

Innovation in Design Theory and Digital Technology
Practice for Water Conservancy and Hydropower Projects

水利水电工程设计理论创新与数字化 技术实践

召坤 主编



International
Union of Scientific and
Technological Scholars
国际科学与技术学者联合会

CIP INFORMATION

Title: Innovation in Design Theory and Digital Technology Practice for Water Conservancy and Hydropower Projects

题目：水利水电工程设计理论创新与数字化技术实践

Author: Kun Zhao

作者：召坤

ISBN: 979-8-90040-176-8

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND
TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**
国际科学与技术学者联合会

**Innovation in Design Theory and Digital Technology Practice for Water
Conservancy and Hydropower Projects**
水利水电工程设计理论创新与数字化技术实践

Address: 100 N Howard St Ste R, Spokane, Wa, 99201. United States

Tel: +888-754-5177

Email: contact@cypedia.net

Format: 170mmx240mm 1/16 Sheets: 16.5

Word Counts: 210.000

Edition: First edition in June 2026

Printing: First printing in June 2026

**CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL
SCHOLARS**

非开放获取·电子版请联络出版社购买·版权归出版社所有·侵权必究

Not Open Access. For the electronic version, please contact the publisher for purchase. The copyright belongs to the publisher.
Infringement will be prosecuted.

编委会

EDITORIAL BOARD

主 编

召 坤 云南秀川水利水电勘察设计有限公司

副主编

闭文德 水发规划设计有限公司云南分公司

夏 曦 云南秀川水利水电勘察设计有限公司

P 前言

REFACE

水利水电工程作为国家水安全、能源安全和生态安全的重要基石，在保障经济社会可持续发展中发挥着不可替代的作用。进入 21 世纪以来，随着全球气候变化加剧、极端水文事件频发、生态环境约束趋紧，以及新一轮科技革命和产业变革的深入推进，传统水利水电工程的设计理念、技术手段与管理模式正面临深刻转型。一方面，工程规模日益宏大、地质条件愈加复杂、安全标准持续提高；另一方面，以 BIM、物联网、人工智能、数字孪生、大数据为代表的新一代信息技术迅猛发展，为工程全生命周期的精细化、智能化、绿色化管理提供了前所未有的技术可能。

在此背景下，如何将前沿设计理论与先进数字技术有机融合，构建面向未来的水利水电工程新范式，已成为行业亟需回应的重大课题。本书正是基于这一时代命题，试图系统回答“理论如何创新”“技术如何落地”“体系如何构建”三大核心问题。

本书的撰写始于对近年来国内外重大水利水电工程实践的深入调研与反思。我们发现，尽管数字化技术在部分项目中已取得初步成效，但整体仍存在“重硬件轻软件、重局部轻系统、重建设轻运维”等短板，理论研究与工程应用之间也存在一定程度的脱节。为此，本书坚持“问题导向、理论引领、技术驱动、实践验证”的编写原则，既注重基础理论的深化与拓展，如复杂水流运动机理、高坝结构安全评价、岩土体本构关系等；又强调数字技术的集成与创新，如 BIM+GIS 协同设计、多源数据融合的健康监测、基于机器学习的安全预警模型等。

全书结构上，第一章至第四章聚焦设计理论的创新突破，涵盖水力学、水工结构、岩土工程等传统优势领域，并融入生态友好、耐久性设计等现代理念；第五章至第八章系统阐述数字化技术在设计、仿真、施工等阶段的应

用体系，突出参数化、协同化、可视化与智能化特征；第九章转向工程运行维护阶段，探索智慧运维的架构与关键技术；第十章则立足长远，展望数字孪生、AI for Engineering、智慧水利等未来发展方向。

本书的特色在于：一是强调“理论—技术—应用”闭环，避免空谈概念；二是注重跨学科交叉，融合水利工程、计算机科学、人工智能、系统工程等多领域知识；三是紧密结合中国国情与工程实际，案例多源于三峡、白鹤滩、南水北调等国家重大工程，具有较强的本土适应性与示范价值。

需要说明的是，水利水电工程的数字化转型是一项复杂的系统工程，涉及标准体系、组织机制、人才结构等多维度变革，远非单一技术所能解决。本书仅从设计理论与技术实践角度切入，力求为行业同仁提供一个可参考的知识框架与技术路线图。

限于作者水平，书中难免存在疏漏及不妥之处，敬请读者批评指正。

作者

C 目录

CONTENTS

第一章 水利水电工程设计理论发展概述	1
第一节 水利水电工程设计理论演进历程	1
第二节 现代水利水电工程设计理念创新	7
第三节 数字化技术在水利水电工程中的应用前景	14
第四节 水利水电工程设计理论发展趋势	20
第二章 水利水电工程水力学基础理论创新	27
第一节 复杂边界条件下水流运动特性研究	27
第二节 新型水工建筑物水力设计理论	33
第三节 水电站水力过渡过程仿真分析	40
第四节 生态友好型水力学设计方法	45
第三章 水工结构设计理论创新	53
第一节 新型水工结构体系研究	53
第二节 高坝结构安全评价理论	58
第三节 地下洞室围岩稳定性分析	63
第四节 水工建筑物耐久性设计理论	69
第四章 岩土工程设计理论创新	75
第一节 复杂地质条件下地基处理技术	75
第二节 边坡稳定性分析新方法	81
第三节 土石坝设计理论创新	87
第四节 岩土工程数值模拟技术	94

第五章 水利水电工程数字化设计基础	101
第一节 BIM 技术在水利水电工程中的应用	101
第二节 三维协同设计平台构建	107
第三节 数字化设计标准体系	113
第四节 参数化设计方法研究	119
第六章 数字化仿真与优化技术	125
第一节 水利水电工程多物理场耦合仿真	125
第二节 结构优化设计理论与方法	130
第三节 施工过程数字化模拟	137
第四节 运行维护数字化管理	143
第七章 智能监测与安全预警技术	149
第一节 智能传感技术应用	149
第二节 结构健康监测系统	155
第三节 安全预警模型构建	161
第四节 大数据分析在工程安全中的应用	167
第八章 数字化施工技术实践	173
第一节 数字化施工管理系统	173
第二节 智能建造技术应用	180
第三节 施工质量数字化控制	186
第四节 施工进度数字化管理	191
第五节 工程示例——白鹤滩水电站设计理论创新与数字化技术实践	197
第九章 智慧运维与管理创新	203
第一节 智慧水库管理系统	203
第二节 水电站智能运维技术	209
第三节 设备状态监测与诊断	215
第四节 运维决策支持系统	222

第十章 水利水电工程数字化发展展望·····	229
第一节 数字孪生技术应用前景·····	229
第二节 人工智能在工程设计中的发展·····	234
第三节 智慧水利建设路径·····	239
第四节 未来水利水电工程数字化发展趋势·····	246
参考文献·····	251

第一章 水利水电工程设计理论发展概述

水利水电工程设计理论的发展史，就是人与自然不断对话、工程技术与科学思想不断融合的历史。它反映的是人类在不同历史时期对于自然规律的认识水平、所掌握的技术手段和社会发展对于工程的根本需求。

第一节 水利水电工程设计理论演进历程

经过几千年的经验积累、不断变革与升华，形成了今天系统化、完善的科学设计理论体系。这既是技术方法的更替更新，又是设计哲学、价值取向的不断变化，是工程设计由朴素的经验主义走向科学化、系统化乃至智能化的新纪元。水利水电工程设计理论的发展过程可以划分成如下三个主要阶段，见表。

表 1-1 水利水电工程设计理论发展阶段特征表

阶段	核心特点	主要方法与理论	局限性与突破
经验主义设计阶段	长期经验积累，师徒传承	因地制宜，经验公式，工程类比	缺乏科学理论基础，保守性强，效率低；经典力学引入带来突破
经典力学理论应用阶段	科学化、量化分析	材料力学、结构力学，水力学、流体动力学，工程地质学	侧重单一结构与目标，忽视系统整体性；计算机技术发展促进变革
系统分析与优化设计阶段	综合性、多目标、全生命周期	系统工程，风险 / 可靠性分析，经济 / 安全权衡	更高数据与计算需求，决策复杂性增加；持续向智能化方向发展

一、经验主义设计阶段

在现代科学理论还没有系统建立起来之前，水利水电工程的设计主要依靠长期的经验积累以及对成功案例的模仿。此阶段的设计思想简洁直接，重视因地制宜、薪火相传，给后世留下宝贵的工程遗产和深刻的设计启示。

（一）基于古代工程实践的总结与传承

古代水利水电工程的建设是先民在长期与洪旱灾害斗争中，经过细致观察和

反复实践积累而成的智慧成果。都江堰、京杭大运河等宏大工程的设计理念不是严密的理论推导出来的，而是在对水文、地理、气候等自然条件深刻理解的基础上巧妙地运用自然规律的结果。这些工程设计者依靠世代相传的经验掌握了“深淘滩、低作堰”等许多宝贵的准则，并用口诀、图示等方式传承下来。传承模式保证技术的连续性，在没有统一理论指导的情况下，也能建造出规模宏大、功能复杂的工程。

根植于实践经验的设计方法，有很强的适应性和超常的创造性。工程师们经过长时间的观察河流泥沙运动、水量季节性变化等现象，总结出许多行之有效的工程布局 and 结构形式。在渠道选线时根据地形，减少土方开挖量，在修建堤坝时就地取材，用土石等天然材料。朴素的生态智慧、因地制宜的思想使古代工程与自然环境和谐共处，历经数百年乃至数千年依然发挥着作用，其中蕴含的内在合理性、生命力至今仍值得我们去研究、去学习。

设计的传承并不只是技术的简单复制，它也包含着对于工程伦理、人水关系的深邃哲学思考。古代工程的建造同区域治理、农业发展、社会稳定密切相关，其设计目的常常具有综合性。这就要求设计者不单要成为技艺高超的工匠，还要成为有宏观视野的管理者。经过工程实践，人们对人与自然的关系有了更深的认识，形成了以趋利避害、天人合一为主的朴素设计哲学，该理念贯穿于每一个工程设计之中，是中华水利文化的重要组成。

（二）经验公式与类比法的广泛应用

在经验主义设计阶段，经验公式和工程类比法是应用最广的两种具体的工程设计方法。经验公式是通过对大量的已建工程观测数据进行统计、归纳而得出的简化计算表达式。它把复杂的物理现象简化成几个关键参数之间的数学关系，给设计提供了一个方便高效的计算工具。虽然这些公式缺少力学基础，而且适用范围受地域、规模等因素的影响，但是它们在一定的工程条件下仍然可以给出较为可靠的结果，大大提高了早期设计工作的效率。

工程类比法是更直观的设计方法。设计新工程时，从自然条件、工程规模、地质状况等各方面去寻找已建成功的工程作为参考。类比可以直接借鉴或者沿用已有的工程结构尺寸、材料选择、施工工艺等。该方法有效地降低了由于未知因素带来的风险，在缺少勘测数据、缺少理论分析手段的时代，成为保证工程成功的重大保障。可以说，每一个成功的古代工程都是后人可以借鉴的“活图谱”，

给后来的工程设计和建设提供了一个宝贵的参照系。

（三）以安全为首要目标的保守设计思想

经验主义时期，由于对水力、土力等作用机理认识不清，加之对自然灾害威力的敬畏，工程安全被放在第一位。由此产生了设计上的保守主义。设计者们宁可采用增大工程体量和用料的方式来换取足够的安全储备，也不愿意冒任何风险。因此古代水利工程如古城墙、古堤防、古石坝等都比较厚实坚固，结构尺寸远远大于现代理论计算所要求的范围。

保守的设计思想在工程建设的各个方面都有体现。用材以耐久性好的石材、优质木材为主。从结构形式来看，多用截面简单的重力式结构，依靠巨大的自重来抵抗水压力、土压力等外荷载。尺寸的确定一般参考历史最大洪水的痕迹，在此基础上留出较大的安全余量。堤防的高度、厚度远远大于常规水位下的要求，目的在于抵御百年一遇甚至千年一遇的极端洪水事件。

不计现代经济成本、追求绝对安全的做法一方面反映了当时生产力水平下人力成本较低，工程失事社会代价巨大；另一方面也体现出设计者对生命财产的高度责任感和重视。虽然极度保守的设计理念在经济性上有所牺牲，但是使许多古代工程历经千年风雨而不倒，创造了工程史上不朽的传奇。

但是保守思想不可避免地会制约结构形式的革新。由于缺少精确的力学分析能力，设计者不敢轻易去尝试拱、壳这些更为轻巧高效的结构形式。设计进步主要是规模扩大、经验积累，而不是结构效率的根本性提高。直到经典力学理论被系统地应用到工程设计当中，这一局面才得以彻底改变，从而推动水利水电工程设计实现了第一次质的飞跃。

二、经典力学理论应用阶段

近代科学蓬勃发展的时候，尤其是牛顿力学体系的建立，为工程设计提供了一种前所未有的理论武器。水利水电工程设计开始从依靠经验的模式中脱离出来，逐渐采用数学、力学等科学的方法来进行计算和分析，从而实现了从“知其然”到“知其所以然”的转变。

（一）材料力学与结构力学的引入

材料力学、结构力学的加入，是水利水电工程设计走向科学化的重大进步。设计师用应力、应变、弹性模量等概念定量地表示了工程材料在受力情况下的力

学行为。通过对杆、梁、板、壳等基本构件进行内力计算，对结构的强度、刚度、稳定性进行校核，把结构安全性判断由模糊的定性分析变为精确的定量分析。这就直接导致了坝体、厂房、闸门等主要结构物设计的革新与优化。

大坝设计时，设计师不再只是依靠经验来增大断面尺寸，而是可以依据水压力分布情况，准确计算坝体各部位的应力状态，从而优化坝体剖面，保证坝体安全又经济。正是在这样的理论指导下，拱坝、大头坝等依靠结构形式传力的轻型坝型被创造出来并发展起来，大大节约了工程材料，在更复杂的地质地形条件下修建高坝成为现实。结构力学理论被广泛应用后，大大解放了工程师的创造力。

（二）水力学与流体动力学理论的奠基

水力学与流体动力学理论的系统化，给水利工程中水流问题的解决打下了坚实的理论基础。这些理论很清楚地显示了水体运动的规律，工程师据此可以预测水流情况，并能就水利工程的结构做出更加科学合理的构造。

1. 恒定总流理论的突破，以伯努利方程、连续性方程、能量方程为代表的恒定总流分析理论，使对渠道、隧洞、压力管道等过流建筑物断面尺寸、水头损失的精确计算成为可能。设计师依靠理论对水力设计加以改进，从而缩减能耗，优化水资源利用水平以及水电站发电效能。

2. 非恒定流分析与模拟，曼宁公式、谢才公式等半经验半理论公式被广泛应用于天然河道、人工渠道等的水流计算中，大大简化了计算过程，给防洪、灌溉、航运等工程设计提供了重要的依据。对非恒定流问题，特征线法等数值计算方法出现以后，洪水波演进、潮汐传播等复杂水力现象才能被准确地模拟出来。

3. 泄水建筑物及水轮机设计革新，这些理论对泄水建筑物的设计起着举足轻重的作用。经过对高速水流掺气、消能、空化等问题的研究，发展出了多种消能工和泄洪洞体型设计方法，保证工程在大流量泄洪下安全运行。流体动力学在水轮机转轮叶片设计中直接决定着水力发电的效率，也是水电技术的关键所在。

（三）工程地质学的初步应用

水利水电工程的成败同地质条件密切相关，工程项目能否成功很大程度上取决于对所在区域地质环境认识的程度。工程地质学出现之后，设计师才开始对工程建设区域的岩土体性质、地质构造、地下水活动以及不良地质现象等问题展开系统的研究，给工程选址、地基处理、边坡稳定等提供可靠的科学依据。通过地质勘察、原位试验和室内试验可以得到岩土体的物理力学参数，为地基承载力计

算、渗流分析和边坡稳定性评价提供基础数据。

工程地质学的应用使得设计不再孤立地考虑上部结构，而把结构物和地质基础看作一个整体。大坝选址时，优先选择基岩完整、透水性小、构造稳定、河段；坝基设计时，根据岩体软硬程度、节理发育情况等采取灌浆、锚固、换填等不同的处理措施，改善工程地质特性，保证地基承载能力、抗滑稳定性满足设计要求。工程地质学的发展，大大减少了由于地质原因造成的工程失事。

三、系统分析与优化设计阶段

伴随着计算机技术迅猛的发展以及系统科学理论日益完善，水利水电工程设计已经进入系统分析与优化设计的新时期。本阶段的设计已经不再仅仅是针对单个建筑物或者单个目标进行研究，而是把整个工程项目看作一个复杂的、多目标的动态系统来加以全面综合的分析优化。

（一）系统工程理论在大型工程中的应用

大型水利水电工程一般承担防洪、发电、航运、供水、生态保护等多种任务，是一项复杂的系统工程，内部各部分之间、系统与外部环境之间存在着错综复杂的相互关系。系统工程理论的引进，给解决这样一种复杂性问题赋予了一种科学的方法论。它强调从整体上出发，综合考虑技术、经济、社会、环境等诸多因素，从而寻找到使系统整体效益最大的方案。工程规划、设计中使用了运筹学、决策分析、模糊数学等系统分析方法。

水库的优化调度设计时，设计师要建立来水过程、下游用水需求、防洪限制水位、发电水头等多变量、多约束的数学模型。利用线性规划、动态规划等优化算法求解出发电效益最大、供水保证率最高或者综合效益最好的调度方案。科学的办法取代了以前单纯依靠经验来制定的简单调度图，可以更好地挖掘出水库的潜在效益。

工程方案比选时，系统工程理论起着十分重要的作用。利用层次分析法、多属性效用理论等建立多目标决策模型，可以对备选方案在技术可靠性、经济指标、环境影响、社会接受度等各方面进行量化的评价并综合排序。使得决策过程更加透明、科学，更好的权衡各种利弊得失，从而选择真正符合可持续发展观念的最优方案，而不是只考虑技术或者经济上的局部最优解。

系统工程思想在工程建设全生命周期管理以及设计中也有所体现。设计阶段

在保证施工便捷性的基础上，还要前瞻性地预见工程未来长期运行过程中可能出现的维修、改建、退役等问题，把整个生命周期的成本效益考虑进去。系统性、着眼于长远的设计理念已经成为现代工程设计的核心精髓，大大提高了大型水利水电工程的综合价值和可持续发展能力。

（二）风险分析与可靠性设计理念的兴起

传统设计方法是确定性的，主要用安全系数来处理不确定性。尽管该方法简单易行，但是不能定量地评价工程的真实安全水平，也不能解释为什么有些安全系数非常高的工程仍然会发生破坏。风险分析、可靠性设计思想的出现，就是工程安全观念的一次重大变革。它承认荷载、材料性能、计算模型等各方面的因素都存在着客观的随机性和不确定性，用概率论和数理统计的方法对这些不确定性进行定量的描述。

在此基础上，设计不再只用“是否安全”来判断，而是用失效概率或者可靠度指标来衡量。通过分析结构或者系统在各种荷载组合下可能出现的极限状态，求出其设计基准期内的失效概率，并保证这个概率低于规范允许的可接受水平。以概率为基础的极限状态设计方法，可以更科学地反映工程实际的安全储备，也可以使不同工程、不同构件之间具有可比较的安全水平。通过失效概率和失效后果的综合风险分析，可以发现系统中的薄弱环节，从而进行有针对性的加强，以更经济高效的方式达到控制整体风险的目的。

（三）经济性与安全性综合权衡

在系统分析的框架下，绝对的安全是不存在的。无限提高安全标准必然导致工程投资无休止地增长，从经济上来说是不可持续的。因此现代设计理念主张经济性和安全性之间要科学合理的权衡。设计的核心任务之一，就是在社会可以接受的风险水平前提下，使工程全生命周期成本最小化。

权衡的过程本身就是复杂的优化决策问题。一方面要建立工程投资和失效概率之间的定量关系，即增加多少投资能够带来多大的安全性提高。另一方面，还需要用经济学的方法来评估工程失效造成的经济损失、人员伤亡、环境破坏等后果的货币化或者非货币化。

将两者结合起来，就会找到一个“最优”的设计点，在这个点上，为了提高安全性而增加的边际投资，正好等于因此减少的预期损失的边际效益。价值工程、全生命周期成本分析等方法给这类权衡提供具体的有效的工具。因此，现代设计

师必须要有更广阔的视野，不仅要掌握工程技术知识，还要了解经济学、社会学、风险管理等各方面的知识，在复杂的多重约束下做出最符合社会整体利益的设计决策。

第二节 现代水利水电工程设计理念创新

随着社会经济发展速度加快，生态文明建设的深入推进，现代水利水电工程设计也发生了深刻的思想变革，从过去单纯的追求工程目标，到现在的追求经济、社会、环境综合效益最大化的新理念，使设计思想和方法论发生了系统性改变。

一、可持续发展设计理念

可持续发展理念已经成为现代工程设计的指导思想。工程的建设应该在经济、社会、环境三个方面寻求平衡，保证工程效益既符合当代人需求又不会影响后代人的利益，从而达到长久延续的目的。

（一）全生命周期成本与环境效益分析

传统工程设计重视建设阶段的投资成本控制，现代可持续发展则用全生命周期成本的角度进行全方位的评价。设计的边界已经从传统的建设阶段扩展到项目的规划、设计、施工、运营、维护、退役、生态修复等整个生命周期。它不但是直接的经济成本，也把长期使用过程中的能源消耗、设备更换、维修保养、废弃处置等费用包含在里面。

在此分析框架下，设计师的选择不再只是最低化初投资。初期投入较大的自动化监测系统或者高耐久性材料，虽然会增加建设成本，但是在几十年的运营期内，因为减少人工巡检费用、降低维修频率、延长工程寿命等原因，会表现出明显的长期经济优势。前瞻性成本核算方式有利于做出经济合理、有远见的决策，防止因为短期节约而造成长期运营成本失控。

全生命周期分析还会将环境效益和社会成本结合起来。采用货币化或者非货币化的方式，将工程建设给生态系统、水资源、气候变化、公众健康等各方面造成的影响纳入评价体系。从而使环境保护不再只是可有可无的附加项，而是内在于项目经济可行性分析的核心变量。综合性评价方法保证水利水电工程决策的科学性、全面性，促使它向着绿色、经济、负责任的方向发展。

（二）绿色建材与清洁能源的整合设计

绿色建材的使用给工程可持续性赋予了物质保证。设计理念由原来的只考虑结构强度、稳定性，转向考虑材料生产、运输、使用、回收全过程的环境负荷。这就要求设计阶段首先要选用本地材料、可再生材料和工业废料再利用材料。例如可以利用工程开挖出的石料作为混凝土骨料；在满足规范的前提下，掺入粉煤灰、矿渣等工业废料来减少水泥用量及其生产过程中的巨大碳排放。同时推广高性能混凝土、玄武岩纤维筋等新材料，可以提高结构的耐久性，减少后续维修的工作量，本身也具有较好的环境性能。

清洁能源整合设计把水利水电工程由单一的水能开发者，转变为区域综合能源系统的主要枢纽和调节器。设计不再只考虑水电站本身的发电功能，而是系统地考虑怎样最大限度地利用项目所在地的自然资源禀赋。在库区广阔的水面上建设漂浮式光伏电站，利用山地地形在项目周边建设风力发电机组，形成水光互补或者水风光互补的多能互补发电模式。整合设计利用水电的快速启停和调节能力，平抑光伏、风电的间歇性、波动性，从而提高整个能源系统的稳定性、电能质量，给电网提供更可靠的绿色电力。抽水蓄能电站的建设可以储存富余的清洁能源，在用电高峰期时释放出来，使能源的时间分配更加合理，为以新能源为主的新型电力系统提供重要支撑。

（三）工程与自然生态系统的和谐共生

现代的水利水电工程设计思想，由以前的以“征服自然、改造自然”为主的工程逻辑向以“尊重自然、顺应自然、保护自然”为主的生态哲学转变。设计出发点不再把工程作为一个孤立的物理实体强行嵌入到环境中，而把它当作自然生态系统的一部分来考虑，努力使两者之间达到良性互动、和谐共生的目的。这就要求工程在布局、形态、规模、运行方式上，都要考虑到适应已有的生态格局。

设计的核心任务之一就是保持河流生态系统的连续性。大坝对河流廊道造成阻隔，设计时必须考虑生态连通。精心设计、建造仿生态鱼道、鱼类升降机等各种类型的鱼道，保证洄游性鱼类的迁徙路线畅通无阻，保证水生生物种群之间的基因交流和繁衍。对河流的水文情势，设计时应该实行生态调度，模拟天然河流的洪水脉冲、基流过程，给下游河道湿地、动植物栖息地提供必要的水文条件，防止河道萎缩、生态功能退化。

和谐共生的思想还体现在工程影响区的生态修复和创造上。利用工程建设形

成的有利地形,根据库区消落带特点,规划人工湿地、水生植物群落、鸟类栖息地,创建新的生物多样性热点区域,弥补工程建设造成的生态功能损失。设计把工程景观同自然山水融合在一起,使大坝、厂房等人工构筑物成为自然景观的有机组成部分,而不是突兀的闯入者。把工程措施和生态措施深度结合的设计思路,即把水利水电工程由潜在的生态干扰源变为区域生态环境的维护者、改善者甚至新的生态价值的创造者。

二、风险管理与韧性设计理念

在全球气候变化加剧、不确定性因素增多的背景下,水利水电工程所面临的风险越来越复杂,风险也越来越巨大。工程设计不能再依靠传统的依靠历史数据的安全系数的方法,而应该转向更加主动、前瞻的风险管理以及韧性提升,保证工程在极端扰动下仍然能够保持关键功能,并且具有快速恢复的能力。

(一) 极端气候与自然灾害的应对策略

全球气候变化造成极端天气事件的发生频率和强度明显增大,历史水文气象数据所符合的平稳性假定已经失效,这对依靠历史数据来进行设计的水利水电工程构成巨大威胁。传统的防洪标准和设计参数已经不能满足未来的极端洪水、持续干旱、强震、滑坡等自然灾害的需要了。因此,现代设计理念必须把应对极端气候和自然灾害作为主要的考虑因素。

对策的重点就是把被动防御转变为积极适应。设计前期要引入气候变化模型,预测未来各种情景下降水、径流等主要水文要素的变化,评价它给工程的安全运行和经济效益带来的影响。根据未来气候情景来评价风险,给动态调整设计标准、预留安全裕度提供科学依据,使工程设计更具有前瞻性、适应性。

在具体的设计实践中,采取了一系列创新应对措施。

1. 提高工程设防标准,以气候模型预测的未来最大洪水成果为依据,复核并适当提高水库防洪标准,提高泄洪设施过流能力,增设非常溢洪道或者采用先进的泄洪设备,保证超标准洪水时大坝安全。

2. 多道防线的建设,在流域范围内,依靠水库群联合调度形成梯级拦截、错峰泄洪的防御体系,防止单个工程承受过大压力。结合非工程措施建立精确的洪水预报预警系统,制订完备的应急预案,使工程措施和非工程措施互相配合,达到最佳的效果。

3. 提高结构抗灾性能,采用先进的结构分析方法和抗震设计理论,改进坝体结构形式,对地质不稳定区域进行主动加固和监测,从源头上降低灾害风险。

综合使用上述的方法,将工程置于更广阔的动态的风险环境中进行审视和设计,从根本上提高工程抵御未来不确定性的自然灾害的能力,保证工程的长期安全和社会福利。

(二) 工程系统的鲁棒性与可恢复性设计

鲁棒性就是系统的坚固性或者强健性,指的是工程系统在内部出现故障或者外部受到干扰的时候,依然可以保持其基本功能和性能稳定的能力。设计时要保证鲁棒性,主要是为了防止出现单点失效造成整个系统崩溃的情况。一般会采用增加冗余设计、提高系统的容错能力等方式来达到目的。在泄洪系统中设置多套独立启闭闸门电源和控制系统;给厂房排水系统配置主备用双动力水泵;预留枢纽交通的备用通道。虽然会增加一部分的初始投资,但是大大提高了系统对于局部损坏或者设备故障时的可靠性,保证核心功能不中断。

可恢复性即工程系统受到破坏之后,能够恢复其功能的程度和时间。这就要求设计不能只考虑怎样抗,还要考虑怎样救。设计时应该考虑模块化、标准化,使得出现故障的部件可以快速地被发现、拆卸、更换。提前做好必要的关键部件储备,制定抢修、恢复计划,明确各种情况下修复的过程及资源调度。设计阶段就要考虑到大型抢修设备进入核心部位的通道及作业空间,使灾后修复工作可以迅速展开。鲁棒性降低系统失效的概率,可恢复性缩短系统失效后的影响时间,两者结合,共同构成工程韧性,保证工程在极端事件冲击下“打不垮、能恢复”。

(三) 基于性能的多级设防标准

基于性能的设计是风险管理理念在工程设计领域的具体体现,是从原来的遵照规范向达成目的的重大转变。传统的规定性设计方法,主要是通过满足一系列固定的安全系数和构造要求来保证安全,但是对结构在不同灾害水平下的具体表现没有明确的描述。基于性能的设计相反,它先确定工程在各种强度灾害作用下应该达到的性能目标,再通过分析、设计工程,选择合适的结构体系和参数来满足这些性能目标。

其核心就是“多级设防”,即给工程设定不同的性能水平,与不同的重现期或者强度的灾害等级相对应。其具体标准见下表。

表 1-2 基于性能的多级设防标准

灾害强度	重现期示例	工程表现 / 损伤	功能目标
常遇小强度灾害	10 年一遇洪水	保持弹性状态，无损坏	功能完全正常，保障正常运营
设防烈度中强度灾害	100 年一遇洪水 / 基本烈度地震	轻微、可修复的非结构性损坏，主体结构基本完好	核心功能维持或迅速恢复
罕遇极强强度灾害	校核洪水 / 罕遇地震	较严重、需较大投入修复的损坏	结构不倒塌，有效保护生命安全，避免次生灾害

从上表可知，在常遇的、较小强度灾害（10 年一遇洪水）的作用下，工程结构应保持弹性状态，功能完全正常，不发生任何损坏，保证正常运营；在设防烈度的、中等强度灾害（100 年一遇洪水或基本烈度地震）作用下，允许结构出现轻微、可修复的非结构性损坏，但主体结构应基本完好，核心功能得以维持或能迅速恢复；在罕遇的、极强强度灾害（校核洪水或罕遇地震）作用下，允许结构出现较严重的、需要较大投入才能修复的损坏，但必须保证结构不倒塌，能有效保护生命安全，避免引发次生灾害。

确定多个明确的性能目标，使设计师有目标的对结构进行优化、合理分配资源，把资源用在最重要的性能上。在抗震设计中，可对重要的坝段或厂房结构进行性能化设计，保证强震下大震不倒，对次要的附属建筑物则可采用较低的性能要求。精细化的设计方法使工程抗风险能力更加明确、透明，实现了安全性和经济性最佳的平衡，也是提高工程韧性的一种重要的技术途径。

三、人水和谐的设计理念

水利水电工程不但是改造自然的物理实体，而且是影响区域社会生态的复合系统。人水和谐的设计理念要求设计回到以人为本的价值原点，充分考虑人的幸福、文化需求、情感体验，促进工程、人、自然三者和谐共生、共同发展。

（一）河流生态系统健康评估与保护

河流是地球的血脉，河流健康的好坏直接影响到整个流域的生态安全和人类的福祉。现代水利水电工程设计明确地认为，工程价值的实现不能以牺牲河流健康为代价。因此，在项目规划和设计的最前端就要引入河流生态系统健康评估，把其作为工程可行性论证和方案比选的基础性工作。评价是一个综合性的科学诊断过程，并不是单方面考察水质、水文指标，而是以系统整体为出发点，对河流

的物理、化学、生物特性进行全面的考察。

评价内容一般包括水文情势的完整性，即流量、流速、水位等随时间变化的自然节律；水体的理化指标，如水温、溶解氧、营养盐浓度等；水生生物群落状况，即鱼类、底栖动物、水生植物的种类、数量、群落结构，用生物完整性指数等量化评价；河岸带植被状况和物理栖息地连通性、多样性。经过这样系统的“体检”之后，就能准确找到河流目前存在的主要生态问题，并预测出工程建设可能会产生的潜在影响。

根据详细的健康评价结果，保护修复措施才能准确地嵌入到工程设计里。评价中指出关键鱼类洄游通道是河流健康的重要因素，鱼道就成为工程不可缺少的一部分。如果下游河口的生态系统高度依赖洪水脉冲，那么水库的生态调度方案就必须模拟自然水文过程。设计中应包含最小生态流量保障、增殖放流站建设、珍稀水生生物栖息地异地迁建或者就地保护等主动性措施。先诊断、后设计的流程，保证工程建设从一开始就以维护和改善河流生态系统健康为出发点，真正践行了人水和谐的理念。

（二）水库移民与区域社会经济发展的协调

水库移民属于大型水利水电工程所牵涉范围最广、影响最深远的社会问题之一。传统设计理念一般把移民安置当作工程建设的附属工作，以事后补偿、简单安置为主。现代人水和谐理念把移民问题提升到战略高度，视其为与工程设计同等重要的核心环节，追求移民安置与区域社会经济发展深度协调，目标是使移民群众的生活水平和发展机会得到切实改善，实现“搬得出、稳得住、能致富”的愿景。

该理念转变要求工程设计之初就开展深入的社会影响评价，尊重移民的意愿，让公众参与到决策当中来。安置规划不再是简单的政府包办，而是在与移民群众反复沟通协商之后制订出来的符合当地文化习惯、发展需求的多元化安置方案，例如集中安置、分散安置、生产安置、就业安置等模式的有机结合。安置点的选择要考虑地质安全、交通便利等硬件条件，也要考虑资源承载能力、长远发展潜力，保证移民迁入后有稳定的生计来源。

设计的主要内容就是发展型移民模式的建立。即工程设计要和区域发展规划相衔接，将移民安置区打造成为新的经济增长点。以水库形成为基础，规划发展水产养殖、库区旅游、生态农业等特色产业，对移民进行相应的技能培训和创业

扶持。健全后期的扶持机制和库区基金，使移民能长久分享工程带来的发展红利。重视移民的社会融合和文化适应问题，在安置区建设完整的教育、医疗、文化等公共服务设施，使移民重新建立社会关系网，保持并传承民族文化。

经过这样系统性、前瞻性的协调设计，水利水电工程不再只是发电或者防洪的设施，它更成为了推动区域社会结构优化、促进城乡统筹发展、实现共同富裕的重要引擎。将工程建设同社会责任、民生改善结合起来的设计思想，就是“人水和谐”理念最深刻的体现，使工程建设成果真正惠及最广大人民群众，实现经济效益和社会效益的统一。

（三）水文化与景观价值的融入

水利水电工程是人类智慧与自然力量相互作用的伟大建筑，本身就有丰富的文化美学价值。人水和谐设计理念认为不能仅仅停留在功能主义上，而应该把工程实体当作地域文化、自然景观的载体，通过精心的设计，使其成为有地标性意义的文化景观和公共空间，提高公众的认同感和自豪感。

设计时要重视挖掘和传承项目所在地水文化内涵。一条河流会孕育出特有的历史传说、民俗风情和灌溉文明。设计师把文化元素探究在建筑的造型、颜色、装饰细节当中。坝顶栏杆可以设计成具有地方特色的图腾样式，厂房立面可以采用能体现当地传统建筑风格的材料和线条。在工程区域设立专题博物馆或者文化展示长廊，用图文、模型、多媒体等手段来叙述河流的故事，工程建设的历史，人水和谐共存的观念，把工程打造成科普教育和文化传承的主要场所。因此冰冷的混凝土建筑也便带上了温度和灵魂，同地方文脉息息相关。

工程的景观价值也被充分发掘并加以创造。设计不再把工程同周围环境割裂开来，而追求一种“虽由人作，宛自天开”的境界。经过对坝址、厂房位置的精心选择，利用周边的地形，使宏伟的工程结构与壮丽的自然山水相辅相成、交相辉映，形成一幅和谐统一、气势恢宏的自然与人工景观画卷。在库区周边规划亲水平台、观景台、滨水步道、生态公园等，给公众提供休闲、游憩、体验自然的开放空间。水库自身形成的开阔水面、美丽的岸线，给水上运动、生态旅游等活动的开展创造了条件。工程功能、文化内涵、景观美学三者相融合的设计，使水利水电工程的整体价值得到提高，把水利水电工程从单一的生产设施变成了促进地方经济、丰富民众生活、提高环境品质的复合型公共产品。

第三节 数字化技术在水利水电工程中的应用前景

一、数字化转型的驱动力分析

水利水电工程数字化转型不是简单的技术叠加，是技术革新、管理需要、国家战略等各方面因素共同作用的结果。驱动力互相交织、互相促进，形成行业走向数字化、智能化的强大动力，给传统水利水电工程现代化发展注入新的活力。

（一）新一代信息技术的融合发展

新一代信息技术迅猛发展并且深度融入，是促使水利水电工程完成数字化转型的关键技术驱动力。物联网、大数据、人工智能、云计算、建筑信息模型、数字孪生等前沿技术不是孤立的技术点，而是互相渗透、互相促进形成的技术集群。由此形成贯穿工程全生命周期的数字世界镜像，可以对物理工程实体进行全方位的感知、精准的分析、智能的预测、优化的控制。

物联网技术是依靠在工程现场设置的各种传感器，对大坝变形、水文气象、设备状况等主要参数实施实时的采集和传递，给工程赋予了无处不在的“神经网络”。云计算给大量的工程数据的存储、计算、共享赋予了弹性且可扩展的算力。大数据技术可以对各种数据进行清理、整合、分析，从中找到潜在的规律和联系。在此基础上，经过深度学习以及模型训练的人工智能算法，使工程系统具有了和人类一样的认识、决策能力。建筑信息模型和数字孪生技术是这些技术的集大成者，把物理工程的几何信息、物理属性、运行规则等集成到一个统一的数字化模型里，为各种仿真分析、方案比选、智能运维提供了一个高保真的虚拟试验平台。技术融合发展用以往没有过的深度和广度，改变着水利水电工程的建造方式以及价值创造方式。

（二）工程建设精细化管理的迫切需求

水利水电工程具有投资大、建设周期长、地质条件复杂、生态环境敏感、安全风险高等固有的特点，给工程管理提出了很高的要求。传统的管理模式大多依靠经验做决策，信息分阶段、分专业传递，造成严重的信息孤岛、数据壁垒和协同障碍。这些问题造成设计变更频繁、施工返工率高、资源浪费严重、安全隐患排查不及时等一系列问题，已经不能满足现代化工程对质量、安全、成本、进度精细化管理的要求。

数字化转型是解决这些管理问题的办法。创建统一的数字化协同平台，可以打通规划、设计、采购、施工、运维各个环节的数据链条，使信息得以实时共享、

高效流转。基于建筑信息模型的三维可视化设计在施工前可以进行碰撞检测、施工模拟，把问题解决在图纸阶段。智慧工地系统利用物联网、视频监控、人工智能识别技术对施工现场的人员、机械、材料和环境进行全方位、智能化的监测和管理，大大提高了施工的安全性和效率。运维阶段用数字孪生进行健康监测和预测性维护，可以提前发现设备故障和结构风险，把传统的“事后维修”转变为“事前干预”。从粗放式管理走向精细化、智慧化管理，是行业内在发展之必然，也是数字化技术广泛运用之因。

（三）国家数字经济战略的政策引导

国家层面的顶层设计和战略部署，给水利水电工程数字化转型提供强大的政策保障以及宏观环境支撑。近几年来，中国大力推进“数字中国”、“网络强国”建设，把数字经济提升到国家战略高度，积极布局以 5G、大数据中心、人工智能等为代表的“新基建”。宏观战略推行以后，给各个行业的数字化转型营造良好的政策环境，也奠定了坚实的基础。

水利行业的“智慧水利”建设已经纳入国家发展规划，成为推动新阶段水利高质量发展的重要途径。水利部以及相关部门陆续发布的指导意见、行动计划中都提出了要加快数字孪生流域、数字孪生水网、数字孪生工程等建设，推动水利业务全流程的数字化。这既给行业发展指明了方向，又用专项资金、试点示范等形式来激励、引导各个工程单位、设计院所、技术企业加大数字化技术开发应用的力度。政策的强力引导，就如催化剂一般，使行业共识形成的速度大大加快，数字化实践落地的速度也加快，水利水电工程的数字化转型由企业的自发探索，变成全行业共同推进的战略行动。

二、数字化技术的应用领域

数字化技术对于水利水电工程的影响已经达到前所未有的程度，它不是单一技术的引入，而是一种全新的体系模式。流域规划到设备运维，数字化正在全方位地改变工程实践的面貌，开启数据驱动、智能决策的新时代。

（一）从规划设计到施工运维的全链条渗透

数字化技术最核心的价值之一，就是打破传统工程建设各个阶段之间的壁垒，把各个阶段的信息集成起来，形成一条贯穿全生命周期的“数字主线”。全链条渗透正在给工程组织、施工方式带来深刻的变革。

1. 在规划设计阶段,用地理信息系统、遥感技术、大数据分析等手段可以对流域的水文、地质、生态环境等进行宏观评价,为工程选址和布局提供科学依据。三维协同设计平台、建筑信息模型技术使各专业设计师在同一个模型上进行设计工作,提高了设计质量与效率,参数化设计、虚拟现实技术也使设计方案的展示、评审更加直观。

2. 施工建造阶段智慧工地管理平台成为现场管控的中枢。无人机倾斜摄影获取的地形地貌信息同建筑信息模型结合,可以实现土方开挖、填筑的准确计算和动态监控。塔吊、拌合站等重要的设备安装传感器和控制器,进行远程监控与自动控制。施工人员佩戴智能安全帽之后,就可以得到位置和状况等数据信息,从而避免事故发生。移动终端质量巡检验收系统可以对工程质量数据进行实时记录,并且可以实现数据的追溯。

3. 运行维护阶段数字孪生模型成了工程运维的智慧大脑。可以实时接收物理工程监测数据,也可以模拟工程运行状态。运维人员可以利用该虚拟模型做应急预案推演、设备故障诊断、大坝安全状态评价。结合机器人、无人机等智能巡检设备,可以替代人工进行高危重复的巡检工作,大幅提高运维效率和安全性。

(二) 多源异构数据的融合与深度挖掘

水利水电工程全生命周期内产生的数据量大、来源多、种类繁杂。勘测设计阶段的计算机辅助设计图纸、地质勘探报告,施工阶段的进度日志、材料报表、影像资料,运行阶段的传感器监测数据、水情信息、设备工况数据等都属于这些数据。结构各异(结构化、半结构化、非结构化),标准不一,分散存储于不同的系统中,形成了典型的多源异构数据环境。数字化技术的主要作用就是将数据有效地融合起来,并对数据进行深层次的挖掘,把隐藏在数据背后的有用信息转化为促进业务发展的生产力。

数据融合首先要创建统一的数据标准以及数据治理体系。在此基础上,建立工程数据中心或者数据湖,把分散的数据集中起来。用数据集成、提取、转换、加载等技术对原始数据进行清洗、转换、关联,从而得到高质量、可分析的数据资源池。数据的深度挖掘是在数据融合的基础上,用统计学、机器学习、深度学习等先进的算法去发现数据背后隐藏的模式、趋势、知识。通过对大坝长时间的变形监测数据同库水位、温度等环境因素展开关联分析,能够创建起大坝安全行为的预估模型,从而达成由“定时检测”到“实时预警”的转变。挖掘历史洪水

资料和气象数据，可以改善水库的防洪调度方案，在保证安全的基础上提高水资源利用率。从数据到信息，从信息到知识，再从知识到智慧的转化过程，就是提高工程智能化水平的关键所在。

（三）复杂工程问题的智能决策支持

水利水电工程所遇到的诸多问题，大多存在着高度复杂性与不确定性，在处理这些问题时，必须要在不同的目标之间做出取舍。梯级水库群联合调度要在防洪、发电、航运、供水、生态等多目标之间寻求最优解，大型地下洞室群开挖支护方案要保证围岩稳定，还要考虑施工进度和经济成本。传统的决策方法主要依靠专家经验以及简化的计算模型，不能很好地考虑各种复杂的因素，所以决策结果的科学性、最优性往往不尽如人意。

数字化技术，尤其是人工智能，给解决复杂的工程问题赋予了新的手段和办法。智能决策支持系统应运而生，把多学科机理模型、数据驱动模型、专家知识库融合在一起，形成可以模拟复杂工程系统行为的“数字大脑”。系统可以依靠强大的计算能力，在遇到决策问题的时候，快速地产生并评估成千上万种可能的方案。

以突发性流域暴雨洪水为例，智能决策系统可以在秒级内综合分析实时雨情、水情、工情，利用洪水演进模型和优化算法自动给出上游水库群闸门开启方案，给决策者提供不同风险偏好下的调度建议。在工程设计的优化过程中，生成式设计算法依据设计师提出的要求、性能限制、材料特性等，可以产生出几百种创新结构供设计师选择并加以改进。人机协同的决策模式把人的智慧同机器强大的计算能力融合起来，大幅度提升了工程问题决策的科学性、时效性、准确性，促使工程项目朝着更智能化方向发展。

表 1-3 水利水电工程数字化转型应用示例

应用领域	关键技术	核心价值	示例场景
规划设计	地理信息系统、建筑信息模型、虚拟现实、大数据	宏观评价、协同设计、直观评审	流域选址评估、三维协同设计、方案可视化展示
施工建造	物联网、人工智能、无人机、智慧工地平台	精确控制、实时监控、安全管理	土方动态监控、设备远程控制、人员智能安全帽
运行维护	数字孪生、机器人、大数据、预测性维护	状态感知、智能诊断、预警推演	大坝健康监测、设备故障预测、应急预案模拟
决策支持	人工智能、优化算法、智能决策支持系统	多目标权衡、科学决策、方案优选	水库群智能调度、工程设计生成、防洪预警决策

从上表可以看出，数字化技术已经深入到水利水电工程的各个环节当中，用先进的技术手段大大提高了工程管理的智能化程度和决策的科学性。

三、面临的挑战与机遇

尽管数字化技术给水利水电工程的发展指明了令人鼓舞的前景，但是要达到这一前景的道路并不是平坦的。行业迎接数字化浪潮的时候，既要正视现实里的一系列困难，也要发现并把握住里面蕴藏的巨大的发展机遇。机遇和挑战并存，行业处在转型时期的时候成为主旋律。

（一）技术标准与规范的滞后性

数字化技术以史无前例的速度更新迭代，但是与它相配套的行业技术标准和规范建设却很落后，这是制约数字化技术深入应用和规模化推广的主要障碍。虽然在建筑信息模型的应用上已经有了一些国家和地方的标准，但是工程全生命周期内统一精细的模型交付标准、信息分类编码标准、数据交换标准还很缺乏。数字孪生、物联网、大数据等新兴技术领域的相关标准还处在开始阶段。由于缺少统一标准，造成各个软件平台、各个项目主体之间数据不能相互沟通，形成新的“数字孤岛”，影响数据集成的价值。

缺少统一标准给数字化成果的质量监管、合同计价、知识产权保护带来了困难。设计单位提供的建筑信息模型深度怎样定义？施工单位采集的物联网数据质量又该如何评价呢？这些问题都没有明确的依据。但是滞后性挑战反过来也带来了巨大的机会。它要求行业的管理者、研究机构以及龙头企业要加快建设符合我国国情，又能与国际接轨的水利水电工程数字化标准体系。能在标准的制定上占据主导地位，未来市场的话语权就多一分。标准化工作开展的过程本身就具有凝聚全行业的共识、推动技术成熟、规范市场秩序的功能。

（二）复合型人才培养的紧迫性

数字化转型最终还是人的转型。水利水电工程数字化发展急需掌握水工、水文、地质等传统知识，又会计算机科学、数据分析、人工智能等新一代信息技术的高级复合型人才。他们既要了解物理规律又要有足够的了解又能创建并应用工程的数字模型，能够识读图纸且能编写代码，重视经验的同时更会重视数据。

目前行业人才结构性短缺的问题非常严重。传统水利水电工程人员没有受到数字化能力系统的培训，而信息科技领域中的专业人才对于复杂的工程应用又缺

少相应的认知。现有的高等教育体系以及企业内部培训机制，对于培养跨学科复合型人才来说还存在心有余而力不足的情况。人才短缺造成先进的数字化理念、工具不能够在工程实践中得到充分的运用，不能发挥其应有的作用。这就暴露出人才培养模式改革的迫切性。它要求高校冲破院系壁垒，设置交叉学科课程，创建校企联合培养基地。工程企业要创建终身学习体系，促进员工在职学习、技能更新。对从业者自身来说，这也是一种提升个人价值的良机，主动适应变革、学习新技术的工程师将会成为未来行业中的主要竞争者。

（三）跨行业协同创新的巨大潜力

水利水电工程的数字化转型不是某个行业可以独立完成的闭门造车。其天然就具有跨界融合的属性，深入发展必然要同信息技术、高端制造、通信、金融等各行业进行深度协同创新。高精度传感器的研发需要电子制造业的配合，海量数据的云端存储和分析要依靠专业的云计算服务商，工地现场的 5G 网络覆盖需要电信运营商的支持，工程数字资产的价值评估和融资牵涉到金融、保险行业。

目前跨行业的合作机制还很不完善，各行业之间仍有行业壁垒、信息交流不畅、合作形式有待于研究。这既是挑战，又是巨大的创新空间。通过创建开放的创新平台、产业联盟或者联合实验室，可以有效地整合各个领域内不同的优势资源，实现技术、人才、资本等各方面的优势互补。信息技术企业根据水利行业的特性提出更加专业的解决方案，水利行业复杂的应用场景又反过来促进信息技术的发展。协同创新一方面能够加快数字化技术在水利水电工程中应用的落地，另一方面也能催生新的商业模式和服务业态，如以数字孪生为基础的工程全生命周期咨询服务、以大数据为基础的流域水资源优化配置服务等。拥抱开放、推进跨行业协同，是释放数字化转型全部潜能、实现行业整体跃升的关键所在。

第四节 水利水电工程设计理论发展趋势

伴随着科技迅猛发展和社会需求的不断变化,水利水电工程设计理论也正发生着深刻的变化。传统的、依靠经验为主的、用简化模型为主的理论体系正在向综合、精细、智能的方向发展。新的理论、新的方法、新的工具层出不穷,正在重新塑造现代水利水电工程的设计范式和技术内涵。

一、多学科交叉融合趋势

水利水电工程具有复杂性,因此它的设计理论不能局限于一个学科。未来发展必然会形成多个学科知识体系的交叉融合,借鉴其它领域先进理论和技术,解决传统方法无法解决的复杂工程问题,进而使设计理论得到跨越式的发展。

(一) 水利与环境、信息、材料学科的深度交叉

现代水利水电工程设计理念已经由原来的只注重工程的功能目标,转变为把工程效益和生态保护结合起来,实现可持续发展。水利工程设计理论和环境科学相互交融,产生出生态水力学、环境水力学等新的分支。设计时不再只考虑水流的力学特性,而是把水生生物栖息地需求、水体自净能力、河流生态系统完整性等生态环境指标作为重要的约束条件加以考虑。在坝体设计中采用生态廊道、分层取水等方式,目的是减少对水生生态系统的破坏;在渠道设计中使用仿自然形态的生态护岸,给动植物提供生存空间,这些都是学科交叉在工程实践中的具体表现。

信息技术加入到设计理论当中来,造成了一系列的设计工具与设计方法发生革命性的变革。地理信息系统给工程选址、淹没区分析赋予了宏观的空间决策支撑,遥感技术完成了对流域水文、地质灾害等信息的动态、大范围监测,给设计输入赋予了前所未有的数据根基,建筑信息模型技术渗入到工程设计的全部流程当中,促使工程设计由二维图纸迈向三维协同设计,设计效率和品质得到明显提升。交叉融合使设计理论由原来的静态、孤立的分析转变为动态的、系统的、可视化的综合研判。

材料科学的发展给水利水电工程设计理论增添了新的生机。新型高强、高耐久性混凝土材料出现以后,超高拱坝、大跨度渡槽等复杂结构的设计才变得可行,也推动了相关结构分析理论的发展。智能材料,内嵌光纤传感器的混凝土,可以实现结构健康状态的自感知,从而推动了以结构全生命周期性能为基础的设计理

论的发展。土工合成材料、环保型修复材料在堤防、渠道、边坡等工程中的大量应用也大大丰富和发展了岩土工程、水工结构的设计理论以及计算方法。

（二）基于大数据的工程规律发现与理论创新

传统水利水电工程设计理论的形成，很大程度上依靠有限的物理模型试验和原型观测数据，再通过统计回归等方法总结出经验或者半经验公式。该模式在数据稀疏时代是必要的，有效的，但是它的适用范围和精度存在局限性。物联网、传感器网络、卫星遥感技术普及之后，工程领域产生了前所未有的大量数据，涵盖水文、气象、地质、结构响应、运行工况等各个方面。为工程设计理论的数据驱动视角重新审视和改进打下了基础。

根据大数据的工程规律发现，主要是用数据挖掘、机器学习等技术，从高维、复杂、非线性的数据中找出隐藏的关联模式以及物理规律。例如对水库大坝安全监测数据做长时间段内分析，可以发现变形和水位、温度、时间等有关的深层次的关系，进而改进目前预测坝体变形的理论模型。对大量的流域降雨径流历史数据进行深度学习分析，可以建立比传统水文模型精度更高的洪水预报模型，给防洪工程设计标准的确定提供更可靠的依据。数据驱动模式不但可以发现传统理论没有发现的机理，也可以对已知机理中复杂的非线性效应进行量化，进而促进理论的创新与突破。

（三）人工智能驱动的智能设计理论发展

以深度学习、强化学习、知识图谱为代表的新的智能设计理论，正在从根本上改变设计师的角色以及设计过程，产生新的智能设计理论。它既是高效的计算工具，又是可以模拟、延伸或者超越人类设计智能的一种新的范式。人工智能驱动的设计理论，核心就是把人类的经验知识同机器强大的计算和学习能力结合起来，从而达到设计方案自动寻优、智能生成的目的。

在这一趋势下，智能设计理论的发展体现在多个层面：

1. 参数化和生成式设计，用参数化的几何模型和性能分析模型，借助人工智能算法（遗传算法、粒子群优化算法等）在设计空间中快速找到满足多目标（安全、经济、环保等）的最优解集，给决策者提供一系列高质量的“帕累托前沿”方案。生成式设计可以按照给定的约束条件，自主探索并产生出超越传统经验的创新结构形态，比如水电站厂房的最优结构布局、水泵叶片的最优水力学形态等。

2. 设计知识显性化、智能化应用，使用知识图谱技术将设计规范、标准图集、

优秀工程案例、专家经验等隐性知识转为结构化的知识网络。设计师在进行设计的时候,智能系统可以依照目前的设计环境,主动给予相关知识、发出预警、提议合适的设计参数,实现由“人找知识”到“知识找人”的转变,从而大幅度提高设计的科学性和规范性。

3. 基于强化学习和运行控制一体化设计,对水库调度、梯级电站群联合运行等复杂的决策问题,采用强化学习理论让智能体在仿真环境与之交互的过程中,自主寻找出最优调度策略。此种方法把设计阶段设定的方案同运行阶段动态调节结合起来,设计成果中就包含了应对未来不确定性的智慧运行逻辑,是设计理论向更高层次的智能决策理论发展的表现。

二、精细化与量化趋势

伴随着计算能力的指数级增长以及观测技术越来越精确,水利水电工程设计理论也向精细化、量化方向发展。该趋势的目的在于更加准确地描述物理过程,更全面的考虑不确定因素,使工程设计由宏观定性判断向微观定量分析转变,从而使工程设计更加科学、可靠、经济。

(一) 从宏观到微观的多尺度模拟分析

水利水电工程中出现的物理现象大多具有明显的多尺度性。混凝土坝开裂过程既与坝体宏观应力分布有关,又与混凝土内骨料、砂浆界面微观力学行为有关。传统设计理论一般用宏观均质化的方法简化处理,但是不能准确反映破坏的内在机理。多尺度模拟分析理论的发展就是为了克服这些不足,希望建立不同空间、时间尺度耦合的模型来更好地反映工程问题。

在岩土工程中将离散元法(模拟土体颗粒之间的微观作用力)和有限元法(分析土体宏观连续变形)结合起来,可更准确地预测出在地震、渗流等复杂荷载作用下土石坝的变形及破坏。水力学当中,把计算流体动力学的宏观湍流模型同分子动力学、格子玻尔兹曼方法的微观流体模型融合起来,可以细致探究高速水流过程中空化、掺气等复杂水力学现象的机理。从宏观到微观的分析方法使设计理论不再仅仅是对于现象的宏观描述,而是建立在对物质微观结构和物理过程内在机理深刻认识的基础之上,因此可以更准确的预测工程结构的性能和寿命。

(二) 不确定性理论的深化应用

水利水电工程设计一直面对着水文地质参数天然变异性、荷载(洪水、地震)

随机性、计算模型自身简化误差和施工质量的离散性等各种不确定性。传统的设计中采用的是安全系数法来粗略考虑不确定性的影响，这种方法虽然简单，但是不能定量地评价工程的可靠度，有时会过于保守造成浪费，有时又会低估风险。不确定性理论的深化应用，就是把不确定的因素定量化地描述出来，系统分析不确定因素对工程性能的影响。

其核心就是促使设计范式由传统的确定性设计转变为概率可靠度设计。采用概率论、随机过程理论、模糊数学等方法，把设计参数当作随机变量或者模糊集，而不是固定的确定值。边坡稳定性设计不再只计算单一的安全系数值，而是用蒙特卡洛模拟或者一次二阶矩法，计算边坡在设计基准期内的“失稳概率”。

因此设计理念发生改变。从而使得设计师可以清楚地看到工程在不同风险水平下的表现，在此基础上做出更加理性的决策。根据工程的重要性、失事后果的严重程度来确定一个可以接受的风险水平（失稳概率小于十万分之一），然后反推出满足该风险水平的结构设计参数。

不确定性理论促进了风险分析和管理的理论的演进。建立综合风险模型来包含所有的不确定性因素，可以找到影响工程安全的主要风险因素，从而制定相应的勘察、设计或者施工控制措施，用最低的成本实现风险的有效控制。设计理论从原来的只关注结构是否安全，上升为关注结构有多安全以及怎样以最好的方式保证安全。

（三）高性能计算赋能的超精细化仿真

对多尺度分析、复杂不确定性量化的准确度要求很高，对计算能力的要求也就很高。高性能计算技术的发展，给这些理论在工程上的应用打下了有力的基础。工程师利用超级计算机或者大规模并行计算集群，可以创建、求解前所未有的高精度、大规模、高复杂度的数值模型，对工程行为进行超精细的仿真。

超精细化的仿真使得过去只能通过简化分析或物理模型试验解决的难题，现在可以通过数值模拟得到精确的答案。对包含几千公里河网的整个流域进行米级分辨率的二维洪水演进模拟，准确地预测出洪水淹没的范围和水深分布，给防洪规划、堤防设计提供精确的依据。从结构设计的角度来讲，可以对大型地下洞室群开挖过程进行上亿单元的精细化三维应力分析，准确地找到围岩稳定状态和支护结构的最优解。大大提高了设计的预见性以及优化水平，也为验证和发展新的设计理论提供了一个“数值实验室”。

表 1-4 高性能计算在水利水电工程中的应用场景

应用领域	具体作用	典型模拟对象 / 内容
水文与水力学	洪水演进预测、水流动力学分析	整个流域米级分辨率洪水演进、复杂水体污染物输移、泄洪消能结构水力特性
岩土工程	地质灾害风险评估、结构稳定性分析	大型边坡稳定性、土石坝地震响应、地下洞室群围岩变形
结构工程	复杂结构应力分析、疲劳寿命预测	超高拱坝受力、水电厂房结构振动、闸门启闭动态行为
生态环境	生态水力学模拟、环境影响评估	鱼类过坝通道水力条件、河流生态系统水温分层、污染物扩散
智能调度	优化水库群调度策略、风险管理	多目标水库优化调度、梯级水电站群联合运行、突发事件应急推演

根据上表可以得出高性能计算已经成为推动水利水电工程设计理论及实践发展的强大推力，使工程师以前所未有的精确度去研究工程系统的复杂行为。

三、智能化与智慧化趋势

在数字化大潮之下，水利水电工程设计理论正走向智能化、智慧化。该趋势的核心特征就是让工程系统具备感知、分析、决策、执行的能力，把设计、施工、运维等各个阶段紧密联系起来，形成一个具有自学习、自适应、自优化能力的智慧生命体。

（一）设计－施工－运维一体化数字孪生

数字孪生理论给工程全生命周期智慧化管理赋予了核心技术架构。它不但是工程的三维可视化模型，也是和物理实体同步更新、相互影响的动态虚拟副本。设计阶段用数字孪生模型把地质、水文、结构、设备等各方面的数据集成在一个虚拟环境中，模拟、碰撞检测、性能仿真等方式来实现设计的协同和优化。

工程进入施工阶段以后，数字孪生模型与现场施工进度、质量检测数据、物料信息等实现实时关联，进而达到对施工过程精细化管理、虚拟建造的目的。任何设计以外发生的变化都能被及时发现并予以纠正。工程进入运维阶段后，物理工程上安装的各种传感器（如应变计、渗压计、摄像头）就会不断地把数据传到数字孪生模型里。

模型利用这些数据自我更新、校准，从而可以反映物理工程真实的健康状况。管理者利用高保真的孪生体做各种极端工况的模拟推演（洪峰洪水、地震），对

工程的安全性及响应进行评估,进而制定科学的应急预案。对历史数据加以分析,模型就可以预估结构性能退化的大致走向,从而给维修养护赋予前瞻性的指引。如此一来设计与施工和运维数据之间的循环被打破了,从而也使得传统工程各个阶段信息孤岛壁垒被完全打破。

(二) 具备自学习能力的智能优化设计

传统的优化设计一般是采用事先确定好的优化算法和固定的目标函数,其智能程度不高。未来的发展方向就是创建具有自学习能力的智能设计系统。该系统可以像人一样,从大量的历史工程数据、设计经验中学习,从而不断提高自身的优化设计能力。这一理论的主要内容就是将机器学习、知识工程、优化算法三者融合,创造出可以自我进化、创新的设计引擎。

系统对大量的成功和失败的工程案例数据库进行分析,从中学习、总结出隐含的设计准则以及优秀的工程设计模式。当遇到新的设计任务的时候,系统不会从零开始无目的地搜索,而是利用已经学到的知识,快速地产生出若干个高质量的初始方案。优化迭代的时候,系统会评判方案的性能,也会把所有的改良途径以及决策逻辑记载下来。系统利用强化学习等手段,在每次设计成功或失败之后,根据其成败得失来调节自身的优化策略,从而使得在以后的设计任务中更加“聪明”、“高效”。自学习能力使设计系统可以适应不断变化的设计环境和约束条件,在学习过程中甚至会创造出一些人类设计师想不到的创新解法,把设计理论从工具运用提升到伙伴共创的境界。

(三) 工程全生命周期的智慧化管控

工程全生命周期智慧化管控是水利水电工程设计理论发展的最终目标,它把多学科交叉、精细化仿真、数字孪生等多种先进理论和技术融合在一起,形成一个高智慧、高协同性、绿色可持续发展的新型智慧水利体系。在此理念之下,设计不再仅仅是工程“投产、运行、管理、维护”过程中的一个孤立的前端环节,而是作为一个贯穿始终的、动态的决策核心,存在于工程的全过程之中。

设计之初就要具备全生命周期的系统思维,不能只考虑工程的初始建设成本和即时功能,而应该前瞻性地规划工程的长期运行效率、维护成本、环境影响以及最终退役处置。设计方案中需要预埋智能传感系统,为后期健康监测、数字孪生的创建打下基础。设计理论应该更多地融合控制论、决策科学,使工程实体本身具有更好的韧性与自适应性,可以灵活应对气候变化、社会发展等带来的长远

挑战。通过一个智慧化的管控平台，把工程的设计数据、建设过程数据、实时运行数据、社会经济数据等综合起来，用人工智能、大数据分析等手段，实现对工程状态的全方位感知、风险的精准预警、资源的最优调度、决策的科学智能，保证水利水电工程从设计到运行、从建设到退役的全过程，始终以最安全、最高效、最绿色的方式持续发挥其社会和经济效益。

第二章 水利水电工程水力学基础理论创新

水利水电工程的规划、设计、运行管理，都必须以对水流运动规律有深刻的认识为前提。随着工程实践不断向更加复杂、更加极端的自然环境延伸，社会经济发展对水资源、水环境、水生态提出越来越高的要求，传统的水力学理论正面临着前所未有的挑战。本章主要研究复杂边界条件下水流运动的特点，力图冲破已有的理论框架，给现代水利水电工程赋予更为坚实的理论根基和新的想法。

第一节 复杂边界条件下水流运动特性研究

自然界及人类社会中的水流边界条件是多变的，山区河流陡峭的河床、城市地下密集的管网、生态系统中广泛存在的植被等，都会对水流的动力学特性、物质输运过程、能量耗散机制产生深刻的影响。因此深入研究复杂边界下水流运动规律，对提高工程设计的科学性、安全性、生态友好性有很重要的理论和实践意义。

一、山区河流水流运动机理

山区河流是水系的发源地，由于地形地貌的复杂多变，因此水动力学现象也十分复杂。大比降、强紊动、多变的河床形态是它的主要特点。正确地揭示山区河流水流运动机理，是进行山区河流开发、治理和保护的科学前提，对灾害防治、资源利用和生态保护都具有重大的意义。

（一）大比降、强紊动水流结构分析

山区河流的比降比平原河流大得多，水流速度快，能量大，表现出很强的紊动性。水流结构在此类情况下非常复杂，存在二次流、旋涡，自由水面剧烈波动甚至破碎。传统的基于缓坡、均匀流的水力学理论在这里已经不再适用。大比降、强紊动水流深层次的研究，必须用高精度的物理模型试验和先进的数值模拟技术来完成，才能体现出水流内部非线性、非恒定的流动特征。大涡模拟、直接数值模拟等可以对紊流涡结构的时空演化过程做更细致的分析，进而找出能量从大尺

度涡到小尺度涡的串级输运规律，水气交换、掺气对水流密度的影响。

表 2-1 常见的紊流数值模拟方法及特点

方法名称	简称	主要原理	适用场景	计算成本	精度
直接数值模拟	DNS	直接求解 N-S 方程，捕获所有尺度紊流脉动	低雷诺数、基础研究	极高	极高
大涡模拟	LES	过滤 N-S 方程，大尺度直接模拟，小尺度模型化	中高雷诺数、复杂流动	高	较高
雷诺平均纳维 - 斯托克斯	RANS	对 N-S 方程进行雷诺平均，所有脉动项模型化	高雷诺数、工程应用	低	中等
分离涡模拟	DES	结合 RANS 和 LES 的优点，对边界层和分离区采用不同模型	复杂分离流、工程应用	中等	较好

这些研究加深了我们对高雷诺数、高弗汝德数水流基本物理过程的认识，也给山区高坝大库泄洪消能设计、岸坡稳定分析及水工建筑物抗冲击计算提供了重要的参数。对强紊动场中雷诺应力分布、紊动能产生与耗散进行准确描述，是改善水工结构体型、减小空蚀和振动破坏、提高水工结构安全耐久性的基础。常见的紊流数值模拟方法及特点如表所示。

伴随着观测技术的发展，三维激光多普勒测速仪、粒子图像测速法等非接触式测量手段，可以获取高时空分辨率的紊动流场数据。大量的实测数据为紊流模型的验证和改进打下了坚实的基础，使山区河流水力学理论由经验公式、半经验公式向以物理机理为基础的精细预测模型发展，从而大大提高了水利工程的设计精度和可靠性。

（二）阶梯 - 深潭形态的水动力学特性

阶梯 - 深潭是山区河流中常见的自然河床形态，是由一系列陡坎（阶梯）和陡坎下游的冲刷坑（深潭）交替形成的，主要是由巨砾和基岩组成的。独具特色的韵律性地貌结构给水流带来巨大的阻力，并形成特殊的耗能机制。水流经过阶梯的时候会形成跌水或者水跃，大部分水流动能在跌水和涡旋运动中被有效地消耗，从而大大降低下游河床的冲刷能力，维持河道的整体稳定。

阶梯和深潭系统水动力学特性同流量大小有密切关系。低流量时水流以跌落的形式逐级经过阶梯，能量主要消耗在阶梯下方的深潭里；随着流量的增大，水流变成急流，掠过阶梯顶部，形成一系列稳定的表面波，耗能区域也扩大到整个河段。独特的形态不仅大幅度增加了水流的流程，延长了水质净化的时间，而且

给水生生物（主要是鱼类）创造了多种不同的栖息环境。深潭可作避难所，阶梯附近就是天然的充氧区。因此，深入认识阶梯深潭水动力特性对山区河流生态修复、近自然化治理有着十分重要的意义。

（三）泥沙输移与河床演变的耦合机制

山区河流既是水流的通道，又是泥沙等固体物质向下游输送的主要廊道。泥沙输移和河床演变之间存在着复杂的关系，互相影响、互相制约，一起塑造着河流的形态和功能。山区河流泥沙颗粒级配较宽，从细小的悬移质到巨大的漂石都有，其输移规律比均质沙要复杂得多。水流的强紊动造成泥沙起动、输运、沉积过程剧烈，而且具有很强的随机性。

泥沙的输移会造成河床形态的改变，深潭淤积、边滩消长等。而变化的河床形态又会影响局部水流结构，进而影响泥沙的输移能力、路径。河床粗化的铠甲层会阻止下方的细颗粒泥沙起动，阶梯-深潭结构会明显改变泥沙的输运方式，大部分推移质在深潭中沉积，只有在极大的洪水期间才能被输送到下游。这样一种动态的反馈机制就成为山区河道演变的动力。建立可以反映水流、泥沙输送和河床变化之间复杂相互作用关系的水沙耦合模型，是完成水库淤积预测、河道冲淤风险评定、制定航道整治规划和采砂管理措施的基础。

目前的研究趋势是发展基于物理过程的二维或者三维数值模型，同时求解水流控制方程、泥沙输移方程和河床变形方程。采用先进的紊流模型以及非均匀沙输沙公式之后，模拟结果能够更加真实的反映出山区河流复杂的河床演变过程。利用遥感、地理信息系统、野外定位观测技术对模型进行率定、验证，可以为长时序、大范围河道演变预测和管理提供强有力的科学手段，从而实现水利工程与河流系统的协调发展。

二、城市复杂管网水力模拟

城市地下排水管网是城市正常运转的“生命线”，其水力学过程比人们想象的要复杂得多。管网系统结构复杂，旱季污水和雨季雨水两种压力同时存在，并且会涉及到气、液、固三相流动。对于城市防洪排涝、水环境保护、基础设施安全等来说，对这个复杂的系统进行准确的水力模拟是非常重要的。

（一）多相流在管道中的运动规律

城市排水管道，尤其是合流制管道，在降雨时一般不是满管流，而是有大量

的空气存在于自由表面流中。当雨水井快速进水的时候,大量的空气就会被带入管道中,形成气液两相流。两相流运动规律非常复杂,会出现分层流、波状流、段塞流、泡状流等各种流态,不同流态的水力特性和输送能力相差很大。段塞流会造成管道内压力剧烈波动,滞留气团还会造成气堵,严重时会使管道的过流能力大大降低。

管道内污水和初期雨水中的悬浮固体颗粒,形成了固液两相流或者气-液-固三相流。固体颗粒的沉积会使管道有效过水断面变小、水流阻力增大、排水效率降低。水流的作用下已经沉积的固体物又会再次悬浮、冲刷,这不但会影响到管道的水力性能,而且和污染物的迁移转化有密切的关系。因此建立可以准确描述管道内多相流流态转换、相间相互作用、固相颗粒沉积和再悬浮过程的数学模型,是进行城市排水系统精细化模拟、优化运行的前提。

(二) 管网水锤效应的精确预测与防护

水锤效应是由于管道系统中流速突然变化所引起的压力瞬变现象,破坏力极大,犹如锤击一般。在城市供水、排水泵站系统中,水泵启停、阀门快速开关都会造成严重的水锤。会产生瞬时的正压或者负压,轻则造成管路振动、噪声,重则造成管路破裂、设备损坏甚至系统完全失效。随着城市规模的扩大、供水距离的增大,长距离、高扬程的输水系统使水锤问题更加突出。

准确预估水锤效应是做好防护的前提。现代水锤分析大多用特征线法对水锤波的传播、反射、叠加过程进行数值求解。利用管网水力模型建立管网的精细模型,输入泵、阀等边界条件的操作规则,可以模拟出管网在不同运行工况下压力时程的变化,找到压力风险最大的节点和时段。

基于精确的预测结果,可以制定科学的防护措施:

1. 优化操作规程,延长阀门关闭时间、平缓水泵启停过程等,是从源头上减少流速变化率、降低水锤强度的最经济有效的办法。
2. 在系统内合理地设置水锤防护装置。常用的设备有吸收压力波能量的蓄能器或者调压塔,压力过高时可以自动泄压的安全阀,出现负压时可以及时补气的空气阀。
3. 对于泵站系统来说,安装缓闭止回阀可以防止停泵时由于水流倒灌造成的破坏性水锤。用上述方法结合使用,就可以得到一套安全、稳定、可靠的城市管网系统。

（三）雨洪峰值叠加与内涝风险评估

城市内涝是全球城市面临的共同难题，其形成机理十分复杂，牵涉到大气降雨、地表径流、管网输送、河道外排等各个环节的相互影响。特别是当城区自身的降雨洪峰和上游汇入河流的洪峰相遇时，就会出现“峰峰叠加”的情况，河道水位急剧顶托，排水管网向河道的正常出流受到严重限制，甚至发生河水倒灌，加重城区内涝灾害。

准确评价叠加效应就要建立“源 - 汇 - 排”一体化的城市雨洪综合模型。该类模型一般用 SWMM 等工具模拟城市地表的产汇流过程、地下管网的水动力学过程，再耦合一维或者二维的河道水动力模型，从而动态地反映河道水位对管网排水的影响。通过输入不同重现期、不同时空分布的设计暴雨和上游来洪过程，可以模拟出各种不利组合下城市淹没范围、淹没水深、淹没时间，进而识别出内涝风险高的脆弱区。

依靠精细的风险评估结果来制订有针对性的防洪排涝计划。从规划上改善城市蓝绿空间的分布、建设海绵城市设施，在源头上削减径流峰值。从工程角度来讲，可以科学地确定排涝泵站的规模和启抽时间，合理地设计防洪闸门和蓄滞洪区的调度方案。依靠这样的模型风险评价与决策支持，可以大大加强城市应对极端雨洪事件的能力。

三、植被覆盖下的水流运动

河流、湖泊、湿地的水生植被在生态系统中占有很重要的位置，同时它也是一种特殊的水流边界。植被存在改变了传统的固壁边界条件，它和水流之间存在着复杂的相互作用，对流速分布、紊动结构、泥沙输运、物质交换过程都会产生深刻的影响。因此，认识植被覆盖下水流运动的规律，成为生态河道设计、湿地修复、水土保持等领域的重要科学问题。

（一）柔性植被与刚性植被的阻力特性

水流经过植被的时候，由于植被的阻碍作用，流速会变慢、水位会升高。按照植被的物理形态可以分为柔性植被（水草等）和刚性植被（芦苇、灌木等）。这两种植被的阻力特性相差较大。刚性植被在水流的冲击下基本保持原来的形态，产生的阻力主要是绕流阻力，绕流阻力大小与植被密度、排列方式、个体形态有关。在相同的环境里，刚性植被所受的阻力一般比柔性植被大。

柔性植被受到水流作用会弯曲摇曳,形态变化反过来又会影响水流阻力。当流速较低时,柔性植被直立,阻力大;流速增大时,植被弯曲程度增大,水流“俯冲”到植被冠层上,有效阻水面积减小,拖曳力系数随流速增大而减小。由于动态相互作用的存在,柔性植被的阻力计算就更加复杂。正确地量化出不同种类的植被阻力特性,对于河道糙率的估算、洪水演进计算和生态流量设计等环节来说都是非常重要的。

（二）植被群对水流结构的紊动调制作用

植被群的存在会对水流的紊动结构产生很大的影响。植被区内由于植被茎干绕流、相互作用,水流紊动强度增大,但是紊动尺度受到植被间距的限制。植被区尾流区常常会出现大的卡门涡街,伴生着很强的剪切层,造成该区域紊动混合和物质交换异常活跃。植被冠层顶部紊动最剧烈,高速水流和冠层内部低速水流在此处交汇,产生强烈的剪切作用和垂向动量交换,这就是冠层共振。

植被密度对于紊动调制作用有很大影响。稀疏植被主要产生的是个体绕流引起的“茎干尺度”紊动,而密集植被则更倾向于作为一个整体,在植被群后面产生“群落尺度”的大尺度相干结构。植被产生的多尺度紊动结构,对于悬浮泥沙的输运、沉积,溶解氧的垂向混合,营养盐的交换等都有深远的影响。植被内部流速变缓、紊动加大,有利于细颗粒泥沙的絮凝、沉降,从而起到净化水质的作用。

认识植被对紊动调制的机理,可以给植被生态修复提供理论基础。合理选择植被种类、密度、空间位置,主动调节河道局部水动力、物质运移,形成利于鱼类产卵的低速缓流区,或者形成利于污染物降解的高强度混合区。以生态水力学原理为基础的主动式生态设计,是河流健康、功能恢复的有效途径。

（三）生态河道水力设计的理论依据

传统河道设计大多把防洪排涝作为主要目标,常用混凝土衬砌等硬质护岸,这很容易造成河道渠化,使河道失去其原本的生态功能。生态河道设计在保证防洪安全的同时,也致力于恢复和营造健康的河流生态系统,主要目的是给水生生物创造多种栖息地。水力条件(流速、水深、紊流强度)是决定栖息地品质的主要物理条件。

生态水力学理论的革新,给生态河道设计赋予了强有力的科学支撑。建立鱼类等重要物种栖息地适宜度模型,可以定量评价不同的水力条件组合下目标物种的适宜程度。一些鱼类喜欢在急流的砾石滩上产卵,但是幼鱼需要在缓流的浅滩

或者植被区中生长。将生物需求与二维或者三维的水力模型结合起来,在设计阶段就可以定量评价和优化不同的河道形态方案。这样就使得设计不再只是追求单一的水力指标,而是一个由不同的水力条件所构成、功能多样、由水力条件镶嵌而成的水力生境复合体。设计内容有恢复河流自然的蜿蜒状态、设置深潭浅滩、合理配置植被群落、设置生态鱼道保证河流纵向连通等。这些措施的根本目的都是通过改变河道的物理边界来创造一个动态的、异质的、有生机的水力环境,从而支持健康的、稳定的河流生态系统。

第二节 新型水工建筑物水力设计理论

随着水利水电工程向着更高的参数、更复杂环境、更多的功能目标发展,传统的理论就遇到了新的挑战。新的水工建筑在考虑结构安全、经济的同时还要考虑水流能量调节、运行自动化、智能化和生态协调。理论创新同数字技术相结合,是实现发展的主要动力。

一、阶梯式溢洪道水力设计

阶梯式溢洪道是消能工的一种,利用阶梯状的泄槽底板增大水流与建筑物的相互作用,达到沿程连续消能的目的。其设计理论主要是研究水气两相流的运动规律,然后依据水气两相流的运动规律来优化结构参数,以达到最佳的减蚀消能的效果,保证枢纽工程的安全运行。

(一) 掺气减蚀机理与设计参数优化

阶梯式溢洪道泄放的高速水流在流过阶梯的时候,会在梯坎后面形成漩涡区,卷吸大量空气,形成强烈的水气掺混流。气泡被压缩在高压区,膨胀到低压区,形成弹性很好的气垫,大大减小了水流对建筑物的冲击和脉动压力,有效抑制了空蚀穴的产生和发展。气泡的存在使水体的物理性质发生改变,水流空化数降低,抗空蚀能力提高。当水流中气体含量达到一定值的时候,即使局部压力低于饱和蒸汽压也很难造成空蚀破坏。

设计参数的优化,会形成掺气减蚀的效果。阶梯高度和长度之比决定水流形态(贴流或者飞流)和掺气强度。贴流态时水流紧贴阶梯面,耗能最充分;飞流态时水舌跃离梯面,冲击下游梯面,掺气主要发生在水舌冲击区。设计时根据泄

洪流量、单宽流量、枢纽地形等条件,选择合适的梯高、梯长来达到最好的掺气效果。设置通气坎、挑流鼻坎等辅助结构可以加强自然掺气,或者在关键部位采取人工补气的方法,使近底区的气体浓度在不同的工况下都大于安全值,从而保证溢洪道结构所有受力部位得到防护。用数字化仿真技术,特别是 CFD 技术对不同的参数下掺气过程做详细的模拟,给设计参数的精确优化提供科学依据。

(二) 水流能量耗散率的计算与评估

水流能量耗散率是评价阶梯式溢洪道水力性能的主要指标,它决定下游消能设施的规模和工程总造价。能量耗散主要通过三种途径,水流与阶梯面摩擦、水体内部剧烈紊动和掺混、水舌冲击阶梯面造成的撞击。阶梯的粗糙性以及由此产生的复杂流态,使得阶梯式溢洪道的耗能效果远大于传统光滑溢洪道,一般能消耗掉总水头能的百分之六十到九十。

能量耗散率的计算及评价方法随研究的深入不断的发展。早期的研究主要是利用物理模型试验,测量上下游断面的水流参数,然后利用能量方程直接求出总能量损失。此法直观可靠,但是耗时费力,模型比尺的相似准则难以完全满足。经过大量的试验数据研究者提出了一系列的经验公式和半经验公式,把能量耗散率和弗劳德数、阶梯几何参数等主要因素联系起来,为初步设计提供了方便的计算方法。

随着计算机技术的发展,数值模拟的方法,特别是雷诺平均方程、水气两相流模型的计算流体力学方法,已经被用来评价能量耗散率。用高精度数值求解可以得到详细的三维流场信息,不仅可以计算总体能量耗散,还可以对梯面附近、漩涡区、掺气区等不同区域的能量耗散贡献做详细的分析。该法可以模拟物理模型难以实现的极端工况,并且可以迅速评价不同设计方案的好坏,大大提高设计效率和精度。目前,结合物理模型试验与数值模拟相互验证,已经成为评价能量耗散率的一般方式,保证设计结果可靠。

(三) 不同体型对消能效率的影响

阶梯式溢洪道的体型设计不是一成不变的,是根据不同的地形地质条件、水力要求发展而来的。不同的体型会使水流产生汇聚或者扩散,从而对掺气过程及能量耗散产生显著的影响,因此体型选择是水力设计的重要一步。

1. 收缩型体型,溢洪道沿程宽度逐渐减小时,水流深度、流速增大,水流的紊动强度、掺气能力增大。该类型适合于河谷地形狭窄的地方,在较小的空间里

可以集中泄洪。收缩段设计要精确控制收缩角，防止水流突然变化造成负压过低或者产生有害冲击波，保证水流平稳过渡，最大限度地耗散能量，同时保证结构的稳定。

2. 扩张型体型，下游河道较宽或者需要减小出口流速时常用。沿程断面的扩大，水流速度变慢，水深增大，有利于水流稳定和下游水位衔接。扩张段设计时要控制水流分离。过大的扩张角会造成水流脱离边墙，形成大范围回流区，使有效过水断面减小，主流区水力损失增大。因此一般要通过优化边墙曲线、设置导流墩等方法来改善流态。

3. 变坡度体型根据山体坡度的自然变化，阶梯式溢洪道可以设计成变坡度体型。上游段坡度较缓，有利于水流的初始掺气和稳定；下游段坡度较陡，加快水流，用有限长度实现充分消能。坡度变化处是水力设计的难点，要实现平滑过渡，不能使水流产生不利的冲击和压力突变。将陡坡和缓坡、收缩和扩张等形状结合在一起设计，可以实现水流能量精细的、分段式的控制，从而达到最佳消能效果。

二、迷宫堰和水力自动翻板闸设计

闸坝工程领域在河道宽度有限的条件下提高泄洪能力、实现工程自动化、智能化运行是技术发展的主要方向。迷宫堰通过独特的平面折叠结构大幅度增加堰长，水力自动翻板闸依靠水力作用自行启闭，这两种新型建筑物的设计理论创新为解决上述问题提供了有效的途径。

（一）非线性泄流能力的精确计算

迷宫堰在平面上呈“W”形或“Z”形等折叠状，在相同的渠（河）宽内，实际过水堰长是直线堰的几倍，在相同的上游水位下泄洪能力增大数倍，或在相同的流量下壅水高度显著降低。由于水力特性好，水库扩容、老旧水闸改造、生态流量下泄等都有广阔的应用前景。

迷宫堰的泄流过程很复杂，泄流能力具有明显的非线性。水位低的时候，水流主要从堰顶顶点处下泄；随着水位升高，整个堰顶开始发挥作用，相邻堰壁间的水流互相干扰，入口水流条件的变化也会影响泄流效率。水位继续上升，尤其是堰体被淹没的时候，泄流能力会突然变小。这些复杂的现象使传统的线性堰流公式不能很好地描述泄流过程。

因此准确计算迷宫堰的非线性泄流能力就成为设计的核心和难点。现代设计

理论综合使用多种方法来求解。通过大量的物理模型试验，研究不同的水头比、不同的堰体几何构型（壁长、壁厚、顶宽、折叠角等）对泄流系数的影响，得到各种工况下适用的经验图表和回归公式。采用高精度数值模拟可以清楚地看到堰顶、堰体周围三维流场，研究水流干扰、能量损失机理，对泄流系数做更精确的修正。最前沿的研究已经运用上了人工智能算法，即神经网络模型，经过大量的试验和模拟数据深度学习，创建出可以即时、精准预测迷宫堰泄流能力的智能化计算模型，从而大大提升了计算精度和效率。

表 2-2 迷宫堰几何参数类型及影响

参数类别	具体参数	对泄流能力的影响
平面几何	折叠角	影响水流转弯阻力及干扰程度
	壁长	增加过水堰长，提高泄流能力
	壁厚	影响局部水流阻力，需考虑结构强度
断面形状	堰顶宽度	影响溢流收缩及水气掺混
	堰顶倒角 / 弧度	改善水流流线，减少局部负压
运行参数	上游水位	决定泄流状态及是否淹没
	弗劳德数	影响水流态和能量耗散

从迷宫堰几何参数类型及影响可知上表，不同的几何参数对迷宫堰泄流能力有显著影响，设计时要综合考虑。

（二）水力自动控制原理与稳定性分析

水力自动翻板闸不需要外部动力或者人工干预，仅依靠上下游水位差产生的静水压力以及闸门自重等形成的力矩，实现闸门的自动启闭。其主要设计原理是用水力学、力学平衡原理来实现水位的精准自动调节，在防洪、灌溉、景观水系的维持等方面都具有很大的优势。

自动控制的基本原理就是对力矩平衡点进行准确的设计。闸门一般绕着水平轴转动。当上游水位低于设定的开启水位时，闸门自重及闸门上部水体压力产生的稳定力矩起主要作用，闸门保持关闭状态。当上游水位持续升高超过设定的水位时，闸门上静水总压力增大，闸门转轴的开启力矩也增大。一旦开启力矩大于稳定力矩，闸门就会自动、平稳地下翻，打开泄洪通道。随着上游水位的降低，开启力矩变小，当其小于稳定力矩时，闸门又会自动复位关闭。

稳定性分析是水力自动翻板闸设计的生命线。不稳定的运行状态会使闸门在

某一个流量下出现剧烈的振动、拍打或者频繁的小幅度开合，不仅会影响泄流效率和水位控制精度，严重的时候还会造成结构疲劳破坏，影响工程安全。稳定性分析的关键就是研究闸门开启时各个角度下合力矩的变化规律。理想的设计应该保证从开启到关闭过程中合力矩的变化是单调的，不能在中间开启角度出现力矩平衡点，从而杜绝卡门现象或者振动现象。

设计时需要对转轴位置、闸门体型、重量、浮箱布置、附加配重块等参数做精确的力学计算和优化。利用闸门的动力学模型来分析水流冲击、漩涡脱落等动水压力对闸门的影响特征，主要校验其共振频率，保证共振频率与水流的激振频率相隔开。现代设计一般用数值模拟和物理模型相结合的方法，对翻板闸在各种复杂水流条件下动态稳定性能做全方位的评价和预测，保证翻板闸运行绝对平稳、安全可靠。

（三）结构体型优化与水力性能提升

对迷宫堰、水力自动翻板闸来说，结构体型优化设计是提高水力性能、保证结构安全、降低工程成本的根本手段。优化目标也是多样的，既希望水力效率高，又希望结构稳定、耐久。

迷宫堰体型优化的重点是平面布置和断面形状。传统的直角或梯形迷宫堰构造简单，但是水流转角处容易产生大的能量损失及负压区。现代设计越来越趋向于流线型结构，顶、谷点形状为圆形或者椭圆形，减小水流分离，提高泄水效率。堰壁厚度、倾角也要进行优化，既要保证结构强度，也不能过大，以免增大水流阻力。使用参数化建模和 CFD 数值模拟相结合的自动化优化平台，可以对几百种不同的几何方案进行快速筛选，找到在特定的工程条件下，单位宽度泄流量最大、水力条件最好的迷宫堰体型。

水力自动翻板闸型优化主要是为了达到平稳运行和准确控制的目的。闸门面板曲线形状影响面板上水压力分布及动水作用力。做成弧形或者反向弧形，可以改善压力分布，减小开启过程中阻力矩的变化，使闸门运行更加平顺。底枢转动轴密封止水结构也成了优化的重点，新型的材料和结构可以大大减小漏水及摩擦阻力，使控制的灵敏度得到提高。将闸门设计成中空浮箱结构，或者在闸门后部加装扰流板，可以利用水流的负压或者浮力来辅助闸门的开启或者关闭，从而降低对配重的要求，使结构更加轻巧、经济。

三、生态鱼道的水力设计理论

随着河流生态系统保护意识的增强，恢复河流连通性、保证水生生物特别是鱼类洄游通道畅通，已经成为水利水电工程建设不可缺少的重要部分。生态鱼道设计不再仅仅是给鱼类一个过水通道，而是要依据水力学和鱼类行为学，为鱼类创造一个能耗低、胁迫小、有吸引力的“水上高速公路”。

（一）目标鱼种的水力学行为学响应

生态鱼道设计的根本出发点是鱼本位，即设计时要充分考虑目标洄游鱼类的生物学特性，尤其是水力学行为反应。不同种类的鱼以及同一种类的鱼在不同生命阶段（幼鱼、成鱼）、不同的生理状态（繁殖期、索饵期）下，它们的游泳能力、疲劳极限、趋流性及对水流刺激的喜好等都存在着很大的差异。

游泳能力是设计的第一要素，一般分为巡航速度、持续速度和爆发速度。巡航速度是鱼儿能长时间保持且不会感到疲劳的速度，也是鱼道设计中背景流速的主要参考。爆发速度虽然很快，但是只能维持几秒钟，鱼用它来通过流速大的地方。鱼道的设计要保证主流区的流速不超过目标鱼种的持续游动能力，在局部困难处（陡坡、闸口等）之后留有足够休息区。

鱼类的趋流性、趋光性、趋触性等行为特征也是设计时要利用或者避免的因素。洄游鱼类一般逆流而上的习性很明显，鱼道入口处的位置以及水流对鱼类有引诱作用。入口要设在洄游鱼类容易聚集的地方，并且要有足够强且方向明确的“吸引流”。鱼道内部不能出现流速紊乱或者强烈的侧向流动之处，否则会使鱼儿失去方向。研究目标鱼种对于水流脉动、紊动强度、光照强度、水体温度、溶解氧的响应，可以有针对性地营造出对目标鱼种最吸引人的环境，实现由被动过鱼到主动诱鱼的转变。

（二）流速场与紊流场的舒适性评价

传统鱼道设计只考虑流速一个指标，但是现代生态水力学研究认为，只控制平均流速是远远不够的。鱼类在水中所感受到的并不仅仅是一个流速，而紊流场（紊动能、雷诺应力、涡量等）的特点也会对洄游时的能量消耗和生理胁迫产生影响，即所谓的水力舒适性。一个鱼类友好的鱼道不能只追求平均速度，还要考虑鱼类的脉动感觉。

舒适性上，要求鱼道内主流区流速分布尽量均匀，不能出现局部高速射流。

同时在通道中设置低速区或静水区，如隔板后的回流区、池塘的边角区等作为鱼类的服务区与加油站，给它们向上游冲刺后恢复体力的地方。休息池大小和间隔要根据目标鱼种的疲劳恢复时间来科学确定。

紊流场舒适性评价更复杂。过大的紊动，特别是大规模的漩涡和剪切流，会使鱼类游水困难，不得不为了保持姿态而消耗多余的能量，甚至会造成物理上的损伤。微小尺度的紊动在一定范围内是鱼类感知环境的信号，但是剧烈的、无序的紊动会形成水力屏障。因此舒适性的评价需要量化的分析鱼道内的紊动能的耗散率、涡旋结构和尺度。理想的鱼道应该把紊动强度控制在鱼类能够接受的范围之内，在休息区内提供微紊动或者层流环境。利用先进粒子图像测速技术做物理模型试验，或者使用大涡模拟等高精度 CFD 方法做数值模拟，可以得到鱼道内流速场、紊流场，根据鱼类生理能耗模型，对不同设计方案的水力舒适性进行定量评价并排序。

（三）仿生学在鱼道设计中的应用

仿生学给生态鱼道设计提供了一种新思路，它的核心思想就是向大自然学习，模仿天然河流中鱼类长期适应并喜欢的那些水力地貌特征，使人工建筑的生硬感降到最低，创造出一个更加自然、更具吸引力的洄游环境。这样一种设计理念既可以提升鱼道的通过率，又可以增加通道内水力生境的多样性。

仿生设计的大体形状舍弃了传统鱼道笔直、规整的渠道形式，用蜿蜒曲折的平面线型来模仿自然溪流的形态。弯曲的河道自然形成深潭浅滩交错的地形，即弯道凹岸处水流速度较快，形成深水区，凸岸处水流速度较慢，形成浅水区，给不同游泳能力的鱼类提供多种通道。河床纵向坡度也可以设计成“陡坎—深潭”的形式，模仿自然河流中存在的小瀑布和瀑布下面的冲刷池，既可以消能又可以提供极佳的休憩场所。

仿生学认为在鱼道底部、侧壁上随机或者有规律地设置大小不同的仿自然卵石、石块或人工仿生构件。障碍物的存在使得鱼道内部水流结构变得十分复杂。它们可以产生小尺度的尾涡、回流、遮蔽区，给鱼类提供大量的即时休息点，也可以作为躲避高速水流的避难所。底质铺设不同粒径的材料，既可以进一步改善近底流态，又可以给一些底栖鱼类或者产卵鱼类提供适宜的栖息和繁殖环境。因此，原本单一的人工渠道被改造成成了一个充满多样化微生境的、动态的生态廊道，极大地提高了鱼类的主动选择性以及通过意愿，实现了从“工程通道”到“生态

廊道”的转变。

第三节 水电站水力过渡过程仿真分析

水电站的水力过渡过程，就是指水流从一个稳定工况转变到另一个稳定工况时，水力参数在时间和空间上发生变化的全过程。对水电站进行仿真分析，对于保证水电站的安全稳定运行、优化控制策略、评价设备性能具有十分重要的意义，是现代化水电工程设计中不可缺少的一环。

一、复杂引水系统水力过渡过程

由于引水系统管路长、结构变化很多，水力过渡过程表现出很强的非线性和复杂性。因此准确模拟、分析水锤传播、压力变化及系统稳定性，是防止管道破坏，保证机组安全运行的前提。

（一）长距离引水隧洞的水锤计算

长距离引水隧洞水锤计算对于水电站的安全设计有着十分重要的意义。由于输水距离长、水体惯性大，当机组工况突然变化时，比如紧急停机或者甩负荷，会引起管道内压力急剧升降，产生水锤波。水锤波在管道内来回传播，造成压力管、隧洞、机组蜗壳承受的压力超过设计值，对系统造成严重危害。传统的图解法不能处理复杂的边界条件，目前的设计大多采用特征线法进行一维数值模拟。该方法可以准确地反映水锤波的传播、反射、叠加过程，已经成为目前水锤现象研究的主要计算方法。

数值模拟中管道摩擦效应要准确。长隧道水头损失除了和流速平方成正比外，还要考虑非恒定流附加摩阻的影响。动态摩阻模型，如齐科夫斯基模型、布伦奥-维格斯基模型等被引入计算当中，用来更加真实的反映能量耗散的过程，从而提高计算结果的准确性。对于衬砌和围岩共同作用的隧道，还需要考虑水与结构相互作用，即管壁弹性变形对水锤波传播速度的影响，使得计算模型更加复杂，需要耦合结构动力学方程来求解。这些方法的特点及应用见下表。

表 2-3 水锤计算方法对比表

方法名称	适用范围	精度	复杂边界条件处理能力	计算效率	典型应用
传统图解法	简单管路	一般	较差	高	初步分析、概念设计
特征线法	一维复杂管路	较高	良好	较高	详细设计、防护措施优化
计算流体力学	三维局部复杂区域	很高	极佳	较低（计算量大）	岔管、阀门等关键部件精细分析

数字化仿真技术的发展使得在水锤计算时可以加入更多的复杂因素。计算流体动力学仿真虽然计算量很大，但是可以对岔管、阀门等关键部位给出详细的流场结构和压力分布信息，从而给一维计算提供更精确的边界条件或者参数。一维、三维模型联合仿真，在保证计算效率的同时可以明显提高局部区域的模拟精度，为长距离引水系统水锤防护措施（调压室、空气阀等）的设计选型和布置提供更加可靠的依据。

（二）调压室水位波动与稳定性分析

调压室是长引水隧洞系统中的关键水锤防护设备，主要功能就是削减水锤压力、缩短水锤波的传播距离、改善机组的调节性能。调压室水位波动范围及稳定状况，直接决定电站运行是否安全。水位波动的分析分为大波动、小波动。大波动分析主要是针对机组甩负荷或者增负荷等极端工况，目的是求出最大动水位和最小动水位，使最大、最小动水位不大于调压室的顶板和底板高程，避免顶板受压或者空气进入引水系统。

小波动稳定性分析主要是研究机组接入电网之后，由于负荷微小扰动引起的调压室水位收敛特性。托马判据提出了阻抗式调压室稳定运行所必需的最小断面面积临界条件。如果调压室的断面积小于临界值，则在调节过程中负荷扰动引起的调压室水位波动会越来越大，最终造成系统失稳，机组出力出现大幅度振荡，严重威胁电网安全。数字化仿真不仅可以检验托马判据，而且可以对双室、差动式调压室等复杂的调压室结构进行详细的分析，弥补经典理论的不足，优化设计参数。

（三）多机组联合甩负荷的相互影响

拥有多台机组或者共用长引水系统的电站，当多台机组同时或者相继甩负荷

时,其水力过渡过程比单机工况要复杂得多。各机组导叶关闭产生的压力波会在引水系统主管和支管中叠加、干涉,在某些局部位置会产生单机甩负荷时的极端压力。相互影响的复杂性要求在设计阶段做详细的仿真分析。

仿真的核心就是对各支管和主管连接处(岔管)的压力波传播和反射进行准确的模拟。当一台机组甩负荷时,产生的正压波在到达岔管处时,一部分会继续沿着主管向前传播,另一部分则会反射进入其它正常工作的机组的支管内,对其稳定运行造成干扰。其他支管的压力波也会对正在甩负荷的机组产生影响。由此产生的复杂的波系耦合效应,使得主管和各支管的压力变化过程具有很强的非线性。

为了正确地处理以上复杂情况,仿真模型要建立完整的多机组引水系统拓扑结构,而且还要正确地设置每台机组的导叶关闭规律。针对各种甩负荷组合(全部机组同时甩负荷、部分机组相继甩负荷等)做数值模拟,找出最不利的工况组合,得到系统最高、最低压力包络线。这些结果是进行管道强度设计、调压室容积校核、制定机组间协同控制策略的基础,目的是保证任何联合操作下整个水力系统都是安全的。

二、水泵水轮机全特性曲线研究

水泵水轮机是抽水蓄能电站的核心设备,其运行工况比常规水轮机复杂得多,有正转泵工况、正转发电工况、反转水轮制动工况和反转泵工况等四个象限。因此获得完整的、准确的全特性曲线是进行过渡过程仿真的基础,也是保证机组安全稳定运行的关键。

(一) S 特性区域的振动与不稳定现象

水泵水轮机的 S 特性区是指在水轮机工况下,当导叶开度较小、机组接近空载或甩负荷时,流量转速特性曲线出现驼峰状正斜率的区段。一旦机组运行到此区域就会产生剧烈的压力脉动、机组振动以及出力摆动,严重的时候会造成机组失控,对结构安全造成巨大的危害。造成不稳定的主要原因是转轮内部复杂多变的非定常流动。

S 区由于流量小、转速高,叶片进口水流攻角与设计值相差较大,叶道内产生大量的流动分离、回流和旋涡结构,很容易出现旋转失速。非定常旋涡结构周期性地脱离、演变,直接造成流道内压力脉动,并通过流固耦合把振动、噪声传到机组的结构上。数字化仿真技术,尤其是大涡模拟、分离涡模拟等高精度湍流

模型,给探究S区内部流动细节、认识不稳定现象机理提供了强有力的手段。仿真可以捕捉到叶道涡的动态行为,分析压力脉动和叶道涡之间的内在关系,为水力设计提供优化的方向,目的是避免或者有效地抑制S区的不稳定性。

(二) 反常工况区的四象限运行特性

水泵水轮机全特性曲线,一般用四个象限来表示其所有工作区域内的工作性能。除了正常发电、抽水等工况之外,还有启动、停机、工况转换、事故处理等许多种异常工况,在实际运行中是不可避免的。

1. 水轮机工况区:机组正转,进行水轮机发电。这是最常规的运行区域,特性曲线通常较为平稳。

2. 水轮机制动区:机组继续正转,由于水头、流量变化,水流对转轮做负功,起到制动作用。常出现在发电甩负荷开始的时候。

3. 水泵工况区:机组反转,作为水泵抽水。这是另一个主要运行区域。

4. 反转水泵区,电机反向运转,水流方向与水泵工况相反,水流推动转轮反向旋转,达到耗能制动的效果。该工况多见于水泵断电后倒转时。

在象限交界处、零流量点、零转速点、零力矩点(即飞逸点)等特殊部位,水力特性十分复杂,压力脉动剧烈,流动很不稳定。水泵断电之后,从水泵工况过渡到制动工况,再到反转水轮机工况(飞逸)的过程中,机组会完整地穿过所有象限。掌握反常工况区运行特性,对于计算评价机组最高倒转速度、水泵扬程和流量反向冲击,以及保护装置设计和操作规程的制定等都有重要的意义。传统的模型试验是得到全特性曲线的主要手段,但是成本高、周期长。

(三) 基于CFD的全特性曲线数值预测

计算流体动力学给水泵水轮机全特性曲线数值预测提供了一条新途径。采用包含蜗壳到尾水管全部流道的三维数值模型,可以模拟机组在任意转速、导叶开度、流量下内部流场,得到其水力力矩、流量、效率等宏观性能参数。通过系统地改变边界条件就可以得到完整的四象限特性曲线。

CFD预测好坏的关键就是模型是否准确。包括几何建模精度、计算网格质量、湍流模型选择、动静交界面处理方法的合理性。剪切应力输运模型因为处理边界层、流动分离等问题的优势,经常被用作水力机械的仿真。对非定常特性明显的S区来说,必须采用更高级的非定常计算方法才能获得流动的动态信息。

数值预测最明显的优势就是灵活、有预见性。在设计之初就可以对各种水力

设计方案进行快速的评估和改进,而不需要等到花费大量的物理模型试验时再进行。计算流体动力学不仅可以给出宏观特性曲线,还可以给出详细的内部流场信息,如压力分布、速度场、涡量场等,使设计者对水力损失的来源和不稳定流动的原因有更深刻的认识。虽然数值预测的绝对精度受许多因素的影响,需要依靠模型试验数据进行校核与验证,但是它已经成为现代水泵水轮机研发中不可缺少的一部分,大大缩短了研发周期,提高了设计水平。

三、水力 – 机械 – 电气系统耦合过渡过程

水电站是一个水力、机械、电气三大系统紧密结合在一起的复杂动力系统。其过渡过程不是孤立地发生在某一个系统中,而是三者互相影响、互相作用的动态响应。因此,只能采用耦合仿真方法才能准确的描述出它的动态特性。

(一) 水力系统与电网的相互作用

水力系统和电网以水轮发电机组为中心枢纽,互相联系。电网负荷变化、频率波动会通过调速系统传递给水轮机,使导叶开度改变,引水系统内就会产生水力过渡过程。当电网频率降低的时候,调速器会命令机组增加负荷,导叶开度变大、引水系统压力下降,从而产生负向水锤。水力系统自身动态响应反过来又会对电网产生影响。水锤效应、调压室波动所引起的机组出力变化,都会影响发电机的输出功率,从而对电网的频率、电压稳定性产生冲击。在小型电网或者孤网运行的水电站中,这种相互作用更加明显,水力系统稳定性直接影响电网频率的好坏。

(二) 调速器与励磁系统的协同控制

水轮机调速器、发电机励磁系统是保证机组和电网稳定运行的两个主要控制系统。调速器的主要任务就是根据电网频率偏差和负荷指令调节导叶开度,来控制机组的有功功率和转速。励磁系统主要是根据电网电压偏差来调节发电机的励磁电流,从而控制机组的无功功率和机端电压。两者不是独立工作的。机组甩负荷时转速迅速增大,调速器会很快关闭导叶;机端电压由于甩去感性负荷而升高,励磁系统必须快速减小励磁电流来抑制过电压。

这两个控制系统的行为是互相影响的。调速器动作会引起机组机械功率变化,进而影响发电机的功角,对电网动态稳定性造成影响;励磁系统调节会使发电机内电势发生变化,同样会影响功角和系统的暂态稳定。现代控制理论主张二者协同控制。在调速器、励磁系统中加入电力系统稳定器等附加控制信号,或者使用

多变量协调控制的方法来抑制系统受扰动之后的低频振荡,可以有效地提高发电机对电网的支撑能力,改善整个电力系统的动态性能。耦合仿真模型要包含调速器、励磁系统数学模型,才能真实再现这样复杂的控制交互过程。

(三) 抽水蓄能电站工况转换的仿真

抽水蓄能电站工况转换属于水电站过渡过程中的复杂情况,牵涉到水力、机械、电气三大系统深度耦合并且精确时序控制。发电工况转换到抽水工况的过程一般包括:发电机解列、机组按发电工况停机、待机组转速接近零时,投入盘车装置或者施加反向制动、在转轮满水状态反向启动机组至同步转速、发电机并网、然后开启导叶进入水泵运行。

过程中存在着许多困难,停机、启动时,机组要经过四象限特性曲线上的几个不稳定区域,会引发剧烈的振动以及压力脉动。反向启动并网时必须控制电气、机械系统,使冲击减到最小。高水头、大容量的抽水蓄能机组中S特性区的影响更加明显,启动过程中很容易发生S区滞留现象,造成启动失败或者设备损坏。

完整的工况转换仿真需要建立一个综合的仿真平台,该平台应该包含引水系统一维水力模型、水泵水轮机全特性曲线模型、机械系统传动与惯性模型、发电机电动机模型、调速器和励磁系统控制模型、阀门操作系统模型等。通过该平台来模拟从一个稳态到另一个稳态的整个转换过程,对各个步骤中水力、机械、电气参数的动态变化进行分析。仿真结果可以给工程师提供操作流程优化、控制参数整定和潜在风险预测的重要依据,保证工况转换过程既快速又平稳又安全。这对充分发挥抽水蓄能电站灵活的电网调节功能,有非常重大的意义。

第四节 生态友好型水力学设计方法

传统的水利水电工程设计一般以防洪、供水、发电等社会效益为重点,但是现代设计理念把生态环境保护放在同等重要的位置。生态友好型水力学设计依靠理论创新和技术实践,目的在于最大程度上减少工程对河流生态系统带来的负面影响,从而达到人与自然和谐共处的目标。

一、环境流量核算与保障

环境流量是维持河流廊道健康,保证水生生态系统结构和功能完整的生命线。

科学核算并全过程保障，是生态友好型水利水电工程设计与运行的基本前提，也是大坝工程实现可持续发展的关键所在。

（一）满足水生生物需求的最小生态流量

最小生态流量是环境流量保障的最低要求，它的主要目的就是保证河流不会断流，为水生生物提供最基本的生存空间。传统的水文学方法，如 Tennant 法，是选取多年平均流量中某一固定的百分比来确定生态基流，这种方法虽然简单易行，但是没有考虑到水生生物的实际需要。现代生态水力学方法更重视流量同生物栖息地的动态响应关系。其中物理栖息地模拟法就是结合一维水力学模型和生物栖息地适宜度曲线，计算不同流量下的加权可用面积，进而找到能提供最大或者最适宜栖息空间的流量过程。

数字化技术应用之后，核算结果的准确性以及动态性都有了很大的提高。高分辨率遥感影像以及无人机航测技术，可以迅速得到河道地形数据，给水力学模型提供可靠的边界条件。并且，以长时监测的鱼类行为学数据为基础，建立更为细密的栖息地适宜度模型，水深、流速这些传统因子之外，还要将底质、掩蔽物、水温这些重要因素加入到考量当中。这就使得最小生态流量的确定，从以前的固定数值转变为一个随季节变化、能响应不同生物生命周期（产卵期、洄游期、越冬期）需求的动态流量过程，给生态调度提供更加科学的决策依据。

保证最小生态流量实现，除了水库要实施精准的调度之外，还要建立完善的监测和反馈机制。在河流下游重要的断面上设置在线监测站点，对流量、水位、水质等主要参数进行实时监测，及时将数据传送到调度中心。监测值小于预设的生态流量阈值的时候，系统就会发出警报，然后执行相应的调度方案调整。依靠物联网、大数据分析创建起来的闭环管理体系，把最小生态流量由理论计算值变成河流生态实践，给水生生物赋予稳定可靠的生存保障。

（二）考虑河流生态过程的脉冲式泄流

仅仅维持一个恒定的最小生态流量，不能模拟天然河流复杂的水文节律变化。河流生态系统的健康演替常常依靠周期性的水流波动，特别是洪水脉冲。脉冲式泄流就是根据这一思想，人为地在水库中制造出历时短、流量大的泄流过程，模拟自然洪水事件，以引发和维持重要的河流生态过程。这说明人们对于生态系统的认识由单纯的保障基本需求的“保底”思维，转变为一种主动的、对整个生态系统进行修复与维持的思路。

脉冲泄流的生态功能是多样的。它能冲刷河床,清除附着藻类,扰动底质,更新底质,有效防止河道淤积、过度植被化,为鱼类产卵、底栖生物栖息提供多样化的物理环境。洪水周期性地淹没河漫滩,使河流与岸边带之间物质、能量交换得以促进,给湿地植被生长、两栖动物繁殖创造有利条件。许多鱼类都有特定的水文脉冲作为洄游或者产卵的天然信号。因此精心设计的脉冲泄流方案,其峰值流量、涨落率、持续时间、发生时间等参数都要和区域内关键物种的生命周期节律高度吻合,才能达到最好的生态效应。

(三) 生态调度对下游栖息地的影响评估

生态调度方案的制定与实施必须有科学的评估作为前提,只有这样才能够保证生态调度方案能够取得预期的积极生态效益,同时也能有效地避免可能产生的不利影响。影响评估的主要任务就是使用先进的数字化工具,对下游河段物理栖息地时空动态变化的过程做精细的模拟和量化分析。

评价工作一般是从建立高精度的二维或者三维水动力学模型开始的。该类模型可以较好地反映复杂河床地形下水流结构,可以计算出任意一点上的水深、流速、剪应力等主要水力学参数。把水动力学模型计算出的结果和为目标物种建立的栖息地适宜度指数模型结合起来,就可以定量地评价出在特定流量条件下,河段内栖息地的质量和数量,即加权可用面积。

模拟不同生态调度方案(不同的最小流量标准、不同规模和频率的脉冲泄流组合等)可以得到一系列下游栖息地时空分布图。从而使得设计者和管理者可以直观地比较出各种方案的好坏,找到可能对某些敏感生活史阶段产生冲击的调度模式,或者找到能够最大化关键物种栖息地的最优调度策略。

需要指出的是评估工作不能只是在项目开始前做预估,而应该贯穿于项目运行的全过程。建立长期生态监测网络,对下游的水文、水质、水生生物群落等实施持续监测,并将监测数据同模型预测结果加以对比验证。模拟、实践、监测、反馈的循环迭代过程是实行适应性管理的一种手段,可以不断对生态调度方案进行优化和调整,使其更符合河流生态系统的需求,从而达到工程效益和生态效益长期均衡的目的。

二、过鱼设施的水力优化设计

大坝等水利建筑物断开了河流的纵向连通性,阻断了水生生物尤其是洄游鱼

类的自由迁移，给河流生态系统造成严重破坏。过鱼设施属于重要的生态补偿手段，其设计的好坏直接影响河流生态廊道修复的效果，水力条件的改善是设计的关键。

（一）基于鱼类行为学的进口诱鱼流速设计

过鱼设施能否成功运行，首先要看其是否能够吸引鱼类进入其入口。鱼道入口处必须形成一种有吸引力的水流，即诱鱼水流，它就像河流中的路标，把鱼群引到上溯的通道。进口流速设计不再是简单的取值经验，是把鱼类行为学同计算流体动力学结合起来的跨学科实践。不同的鱼种其感知能力、游泳能力、趋流习性千差万别，因此在设计时需要根据目标保护物种，在天然河流中寻找迁徙路线时的水力学线索偏好。

数字化模拟在这里起着举足轻重的作用。对大坝下游、电站尾水、鱼道入口附近等较大区域建立三维 CFD 模型进行模拟，可以获得各种运行条件下复杂的流场信息。设计者可以在模型中不断对鱼道入口位置、朝向、宽度、形态进行修改，分析其产生的流场与电站尾水主流相互作用。优化的目的就是产生一个流速适中、方向明确、紊乱度小的吸引流，使它能够从背景流场中脱颖而出，平顺地连接到鱼道内部。另外入口处的流速不能过大，流速过大的地方容易引起鱼类的生理应激，还会形成水力屏障，使鱼类不愿意进入。

（二）池式鱼道内部流场结构优化

池式鱼道是应用最广泛的一种过鱼设施，内部由许多互相连通的池室组成，逐级消能，给鱼类提供一条流速可控的阶梯。鱼道内部流场的优化目标就是实现“通达”与“休憩”的平衡，主流区水流要能够有效地引导鱼类上溯，池室内必须有足够的低速区，供鱼类奋力穿过隔板后恢复体力。

传统的池式鱼道设计大多依靠经验公式和物理模型试验，很难完全体现池内复杂的紊流状况。现代设计利用 CFD 数值模拟技术，可以对隔板开孔形式、尺寸、位置、池室几何形状做精确的参数优化。其核心就是调节池内能量耗散率以及紊动能分布。理想的池内流场应具有如下特点

1. 过鱼主流清晰，即连接上下游池室的孔口或堰口处形成的主流股，其最大流速不应大于目标鱼种的冲刺泳速，保证鱼类能顺利通过。

2. 充足的休息区：在主流股两侧和池室角落处应形成稳定的低流速区或者回流区，其流速应小于鱼类的巡游速度，供鱼类休息。

3. 防止有害流态：不能形成大面积强旋涡，旋涡会使得鱼儿失去方向，耗尽体力，严重时会造成鱼儿撞击。改善隔板倒角、设置导流墩等可以改善池内流态，提高过鱼的舒适度和成功率。

（三）仿自然通道的水力连通性设计

仿自然通道，如乱石坡鱼道、近自然形态的旁通河道，是近几年来生态修复领域所提倡的一种过鱼方式。它摒弃了传统鱼道的人工化构造，力求在工程影响区域复原一段类似天然溪流的河道，用多样化的水力条件和生态环境服务更广泛的水生生物群落，而不只是游泳能力较强的少数鱼类。

仿自然通道设计的主要难题，在于怎样在短距离、大高差的条件下，创造出既可以消能又可以保持水力连通性的河道环境。这就要求设计者对天然河流中“深潭-浅滩”序列的水力学机理有深刻的认识。通过巧妙布置大小不同的石块或者人工构件可以形成一系列的跌水、湍流区以及缓流区。深潭区域水深、流速小，是鱼类理想的休息地；浅滩区水流急、水深浅，是鱼类快速通过的区域。整个通道在设计过鱼流量范围内，从入口到出口必须有一条水深、流速均能满足最弱过鱼物种通行的连续通道。二维水力学模型是实现这一目标的重要工具，对河道糙率、基质排布、微地形进行反复调整、模拟，可以预测出不同流量下水流路径和水力条件的变化，保证通道在各种水文条件下都能起到生态连通的作用。

三、水库分层取水与水温调控

大型水库建成以后，由于水体的体积巨大，热力学性质也随之发生变化，在春夏季节经常出现稳定的热分层现象。传统水电站多采用底层取水方式，使下泄水温远低于天然河流水温，造成所谓的冷水病，严重影响下游水生生物的生长、发育和繁殖，改变水生态系统结构。

（一）水库水温分层结构预测模型

有效实施水温调节的前提，就是对水库水温的垂直分层状况以及季节性变化规律做出准确的预估。水库水温分布受到太阳辐射、气象条件、入库水温、出库流量、水力交换等诸多因素的综合影响。因此发展并应用水库水温预测模型就显得尤为重要。

目前应用最广的模型分为一维模型和多维模型。一维模型 DYRESM 模型将水库简化为一系列水平层，只考虑垂直方向的热量交换和输移，计算效率高，能

很好地模拟大型深水水库在风和密度驱动下的垂向混合过程，非常适合进行长期预测。对形态复杂、支库众多的水库来说，二维或者三维水动力和水温耦合模型更加合适。可以详细地刻画出库区内部由于地形、水流等因素所引起的复杂环流和局部温差，给出更详细的时间和空间水温场分布信息，给取水口的精细化操作提供决策支持。这些模型成为水温影响评价及调控措施设计的数字化标准。

（二）选择性取水建筑物对下泄水温的影响

选择性取水是解决低温水问题的最直接、最有效的工程措施。主要是在取水建筑物上布置不同高程的取水口。控制不同高程取水口闸门的开启组合，可以抽取水库表层、中层或者底层的水、适温水或者冷水，或者将不同层次的水按比例混合，从而调配出最接近天然河道同期水温的下泄水流。

选择性取水建筑物的设计和运行，很大程度上要依靠前面提到的水温预测模型以及详细的水力学模拟。设计阶段根据水库多年水温分层模拟结果，确定取水口垂直布置间距和高程范围，保证运行期间不管分层结构怎样变化，都能取得所需要的水体。运行期调度人员根据水温模型短期预测结果，按照下游生态目标来确定最佳的闸门开启方案。利用 CFD 模型来模拟取水口附近的三维流场和水流掺混过程，可以准确地算出不同闸门组合的出水温度，从而达到对下泄水温精确控制的目的。

表 2-4 水库水温调控方法对比表

调控方法	原理	优点	缺点	适用场景
选择性取水	多层取水口抽取 / 混合不同温度水体	精准调控下泄水温；主动性强	需新建取水设施；工程造价高	新建水库；或改造具有条件的老水库
表层 / 幕式取水	强制深层冷水不进入取水口，抽取表层温水	改造简单；效果较好	对水库热分层依赖性强；不适用于所有工况	已建成无分层取水条件的水库
增温池 / 调温塘	利用太阳辐射和空气热交换提高水温	技术简单；生态效益显著	占地面积大；增温效率受天气影响	对下游水温要求高、低温水影响显著的区域

如上表所示，不同水温调控方法各具特点与适用性，其选择需综合考量工程实际。

（三）减缓低温水下泄的工程措施

对已建成、不具备分层取水条件或者分层取水效果仍不理想的，应采取其他辅助工程措施来减缓低温水的影响。这些措施的核心思想就是对水体下泄前或者下泄后进行人工增温。

常用的一种做法是建立表层取水的浮式或幕式取水设施。在常规深式取水口前设置柔性隔水幕，顶部设在水面之上，底部悬浮于温跃层之上。隔水屏障可以有效地隔开深层的冷水，使取水口抽到上层温水。另一种办法就是在大坝下游设增温池或者调温塘。具体操作就是将水库下泄的冷水先排入面积较大、水深较浅的池塘中，利用太阳辐射和空气热交换使它自然升温，达到适宜的温度后再排入下游河道。增温池的设计要经过传热学计算来确定合适的水面面积和停留时间。虽然会增加工程投资，但是对于保护下游珍稀水生生物及其栖息地而言，它有非常大的生态意义与现实意义。

第三章 水工结构设计理论创新

由于水利水电工程向高、大、复杂方向发展，传统理论设计及结构体系就面临了严峻的挑战。本章主要研究近几年出现的新型水工结构体系，对它的设计理论创新做深入的阐述，为以后工程建设提供理论依据和实践指导。

第一节 新型水工结构体系研究

为了全面提高水工结构的经济性、安全性、环境友好性，工程界和学术界一起研发、推广各种新型结构体系。这些新体系依靠改善材料性能、革新结构形式、改良施工工艺等方式，显示出巨大的发展潜能，正在慢慢改变现代水利水电工程的设计格局。新型水工结构体系的特点和优势如下表所示。

表 3-1 新型水工结构体系特点对比表

结构类型	核心特点	主要优势
胶凝砂砾石坝	天然砂砾石与少量胶凝材料胶结	材料成本低、水化热低、施工便捷
堆石混凝土坝	大块石骨架、自密实混凝土填充	节约水泥、降低温升、快速施工、整体性好
土工合成材料加筋结构	筋材在土体中引入抗拉性能	提高土体强度、控制变形、稳定性好

一、胶凝砂砾石坝设计理论

胶凝砂砾石坝是介于土石坝和混凝土坝之间的一种新型坝型，用少量胶凝材料将天然砂砾石胶结成整体，具有材料成本低、水化热低、施工方便等优点，其设计理论的完善对于推广应用十分重要。

（一）材料力学性能与本构模型研究

胶凝砂砾石是由粗骨料、细骨料、胶凝材料和水拌合而成的复合材料，其力学性能与常规混凝土、岩土材料有明显的不同。胶凝砂砾石的强度、变形特性受

胶凝材料用量、水胶比、龄期等的影响，同时也与砂率、骨料级配、密实度有关。一般来说，胶凝材料用量增加以及龄期增大，抗压强度和弹性模量都会随之增大；砂率存在一个最佳值，砂率过高反而会使得材料整体强度降低。

深入认识胶凝砂砾石材料的力学性能，关键之处在于创建能正确体现其应力-应变联系的本构模型。由于该材料具有胶结和摩擦两种力学机制，表现出应变软化、剪胀、非线性变形等复杂的力学特性，单一的线弹性模型或者理想弹塑性模型都不适用。目前研究者多采用非线性有限元法进行分析，所用本构关系有摩尔-库仑软化模型、弹塑性损伤模型、考虑应变软化和剪胀特性的双重屈服面模型等。这些模型能更好的体现材料在不同的应力路径下真实的反应，也能更准确的模拟大坝渐进破坏的过程以及长期性能的变化，给结构设计精细化分析提供必要的工具。用循环三轴动力剪切试验等方法，可以建立动力损伤本构模型，为大坝抗震设计和安全评价奠定基础。

（二）结构应力与稳定性的分析方法

胶凝砂砾石坝结构分析一般采用大型有限元软件进行，用数值模拟来评价坝体在自重、水压力、温度荷载、地震作用下的应力分布、变形规律和整体稳定性。坝体与地基的相互作用是分析中的一个关键问题，特别是地基为复杂岩土体或者砂砾石层的时候，需要精细模拟地基的非线性行为和接触面特性。根据研究结果可知，坝踵、坝趾处应力集中，在蓄水及超载工况下，坝踵附近会出现拉应力或者损伤区域。

传统的重力坝刚体极限平衡法仍被广泛地应用于初步校核坝体的抗滑、抗倾覆稳定性。计算时要考虑好胶凝砂砾石材料的抗剪强度参数，对坝基面、坝体各高度上的施工层面进行验算，判定出潜在滑动面的安全系数。对于高坝或者复杂的地基条件，则需要采用非线性有限元法做更深层次的深层抗滑稳定分析。这有利于对大坝从正常工作状态到极限荷载的整个过程进行模拟，发现潜在的滑移通道以及破坏模式，从而对大坝整体安全做出更加全面的评价，保证设计留有足够的安全余量。

（三）断面优化与经济性评价

胶凝砂砾石坝断面设计直接关系到工程投资和结构安全。和传统混凝土重力坝相比，因为胶凝砂砾石材料的抗拉强度较低，一般要采用比较平缓的坝坡来保证坝体稳定。断面优化的目的是在满足规范所要求的应力、稳定、变形要求的前

提下,找到工程量最小、综合造价最低的坝体剖面形式。优化时要综合考虑坝高、坝坡系数、坝顶宽度、上游是否设防渗面板等各方面因素。

经济性是胶凝砂砾石坝最突出的优点。经济性主要表现在以下几点:大量使用天然或者开挖的砂砾石材料,水泥、优质骨料用量大幅度减少,材料成本大幅度降低。胶凝砂砾石材料水化热低,温控措施简单,减少了冷却通水等复杂工艺,施工周期得以缩短。施工方式与碾压混凝土类似,可以使用大型机械连续作业,施工效率高。在评价其经济性的时候,要同常规混凝土坝、堆石坝等方案展开全方位的技术经济比较,考虑材料、施工、温控、后期维护等全生命周期成本,给坝型选择提供科学依据。

二、堆石混凝土坝设计理论

堆石混凝土坝是将大尺寸块石预先放置在仓内,再用流动性较高的自密实混凝土填充其间隙,从而形成的一种新型大体积混凝土坝。它充分发挥了块石骨架的支撑作用,节约水泥、降低温升、快速施工,设计理论随着工程实践的增多而日趋完善。

(一) 堆石混凝土的充填密实性与强度

堆石混凝土质量好坏主要看自密实混凝土对堆石体空隙的填充效果。充填密实度受自密实混凝土的流动性、抗离析性、块石级配、空隙率等因素影响。根据理论研究及室内试验可知,为了达到有效的填充,自密实混凝土应具有高流动性和一定的黏聚性,保证浆体可以顺利通过狭小的孔隙而不产生离析堵塞。块石粒径及堆放方式决定了空隙大小和连通性,进而影响填实的难易程度。浇筑密实性的研究属于质量控制的理论基础,改善混凝土配合比以及块石级配,可以有效地保证堆石混凝土内部结构的均匀致密性。

堆石混凝土属于复合材料,强度特性为块石和自密实混凝土共同作用。大量的块石构成主要的传力骨架,自密实混凝土起胶结、传递应力的作用。通过试验研究可知,堆石混凝土的抗压强度与自密实混凝土的强度等级、块石含量、强度、界面过渡区等因素有关。堆石混凝土受压时,应力应变曲线常呈现多峰,说明它具有良好的韧性、变形能力。设计强度一般用自密实混凝土的强度等级来代表,但是必须通过大尺寸试件试验进行验证,才能准确地评价非均质复合材料的整体力学性能。

（二）大坝整体工作性态与安全评价

堆石混凝土坝的整体工作性态和常规混凝土坝相似，但因其材料和施工特点而有不同。由于内部掺入大量的块石，堆石混凝土的水化热比普通混凝土小得多，温升小，温度应力也小。因此堆石混凝土坝可以采用更大的浇筑块、更长的坝段甚至取消传统的横向分缝来提高大坝的整体性。根据已建工程的监测数据可知大坝在蓄水和运行期间变形、应力都在设计允许范围内，工作状态良好。

安全评价是堆石混凝土坝设计的主要工作。评价内容主要是坝体应力分析、抗滑稳定分析、抗震性能分析等。进行应力分析时要考虑温度应力、自生体积变形、堆石骨架效应的影响。稳定性分析可以采用常规重力坝或者拱坝的设计方法，但必须考虑堆石混凝土材料参数的特殊性。对高坝或者复杂地质条件应做专门的仿真分析及模型试验，保证设计方案的可靠性。已有工程实践表明，堆石混凝土坝工作性能好、安全系数大，在中小型水利工程中已经成功地用取消横缝、纵缝、上游防渗层的简化结构来设计。

（三）快速施工技术对结构设计的影响

快速施工是堆石混凝土技术最突出的优点，它深深地影响着大坝结构的设计思想。传统的混凝土坝施工工序繁杂，包括模板架设、钢筋绑扎、混凝土浇筑和振捣、养护和温控等，施工强度大，工期长。利用预置堆石、自密实混凝土浇筑的方式大大简化了施工流程，实现了连续高效的作业。该种施工方式可以实现大面积、厚层化浇筑，大大提高了施工效率，缩短了工期。

快速施工技术给结构设计带来了许多影响。由于施工速度快，坝体会在短时间内迅速增高，设计时要充分考虑施工期荷载和坝体自重快速累积效应。由于低水化热的特点，温控防裂措施变得简单，在设计中可以大胆地取消或者减少收缩缝、诱导缝，从而提高结构整体性，减少渗漏隐患。拱坝设计时可以研究取消传统分缝、封拱灌浆的整体浇筑技术。对廊道、孔口等复杂的部位，结构设计要和快速施工工艺相匹配，采取预制构件或者同步浇筑技术，避免局部工序变成整体施工的瓶颈。

三、土工合成材料加筋结构

土工合成材料，即土工布、土工格栅等，在土体中引入抗拉性能，改善土体力学性质，形成加筋土复合体。该技术被广泛地用在挡土墙、边坡加固等地方，

设计理论主要是筋土相互作用、结构稳定性和长期性能。

（一）加筋机理与界面相互作用研究

土工合成材料加筋的机理是筋材和土体之间界面作用，把土体中的拉应力传递给筋材，利用筋材良好的抗拉性能来弥补土体抗拉能力不足的缺陷。有效地控制土体侧向变形，提高了土体整体强度和稳定性。界面相互作用主要是摩擦作用和嵌锁作用。纤维或者筋材表面与土颗粒之间的主要力学机制就是粘结和摩擦。

筋土界面作用的研究是加筋土结构设计的基础。

1. 摩擦作用，当土体产生变形趋势的时候，土颗粒在筋材表面产生相对滑动的趋势，从而产生摩擦力。摩擦力的大小受土体法向应力、土体和筋材之间的摩擦系数、筋材表面粗糙度等因素的影响。

2. 嵌锁作用对于土工格栅等网格状筋材，土颗粒可以嵌入网孔中，当发生相对位移时，网格的横向肋直接承受土体的压力，形成强大的被动土压力，即产生嵌锁作用。该作用产生的抗拔力一般大于摩擦作用。

一般用室内直剪试验和拉拔试验定量分析界面作用特性，得到界面摩擦角、粘聚力等参数，为加筋结构内部稳定性计算提供科学依据。从微观上利用扫描电子显微镜等手段观察纤维在土中分布的形态、与土颗粒的接触状况，可以进一步认识筋土相互作用的微观机理。

（二）加筋土挡墙和边坡的设计方法

加筋土挡土墙、边坡设计一般分为内部稳定和外部稳定两大类。该设计方法把加筋土体当作一个拟重力式结构，行为和传统重力式挡墙相似。

内部稳定性分析，即保证加筋区本身不发生破坏。这包含验算筋材抗拉拔的能力，保证筋材锚固长度满足要求，不被土体拔出；同时验算筋材抗拉断能力，保证筋材承受土压力时拉伸应力不大于其长期允许抗拉强度。计算时，应根据土压力理论求出筋材所受的拉力，同时还要考虑荷载、筋材间距等因素。

外部稳定性分析就是将整个加筋土区域作为一个刚性整体，检验它抵抗外部破坏的能力。主要包含三部分，地基承载力验算，保证加筋土结构物的自重和附加荷载不超过地基承载力；抗滑移稳定性验算，防止结构物沿基底发生滑动；抗倾覆稳定性验算，防止结构物绕墙趾发生倾覆。对于建在山坡上的加筋结构还需要进行整体滑动稳定性验算。设计时要合理选用填料，设置完善的排水设施，保证结构的长期稳定。

（三）长期蠕变与耐久性性能分析

土工合成材料为高分子聚合物，在持续荷载的作用下会产生时变性，即会产生蠕变变形。长期蠕变会降低加筋土结构的长期安全性和使用功能，造成筋材应力松弛、加筋区域变形增大，严重时还会造成结构失稳。因此设计时必须充分考虑蠕变效应，筋材的抗拉强度指标应取极限强度的折减值，折减系数要通过长期蠕变试验来确定。蠕变试验是用不同的恒定荷载作用于材料，并观察数千小时内其应变的发展规律，以此来预测材料在设计寿命期内会发生怎样的变形和强度下降。

耐久性就是土工合成材料在工程使用年限内，抵抗各种环境因素（紫外线、高低温、化学腐蚀、生物降解等）的影响，保持其性能稳定的能力。这些环境因素会使材料老化、降解，造成材料物理力学性能下降，减弱加筋效果，影响工程安全。耐久性评价一般用室内加速老化试验和现场暴露试验。设计时根据工程环境、材料种类等确定耐久性折减系数，也可通过增加保护层、选用抗老化性能好的材料等措施提高结构耐久性。对蠕变、耐久性做进一步研究，是使加筋土结构由短期稳定向长期安全过渡的重要途径。

第二节 高坝结构安全评价理论

一、高坝抗震动力分析

高坝工程的抗震安全属于其整体安全评价的重要部分，在高烈度地震区尤其如此。设计理论已经由最初的静力法、反应谱法，发展到现在更加精细的动力时程分析法。数字化仿真技术可以对大坝在复杂的地震作用下，动力响应、损伤破坏过程做更细的模拟。

（一）复杂地震动场的输入与模拟

高坝等大型结构在地震作用下，由于坝基覆盖范围大，地震动具有空间变异性，传统单点一致激励假设已经不能满足精细化分析的要求。考虑地震动空间变异性、复杂地震动场模拟，正在成为高坝抗震分析理论创新的前沿课题。变异性主要表现为行波效应、相干效应和场地效应，这些效应会造成坝体不同部位的输入地震动在幅值、频谱、相位上存在明显的差别。如果忽略这些差异，就会低估

大坝的扭转反应和局部应力集中，从而危及结构安全。

为了模拟复杂的地震场，数字化技术起着关键的作用。根据随机振动理论以及地震学模型，已经发展出了多种人工地震动合成的方法。其中，谱表示法、时域递推法等能够生成满足特定目标谱并考虑空间相关性的多点地震动时程。用空间相干函数模型来定量表征不同点间地震动相关性的衰减规律。所产生的虚拟地震动场可作为有限元等数值模型的输入边界条件，给高坝空间变异性地震动下的实际动力响应奠定更好的基础。

（二）坝体－库水－地基系统动力相互作用

高坝在地震中动力响应不是孤立的坝体振动，而是由坝体、库水、地基三者耦合、共同作用而产生的，其动力相互作用机理十分复杂。坝体振动会产生库水动水压力，反作用于坝体，改变坝体的自振特性，增大动力响应；坝体振动能量会向无限地基辐射耗散，形成辐射阻尼；地基的柔性也会对上部结构的动力行为产生影响。正确地考虑这些复杂的耦合效应，就是高坝抗震分析的重要方面。

数字化数值模拟是对耦合问题进行解决的主要途径。目前主流的分析方法为有限元-边界元法或者纯有限元法。对坝体和近场地基一般用有限元法离散，可方便地处理复杂的几何形状和非线性材料性质。对库水、远场地基这两个无限或者半无限域，可以采用边界元法精确模拟辐射阻尼效应，也可以在有限元框架内，通过透射边界、黏弹性边界等人工边界条件进行近似模拟。对于流固耦合问题，除了经典的附加质量法之外，用声学波动方程直接耦合流体单元和结构单元的分析方法，可以更加真实的反映动水压力的频率依赖性和分布规律，从而大大提高高坝抗震动力分析的精度。

（三）混凝土损伤开裂模型的非线性分析

强震下高坝混凝土材料不可避免地要进入非线性工作状态，从而产生损伤累积和宏观开裂。传统的线弹性分析不能反映出材料的非线性行为，会高估坝体的承载能力，不能真实的反映坝体的损伤发展过程和潜在的破坏模式。因此采用能够模拟混凝土开裂过程的非线性本构模型进行分析，就是高坝抗震安全性评价理论的一个重大突破。

混凝土的非线性行为十分复杂，它包括受拉开裂、受压屈服、刚度退化、滞回耗能等。为了描述这些行为，学术界发展了许多本构模型，其中弥散裂缝模型和连续介质损伤力学模型在工程上应用最广。尤其是混凝土塑性损伤模型，它用

两个独立的损伤变量来分别描述材料在拉伸和压缩下刚度的退化，并用塑性理论来刻画材料的不可恢复变形。该模型能较好地模拟混凝土在循环荷载下刚度恢复和能量耗散的特性。

将此类高级本构模型嵌入有限元软件中，采用增量迭代算法求解非线性动力方程，就可以得到高坝在强震作用下，从微裂纹萌生、扩展到宏观裂缝形成的全过程动态仿真。分析结果可以给出应力、应变等常规信息，也可以直接显示出坝体内部损伤分布云图、裂缝开展路径，为大坝震后损伤状态的评价、判断大坝是否达到预期性能目标、制定加固修复方案提供重要的依据。

二、高坝温度应力与温控防裂

温度荷载是大体积混凝土坝，尤其是高拱坝安全的重要影响因素之一。混凝土水化热和温度变化引起的温度变形受到约束时，会产生巨大的温度应力。当这些应力大于混凝土抗拉强度的时候，就会使坝体开裂，从而给工程带来长期的危害。因此准确预测温度场和温度应力，采取有效的温控措施就是设计的主要任务。

（一）大体积混凝土水化热温度场仿真

大体积混凝土浇筑之后，水泥水化反应会释放大量的热量，使内部温度迅速升高，而表面散热较快，造成内外温差。温差造成早期裂缝。准确预测施工期间混凝土内部温度变化的过程，是进行温度应力分析和制定温控方案的前提。这就需要建立能够细致刻画出热量产生、传递过程的数学物理模型。

数字化仿真技术是达到该目的的主要方法。求解带有内热源的非稳态热传导方程，就可以模拟混凝土从浇筑到运行期全过程温度场的变化。在有限元模型中要正确地给出各种热边界条件，即与空气的对流换热、太阳辐射吸收、水体或基岩的导热等。模型的关键在于正确反映水泥水化放热的过程。现代仿真技术从最初的简单绝热温升曲线法，发展到以水化度为基础的精细模型，可以将水化放热速率与混凝土的龄期、温度、水泥种类、掺合料等多种因素联系起来，使温度场仿真精度得到大幅度提高。该仿真不仅可以预测出最大温升，还可以模拟整个浇筑过程中温度随时间和空间的变化情况，为后面应力分析提供可靠的输入。

（二）温度应力与徐变的耦合分析

温度变化本身不会直接产生应力，只有当温度变形受到约束的时候才会产生。高坝的约束主要是由两个方面引起的，一是外部约束，即地基对坝体变形的约束；

二是内部约束，即坝体内部各点之间由于温差不均而产生的相互约束。计算温度应力必须在准确的温度场基础上，考虑混凝土复杂的力学行为，尤其是混凝土随时间变化的徐变特性。

混凝土属于黏弹性材料，在长期荷载作用下会发生徐变，也就是持续变形。徐变对温度应力有明显的松弛作用，可降低应力峰值，对防裂有利。如果忽略徐变，则会造成温度应力估计值偏高，进而得出过于保守甚至错误的设计结论。因此，温度应力分析时要考虑温度场、应力场和徐变场的耦合作用。在结构分析模型中，需要使用能反映混凝土弹性、徐变、收缩、热膨胀等各个变形分量的时变本构关系。常用的徐变模型有龄期调整有效模量法、基于积分形式的遗传时效理论等。数字化计算把施工和运行期间划分成若干时间步，在每一个时间步内进行增量计算并逐次叠加，得到考虑了全部加载历史和徐变效应的应力场演化全过程，为裂缝风险评估打下了坚实的基础。

（三）智能温控与防裂措施优化

为了保证混凝土的温度和温度应力在安全范围之内，高坝施工一般会采取综合温控措施，这是一项复杂的系统工程。传统的温控方案设计大多依靠工程经验与简化计算，不能实现全局最优。伴随着数字化技术以及智能算法的发展，温控防裂措施的优化设计和智能控制变得可行，是温控防裂领域技术创新的重要方向。

智能温控的核心思想就是把精细化的温度场、应力场仿真模型当作数字孪生体，用优化算法对各种温控措施进行寻优组合。常见的温控措施见下表：

表 3-2 常见高坝温控措施

温控措施类型	具体方法	目的与效果
材料优选	选择低热或中热水泥，掺加粉煤灰等掺合料	降低混凝土总水化热，减少热量峰值
预冷措施	对骨料进行风冷或水冷，拌合时加冰	降低混凝土出机口温度，减少初期温升
通水冷却	在坝体内预埋冷却水管，循环通水	强制带走水化热，控制内部温度
表面处理	表面保温保湿处理	减小内外温差及表层温度梯度，防止干缩裂缝

它们是建立以不开裂为约束条件、以总成本最低或者工期最短为目标函数的优化模型，用遗传算法、模拟退火等智能寻优工具，在大量的方案组合中自动搜索出最优的温控参数，即浇筑温度、冷却水管的通水流量和时间等。进一步地，

根据施工现场温度传感器的实时监测数据，用数据同化技术不断修正仿真模型，实现温控措施的动态调整和闭环控制，从而达到精准、高效、经济的防裂目的。

三、高坝深层抗滑稳定分析

高坝的稳定不单是坝体本身的强度决定的，更重要的是建基岩体的稳定。尤其在地质条件复杂的峡谷地带，如果存在深层的软弱结构面或者断层破碎带，就会形成一个规模巨大的潜在滑动体，对大坝造成致命的威胁。因此高坝深层抗滑稳定性的精细化认识与评价，就是保证工程安全的基础。

（一）复杂岩体结构面的力学特性

天然岩体不是均质连续体，其内部有节理、裂隙、层面、断层等各种地质不连续面。这些结构面是岩体的软肋，力学性质直接控制整个岩体的强度、变形及稳定性。在深层抗滑稳定分析中，首先要对这些关键结构面的力学性质，尤其是抗剪强度做出正确的认识和表述。传统的莫尔库仑准则虽然方便，但是用黏聚力和内摩擦角两个参数来表征抗剪强度，不能很好地反映结构面粗糙度、法向应力、风化程度等因素的影响。

理论创新表现为提出了更加精细的非线性强度准则，巴顿 - 班迪斯准则和霍克 - 布朗准则。巴顿模型考虑了节理粗糙度系数、节理壁抗压强度、基本摩擦角，可以较好地反映粗糙结构面剪切过程中剪胀效应、法向应力对抗剪强度的非线性影响。数字化勘察技术，例如三维激光扫描和数字摄影测量等，可以快速得到结构面的几何形态信息。把先进的强度准则和细致的几何信息应用到稳定性分析中，可以明显提高岩体力学行为预测的准确性。

（二）三维极限平衡与有限元强度折减法

传统的抗滑稳定分析大多采用二维极限平衡法，此方法需要先假定滑动面的形状、位置，再通过力或者力矩的平衡来求取安全系数。复杂的三维滑动体在二维简化时，产生的误差会很大。虽然三维极限平衡法有所改进，但是它仍然受到静力平衡假设的限制，不能考虑岩体的应力应变关系以及破坏过程。

有限元强度折减法属于高坝稳定分析领域的一项革新。不需要事先确定滑动面，在坝基岩体上进行整个范围内的弹塑性有限元分析来实现的。其基本思想就是对岩土材料的抗剪强度参数（黏聚力 c 和内摩擦角 $\tan \phi$ ）同时进行折减。折减系数 F 从 1 开始逐渐增大，对每一个折减后的参数做一次完整的有限元计算。

当折减系数增大到某个临界值,使结构系统达到极限平衡状态,即数值计算不能收敛的时候,此时的临界折减系数就叫做安全系数。强度折减法的优点是能自动找到系统中危险最大的潜在滑动面,一般表现为塑性应变或者剪应变连续区;分析过程中考虑了岩体的非线性本构关系,结果更加真实可靠;并且可以自然地处理复杂的三维地质结构和不规则边界。该法已经成为复杂条件下高坝深层抗滑稳定评价的主流及标准方法。

(三) 加固措施对稳定性的贡献评价

当坝基岩体的天然稳定性不够时,就要进行人工加固。常见的加固方式有置换混凝土、固结灌浆、抗滑桩、锚索、锚杆等。如何定量评价加固措施对整个结构安全系数的提高效果,就是加固设计中的关键问题。传统的计算方法一般依靠经验公式或者大幅度简化,不能进行精确的评估。

现代的数字化分析技术给评估提供强有力的手段。采用有限元强度折减法框架,可以对各种加固措施做详细的仿真分析。锚索或者锚杆可以模拟成施加预应力的杆单元或者索单元,其与岩体的相互作用可以用接触单元来表示;抗滑桩可以作为梁单元或者实体单元嵌入到岩体模型中;混凝土置换和灌浆区域则可以赋予其更高的材料强度参数来模拟。用加固前后的系统安全系数来评价各种加固措施的效果。进一步用数值模型做参数化分析,可以优化锚索长度、角度、预应力大小或者优化抗滑桩的布局、尺寸,以达到最小工程代价获得最大稳定性提升的目的,从而实现加固设计的科学化、精细化。

第三节 地下洞室围岩稳定性分析

水利水电工程中的地下洞室,引水隧洞、地下厂房、交通洞等,其围岩稳定是工程安全运行的重要保证。随着工程深入到深部、复杂地质条件中去,高地应力、大跨度、洞室群互相影响的问题越来越突出,给围岩稳定性分析的理论和技术提出了更高的要求。

一、深埋洞室高地应力岩爆预测

深埋洞室的开挖扰乱了岩体原有的地应力平衡,使得洞壁围岩应力高度集中。当局部应力大于岩石的强度时,积累的弹性应变能就会突然释放,引起岩爆灾害,

给施工人员、设备带来严重的危害。

（一）岩爆倾向性评价指标与分级

岩爆倾向性评价主要是对岩体发生岩爆的可能进行静态评估，是岩爆预测的基础。传统的评价指标主要是岩石力学性质、应力状态。应力强度比，也就是洞壁最大切向应力和岩石单轴抗压强度的比值，直接体现岩体受力状况是否接近临界破坏。脆性指标用岩石单轴抗压强度和抗拉强度的比值，或者弹性应变能指数来表征岩石储存和释放能量的能力。脆性越大、储能能力越强的岩石，在应力集中时就越容易发生剧烈的能量释放。

随着研究的深入，单一指标的局限性也逐渐暴露出来，多指标综合评价方法已经成为主流。使用模糊数学、灰色系统理论、神经网络等数字化技术，把地质构造、岩体完整性、地下水、开挖方式等影响岩爆的因素统一到一个评价体系里。通过建立非线性映射关系、给不同的因素赋予相应的权重，最后得出一个综合的岩爆烈度分级指数。分级系统一般由无岩爆、轻度岩爆、中度岩爆、强岩爆（冲击）四等组成。这就使设计阶段的支护方案选择、施工阶段的风险预警有了更加科学、可靠的依据，实现了由定性描述向定量分析的飞跃。

（二）微震监测技术与岩爆源定位

微震监测是一种可以实时、动态监测岩体内部微小破裂事件的先进地球物理技术，被形象地称为岩体稳定的“听诊器”。岩爆孕育过程中，岩体内部应力集中区域会产生微裂纹萌生、扩展、贯通的过程，这个过程会以弹性波的形式释放能量。在洞室周围布设高灵敏度的微震传感器阵列，就可获得这些微弱的地震信号。

获取微震信号之后，核心工作就是对岩爆源进行精确定位。一般用不同传感器接收到的同一个微震事件信号到达时间差来确定。通过对 P 波、S 波走时数据进行分析，结合已知的波速模型，采用 Geiger 算法、最小二乘法或者更先进的联合反演算法，可以反演出微震事件发生的位置（三维坐标）、时间、震级。随着数字技术的发展，定位精度、效率都有了很大提升，可以实现分钟级到秒级的实时定位。

对大量的微震事件的时空分布特征、能量释放规律、震源机制进行分析，可以反映岩体内部应力场的变化、潜在破坏面的发展趋势。微震事件在空间上聚集的区域，一般就表示应力集中区或者结构弱面的活化区，也就是未来可能发生强

岩爆的危险区域。微震活动频率突然增加或者“平静期”出现，往往是岩爆将要发生的一种有效的前兆。因此，微震监测既是预测的手段又是预警的工具，为局部卸压、加强支护等主动干预措施提供时间窗口。

（三）基于能量理论的岩爆判据

岩爆本质上是能量驱动的失稳现象，所以基于能量守恒原理建立的判据更能反映它的物理机理。该理论认为开挖洞室后围岩储存的弹性应变可以得到释放。这部分能量一部分消耗在岩石破裂和塑性变形上，另一部分以动能在岩石碎块抛射中表现出来。当系统释放的总能量大于它所耗散的能量时，剩余的能量就会引起动力破坏，即岩爆。

因此发展出了多种能量判据。以“局部能量释放率”判据为例，数值模拟计算开挖过程中单位面积或者单位体积岩体释放的弹性能，当该值超过某一临界值时，就预示着岩爆风险。能量冲击指数又考虑了能量释放速率和岩体吸能能力。这些判据的优点就是物理意义明确，容易量化。利用有限元、离散元等数值计算方法与之结合，可以模拟开挖全过程能量场的演化过程，对洞室各个部位以及施工不同阶段的岩爆危险性进行精细化评价，给设计和施工优化提供理论依据。数字化模型可以模拟复杂的地质条件以及开挖过程，使能量分析的结果更贴近工程实际，从而提高预测结果的可信度。

二、大型地下洞室群施工期稳定性

水利水电枢纽中的地下厂房、变压器室、引水洞等通常是以洞室群的形式集中布置。洞室间距小，开挖过程中互相影响大，稳定性控制比单洞室复杂得多，所以必须对施工组织进行系统的优化。

（一）开挖顺序与支护时机的优化

大型地下洞室群开挖顺序直接影响围岩应力路径及围岩最终应力分布，是控制围岩稳定性的关键。不合理的开挖顺序会造成某个地方的应力过于集中，或者引起洞室之间不利的应力传递，从而造成大面积松动变形甚至失稳。优化的主要思想就是实现时空协调，在时间与空间两个方面合理安排各个洞室、各部分的开挖，使开挖的扰动最小化，并充分利用岩体的自承载能力。常用的原则有“先大后小”、“先上后下”、“分层开挖”、“预留核心土”等，一般先开挖对整体应力场起决定作用的大洞室，并采取措施使应力平稳转移。

数字化仿真技术对于开挖顺序的优化有着十分重要的意义。通过建立精细化的三维地质模型,用数值模拟软件(FLAC3D、ANSYS等)对各种备选开挖方案进行模拟,可以:

1. 模拟各种方案下洞室交叉口、洞肩、边墙等部位的应力集中系数、塑性区范围、变形量。

2. 对比分析各方案的优劣,从而筛选出最优或较优的施工顺序。

支护时机的选择也十分重要,它遵循随挖随支、柔性支护、信息反馈的原则。过早的刚性支护会承受过大的围岩压力,而过晚支护又不能很好地控制围岩的初始变形。现代设计理念讲究支护和围岩的配合,初期使用柔性支护(喷锚网)允许围岩产生一定的变形,放出一部分应力。待围岩变形速率趋于稳定之后,再进行二次衬砌施工,形成永久支护。整个过程要依靠现场监测数据来实现动态反馈和调整,以达到信息化施工的目的。

(二) 围岩变形时空演化规律分析

洞室群开挖属于动态过程,它所造成的围岩变形在时间和空间上都表现出非常复杂的演化规律。空间上变形主要集中在开挖临空面附近,然后逐渐向岩体深处衰减,形成松动圈或者塑性区。洞室群中相邻洞室的变形场会互相叠加,使洞室间岩柱的变形、应力状态变得十分复杂,是稳定性分析的重点。变形分布形态受地质构造、地应力、开挖形状等影响较大,一般是不对称、不均匀的。

就时间而言,围岩变形具有瞬时性、流变性和长期性。开挖瞬间会发生快速的弹性、塑性变形,之后在应力的作用下岩体会产生蠕变等时效性流变变形。该过程历时几个月或者几年后才稳定下来。掌握变形的时空演变规律,对评价围岩稳定性、检验支护效果、预测长期安全起着非常重要的作用。需要建立一个覆盖施工全过程的、三维的自动化监测网络,用多点位移计、收敛计、测缝计等传感器和三维激光扫描、合成孔径雷达等非接触测量技术获取大量的变形数据。经过数据处理和可视化分析之后,变形场随时间和空间的变化情况就一目了然了,可以找到关键变形区,检验数值模拟结果,为支护参数动态调整提供决策依据。

(三) 块体理论在危岩体识别中的应用

对于节理裂隙发育的硬质岩体,其失稳模式一般是由结构面控制的,表现为某块岩石块体的滑移、倾倒或掉落,而不是整个岩体的塑性流动。块体理论可以用来分析结构控制型失稳。把围岩看作由许多结构面切割的块体集合,其主要任

务就是识别出那些在开挖后失去支撑、仅靠自身和周围块体间的摩擦力、黏聚力维持平衡的“关键块体”，对这些块体的稳定性进行评价。

传统的块体识别依靠地质人员现场记录结构面信息，用赤平投影等图解法进行分析，效率低、精度差。数字化技术出现以后，完全改变了这种状况。采用无人机摄影测量或者地面三维激光扫描的方式，可以快速得到洞室开挖面的高精度三维点云模型。利用专门算法可以从点云数据中自动、准确地提取结构面的产状（倾向、倾角）、位置、尺寸等信息，建立起真实数字孪生结构面网络模型。

将该模型导入块体分析软件（UnWedge、3DEC 等）中，程序就可以自动识别出结构面和开挖面共同围限的所有的不稳定块体。对于每一个被识别出来的块体，软件都会进行运动学分析来判断这个块体是否存在着自由面，以及自由面的滑动方向。接着用极限平衡法计算其安全系数，考虑块体自重、锚杆力、支护压力、地震力等。利用数字模型对块体进行分析的方法，可以提高危岩体识别的全面性、准确性，也可以对不同的支护方案的效果进行量化评价，从而达到对结构控制型围岩失稳风险精细化控制的目的。

三、水工隧洞衬砌与围岩联合承载

传统的水工隧洞设计一般把围岩荷载当作衬砌结构的外力，很少考虑围岩本身的承载能力。现代设计理念认为衬砌和围岩作为一个整体共同工作，充分利用围岩的自稳能力来达到更加安全、经济的设计。

（一）围岩承载圈的形成机制与评价

隧洞开挖以后，原来的应力场被破坏了，应力在洞周重新分布。在一定深度范围内，围岩由三向受压状态变为以切向受压为主的状态，形成一个环状的压应力区，即围岩承载圈或者天然承载拱。承载圈可以承受大部分上覆岩体的荷载，将荷载传递给深层更稳定的岩体。发育良好、完整的承载圈是隧洞长期稳定存在的基本保证，也是衬砌结构减载的前提。

承载圈的产生和围岩的物理力学性质、地应力水平、洞型、施工方法等有关。在坚硬的岩体中，承载圈很薄但承载力大；在软弱破碎的岩体中则要靠预支护和初期支护来帮助其形成并稳定。评价承载圈的承载能力是进行衬砌设计的前提。评价方法主要有经验公式法、基于弹塑性理论的解析法和数值模拟法。数值模型可以清楚地显示开挖后应力重新分布的情况，据此可以对围岩分担荷载比例进行

量化评价。现场监测，用岩体多点位移计监测承载圈内外的变形差异，可以用来验证和修正理论计算的结果。

（二）复合式衬砌的受力特征与设计

复合式衬砌一般是由初期支护（喷射混凝土、锚杆、钢拱架等）和二次模筑混凝土衬砌组成，是围岩和衬砌共同受力的典型结构形式。主要受力特点就是各个部分在不同的时间段起到不同的作用，最后形成一个协调工作的有机整体。初期支护在开挖后立即进行，主要用来抑制围岩过大变形和松动，防止塌方，为围岩承载圈的形成创造条件。它具有一定的柔性，可以给围岩留下部分变形能。

二次衬砌是永久性的结构，一般在围岩变形基本稳定之后才施工。它承担剩余围岩压力和外水压力，具有防渗、抗冲刷、改善水力条件的作用。在联合承载体系中，由于初期支护和围岩自身的调整，二次衬砌所承受的围岩压力已经大大减小。设计时必须准确计算出各个部分的分担比。一般通过施工全过程数值模拟来完成，模型中应真实地反映初期支护与围岩、二次衬砌与初期支护之间的接触和相互作用。设计目的在于优化各层衬砌的刚度、强度，使衬砌的刚度、强度与围岩的刚度相适应，避免因刚度差异过大而造成应力集中，最终达到结构受力和谐、经济的目的。

（三）高压隧洞钢筋混凝土衬砌限裂设计

承受高内水压力的引水隧洞，衬砌的主要荷载由内水压力来控制。钢筋混凝土衬砌在荷载作用下处于拉伸状态，开裂几乎是不可避免的。传统的“不裂缝”设计要求衬砌混凝土截面始终处于受压或者极小的拉应力状态，一般需要极厚的衬砌或者预应力等昂贵的措施，经济性不好。因此限裂设计理念应运而生。它承认裂缝的出现，但是通过合理的钢筋配置将裂缝宽度控制在规范允许的、不影响结构安全和耐久性的微小范围内。

限裂设计的理论依据就是，当混凝土开裂后，它所承受的拉力就主要由钢筋来承担。合理配置足够数量的钢筋，可以把一条宽裂缝分散成多条细小的不影响结构的微裂缝。设计计算的主要内容是按照内水压力、围岩约束力、混凝土和钢筋的力学性质，预测衬砌工作状态下的最大裂缝宽度，保证它小于抗渗、抗冻、防止钢筋锈蚀等规定的限值（如 0.2mm）。计算时要考虑到围岩的弹性抗力，即衬砌在内水压力作用下向外膨胀的时候，围岩会施加一个反向的约束力，这个力可以减小衬砌内钢筋所受的拉应力，从而减轻钢筋的负担。因此准确评价围岩的

弹性模量和约束作用，就成为高压隧洞限裂设计的一个重要环节。在保障工程安全的前提下，工程造价得到极大降低，体现出了精细化与经济性的设计思想。

表 3-3 地下洞室围岩稳定性分析关键技术一览

技术类别	核心内容	应用场景	主要目标
岩爆预测	倾向性评价、微震监测、能量判据	深埋高地应力洞室	识别岩爆风险，预警并指导支护
洞室群施工优化	开挖顺序、支护时机、变形规律	大型地下洞室群	降低施工扰动，保证整体稳定
衬砌与围岩联合承载	承载圈理论、复合式衬砌、限裂设计	各类水工隧洞、高压隧洞	优化结构受力，提高经济安全性

从表中可以看出，地下洞室围岩稳定性分析所用到的关键技术有，它们相互作用，共同保障了工程安全高效的进行。

第四节 水工建筑物耐久性设计理论

水工建筑物长期处在复杂的、严酷的水环境中，耐久性的好坏直接影响工程的安全运行、经济效益和社会影响。建立科学的耐久性设计理论，是水利水电工程全生命周期性能保证和可持续发展的关键技术支撑，也是工程设计从经验走向科学预测的重要一步。

一、混凝土结构耐久性劣化机理

对混凝土在各种环境因素作用下劣化过程及内在机理进行深入剖析，是进行耐久性设计、寿命预测的前提。水工混凝土结构所处的侵蚀环境十分复杂多变，其劣化过程常常是多种物理、化学作用叠加的结果，因此了解这些基本机理十分重要。

（一）碳化、氯离子侵蚀与钢筋锈蚀

混凝土的碳化是指大气中的二氧化碳进入混凝土内部，与水泥水化产物氢氧化钙反应生成碳酸钙和水,孔隙溶液的碱度下降。当pH值降到一定程度的时候(一般小于9)，钢筋表面的钝化膜就会被破坏，不能有效保护钢筋。在有氧气和水存在的条件下，钢筋就会产生电化学锈蚀。碳化过程的速率受到混凝土密实度、环境湿度、二氧化碳浓度等众多因素的影响，是造成大气区水工结构钢筋锈蚀的

主要原因。

氯离子侵蚀对钢筋的危害比碳化大得多。氯离子可以来自外部环境（海洋环境、使用除冰盐地区）也可以在拌合过程中从原材料带入。氯离子本身具有很强的侵蚀性，可以以点蚀的形式局部破坏钢筋的钝化膜，即使混凝土仍然保持较高的碱性，也会引起锈蚀。钢筋锈蚀之后，其产物（铁锈）的体积会膨胀数倍，对周围的混凝土产生很大的张力，从而引起保护层开裂、剥落。既减小了结构的有效截面，又加快了外部有害物质侵入的速度，形成恶性循环，严重危害结构的承载能力以及使用寿命。

（二）冻融循环与碱-骨料反应破坏

在寒冷地区，水位变动区或浪溅区的水工建筑物很容易受到冻融循环的破坏。当混凝土孔隙里的水结冰时，体积会增大约 9%，给孔壁造成很大的静水压力。冻融循环的反复出现，会使混凝土内部压力不断增大，造成微裂缝的产生和扩大，最终形成表面砂浆剥落、骨料暴露，严重时会出现大块混凝土崩解。混凝土的饱和度和孔结构特征、抗冻等级是影响混凝土抗冻性的主要因素，引气是提高混凝土抗冻性最有效的途径。

碱骨料反应就是混凝土内部发生的缓慢化学膨胀性破坏。实际上就是水泥中碱（氧化钠、氧化钾）和骨料中某些活性矿物成分（蛋白石、玉髓、火山玻璃等）发生化学反应，生成一种吸水膨胀能力强的碱-硅酸盐凝胶。凝胶会吸收孔隙溶液里的水分，从而发生膨胀，产生巨大的内应力。当这个应力大于混凝土抗拉强度时，就会造成混凝土内部产生不规则网状裂缝，结构整体膨胀、接缝错位、强度降低，严重时丧失结构正常使用功能。发生碱-骨料反应的三个条件是：活性骨料的含量足够、混凝土中碱含量高、湿度适宜。水工结构长期处在水中，给该反应提供持续的水分来源，使它成为潜在的严重耐久性问题。

（三）多因素耦合作用下的寿命预测模型

实际工程中水工混凝土结构劣化不是单一因素作用的结果，而是多种劣化机制互相促进、耦合的复杂过程。冻融循环造成的微裂缝会成为氯离子和二氧化碳入侵的便捷通道，加快钢筋锈蚀；荷载作用下产生的结构裂缝会大大降低混凝土的抗渗性；碳化和氯离子侵蚀同时存在时，对钢筋锈蚀的综合影响不是简单的线性叠加。由于耦合效应的复杂性，准确预测结构实际使用寿命很困难。

为了克服上述问题，学术界和工程界提出了许多寿命预测模型。早期的模型

大多是基于经验数据的统计回归模型，形式比较简单但是适用范围较窄。随着劣化机理的深入认识，基于物理化学过程的确定性模型也得到广泛的研究，例如菲克第二定律的氯离子扩散模型，考虑碳化反应动力学的模型等等。这些模型可以较好地描述单一的劣化过程。现代耐久性设计越来越倾向于采用考虑多因素耦合作用的综合模型，引入概率论和可靠度理论，进而发展成为基于可靠度的寿命预测模型。此类模型把材料性能、环境参数、荷载效应等当作随机变量，采用蒙特卡洛模拟等方式，算出结构在设计寿命期内符合耐久性需求的概率，给出更为科学、全面的寿命评价成果，给性能化设计赋予结实的理论支撑。

二、水工结构耐久性设计标准

为了保证水工建筑物的长期安全可靠，耐久性要求必须从设计的初始阶段就考虑进去。现代水工结构耐久性设计标准已经发展成为以性能为基础、以定量指标为主的科学设计方法，目的是实现结构全生命周期的精确控制。

（一）基于性能的耐久性设计方法

以性能为目标的耐久性设计方法，就是确定结构在设计使用年限内要达到的性能目标，再用科学的计算方法和验证手段，选用合适的材料、构造、施工措施来实现这些目标。它冲破了传统规范只有“配方”式规定（最大水灰比、最小水泥用量、最小保护层厚度等）的束缚，给设计师留出更大的自由发挥余地和创新空间。

该方法一般有以下几个步骤：根据工程的重要性以及服役环境来确定耐久性目标，例如将设计使用年限设为 100 年，要求钢筋的设计使用期内不发生锈蚀。选择和目标直接相关并且可以量化的性能指标，例如混凝土的氯离子扩散系数、抗渗等级、碳化速率系数等。再次，利用经过验证的寿命预测模型，计算所设计混凝土配合比、结构参数在给定的环境条件下是否满足性能要求。通过试验来验证所选择的材料及配合比能否达到设计性能指标。以终为始的设计理念，把耐久性设计从被动满足规范转向了主动的性能保证，更能满足新材料、新技术的应用要求，达到资源节约、经济效益最大化的目的。

（二）环境区划与耐久性要求等级划分

水工建筑物体量巨大，各部位所处的环境条件千差万别，如果采用统一的耐久性设计要求，则既不经济也不科学。因此结构要做详细的环境区划，根据不同

的侵蚀程度划分耐久性要求等级，才能满足差异化、精细化设计的前提。水工混凝土结构常见的环境分区、各分区的主要特征及耐久性要求见下表：

表 3-4 水工混凝土结构环境区划及耐久性要求

区域名称	主要特征 / 劣化因素	耐久性要求
大气区	高水位以上，干湿交替、碳化、雨水冲刷、日照温差	关注碳化与钢筋锈蚀
水位变动区和浪溅区	干湿循环、冻融循环、冲刷磨损、氯离子富集	要求最高，需全面防护
水下永久浸没区	长期水下，水体化学侵蚀、渗透压力、磨损	关注化学侵蚀、磨损
特殊腐蚀环境区	工业废水、酸雨、高浓度硫酸盐等化学介质	需针对性防护，极高要求

根据各个区域的特点，规范中会给出相应的耐久性设计等级，对该等级的混凝土提出具体的耐久性技术要求，即最低强度等级、最大水胶比、最小胶凝材料用量、保护层厚度、外加剂种类、骨料等。分区分级有助于对症下药，把优质资源用在最需要的地方，既保证了整体耐久性，又有效控制了工程成本。

（三）耐久性极限状态的设计表达式

为了把耐久性设计融入结构设计的统一框架里，提出了耐久性极限状态的概念。耐久性极限状态与承载能力极限状态、正常使用极限状态不同，它表示的是结构由于材料劣化而达到预定使用寿命终点的临界状态。临界状态一般指某个关键劣化指标达到临界值，比如钢筋表面的氯离子浓度达到临界值或者碳化前沿延伸到钢筋表面。

耐久性极限状态的设计表达式一般用时间为变量，基本形式可以表示为设计使用寿命（ t_L ）不能大于模型预测的结构耐久性寿命（ t_d ），即 $t_d \geq t_L$ 。其中 t_d 的计算要依靠前面寿命预测模型。氯离子侵蚀环境下钢筋混凝土的设计表达式要考虑混凝土保护层厚度、氯离子在混凝土中的扩散情况和环境中的氯离子浓度。验算过程就是检验在给定的设计参数下，氯离子渗透到钢筋表面达到临界浓度所需要的时间，是否满足工程设计使用年限的要求。在基于可靠度的设计方法中，还会考虑各个参数的不确定性，以结构失效概率或者可靠指标的形式表现出来，保证结构在整个生命周期内耐久性风险在可以接受的范围内。

三、提升耐久性的材料与构造措施

理论、标准最终要落实到具体的工程措施中。水工建筑物的耐久性提高，不

能缺少先进材料技术与精妙构造设计的配合。两者互相配合,共同构筑起抵御环境侵蚀的坚固防线,是保证结构长寿命的重要因素。

(一) 高性能混凝土与特种外加剂应用

高性能混凝土属于提高结构耐久性的途径之一。它不仅仅指高强度混凝土,而是强调它的工作性好、体积稳定性好、耐久性好。采用低水胶比、掺入高效减水剂和优质矿物掺合料,可以明显改善混凝土内部孔结构,使其更加致密,从而大大提高混凝土的抗渗透性、抗化学侵蚀性、抗冻融性。

矿物掺合料的使用属于制备高性能混凝土的重要技术。粉煤灰、磨细矿渣粉、硅灰是水工工程中应用最广的三种矿物掺合料。粉煤灰的微珠效应能改善新拌混凝土的和易性,其火山灰效应可与水泥水化产物发生二次反应,生成更多的水化硅酸钙凝胶,填充毛细孔隙,降低渗透性,抑制碱-骨料反应。硅灰颗粒非常细小,具有很高的火山灰活性,其填充效应和火山灰效应能大大提高混凝土的密实度和早期强度,是配制具有超强抗氯离子渗透能力、抗冲磨能力混凝土的首选材料。

化学外加剂给混凝土性能的精细调控赋予了强大的工具。高效减水剂在保证流动性的同时可以大幅度降低用水量,是实现低水胶比的必要途径。引气剂在混凝土中形成大量的均匀小气泡,给孔隙水结冰膨胀留出缓冲空间,是抵抗冻融破坏的最有效方法。还可以根据需要使用阻锈剂、收缩补偿剂等特种外加剂,从化学角度提高混凝土抵抗某些劣化因素的能力。

(二) 表面防护涂层与阻锈技术

在提高混凝土本身性能的基础上,采用表面防护技术,可以为混凝土加一层防护层,就像给它穿上防护服一样直接隔绝侵蚀介质与混凝土的接触。表面防护技术种类繁多,要根据结构所处的环境以及防护的目的来选择。对防止水分、氯离子侵入的地方可采用渗透结晶型防水涂料或者有机高分子涂层(环氧树脂、聚氨酯等)。前者可以和混凝土起化学反应生成不溶于水的晶体,堵塞毛细孔道,形成永久的防水层;后者在混凝土表面形成一层致密的物理隔离膜。

被动式表层隔绝已经得到了重视,而主动式的防锈技术也越来越被重视。环氧涂层钢筋属于传统的防腐手段,它就是将环氧树脂涂抹在钢筋的表面,以此来隔绝锈蚀的环境。阴极保护技术属于主动的电化学防护手段,通过施加外加电流或者使用牺牲阳极,使受保护的钢筋整体变成阴极,从而从根本上阻止锈蚀电流的产生。这项技术适合在海洋环境里腐蚀性很强的重大工程中使用,也可以用于

已经锈蚀的结构的修复。迁移型阻锈剂可以喷涂在现存的混凝土表面，依靠渗透作用迁移到钢筋附近，在钢筋表面形成保护膜，起到延缓或者阻止锈蚀的作用。

（三）有利于耐久性的构造细节设计

精良的构造设计是发挥材料性能、保证结构长久耐久性的基础，所谓细节决定成败。很多耐久性问题都是由于构造设计考虑不周造成的。其中一个主要的设计原则就是引导排水，防止积水。结构外露表面应该有足够的排水坡度，防止形成积水区。梁板边缘处设滴水线或鹰嘴，防止水流沿边缘蔓延，使边缘润湿时间变短。

保证足量、均匀的钢筋保护层厚度，是防止钢筋锈蚀最基本、最重要的环节。设计中必须明确保护层厚度，在施工图纸上清晰表达，同时考虑施工误差，留有余量。控制结构裂缝属于另一项重要的构造措施。荷载、温度变化和混凝土的收缩都会造成裂缝的产生，裂缝是侵蚀介质进入的一个通道。通过合理的构造钢筋配置、控制构件截面尺寸、设置收缩缝、后浇带等措施可以把裂缝宽度控制在规范允许的无害范围内。对于处在严重侵蚀环境的地方，裂缝宽度限值更加严格，以保证混凝土自身的防护功能。

第四章 岩土工程设计理论创新

岩土工程是水利水电工程的基础，岩土工程设计的理论是否可靠，技术手段是否先进，都会影响整个工程的安全和效益。本章主要对复杂地质条件下岩土工程设计理论前沿进行研究，主要研究其理论创新以及数字化技术的应用。

第一节 复杂地质条件下地基处理技术

随着工程地质环境的越来越复杂，工程安全标准也越来越高，传统地基处理技术往往会遇到很大的困难。本节主要对深厚覆盖层、喀斯特地貌、饱和液化土层等典型复杂地基处理技术创新以及工程实践进行阐述。

一、覆盖层深厚地基处理

河流冲洪积作用形成的厚覆盖层在水利枢纽工程中较为常见，它一般具有高压缩性、低承载力、不均匀等特点，对上部结构物的稳定造成严重的影响。本部分主要研究几种主流的深层地基加固技术。这些技术各有特点，加固机理、适用范围、优缺点见下表。

表 4-1 深层地基加固技术对比表

技术名称	主要加固机理	适用土层类型	优点	缺点
强夯法	冲击压实、瞬时液化再固结	黏性土、砂土、杂填土（非饱和）	施工简便、经济	加固深度有限、施工振动大、噪音大
振冲法	振密、置换、排水	饱和砂土、粉土（可液化）、软黏土	加固深度大、抗液化效果好	对黏性土效果差、需水源、易污染
高压旋喷桩	切割置换、搅拌固结	淤泥、砂土、黏性土、含少量块石土	适应性强、加固效果均匀	耗浆量大、施工成本相对高
水泥土搅拌桩	搅拌固化、化学胶结	软黏土、淤泥、粉土	施工简便、对环境影响小、经济	加固深度有限、加固效果依赖土质

（一）强夯法与振冲法的加固机理与效果

强夯法是利用起重设备把大质量重锤提升到一定的高度，然后自由下落，用

巨大的冲击能反复夯击地基。高能冲击波在地基土中传播,破坏土体原有的结构,使土颗粒重新排列,强制压实,在土中形成高密实硬核。冲击能量耗散伴随着剧烈的土体振动、孔隙水的排出、土体的瞬时液化再固结,最终使得地基承载力明显提高、压缩性减小、均匀性改善。

振冲法就是用特殊振冲器,依靠它的水平高频振动和端部的高压水流,在软弱地基中振动造孔。成孔之后分批填入碎石、砂砾等优质骨料,用振冲器的振动能量将填料压实,形成密实桩体。这不但实现了软弱土的置换,更重要的是利用强烈振动加密了桩周土体,形成桩和桩间挤密土共同组成的复合地基,共同承担上部荷载,同时也可以作为排水通道加速土体固结。

强夯法施工简单、经济,对非饱和的黏性土、砂土、杂填土等都有较好的加固效果,但是其加固深度受夯击能量和土质条件限制,而且施工振动对周围环境的影响较大。振冲法适合处理可液化的饱和砂土地基和部分粉土地基,加固深度大,形成的碎石桩排水性能好,在抗液化处理上具有明显优势。水利工程实践当中,选择哪一种方法要综合考虑地质状况,加固深度需求,环保要求,工程经济性等诸多因素。

（二）高压旋喷桩与水泥土搅拌桩复合地基

高压旋喷桩技术是在钻机钻到设计深度之后,在钻杆底部特殊的喷嘴处高速射出水泥浆液或者水、气混合流体。高压射流像一把锋利的土刀一样,可以切割、冲蚀、搅动桩体周围的土体,并把喷入的浆液和被切削的土颗粒强制、均匀地混合。凝固之后,在原位上就形成一个直径大、强度高的圆柱状固结体。高压旋喷桩技术对地层的适应性强,淤泥、砂土、黏性土、含少量块石的土层均可适用,在水工建筑物的基坑支护、防渗帷幕、局部地基加固等工程中应用较多。

水泥土搅拌桩一般指深层水泥土搅拌桩,用专门深层搅拌机械将叶片钻入软土地基预定深度,钻具旋转和移动使水泥浆或水泥粉与原地基软土就地强制、均匀地搅拌。经过一系列物理化学反应后,软土和水泥固化剂反应、硬化,形成有一定强度和水稳定性的水泥土桩体。桩体和桩间天然土体一起构成复合地基,大大提高了地基的整体承载力和稳定性,沉降也明显减小。该方法施工简便、造价低、对环境影响小,在水闸、堤防、泵站等工程软基处理中得到了大规模的应用。

（三）桩-网复合地基工作性状与设计

桩-网复合地基是桩体、桩顶铺设的土工加筋材料和桩间土共同组成的高效

地基处理系统。基本构造是在桩顶上设置一层或者多层高抗拉强度土工格栅，在格栅上再铺设具有良好滤水、扩散荷载作用的褥垫层。此种结构形式主要是为了改善桩土间荷载的分布，使各部分材料都能发挥其作用。

其基本工作机理就是荷载的共同分担和应力分散。上部荷载作用于褥垫层上的时候，一部分荷载会通过桩体传给深部持力层，这就是桩的直接承载作用。另一部分荷载作用在桩间土上，由于土工格栅拉伸变形产生的“网兜效应”会使部分桩间土荷载重新传给桩顶。同时，褥垫层和桩间土中也会出现明显的土拱效应，即土体颗粒之间由于咬合、摩擦而自然形成的拱形承载结构，把大部分上覆荷载直接传给更坚硬的桩体，使桩间土的应力大大减小，有效地控制地基总沉降和不均匀沉降。

桩-网复合地基设计的关键在于确定桩土应力比、土工格栅布置形式和性能参数、褥垫层材料和厚度。这些参数决定土拱效应的发挥程度以及网兜效应的贡献大小。现代设计方法越来越多地使用有限元、有限差分等数值模拟软件，对桩网复合地基复杂的工作状况进行精细化分析，模拟不同的设计参数下应力分布、变形规律来优化设计方案，达到安全和经济的平衡。

桩网复合地基技术具有控制沉降能力强、承载效率高等特点，在众多水利工程中具有很大的应用前景。对于宽大堤防、水闸翼墙、大面积堆场等对不均匀沉降敏感的工程软土地基处理，不仅可以保证工程的长期稳定，而且可以大大缩短工期，降低工程造价，代表了复合地基技术发展的又一方向。

二、喀斯特地貌地基处理

喀斯特地貌区岩溶发育强烈，溶洞、土洞、暗河等不良地质体广泛分布，隐蔽性、复杂性、不确定性给水利水电工程，尤其是高坝大库的建设带来了极大的安全隐患。本节主要研究岩溶的探测、评价及相应的处理技术。

（一）溶洞与土洞的探测与稳定性评价

岩溶地基处理的首要前提是对地下岩溶洞穴的空间分布、规模、形态及其填充情况进行精确探明。

1. 综合地球物理勘探是实现大面积、快速普查的有效方法。高密度电阻率法、瞬变电磁法、浅层地震勘探、地质雷达等物探方法联合使用，根据岩体、溶洞及其填充物在电性、弹性波速等物理性质上的差别，可以初步圈定岩溶发育的异常

区，为后续详细勘察提供指导。

2. 精密钻探勘察，是判定岩溶状况的主要方式。钻孔取芯可以直接取得岩样，再配合孔内电视、声波测井、单孔或者跨孔 CT 成像等先进的孔内测试方法，能准确地查明溶洞的准确位置、三维形态、大小及其内部填充物是全填充、半填充还是无填充，为以后处理方案的设计提供可靠的依据。

查明岩溶发育情况之后，就要对岩溶的稳定性进行科学评价。评价工作要综合考虑溶洞顶板的岩体质量等级、结构面发育情况、顶板厚度和跨度、上覆土层性质、厚度、洞内填充物密实度、强度等各方面因素。在工程荷载与水库蓄水产生的静水压力联合作用下，使用极限平衡理论、板壳理论或者复杂的数值模拟方法，对溶洞顶板的抗剪、抗弯破坏可能性、覆盖层的突涌、塌陷风险进行定量分析，最后对岩溶区做稳定性分区，分为稳定区、欠稳定区和不稳定区，为制定科学、经济、可靠的处理方案提供决策依据。

（二）灌浆技术在岩溶地基处理中的应用

灌浆是目前处理岩溶地基问题最常用、效果最好的方法。其基本原理就是用压力将具有可凝结性的浆液注入岩体的裂隙、溶蚀管道或者溶洞。浆液在其中流动、渗透、填充、凝固，将原来分散、破碎的岩土体胶结成一个整体，大幅度提高地基的整体性、强度和抗变形能力，有效封堵渗流通道，降低其渗透性。灌浆材料从原来的水泥、水玻璃双液浆发展到现在的超细水泥、环氧树脂、聚氨酯等化学浆液，以满足不同尺度的裂隙和复杂的地质环境下的灌浆要求。

现代水利工程对灌浆技术的要求越来越高，促使灌浆技术走向精细化、信息化。创新的灌浆工艺有动态设计、信息化施工、过程反馈、智能调控。施工中用自动化监测系统实时采集、分析灌浆压力、流量、浆液扩散范围、地表抬动等关键参数，将采集到的信息及时反馈给控制系统，对施工过程进行闭环控制，从而达到动态调节灌浆参数的目的。GIN 法、分序循环、分段控制、压力流量双控等精细化灌浆工艺的应用，使灌浆范围、效果更加可控，避免了传统灌浆中浆液流失、污染地下水、扰动地层等常见问题。

灌浆技术在水利工程中使用较多。在大坝基础防渗工程中，可以在坝基岩体里形成深达几十米的灌浆帷幕和固结灌浆区，堵塞岩溶管道、构造裂隙，形成一道可靠的地下防渗墙，保证大坝的安全运行。大型或者巨型溶洞一般采用综合处理的方法，在洞内回填大量的低强度混凝土来恢复地基的连续性，再沿溶洞和围

岩接触带、洞顶补充接触灌浆、固结灌浆，以消除接触面上的空隙，保证上部结构荷载均匀、安全地传递。

（三）跨越结构在岩溶地基上的设计

当工程场地岩溶发育特别强烈，溶洞密布、规模巨大，采用灌浆等填充处理方法在技术上不能达到预期效果或经济上不可行时，采用跨越结构设计的方式来规避地质风险是一种有效的方法。设计理念的核心思想是避而不治，即通过结构形式上的创新，把上部建筑物的主要荷载绕过浅部不稳定、不可靠的岩溶发育区，直接传到深部稳定、完整的基岩持力层上。

跨越结构形式多样，在岩溶发育深度、规模、上部荷载大小、分布特点、现场施工条件和工程造价等因素综合考虑后选择合适的跨越结构。常见的大直径嵌岩桩，通过单桩或者群桩基础，把荷载穿过溶洞区，嵌入到深部的稳定基岩里；地下连续墙，形成深埋的条形承重结构，可以跨越线状分布的溶洞群；整体性好的大厚度筏板基础，依靠自身的刚度来抵抗溶洞顶板可能产生的不均匀沉降；对于大型孤立溶洞，甚至可以设计地下钢筋混凝土拱结构，把荷载巧妙地传递给溶洞两侧稳定的洞壁岩体。跨越式设计对岩体稳定性精细化分析、结构本身的计算理论有更高的要求。

三、饱和液化土层地基处理

地震作用下，饱和松散的砂土、粉土层会发生液化，地基瞬间失去承载能力，这是造成水利水电工程结构物失稳、倾斜、倒塌等严重震害的重要原因之一。本节主要研究地基液化的判别、处理和在液化地基上建筑物的抗震设计方法，属于工程抗震领域的重要问题。

（一）地基液化判别与危险性评价

地基液化的物理机理是地震波引起的循环剪应力，使饱和土层中孔隙水压力不断增大并突然升高。当孔隙水压力增大到和土层上覆总应力相等的时候，土颗粒间有效应力为零，土体暂时丧失了抗剪强度，处于类似液体的流动状态。目前工程实践当中普遍使用以原位测试指标为基础的简化经验判别法，其中以标准贯入试验的 N 值、静力触探试验的锥尖阻力为主要依据的方法使用最为广泛。这些方法是建立场地土层循环应力比与抗液化循环抗力比的关系，从而判断地基在设计地震动作用下是否会发生液化。

地基液化危险性评价比液化判别更综合，它不仅要回答“是否液化”的问题，还要评价液化可能造成的工程后果。评价内容一般包括液化土层埋深和厚度的精确确定、液化后可能产生的地表沉降量、差异沉降、对于近河或者有坡度的场地还要计算液化引起的侧向扩展位移，最后综合评价地基变形对上部水工结构物造成倾斜、开裂、失稳甚至破坏的程度。这一系列评价工作要同场地的工程地质条件、设计地震动参数、建筑物结构类型、重要性等级等结合起来，进行综合分析。

传统的经验判别方法主要是依靠历史震害数据的统计回归，它的适用性受到一定的限制。现代岩土抗震理论的发展方向就是使用有效应力原理的动力分析方法。通过建立可以真实反映土体在循环荷载下孔隙水压力累积、刚度退化、强度软化等非线性行为的动力本构模型，用先进的数值模拟软件进行场地地震反应分析，可以直接模拟计算出地震过程中土层的孔压发展、变形响应以及最终的液化状态，从而实现了对液化潜势和震害后果更加精细化、定量化的预测。

（二）碎石桩与挤密砂桩抗液化加固

碎石桩、挤密砂桩就是利用振动、冲击或水力等方法在可液化地基中成孔，然后填入碎石或者砂等粗颗粒材料并加以压实，形成复合地基。这两种方法是处理液化地基最常用、最经济有效的地基处理技术之一。抗液化加固主要通过挤密效应、排水效应、置换增强效应来实现：挤密效应是成桩时对桩周土体产生强烈挤压和振动，提高桩间土的相对密实度，从而直接提高土体自身的抗液化能力；排水效应是碎石桩或砂桩本身是由高渗透性材料组成，在地震时可以作为竖向排水通道，迅速消散土中累积的超孔隙水压力，使其不能达到触发液化的临界值；置换增强效应是桩体材料的抗剪强度远大于原状土，与桩间挤密土形成的复合地基，其整体抗剪能力和抵抗侧向变形的能力得到大幅度提高。

设计碎石桩或者挤密砂桩复合地基时，需要根据液化土层厚度、土质参数、上部荷载要求、抗震设防烈度等来确定桩的直径、间距、桩长，置换率，即桩的面积占总处理面积的百分比，是控制加固效果的关键设计参数。施工质量直接影响加固效果，所以桩体材料级配、含泥量必须严格控制，保证桩身施工全过程的密实度、垂直度。振动沉管法是目前主要的施工方法，它所产生的振动可以进一步密实桩周土体，但在施工过程中需要对振动、侧向挤压进行监测，防止对相邻已有建筑物或者设施造成不利影响。

（三）可液化地基上建筑物抗震设计

在可液化地基上进行水工建筑物抗震设计，应该以综合性的、体系化的设计理念为指导。该理念既重视地基处理以消除或者减轻液化，又重视上部结构的特殊设计，使上部结构能主动适应液化引起的地基承载力下降和不均匀沉降，达到地基、结构体系协同抗震、保证整体安全的目的。

当场地液化风险不能完全消除，地基处理方案在经济上不可行时，采取有效的上部结构抗震措施就显得格外重要。可以采用箱形基础或筏板基础，依靠基础本身强度和刚度抵抗、调节由于液化引起的差异沉降；也可以用桩基础将上部结构荷载穿透可液化土层，直接传给深部稳定的非液化土层或基岩。此时需要对桩基做特殊的验算，认真计算液化土层对桩基产生的负摩阻力、侧向流动产生的冲击力、桩身在液化层和非液化层交界处可能承受的巨大剪力和弯矩。

隔震、减震技术的应用给可液化地基上结构抗震设计提供了一条新的思路。在建筑物基础与上部结构之间设置柔性隔震层，可使结构自振周期明显增大，大部分地震能量被隔震层吸收，不向上传递，上部结构地震响应和损伤大大减小。此法能保证主体结构安全，但设计时要准确计算隔震层各项参数，充分考虑液化造成地基竖向沉降对隔震装置长期性能的影响。

超越传统的规范条文设计，采用以性能为基础的抗震设计方法，可以更科学、更精细地解决液化地基上的抗震设计问题。该方法根据不同的地震作用等级来设定结构的多个性能目标，小震下正常使用、中震下基本可修、大震下防止倒塌。然后做非线性动力时程分析，检验地基和结构整体系统是否达到预设目标。该方法可以满足强震下结构的功能性与安全性要求，从而达到水工建筑物长期安全的目的，实现经济性设计。

第二节 边坡稳定性分析新方法

水利水电工程边坡问题直接影响枢纽建筑物安全及工程长期效益，所以边坡稳定性分析一直是岩土工程领域研究的重中之重。随着计算机技术的迅速发展和岩土力学理论的不断完善，传统的极限平衡法已经被功能更强大、理论更深厚的各种数值分析和概率分析所取代或者补充。新的方法给复杂的地质条件下边坡工程设计提供更加科学的决策依据。

一、基于强度折减的有限元分析

有限元强度折减法把边坡岩土体当作弹塑性材料，逐渐减小它的抗剪强度参数，直到计算不再收敛为止，从而得到边坡的稳定安全系数和潜在的临界滑移面。该方法的一大优点就是不需要预先假定滑移面的形状和位置，可以真实模拟复杂的应力应变过程，是现代边坡稳定性评价中不可缺少的技术手段。

（一）失稳判据的选取与临界状态确定

有限元强度折减法的关键就是怎样准确地确定边坡的临界失稳状态。与有明确力或者力矩平衡方程的极限平衡法不同，有限元法的失稳判据更多样化，需要综合考虑。常用的判定标准为数值计算的收敛性，当强度参数折减到一定程度时，有限元静力平衡迭代计算不能在设定的步数内收敛，系统无法找到平衡解，此时折减系数就定义为安全系数。从物理角度上说就是边坡内部产生了不能控制的塑性流动，从宏观上来说就是失稳破坏。

除计算不收敛外，塑性区的贯通也是一个直观而且重要的辅助判据。随着岩土体屈服区域的不断扩大，当一条连续的塑性应变带从坡脚延伸到坡顶或者坡体后缘的时候，就表示一个完整的剪切破坏机制已经形成，此时边坡就处于极限平衡状态。该现象可以用等效塑性应变云图清楚地表现出来。

也可以把特征点位移突变当作判据。选取坡顶或者坡面上的一个节点，绘制该节点位移随折减系数变化的曲线。边坡接近失稳时，该节点的位移量会突然急剧增大，曲线出现明显的拐点。拐点所对应的折减系数可以看作边坡的稳定安全系数。在实际应用中一般以数值不收敛为主，结合塑性区贯通、位移突然改变等多种判据综合判断来保证结果的可靠性、精确性。

（二）滑移面的自动搜索与可视化

有限元强度折减法最大的优势之一，就是可以自动识别出边坡最危险的潜在滑移面，而不需要像极限平衡法那样进行大量的试算和搜索。滑移面就是边坡失稳的时候发生相对剪切滑动的界面，在数值模型中，它对应的是材料出现较大塑性变形的区域。当计算到临界状态时，模型里自然地出现一条集中高剪应变带或者高塑性应变带，该带轨迹清楚地勾勒出临界滑移面的位置和形状。

自动搜索原理来自于有限元法对于连续介质力学应力应变场的求解。强度折减时，应力按照材料的本构关系在坡体内重新分布，应力集中处最先出现塑性状

态。随着折减系数的增大,塑性区越来越大,而且会连成一条贯穿的、力学上最薄弱的路径,这就是自然形成的滑移面。形状可以是圆弧、折线,也可以是任意复杂的曲线,完全体现了地质结构、材料性质等复杂因素的影响。用后处理软件把等效塑性应变、最大剪应变这些物理量以云图或者等值线的形式展示出来,直观地看到边坡的破坏模式,为后续支护设计提供准确的目标区。

(三) 支护结构与边坡的共同作用分析

水利水电工程中的高陡边坡一般要使用锚杆、锚索、抗滑桩、挡土墙等支护结构来保证其稳定。传统分析方法一般把支护结构的作用简化为作用在坡体上的外力,忽略了支护结构自身的变形以及它与岩土体之间复杂的相互作用。有限元强度折减法则可以很好地解决该问题,可以实现支护体系和边坡协同工作精细化模拟。

有限元模型中边坡岩土体用实体单元来模拟,锚杆、抗滑桩等支护结构可以用杆系单元(如梁单元、索单元)或者实体单元来模拟。岩土体和支护结构之间通过接触单元或者共用节点连接起来,从而真实地模拟两者间的荷载传递和变形协调。当边坡有向下滑动的趋势时,会带动抗滑桩变形并使其受力,抗滑桩产生的抗力又会反过来约束边坡的变形,二者之间相互制约的耦合效应在模型中能够充分体现出来。

经过这样的综合分析,可以得到考虑支护作用后整个系统整体稳定安全系数,也可以得到支护结构内部应力、轴力、弯矩、剪力分布、锚杆拉力、桩身变形等详细信息。因此工程师可以有效地评价支护设计的有效性,优化支护参数(锚杆长度、间距、预应力大小,抗滑桩桩径、配筋等),预测极限状态下支护结构的受力是否超过其承载能力,从而达到更安全、经济、合理的设计。精细化的共同作用分析是传统简化方法所不能比拟的。

二、考虑裂隙水压力的边坡稳定性

水是影响边坡稳定性的最活跃、最关键的因素之一,在水利水电工程环境里尤为突出。降雨、库水位变化等水文条件会引起边坡内部渗流场、孔隙水压力的改变,从而导致岩土体的有效应力、抗剪强度发生改变,进而可能引发或者加快边坡失稳。因此,对受水影响下的边坡稳定性进行分析是十分必要的。

(一) 降雨入渗与暂态饱和区形成

强降雨是山区表层滑坡的主要因素。降雨时雨水通过坡体表面的孔隙、裂隙

向下渗透。入渗初期表层非饱和土含水率增大，基质吸力变小，抗剪强度降低。降雨持续且强度增大时，入渗速率会超过下层土体的渗透能力，使水分在坡体内某一相对不透水层上部积聚，形成一个暂时的、悬浮于地下水位之上的饱和区，即暂态饱和区。

暂态饱和区出现时，边坡的稳定就不好。该区域内孔隙水压力由负值（基质吸力）变为正值，会大大减小土体的有效应力，从而大幅度降低土体的抗剪强度。饱和区的存在会增加坡体的自重，产生沿坡面向下的渗透力，使边坡的不稳定性增大。许多雨季滑坡都是浅层、流态化的，其根本原因就是暂态饱和区的形成和扩展。现代数值模拟技术可以建立瞬时渗流模型，对降雨入渗、暂态饱和区时空变化规律进行仿真模拟，给边坡实时稳定性评价和预警提供科学依据。

（二）非饱和土强度理论与渗流 - 应力耦合

自然界中的绝大多数边坡浅层土体都是非饱和的，其力学性质与饱和土存在明显的区别。非饱和土的强度除了和净应力有关之外，还受基质吸力的影响。基质吸力好比预应力，可以提高土体的抗剪强度。传统饱和土力学分析的方法没有考虑这一部分强度，对非饱和条件下边坡稳定性的评价可能过于保守。因此，合理地使用非饱和土强度理论来评价边坡的稳定性是十分必要的。目前应用最广的基于双应力变量（净应力和基质吸力）的强度理论是 Fredlund 理论。

边坡内部渗流场和应力场之间存在着复杂的关系。渗流场的变化（孔隙水压力的增减）会引起土体有效应力的改变，进而引起应力场和变形场的调整。另一方面，应力场的变化引起的土体压缩或者剪胀会改变孔隙率和渗透系数，从而影响渗流场的分布。双向互馈的作用就是渗流 - 应力耦合。

分析降雨入渗或者库水位变化问题的时候，必须考虑到这种耦合效应。边坡由于加载而产生压缩时，孔隙变小，渗透性变差，水排出受阻，孔隙水压力增大，失稳速度加快。相反，如果边坡发生剪胀，孔隙增大，渗透性变大，有利于水的消散。

建立能同时求解水分运移方程和力学平衡方程的耦合数值模型，可以更真实的模拟边坡在复杂的水文条件下力学响应。耦合分析可以反映出孔隙水压力、土体变形和整体稳定随时间的变化过程，为边坡在百年一遇暴雨下会发生怎样的行为提供精确的预估工具。

（三）库水位升降对岸坡稳定性的影响

水库岸坡的稳定直接关系到大坝以及整个水利工程的安全。库水位的周期性

升降是库岸最主要、最复杂的荷载工况，它既有力学作用，又有水力学作用。

1. 库水位快速下降是库岸失稳最危险的一种工况。当库水位快速下降时，坡体内部的浸润线和孔隙水压力不能同步快速下降，在坡体内外产生较大的水位差。水位差一方面会产生指向坡外的渗透力，增大了下滑力；另一方面库水之前对坡体的支撑作用消失，而坡体内较高的孔隙水压力仍然存在，使岩土体的有效应力、抗剪强度大幅度下降。两种效应叠加起来，岸坡的稳定性会急剧降低，极易失稳破坏。历史上许多著名的库岸滑坡，都发生在首次蓄水之后的快速泄水期。

2. 库水位上升时同样会对岸坡的稳定产生不利影响。水位上升会使坡体前缘静水压力增大，静水压力虽然有支撑作用，但是水位升高后会使坡体下部浮托力增大，从而减小坡体的有效重量和抗滑力。更重要的是水会渗透到坡体内部，使地下水水位上升，饱和度增大，岩土体强度随之下降。对于存在软弱夹层或者结构面的岸坡，水位升高会进一步软化这些结构面，使它们抗剪能力进一步下降。

三、边坡动力稳定性与可靠度分析

在地震频发地区修建的水利水电工程，边坡动力稳定性是必须要考虑的重要问题。由于岩土参数以及外部荷载本身固有的不确定性，传统的确定性分析方法已经不能全面评价边坡的安全水平了。用可靠度理论和风险分析，可以对边坡工程所面临的风险进行更科学的量化。

表 4-2 边坡稳定性分析方法比较

分析方法	主要特点	优点	缺点	适用场景
极限平衡法	基于平衡原理，假定滑移面	计算简便，概念清晰	需预设滑移面，无法反映变形	简单边坡，初步分析
强度折减有限元法	逐步折减强度，自动搜索滑移面	无需预设滑移面，反映应力应变	计算量大，判据多样需综合	复杂边坡，精细化分析
Newmark 滑块法	简化为刚性滑块，计算永久变形	简单直观，考虑地震效应	忽略坡体内部变形，结果保守	初步地震永久变形评估
动力时程分析法	直接输入地震动，求解动力方程	最全面反映地震响应和变形	计算复杂，对地震动输入要求高	高等级边坡，精细地震响应分析
可靠度分析法	将参数视为随机变量，计算失效概率	量化不确定性，给出失效概率	需要参数概率分布，计算复杂	不确定性较大的重要边坡
风险分析法	失效概率与后果的乘积	综合考虑风险，支持决策	需要准确后果评估	重大风险边坡，决策支持

从上述边坡稳定性分析方法比较可见,每种方法都有其特点和适用范围。

(一) 地震作用下边坡永久变形计算

传统的边坡抗震设计大多采用拟静力法,即将地震的动力效应等效为一个作用在滑动体重心的水平惯性力,用静力条件下的安全系数来评价边坡的抗震稳定性。此方法简单直观,但是不能反映地震的持续时间、频谱特性等动力学特征,也不能给出边坡在地震之后变形的信息。现代工程设计越来越重视基于性能的设计理念,即在强震作用下允许结构产生一定的可控损伤和变形,只要不发生整体失稳。因此,计算边坡在地震作用下永久变形成为评价边坡动力稳定性的关键。

Newmark 滑块法是用来计算边坡地震永久变形的简化方法。它把潜在的滑体简化成一个放在斜面上的刚性滑块,当地震加速度大于使滑块开始下滑的临界加速度时,滑块就会沿斜面发生相对位移。对整个地震时程中超过临界加速度的部分做两次积分,就可得到累积的永久位移。

随着计算机技术的发展,动力时程分析法越来越准确。该方法将地震动时程记录直接输入到有限元或者有限差分模型中,用逐步积分的方法求解动力运动方程,可以详细模拟地震波在坡体内的传播、放大效应以及坡体的非线性动力响应。不仅能得到边坡各点的永久位移分布,还可以揭示坡体内部应力状态的变化、塑性区的发展,给边坡震后性能和损伤程度提供最全面的信息。

(二) 基于概率方法的边坡可靠度指标

传统的边坡稳定性分析只用一个安全系数。确定性方法把所有的参数都当作定值,不能反映岩土材料的性能、几何参数、地下水位、地震荷载等变量中普遍存在的不确定性和空间变异性。一个计算出的安全系数,如 1.5,它的实际可靠程度并不清楚。两个安全系数都为 1.5 的边坡,如果其中一个参数的不确定性远大于另一个,那么它的真实失稳风险也会大得多。

为克服上述缺点,采用概率的可靠度分析法对边坡工程进行了研究。该法把影响边坡稳定性的关键参数(内聚力 c 、内摩擦角 ϕ 、重度 γ 等)当作服从某种概率分布(正态分布、对数正态分布等)的随机变量。建立边坡的功能函数或者极限状态方程,用一次二阶矩法、蒙特卡洛模拟等概率计算方法,最后得到边坡的失效概率或者与之对应的可靠度指标(β)。可靠度指标 β 直接度量边坡的安全程度, β 值越大,失效概率越小,边坡越安全。可以定量地评价不确定性对边坡稳定性的影响,给设计标准的制定和安全水平的确定提供更加理性的

依据。

（三）风险分析在边坡工程中的应用

边坡可靠度分析可以解决边坡失稳的概率问题，而风险分析在此基础上更进一步，回答了边坡失稳的后果是什么、这种风险是否可以接受的问题。风险就是失效概率和失效后果相乘得到的。一个失效概率高、后果轻微的边坡，其风险比一个失效概率低、一旦失稳就会造成灾难性后果的边坡要小得多。

水利水电工程中边坡失稳的后果非常严重，它会破坏大坝、厂房等重要建筑物，堵塞河道造成上游洪水，对下游生命财产安全造成巨大威胁。因此风险分析变得非常重要，风险分析过程一般包括：危害识别（找出滑坡可能发生的模式）、失效概率估计（通过可靠性分析得到）、后果评估（量化人员伤亡、经济损失、环境破坏）、风险计算。

将计算得到的风险值同社会、行业所能接受的风险标准相比较，可以为工程决策提供重要的依据。风险太高，就要用工程措施（加固、降坡等）或者非工程措施（建立监测预警系统、制定应急预案等）来降低失效概率或者减轻失效后果，使风险控制一定范围内。风险分析将工程的稳定性以及社会经济发展情况紧密地联系在一起，使现代工程设计从保证安全转而向管理风险的思想转变，也是工程可持续发展的必然趋势。

第三节 土石坝设计理论创新

水利水电工程向高海拔、高地震烈度地区前进的时候，土石坝作为主要挡水结构，其设计理论正处在前所未有的挑战和机遇之中。本节主要讨论土石坝设计中的一些重要问题，分析理论创新是如何促进工程实践发展的。

一、高土石坝变形与渗流控制

高土石坝长期安全运行的关键是控制好变形和渗流。二者互相影响、互相耦合，构成了设计理论创新的重要研究领域，直接关系到大坝的稳定性与耐久性，研究程度的好坏直接决定工程成败。

（一）堆石体流变变形的长期预测

堆石体在长期高应力作用下出现的流变变形，是高土石坝沉降和位移的主要

部分,会对坝体顶部结构、心墙或者面板的应力状态造成影响。变形有明显的时间依赖性,发展过程可以持续数十年甚至上百年,准确预测其最终值和演化过程,对评价大坝长期工作性状十分重要。传统的预测方法大多依靠经验公式或者简化的粘弹性模型,这些模型不能很好地反映堆石料在复杂应力路径下非线性流变特性。考虑颗粒破碎、应力水平变化、环境因素影响的时候,它的预测精度就会受到很大的限制。

现代设计理论创新的关键就是发展更加细致的流变本构模型。利用弹塑性理论、损伤力学来构造能同时描述瞬时变形和长期流变的统一模型。如广义塑性理论下的多分量流变模型把堆石体变形分为弹性、塑性、粘性等不同部分来考虑其发展规律。这样可以更真实地反映长期荷载下堆石料发生的蠕变、应力松弛、颗粒重排等微观现象。

结合大型三轴流变试验得到的材料参数,用先进的数值模拟软件在工程尺度上进行计算,就可以对高土石坝全生命周期内的变形进行动态、精细化的预测。不仅可以预测坝顶沉降的最终量级,而且可以反映坝体内部各个区域变形的时空分布规律,为心墙防裂、面板接缝设计、运行期安全监控提供更加可靠的科学依据,从而大大提高高土石坝的长期安全性。

(二) 心墙与坝壳接触面的水力劈裂

水力劈裂是高心墙土石坝存在的一种严重隐患,特指心墙与坝壳或岸坡接触处,由于应力拱效应造成局部总应力过低,当库水压力大于该处的最小主应力并克服材料抗拉强度时,水流就会劈开土体形成集中渗流通道,从而引发破坏性的内部侵蚀。现象产生原因比较复杂,牵涉到土力学、水力学、断裂力学等诸多学科交叉,属于设计理论研究的前沿和难点。

理论创新的主要方向是水力劈裂发生机理的研究以及预测模型的建立。研究表明心墙差异沉降、材料压缩性不同、填筑施工过程都会造成接触区低应力区的产生。新理论不再把土体看作连续介质来简单的进行应力分析,而是引入了流固耦合的非线性有限元方法,并采用能描述张拉破坏的本构模型来模拟水力劈裂从萌生到发展,贯通过程的全过程。可以准确地描述孔隙水压力在裂隙中传递的过程,也可以描述水压力与裂隙壁面应力场相互作用的过程,从而确定水力劈裂发生时的临界水头和可能的位置。设计时通过优化心墙和坝壳材料的级配及压实参数,设置过渡层或者采用应力补偿技术,可以提高接触区的应力水平,从根本上

防止水力劈裂的发生。

（三）反滤层设计的优化与保护机理

反滤层是土石坝渗流控制系统中的一道“最后防线”，其主要作用就是保证水流顺利排出，阻止上游被保护土体中细颗粒的流失，从而防止管涌破坏的发生。传统的反滤设计大多依靠经验性的几何准则，比如特尔扎吉准则，这些准则虽然方便实用，但是面对宽级配土料、高水力梯度、动态荷载等复杂工况时，其适用性、可靠性就会受到影响。

现代设计理论革新之处在于，对反滤机理有了更深层次的微观认识，设计方法也越来越精细化。研究重点已经由宏观的几何判据转变为对颗粒间相互作用、渗流场耦合行为的分析。

1. 基于过滤稳定性的概率分析方法：考虑土料颗粒级配的随机性，用概率统计理论来评价在给定的水力条件下，不同粒径颗粒发生迁移的概率，从而建立可靠度反滤设计方法。这样就可以科学地度量反滤层的安全裕度。

2. 数值模拟技术的应用，把离散元法和计算流体动力学耦合起来，可以直接在颗粒尺度上再现渗流作用下细颗粒启动、运移和堵塞的过程，揭示自愈合反滤层的形成机理，为优化反滤层级配和厚度提供直观的物理图像和定量依据。

3. 反滤层长期性能研究，创新研究也考虑到了反滤层在长期渗流化学作用下可能会出现堵塞、老化问题。通过试验研究和化学反应动力学模型，对反滤材料的耐久性进行评价，保证反滤材料在整个工程使用年限内都能发挥作用。

上述理论创新使得反滤层的设计由“经验定型”变为“科学定量”，新一代反滤系统更安全可靠、经济合理，能够适应更加严格的工程地质、水力条件，给高土石坝长期安全运行提供保障。

二、面板堆石坝设计理论

混凝土面板堆石坝因为施工方便、适应性广等优势而得到广泛使用。其设计的关键之处在于保证面板的完整以及止水系统的效果，因此对面板应力、接缝位移、堆石料力学性质等进行了细致的研究。

（一）面板应力与接缝位移的精细化模拟

混凝土面板是面板堆石坝的主要防渗结构，其自身结构的安全性十分重要。面板属于一块装有变形体的薄板，会被堆石体沉降、库水压力、温度改变等诸多

因素影响。尤其是高坝工程，巨大的不均匀沉降会造成面板产生过大的拉应力、弯矩，接缝处也会出现过大的张开或者错动，从而威胁到面板的完整性以及止水系统的功能。因此对面板应力及接缝位移的精细化模拟，就成为设计理论创新的重要部分。

创新的关键就是发展出可以反映面板与垫层、堆石体之间相互作用的数值分析模型。使用可以模拟接触面滑移、脱开、碰撞的非线性接触单元，考虑混凝土徐变、收缩、温度效应的壳单元。在整体计算模型中，把面板的精细化结构模型和堆石体的非线性流变本构模型耦合计算，得到堆石体变形传递给面板的复杂荷载。经过这样的模拟，可以准确地预测面板在趾板附近、折线面板转角处等高应力区的应力集中情况，找出潜在的开裂隐患，准确地计算出周边缝、板间缝的张开和剪切位移量，为接缝止水结构的设计提供准确的输入参数。

（二）趾板与周边缝的止水结构设计

趾板和周边缝是面板堆石坝止水系统的重要部位，它把刚性混凝土面板和基岩连接起来，还要适应两者之间由于堆石体沉降而产生的巨大差异变形。该区域止水结构一旦失效，就会造成大坝绕坝渗漏，严重时危及大坝的安全。因此止水结构设计既是面板堆石坝技术成败的关键所在，又是理论创新最活跃的领域。

传统的止水结构大多用铜止水片等金属止水材料，依靠它的塑性变形来适应接缝位移。但是随着坝高增加，周边缝的位移量级越来越大，传统的止水结构不能满足变形要求，容易产生疲劳断裂。

设计理论创新的主要表现形式就是新材料、新结构形式的使用。现代设计一般使用复合式止水系统，形成多道防线。例如把有良好弹塑性变形能力的铜止水片与 EPDM 或 PVC 等高分子材料制成的止水带结合起来，形成“铜片 + 塑料”的双重止水系统。前者是刚性障碍，后者则能承受较大的拉伸和剪切变形，从而大大提高系统可靠性及耐久性。

更深层次的创新就是对止水结构工作机理做细致的分析。利用大型三维非线性有限元分析方法，建立止水带、周边混凝土、基岩、面板整体模型，对模型施加复杂的位移、水压力荷载，分析止水带的应力应变、接触应力、密封性能。分析可以找出极限变形状态中止水结构最薄弱的地方，优化止水带截面形状和布置方式，检验不同工况下止水带的适用性，从而将概念设计转变为性能设计。

（三）堆石料本构模型与参数反演

堆石料是面板堆石坝主要的承重和变形体，对堆石料的力学行为进行准确的描述是整个大坝变形、应力分析的基础。堆石料是散粒体材料，力学性质有明显的非线性、应力依赖性、剪胀性、颗粒破碎效应。使用简单的线弹性或者弹塑性模型，不能很好地模拟出其在复杂应力路径下真实的响应，从而影响面板应力和接缝位移的预测精度。

理论创新前沿就是发展能全面反映堆石料复杂力学性质，更高级的本构模型。邓肯-张 E-B 模型等双曲线模型虽然应用较广，但是对剪胀性和应力路径相关性的描述不足。因此学者们提出了更加完善的弹塑性模型，比如基于临界状态土力学思想的修正剑桥模型、考虑颗粒破碎影响的状态相关剪胀模型、基于广义塑性理论的非正交模型。这些模型可以建立在统一的理论基础之上，对堆石料的应力软化、硬化、体积剪缩、剪胀和循环荷载下进行合理描述，为精细化数值分析提供有力的理论依据。

但是获得这些高级本构模型的大量参数又是一大难关。完全依靠室内大型三轴试验成本很高，很难完全模拟坝体内部真实的应力状态。参数反演分析就成了一项重要的创新技术。该方法利用大坝施工期和运行期的实际变形、应力等监测数据，结合数值计算模型，用遗传算法、神经网络、贝叶斯方法等优化算法，反向求出一组能最佳匹配监测数据的本构模型参数。将现场原型观测和理论模型结合起来，所获得的参数更接近堆石料的原位力学特性，因此可以大大提高数值模拟的预测精度和可靠性，实现了大坝工作性状的“实时校核”和“未来预测”。

三、土石坝抗震设计理论

高地震烈度区里，土石坝的抗震安全是设计的生命线。现代抗震设计理论已经从传统的拟静力法发展到以强震记录、非线性动力响应分析为依据的性能化设计阶段，目的就是保证大坝在罕遇地震下仍能保持基本功能。

（一）坝体残余变形与地震永久变形

地震对土石坝的影响不单是地震过程中产生的动力响应，更重要的是震后永久变形，也叫残余变形。变形有坝顶沉降、坝坡水平位移、坡面塌滑等，是评判大坝震后是否安全、能否继续运行的重要指标。过大的残余变形会使得坝顶高程不足、防渗体开裂或者与其它结构连接失效，从而造成严重的安全隐患。

传统的抗震设计方法,比如 Newmark 滑块分析法,可以估算坡体的永久位移,但是它把复杂的三维失稳问题简化为刚性块体的二维滑动,不能反映坝体内部非线性动力相互作用以及变形的连续分布。理论创新就是发展以动力有效应力分析为基础的残余变形预测方法。该方法使用先进的非线性动力分析程序,采用能反映土体在循环荷载下刚度退化、阻尼增大、塑性应变累积的动力本构模型,对坝体-地基系统在地震作用下的动力响应进行时程分析。该方法不仅可以计算地震时坝体的加速度、应力等动态响应,而且可以直接得到震后坝体各处的残余变形场,准确得到坝顶沉降量、最大水平位移和发生位置,为性能化抗震设计提供直接依据。

(二) 孔隙水压力增长与液化可能性评价

饱和土料(心墙、饱和的坝壳下游区、饱和地基)在地震循环剪切作用下,内部孔隙水压力不断增大。当孔隙水压力接近总应力的时候,土体有效应力接近于零,大部分剪切强度消失,随后就发生液化。液化是造成土石坝地震失稳的重要因素之一,因此对其发生可能性的准确评价是抗震设计的重要内容。

早期的液化评价主要依靠用标准贯入试验等原位测试结果的经验图表法,虽然方法简单,但是对复杂的应力情况和非标准土料适用性较差。现代设计理论创新主要表现在以下几个方面:

1. 有效应力动力分析法的应用,是目前最先进、最可靠的评价方法。通过建立如 UBCSAND 模型等能模拟循环荷载下孔压增长的有效应力本构模型,在非线性动力分析时直接计算地震过程中坝体各部位孔隙水压力的产生、扩散和消散过程。根据孔压比计算结果与液化触发标准比较来确定潜在的液化区和范围。

2. 动三轴试验及本构模型参数标定,对坝料和地基土做不同围压、循环应力比的不排水循环三轴试验,得到材料的抗液化强度曲线,为上述有效应力本构模型提供准确的参数标定,保证数值模拟的真实性。

3. 概率性液化评价框架:考虑到地震动、土体参数的不确定性,采用概率理论,对在给定的地震风险水平下,坝体各个部位发生液化的概率进行评价,从而作出基于风险的抗震设计决策,使评价结果更加科学。

表 4-3 液化评价方法对比表

评价方法	优点	缺点	适用范围
经验图表法 (SPT/CPT)	简单、快速、成本低	适用性受限、不考虑复杂应力路径	初步评估, 经验性强
有效应力动力分析法	准确、可模拟全过程、考虑耦合效应	模型复杂、参数获取难、计算量大	精细化设计、高风险工程
概率性液化评价法	考虑不确定性、量化风险	理论复杂、数据要求高	基于风险的决策、高标准工程

从上表可以看出, 随着技术发展, 液化评价方法由经验性向量化、精细化及概率化演进。

(三) 抗震加固措施与效果评估

对新建工程和有缺陷的土石坝, 选择一种经济合理的加固措施, 并科学评价其效果, 就是理论与实践相结合的重要环节。常见的加固措施有削坡减载、坝趾处设置压重平台、液化地基采用振冲碎石桩、强夯或设置竖向排水体等。

创新之处在于把加固措施的设计、效果评价融入到先进的非线性动力分析流程中, 实现性能化、最优化的设计。具体做法就是: 工程师先建立没有加固的原坝数值模型, 做地震响应分析, 找出薄弱环节, 比如过大永久变形区或者潜在液化区。然后在模型中加入设计的加固措施, 即改变模型几何边界来模拟压重平台, 或者改变地基土材料参数来反映密实处理后的效果。再对同一个地震动进行动力分析, 比较加固前后坝体动力响应、残余变形、孔压增长等, 定量评价加固措施效果。利用数值模拟的评估方法, 使工程师可以系统性地比较各种加固方案的好坏, 优化加固范围和工程量, 以最小的代价取得最大的抗震性能提高, 保证加固后的土石坝达到预定的抗震性能目标。

第四节 岩土工程数值模拟技术

水利水电工程的安全性、长期稳定性都同岩土体的力学行为相关。伴随着计算机技术的迅猛发展，数值模拟已经成为分析复杂岩土工程问题的主要方法。它可以模拟大坝、边坡、地下洞室在复杂荷载下力学响应，也可以预测工程活动给地质环境带来的影响，给设计优化和风险评价提供前所未有的数字化工具。

一、岩土体本构模型研究

正确的表述岩土材料的力学行为是数值模拟成功的基础。本构模型是应力和应变之间的桥梁，本构模型的好坏直接影响到计算结果是否准确。因此，对于水利水电工程中各种不同的岩土介质和复杂的受力环境，深入研究并开发出适合本构模型，有着十分重要的理论和实践意义。

（一）弹塑性与损伤模型的开发

岩土材料本构关系很复杂，具有明显的非线性、弹塑性、应变软化等特点。传统的线弹性模型已经不能满足工程实际的要求，因此能够描述材料屈服后行为的弹塑性模型成了研究的主流。从经典的摩尔-库仑模型、德鲁克-普拉格模型到更能体现土体压硬性、剪胀特性的剑桥模型及其一系列修正模型，理论研究越来越深入，希望能够更好地解释不同应力路径下土体的变形规律。目前考虑土体结构、各向异性、循环加卸载效应等复杂特征的弹塑性模型也取得了较大的进展，为高土石坝等重大工程的变形分析提供了重要的理论依据。

对高陡边坡、大坝基底等坚硬脆性岩体，在荷载作用下破坏是微裂纹萌生、扩展、贯穿的过程，为损伤积累、劣化过程。损伤力学对这类问题有较好的分析能力。用损伤变量来描述材料内部的微观缺陷状况和演化规律，损伤模型可以模拟岩石从弹性变形到宏观破坏的全过程，对岩爆、节理岩体失稳等脆性破坏事件的预测有独特的优势。目前的研究重点在于将弹塑性理论和损伤力学结合起来，建立弹塑性损伤耦合模型，从而同时描述岩土材料在不同围压、加载条件下延性与脆性的变化，使数值模拟结果更加接近物理真实。

水利水电工程中，岩石、混凝土等准脆性材料的力学行为模拟也十分重要。新近发展起来的相场损伤模型，用连续场变量来描述裂纹的几何形态，避免了传统方法在处理裂纹分岔、合并等复杂拓扑变化时所遇到的网格依赖性问题，为模

拟混凝土坝的开裂过程等提供了更为强大的工具。高级本构模型的建立与应用,极大地加深了人们对水利水电工程复杂岩土力学问题的认识,并且提高了预测精度。

(二) 考虑结构面影响的各向异性模型

天然岩体中发育着各种尺度、产状的节理、裂隙、层面、断层等结构面。地质不连续面的存在破坏了岩体的完整性,也使得岩体的力学性质出现了明显的各向异性、非均质性。水利水电工程中大坝坝基、地下厂房围岩等结构面的稳定性很大程度上取决于结构面的力学行为。因此建立能反映结构面影响的各向异性本构模型,是进行真实地质条件下岩土工程分析的前提。

目前模拟结构面影响的方法主要有两种。一类是等效连续介质模型,把含有优势方向结构面的岩体等效成均匀的各向异性连续体。横观各向同性模型可以用来模拟层状岩体的力学行为。该类模型计算速度快,实现方便,适合宏观尺度岩体力学响应分析。研究人员在经典弹塑性模型中加入了描述各向异性张量函数,使不同方向上的强度、变形模量差异被反映出来。另一种方法更为直接,就是直接模拟主要的宏观结构面,用离散裂隙网络模型或者接触面单元来描述断层、节理的几何形态和力学行为。该类方法可以模拟岩体在结构面上发生滑移、张开等局部破坏的方式,对由少数几组控制性结构面所控制的岩体失稳问题有较强的分析能力。近几年来,将等效连续体法和离散裂隙网络法结合起来的尺度建模方法,已经成为研究复杂节理岩体力学行为的重要方法,为水利水电工程高边坡、大型地下洞室群的稳定性评价提供更加可靠的分析手段。

(三) 模型参数的室内外试验确定

任何一个先进的本构模型,应用是否成功都最终取决于模型参数的准确性。岩土本构模型参数的确定是系统性的工程,很大程度上要依靠精细的室内试验和原位测试。室内试验,比如常规三轴压缩试验、真三轴试验、空心圆柱扭剪试验等,是研究岩土材料基本力学性质、探索本构关系、确定模型参数的主要方法。在控制条件下进行试验,可以获得材料在不同的应力路径、不同的排水条件下应力应变关系、强度特性、剪胀(缩)特性、小应变刚度等重要的信息,为邓肯-张模型、剑桥模型、硬化土模型等经典及现代本构模型的参数标定提供基础数据。

但是,单靠室内试验有它的不足。取样过程中扰动、应力释放、尺寸效应等因素,都会使室内试验样品与原位岩土体的性质产生较大的差异。特别是深厚覆

盖层、大尺寸颗粒堆石料、结构强度高的原状土，取得高质量的原状样并进行室内模拟试验很困难。因此，结合现场原位测试来确定或者修正模型参数就显得十分重要。岩土工程常用参数测试方法比较见下表。

表 4-4 岩土工程常用参数测试方法对比表

测试方法	类型	主要测量参数	适用范围 / 特点
常规三轴压缩试验	室内	强度、变形、应力 - 应变关系	模拟不同应力路径，获取材料本构特性
真三轴试验	室内	各向异性强度、变形特性	更真实模拟三维应力状态，但设备复杂
空心圆柱扭剪试验	室内	小应变刚度、剪切模量	测定小应变下的剪切变形特性
旁压试验	原位	变形模量、极限承载力	扰动小，可获取深层土体参数
扁铲侧胀试验	原位	侧向压力、孔隙水压	快速简便，可判别土性
标准贯入试验	原位	贯入阻力 N 值，判别密实度	简单易行，广受欢迎，但精度相对较低
静力触探	原位	锥尖阻力、侧壁摩阻力	连续测量，区分土层，数据准确性高
现场大型剪切试验	原位	粗颗粒土体强度参数	针对大尺寸颗粒土，接近实际工况

为了更可靠地确定参数，现场监测数据反演分析法已经被广泛使用。通过对工程实体（试验坝、基坑、隧道等）施工或者运营过程中产生的变形、应力、孔隙水压力等信息进行监测，用优化算法反演本构模型参数，使数值模拟计算结果与现场实测数据达到最佳匹配。采用联合室内试验、原位测试、现场反演分析等相结合的方式，可以克服单一方法的不足，互相验证、互相补充，得到真实反映工程场地实际情况的本构模型参数，为水利水电工程的安全设计与施工提供有力保障。

二、多场耦合数值模拟

水利水电工程所处的环境是复杂的、多变的，岩土介质常常处在应力、渗流、温度、化学侵蚀等许多因素的共同影响之下。物理、化学场之间互相影响、互相制约，形成了复杂的多场耦合现象。水库蓄水会引起孔隙水压力的变化，进而改变岩土体的有效应力和稳定性。因此进行多场耦合的数值模拟研究，对全面认识工程性状、准确预测其长期安全性有非常重要的意义。

（一）渗流－应力－化学耦合分析

水利水电工程中，渗流和应力场的相互作用对工程稳定性有很重要的作用。隧道开挖、基坑降水或者水库蓄水都会改变岩土体中的渗流场，孔隙水压力的变化会直接影响有效应力，从而引起岩土体的变形甚至破坏。同时应力状态的变化会使得岩土体孔隙或者裂隙发生变形，进而改变岩土体的渗透性。渗流和应力互相耦合的作用在土石坝的固结沉降、边坡稳定分析、水力劈裂等问题上起着决定性的作用。渗流应力耦合分析的理论基础就是比奥理论的有效应力原理。数值模拟就是求解流体连续性方程和固体力学平衡方程耦合的方程组，从而实现整个过程的动态仿真。

除了渗流和应力的耦合，化学场的作用也不能忽略。在盐岩地区岩溶发育、污染场地、核废料地质处置库等特殊工程环境当中，地下水中的化学成分会与岩土矿物产生反应，造成材料溶蚀或者形成新的矿物，从而改变岩土体的孔隙结构、渗透性以及力学强度。渗流、应力、化学耦合的过程属于一个复杂并且长期的效应。混凝土坝体中水渗透会造成钙离子溶滤，降低材料强度；某些黏土防渗屏障里化学品的侵入会造成其膨胀并改变渗透性。模拟此类问题需要构建出能体现化学反应的动力学过程，并能反映其对岩土体的物理力学参数产生影响的复杂本构关系，这是目前岩土工程数值模拟领域中的一个前沿难题。

（二）温度场对岩土工程性质的影响

温度变化对水利水电工程岩土体性质的影响也十分明显，在高寒地区、深部地下工程以及高放核废料处置工程中更加突出。温度的变化会在岩土体内部产生热应力，当热应力大于材料强度的时候就会导致开裂或者变形。混凝土坝等大型结构由于日照、气温周期性变化及水泥水化热，都会产生较大的温度应力，这是造成大坝裂缝的主要原因。寒冷地区岩土体中的孔隙水冻结和融化（即冻融循环）会产生很大的冻胀力，使材料强度急剧降低，严重危及渠道、边坡等工程的稳定性。

温度还会直接改变岩土体的物理力学性质。温度升高，岩石的强度、弹性模量减小，塑性增大。温度变化对土体中结合水状态的影响，会使土的黏聚力和内摩擦角发生变化。温度对渗流、应力场、温度耦合问题产生影响的方式有两种，一种是通过热应力作用在应力场上面，另一种是通过流体（水）的黏度和密度的影响来作用于渗流场。地热开发或者核废料处置等工程中，高温会大大增强岩体中的热对流、热虹吸作用，从而对渗流模式、核素迁移途径产生重要影响。因

此建立考虑温度效应的本构模型以及多场耦合分析框架，对保证这些特殊工程的长期安全有极其重要的意义。

（三）多场耦合在核废料地质处置中的应用

高放射性核废料的地质处置，是人类可持续发展所面对的重大问题，其核心目的就是核废料长期、安全地隔离在地下深部稳定的地质构造里。处置库的安全性评价是一项需要数万年甚至更长时间的长期工作，必须考虑温度、水、力、化学等多场耦合作用。核废料衰变放热会造成处置库周围岩体（围岩）、工程屏障（膨润土缓冲材料）的温度升高，引起一系列的耦合效应。

高温会形成很大的热应力，使围岩开裂或者改变原有裂隙的开度，从而为地下水、放射性核素的迁移提供新的通道。温度升高还会使地下水产生热对流，改变原来的地下水流场。膨润土作为重要的工程屏障，高温会干扰膨润土的水化膨胀过程以及密封性能；地下水的化学成分改变膨润土的矿物组成，影响膨润土的长期稳定性。岩体应力状态、地下水压力、温度分布、化学环境四者之间动态地相互影响，形成一个紧密耦合的系统。

因此，对核废料地质处置库的安全评价，必须依靠可以模拟热、水、力、化多场耦合过程的精细数值模型。利用这些模型可以预测处置库在长时间里将会发生怎样的变化，例如温度场时空分布、围岩应力响应与变形破坏、缓冲材料饱和和劣化、放射性核素泄漏到地下介质后迁移路径和速率等。复杂数值模拟对计算能力和理论模型都有极高的要求，但是它仍是进行处置库设计优化、性能评价和长期安全论证不可缺少的手段。

三、并行计算与精细化模拟

由于工程规模不断扩大，地质条件越来越复杂，传统的单机计算模式已经不能满足水利水电工程对大规模、高精度数值模拟的要求了。发展基于并行计算的精细化模拟技术，可以快速准确地求解复杂的工程问题，这是数字化设计发展的必然趋势，也为以前难以解决的高难度工程问题提供了一种新的解决方法。

（一）大规模计算的并行算法实现

水利水电工程数值模拟，特别是三维、非线性、多场耦合的复杂问题时，计算量非常大，自由度常有数百万甚至更多。传统的串行计算方法处理这类问题耗时长久，甚至无法完成计算，严重影响了数值方法在工程上的应用。并行计算技

术把一个大的计算任务分成若干可以同时执行的子任务，分配给不同的处理器并行完成，大大缩短了计算时间，提高了求解效率。

岩土工程领域中区域分解法是进行有限元并行计算的主要方法。该方法把整个计算区域（大坝或者边坡）的网格分成若干个子区域，每个处理器负责一个或者多个子区域的计算。计算的核心就是高效地求解大规模的线性方程组，目前的研究和应用热点有并行共轭梯度法、多重网格法等。经过精心设计的并行算法可以达到减少处理器间通信开销、获得高加速比、保持良好的并行效率的目的。应用该技术之后，可以对含有数亿个网格单元的复杂地质模型实施全过程的仿真，给工程精细化设计以及风险评价赋予强有力的计算支持。

（二）岩土工程三维精细化建模技术

数值模拟的精度不单和计算方法有关，还和地质模型的真实性和密切相关。传统的基于二维剖面的分析方法，不能真实地反映地质体在三维空间中的实际形态以及相互联系。三维精细化建模技术是利用各种勘察数据源，建立能够真实再现场地地质结构和工程布局的数字化三维模型，是精细化模拟的基础，正在改变水利水电工程的勘察设计方式。

精细化建模的过程通常包括以下几个步骤：

1. 数据融合与处理，即把钻孔数据、物探图像（地质雷达）、遥感影像、激光扫描点云等各种来源、不同形式的地质信息融合起来，经过空间配准和数据清洗，形成统一的、标准的地质数据库。

2. 地质体三维建模，使用 GOCAD、Surpac 等专业建模软件，采用隐式或者显式建模方法，建立地层、岩体、断层、褶皱、滑坡体等复杂地质体的三维空间模型。先进的建模算法可以按照地质统计学原理，对稀疏钻孔数据进行空间插值，得到符合地质规律的连续地质体。

3. 工程与地质一体化建模，即把大坝、厂房、隧洞等工程结构的三维模型嵌入到三维地质模型里，形成一个能够完整体现工程与环境相互作用的一体化模型。这就为后面数值计算提供准确的几何边界和初始条件，实现了从地质勘察到设计分析的数字化全链条。

（三）数值模拟结果的验证与不确定性分析

数值模拟是一种近似分析的方法，计算结果的可靠性必须经过严格的检验，同时还要对其中存在的不确定性有充分的认识，并加以量化。数值模拟结果的检

验一般用多种方法。最直接的方法就是与现场监测数据进行对比，把计算得到的变形、应力、渗流等与实际观测值进行对比，这是检验模型和参数合理性的最终标准。也可以通过与物理模型试验（离心机试验）结果的对比，或者与其它成熟的数值计算程序的对比来判断计算结果是否正确。

不确定性分析也是评价数值模拟是否可靠的一个部分。岩土工程中不确定因素很多，地质模型的不确定因素有地层界线、断层位置，岩土参数的空间变异性，测试误差，本构模型自身的简化和假设等。概率分析法、蒙特卡洛模拟、可靠度分析等都是量化这些不确定因素影响的主要方法。通过随机抽样输入参数做大量的重复计算，可以获得工程响应（位移、安全系数等）的概率分布，所以不仅可以给出确定的预测值，还可以评价其发生的概率以及相应的风险水平。用概率来评价风险的方法可以给工程决策提供更全面、科学的依据，有利于推动从传统的确定性设计向先进、可靠度为基础的设计方法的转变。

第五章 水利水电工程数字化设计基础

伴随着信息技术的迅速发展，水利水电工程设计也正在由传统的二维模式向三维数字化、信息化转变。建筑信息模型技术作为数字化转型的主要驱动力，由于具有三维可视化、信息集成、协同工作等优点，在水利水电工程结构复杂、专业交叉、生命周期长等问题上找到了一种新的解决方式，使设计理论和实践发生了改变。

第一节 BIM 技术在水利水电工程中的应用

BIM 技术是设计、施工、运维等工程阶段的数据集成共享的数字化信息模型创建和管理的方法，它在工程全生命周期中得到运用。水利水电工程中应用此项技术，可以改善设计流程、提高设计质量，在多专业协同、工程量计算、施工模拟等方面具有很大的潜力，是推进行业精细化管理、高质量发展的重要技术支撑。

一、水利水电工程 BIM 建模标准

统一建模标准是 BIM 技术发挥最大效用的前提和基础。根据水利水电工程的特殊性，在通用标准的基础上，制定出符合行业特点的建模规范，即对数据交换格式进行扩展、构件分类编码进行统一、模型精细度进行明确定义，以保证信息模型在各个阶段、各个专业之间能够顺利传递和高效利用。

（一）IFC 标准在水利工程中的扩展

工业基础类标准是建筑信息领域开放的数据交换格式，主要是为建筑工程服务的。但是其现有的框架不能完全涵盖水利水电工程特有的大坝、溢洪道、输水隧洞、水力机械等复杂的构件和系统。因此，对其开展行业性的拓展就势在必行。扩展工作主要是定义新的实体类型，来准确描述水工构筑物复杂的几何和拓扑关系。针对大坝不同坝段、廊道系统、坝基处理等创建相应的 IFC 实体并确定其属性集。还要对水文、地质、金属结构等专业信息定义专门的属性和关系，保证这

些重要数据在模型中被正确地表示出来，并且可以无损地交换。从而解决不同的 BIM 软件平台之间的数据互通问题，为水利工程 BIM 数据的标准化、信息共享打下牢固的基础。

此项拓展不但是技术上数据结构的完善，更是行业知识积累和固化的过程。与国内水利水电勘测设计协会等行业机构合作，将成熟的设计规范、工程经验加入到 IFC 扩展标准里，形成既符合国际标准又能指导国内实践的行业数据标准。这样 BIM 模型就不再是单纯的几何形状的展示，而会成为包含水利工程专业知识以及设计意图的数字资产，给后续的仿真分析、施工管理、智慧运维提供高质量的数据源。

（二）构件分类与编码体系的建立

水利水电工程规模大、构件数量多、种类繁多，建立科学统一的构件分类编码体系对模型的有序管理、信息检索十分重要。有效的编码体系可以给 BIM 模型中的每一个构件赋予唯一的一个数字身份，这个数字身份包含着构件的几何信息、物理属性、功能定位、材料规格、造价信息等。该体系一般采用分层结构，可以按照工程部位、专业、构件类型等几个方面来划分，例如把工程分为挡水建筑物、泄水建筑物、发电厂房等大类，再逐级细化到坝段、闸门、水轮机组等具体的构件。

建立编码体系可以参照 OmniClass 等国际通用的分类标准，根据水利工程自身专业特点做相应的调整和优化。编码规则应该具备扩展性、唯一性以及易读性的特点，以适应设计规划到使用管理全程的要求。通过将编码与 BIM 模型进行深度融合，可以对大量的模型和数据对象进行有效的管理，为工程量自动统计、物料采购、施工计划的制定以及后期资产的管理提供准确的数据支持。统一编码标准是多专业模型集成、数据互通、全生命周期信息传递的前提，也是连接设计、施工、运维数据链的重要环节。

（三）LOD 精细度定义

模型发展等级规定了 BIM 模型在项目不同阶段应该达到的详细程度和信息丰富度，是评价模型质量、指导建模工作的“度量衡”。根据水利水电工程的特点，有必要对通用 LOD 等级进行细化和本地化，明确从概念设计到竣工运维各个阶段中，坝体、厂房结构、机电设备等模型单元应该包含的几何信息和非几何信息。

1. 项目初期，模型主要以体块或者通用形式表达工程总体布局、规模、位置，

用以进行方案比选、投资估算。此时的模型中只包含基本的尺寸、面积、体积等数据。

2. 进入技术设计和施工图设计阶段，模型构件的几何尺寸、形状、定位要精确，且应带有材料、规格、型号等属性信息，满足多专业协同设计、碰撞检查、施工图出图的要求。

3. 在加工制造和施工阶段，模型要具有足够详细的信息来指导构件的工厂预制、现场安装，例如钢筋布置、预埋件精确定位等。

4. 最终竣工模型要能真实体现工程实际建造成果，包含运维所需的各种信息，比如设备手册，维修记录等，最后交付给运维单位。

明确定义的 LOD 可以给各个方提供清晰的工作指导以及交付标准，保证每个阶段 BIM 模型的适用性、准确性、信息连续性，防止由于过度建模或建模深度不够而造成的浪费时间、资源的现象发生。

表 5-1 水利工程 BIM 模型 LOD 等级示例表

LOD 等级	阶段	几何信息描述	非几何信息描述	主要应用
LOD 100	概念设计	符号表示、体块	概略预算信息	方案比选、初步估算
LOD 200	方案设计	近似尺寸和形状	系统级参数	总体规划、工程量概算
LOD 300	详细设计	精确尺寸、形状和位置	详细材料、规格、型号	碰撞检查、协同设计
LOD 350	施工图设计	构件详图、连接关系	供应商信息、技术参数	施工图出图、预埋件定位
LOD 400	制造 / 建造	制造或安装所需的具体信息	生产数据、安装说明	构件预制、施工指导
LOD 500	运维管理	实际建造状态	运维手册、保修信息、维护记录	资产管理、智慧运维

由表可知，等级越高，模型几何精度和信息量就越多，可以满足工程项目的各个阶段的要求。

二、BIM 在协同设计中的应用

水利水电工程设计包含水工、地质、机电、施工等各个专业。传统二维设计模式中各个专业间的信息交流不畅，图纸上出现错漏碰缺的情况时有发生。BIM 技术出现以后，凭借创建统一的三维信息模型，给多专业协同设计赋予了革命性的平台，明显改善了设计的效率与品质。

（一）多专业模型的碰撞检查与协调

BIM技术最直接的应用价值之一就是碰撞检查。三维环境下可以将土建结构、机电设备、金属结构、预埋管线等各个专业的BIM模型整合在一起。利用软件可以自动检测构件之间在空间上出现的冲突，即直接重叠的硬碰撞以及不满足安全距离或者检修空间要求的软碰撞。可以发现预埋在混凝土中的冷却水管与结构钢筋的冲突，也可以发现水轮机蜗壳的安装空间与厂房结构梁柱的冲突。可视化的检查方式，可以将传统二维图纸会审中容易被忽略的空间冲突问题，在设计阶段就暴露出来，使设计师可以及时进行调整和优化。

定期召开模型协调会议，在统一的BIM模型上可以直接对碰撞问题进行讨论，商量解决办法。这有利于避免由于设计错误在施工阶段造成的返工、材料浪费等问题，降低工程成本，缩短工期，改善管线布置，提高建筑空间的利用率，改善设备的安装、运行和维护条件。应用碰撞检查，把设计质量控制的关口前移到设计初期，实现了从被动解决问题向主动预防问题的转变，是保证设计方案可施工性的重要手段。

（二）设计成果的云端协同与版本管理

由于项目规模的扩大和参与方数量的增加，BIM模型数据量越来越大。怎样有效地、安全地管理、共享海量的BIM模型数据，成为亟待解决的问题。以云技术为依托的BIM协同平台给它提供了一个理想的解决途径。该类平台可以使得所有的参与方（设计单位、业主、咨询单位等）随时查看最新的BIM模型以及相关的文件，不受地域、组织的限制。设计人员可以实时把本专业模型上传到云端，平台会自动将各个专业模型整合成完整的项目模型，从而达到多专业并行设计的目的。

云协同平台重要的一个功能就是严格的版本管理。模型每次修改都会被记录下来，形成可追溯的历史版本，保证所有的项目成员使用的都是最新的设计成果，避免因使用旧版图纸或者模型而产生的错误。设计变更发生的时候，模型的变动会被清楚地记录并跟踪下来，与之有关的工程量、造价等信息也会随之联动更新。平台还具备权限管理、问题跟踪、在线审批等功能，能规范协同工作流程，保证数据的一致性、安全性，明显提升跨专业、跨地域团队的协作效率。

（三）基于BIM的三维可视化会审

传统的会审依靠二维图纸，对于水利水电工程里繁杂的三维空间联系（廊道

系统,机电管线布置等),与会者只能依靠想象,沟通效率低,容易产生误会。BIM 三维可视化会审彻底改变了这样的局面。利用 BIM 模型中包含的专业信息进行投影,在大屏幕上或者使用虚拟现实设备展示,使与会人员可以直观地进入工程内部,实现 360 度无死角漫游、剖切、查询。复杂的结构细节、设备布置、空间关系一目了然,大大降低了识图难度。

会审时,在图纸上发现的问题可以在三维模型上进行标记定位。各个参与方都以同一个直观的数字模型为基础来展开讨论,准确地表达出自己的意见,很快达成一致。设计方案好坏、施工难题、运行维护方便程度等都可以用三维模型进行模拟和评价。“所见即所得”的沟通方式大大提高了会审的效率和决策的准确性,保证设计意图被各方正确理解,减少后期由于沟通不畅而造成的变更。

三、BIM 模型的信息集成与应用

BIM 模型的核心价值就是它的信息属性。它不单单是三维几何模型,它还是一个含有丰富工程数据的结构化数据库。利用模型中所包含的各种信息可以大幅度提高工程量统计、施工管理和整个项目的生命周期管理效率和水平。

(一) 工程量自动统计与造价估算

传统的工程量统计依靠人工识读二维图纸,手工计算或者用算量软件重新建模,过程繁杂、耗时且易出错。BIM 技术可以实现工程量的高精度自动提取。因为 BIM 模型中的每一个构件都带有准确的几何尺寸、材质等信息,所以可以从模型中直接获取各类构件的材料数量、长度、面积、体积和重量等工程量数据,例如混凝土体积、钢筋重量、模板面积等等。该种自动化算量方式大大解放了造价工程师的生产力,使造价工程师可以将更多的精力投入到成本控制、价值分析等更高层次的工作当中。

更进一步,把 BIM 模型同造价信息数据库联系起来,就可以达到动态成本估算的目的。当设计方案发生改变的时候,BIM 模型就会随之更新,与之相关的工程量以及造价也会自动重新计算,从而给设计过程中的成本控制提供实时的反馈。因此设计团队可以对不同的方案进行快速的造价对比,在设计初期就做出更加经济合理的决策。依靠模型实现精细化、动态化的造价管理,使投资估算的准确性大大提高,也极大地提高了项目成本控制的效果。

（二）施工进度模拟与资源管理

把 BIM 三维模型和施工进度计划（时间维度）相融合，就构成了四维 BIM。利用 4D 施工模拟可以将整个建造过程用三维动画直观地展示出来，并且可以清晰模拟出每天、每周的施工情况。施工人员按照施工方案的可行性来对施工方案进行审查，优化施工工序，合理安排塔吊、运输车辆等大型机械的工作时间和空间，防止场地冲突。可视化预演可以提前发现施工中会遇到的问题，避免现场返工，保证施工进度。

4D 模拟不单在计划阶段发挥作用，在施工过程中也起着重要的作用。将实际施工进度数据输入模型之后，就可以对计划进度与实际进度展开动态对比，从而让项目管理者及时察觉进度落后的部分并探究原因，进而采取纠偏举措。将人力、资源，材料，设备等信息加入到模型之中，就可以对资源的需求进行准确的预测和动态的管理。系统按照施工进度计划生成某一时间段内所需要的混凝土、钢筋等材料用量清单，给精准采购和减少库存提供依据，从而达到精益建造的目的。

（三）设计信息的全生命周期传递

BIM 技术最终的目的就是实现工程信息的全生命周期管理，打破设计、施工、运维阶段的信息壁垒。设计阶段所建立的包含丰富信息的 BIM 模型，不应该在施工结束后就被废弃，而应该作为核心的数字资产，经过更新和补充之后，最终交付给业主，用于工程的长期运营和维护。竣工信息、设备参数、供应商信息、操作手册、维修保养记录等构成竣工 BIM 模型，一起组成了工程完整的数字孪生体。

运维阶段管理人员利用数字孪生模型，可以快速找到任何一个设备或者构件，查询其所有的信息。当某个水泵出现故障的时候，可以在模型中迅速找到该水泵，获得它的型号、安装日期、历史维修记录、更换备件规格等信息。将 BIM 模型同物联网传感器、监控系统等融合起来，便可对工程运行状况实施实时监测，并开展预测性维修。基于 BIM 的资产管理方式可以大大提高运维效率、智能化程度，缩减全生命周期成本，最终达到设计信息价值最大化的目的。

第二节 三维协同设计平台构建

水利水电工程数字化的时代，设计工作的复杂度日益增大，对于协同作业的要求也越来越高。因此建立一个高效、稳定、安全的三维协同设计平台就成为提高设计质量、提高效率的关键动力。这样的平台不是简单的堆砌软件工具，也不是简单的改善工作流程或者数据来源，是以先进的架构理念为基础，完善的工作模式为支撑，整合各种信息，形成一套完整的数字化解决方案。也是进行设计理论创新的主要阵地。

一、平台架构与技术选型

一个成功的协同设计平台，最根本的就是科学合理的设计顶层架构，谨慎地选择技术。这些因素直接决定平台性能的好坏、可扩展性、可靠性、未来的发展潜力。平台架构要契合水利水电工程设计专业特性，即具备强大的高性能计算能力，又具有方便的访问性，从而保证系统可以支持大型的、长周期的复杂的工程项目。

表 5-2 协同设计平台主要技术架构对比

特性 / 架构	C/S 架构	B/S 架构	微服务架构
部署方式	客户端安装	浏览器访问	独立部署
计算能力	高（利用本地硬件）	低（依赖服务器）	灵活（按需扩展）
用户体验	丰富、流畅	简单、便捷	模块化、可定制
维护难度	客户端更新复杂	服务器端集中维护	独立服务维护
适用场景	核心设计、复杂计算	远程协同、轻量化浏览	复杂业务、快速迭代
扩展性	较差	较好	优秀（水平扩展）

（一）基于 C/S 与 B/S 的混合架构

水利水电工程三维协同设计平台在技术实现上一般都采用 C/S 和 B/S 相结合的混合架构模式。该模式把两种架构的优点结合在一起，满足不同的应用场景。混合架构的核心思想就是把不同的任务交给适合它处理的客户端形态，达到整体性能和用户体验的最优。

C/S 架构主要完成对计算资源和图形处理能力要求比较高的主要设计工作。大型枢纽建筑物三维建模、复杂的水力学和结构力学仿真计算、海量点云数据处理与可视化等工作，都必须充分发挥本地计算机强大的硬件性能来保证操作的流

畅性、实时性。设计人员在本地安装高性能客户端软件之后,可以对模型做细致的创建与修改,然后将创建修改的数据同后台数据库实施高效同步以及版本控制。此种模式保证设计工作专业、质量。

B/S 架构主要是为了实现轻量化、跨平台的协同和管理,使平台更加便于访问和使用。项目管理者、审核员以及相关方不需要安装专门的软件,只要使用标准的浏览器就可通过网络进入系统随时开展工作。可以随时查询项目信息,查看设计成果的三维模型的在线轻量化浏览,查阅图纸文档,审批工作流程,监督项目进度。B/S 架构可以降低平台的使用门槛,有利于跨区域、跨部门的合作,使项目全生命周期各个参与者之间可以高效、透明地交换信息。混合架构把 C/S 架构深度设计能力同 B/S 架构广度协同能力结合起来,已经成为水利水电工程协同设计的最佳技术范式,如上表所示。

（二）微服务架构的模块化设计

因为水利水电工程设计复杂,需求不断变化,所以后端架构趋向于微服务架构。其思想就是把一个庞大而复杂的单一应用拆解成若干个小的、松耦合的、独立部署的服务。每一个微服务都是围绕某一个具体的业务功能来建立,比如用户权限管理、模型数据管理、文件版本控制、协同会商、任务流程引擎等等。各服务用独立的数据库、独立的部署单元,使用轻量级的通信方式进行合作。

使用微服务架构有明显的优势:它使系统更灵活,也更容易维护。开发团队可以对不同的微服务分别进行开发、测试、部署、升级,不会影响到整个平台的其它部分,从而加快了新功能迭代的速度以及对业务变化的响应能力。同时系统也具有更好的容错性。单个微服务的故障不会造成整个平台的崩溃,用服务降级、熔断等方式可以隔离故障,保证核心功能的稳定运行。

微服务架构给平台带来强有力的水平扩展能力。当某个特定功能(三维模型渲染、数据转换等)的访问压力增大时,只需要对这个功能对应的微服务进行单独的资源扩展和负载均衡,而不需要对整个平台进行扩容。精细化资源调配一方面可以提高系统的处理能力和并发性能,另一方面又能提高硬件资源的使用率,降低平台运行成本。使用容器化技术和容器编排工具来管理微服务可以实现微服务的自动化部署、动态伸缩、高效运维等功能,给高可用、高弹性协同设计平台的创建提供强有力的技术支持。

（三）数据库技术与数据安全策略

协同设计平台的数据中心是整个系统的中枢，数据库技术选择的好坏、数据安全策略是否得当，直接关系到工程数据的完整性、一致性、保密性。由于水利水电工程数据具有多源异构的特点，所以平台一般会使用混合数据库存储的方式。对于项目信息、用户信息、权限配置、任务流程等结构化业务数据，会使用关系型数据库（PostgreSQL 或者 MySQL），利用其强大的事务处理能力以及数据一致性保证，保证核心业务逻辑的严谨性。BIM 模型、GIS 数据、设计文档、点云等非结构化或者半结构化的数据则采用对象存储服务或者 NoSQL 数据库来管理，从而获得更好的存储效率和可扩展性。

数据安全是水利水电工程协同设计平台的生命线，因此必须构建全方位、多层次的安全防护体系：

1. 身份认证、访问控制平台有严格的认证制度，实行多因素认证。根据角色访问控制模型来对不同用户的操作权限进行细致的划分，保证用户只能操作其职责范围内的事项，防止越权或者非法操作。

2. 数据传输和存储加密，用 SSL/TLS 对整个数据传输过程进行加密，防止数据在传输过程中被窃取或者篡改。数据库中敏感信息及存储的各种文件也都做了加密处理，即使数据物理介质泄露，内容也不能直接读取。

3. 操作审计、日志追踪，平台要具备完备的日志记录功能，对所有的用户重要操作进行记录，即登录、文件上传下载、模型修改、权限变更等。审计日志对于追溯安全事件、认定责任是不可缺少的。

4. 备份与灾难恢复，平台制定和执行定期数据备份策略，有全量备份和增量备份两种，将备份数据存放在异地。还要拟定完善灾难恢复预案，在硬件故障、自然灾害等情况下能够很快地回复平台服务及工程数据，保证业务连续性。

二、协同工作流程设计

技术架构是平台的骨架，精心设计的协同工作流程则是平台的灵魂。它把技术能力转变为实际的设计生产力，改变传统的串行设计模式，重新塑造专业之间、部门之间的合作方式为并行协同，从而大大提高整体的设计效率和质量。

（一）统一用户权限与角色管理

水利水电工程项目多专业、多团队参与时，创建起一套清楚的、严格的并且

有弹性的统一用户权限与角色管理体系,是保证协同工作有序进行的前提。平台要创建起一个集中式的身份认证与授权中心,对项目里的个人以及单位实施统一的管理。该体系使用的是基于角色的访问控制模型,将权限和角色联系起来,然后把角色分配给用户,使权限管理变得简单。

平台预先设置了一套符合水利水电工程设计流程的典型角色,即项目负责人、专业负责人、设计工程师、校核人、审核人、审定人等。每个角色都会得到一组权限,不仅仅有基本的读、写、删权限,更是被细分到对于特定类型的数据、某个项目阶段或某种行为行为的控制上,例如枢纽布置图、厂房结构模型、地质数据、初步设计、招标设计、施工图设计、创建版本、提交审核、发布成果等。水工专业设计工程师编辑本专业 BIM 模型时具有读写权限,而对电气专业 BIM 模型只有读权限;项目负责人可以查看所有专业的成果及审批流程。权限设定既能让设计者很快地高效完成本职工作,又能防止因操作失误或者信息泄露造成的错误,保证工程数据的安全、统一。

(二) 任务分发与流程追踪机制

协同设计平台的重要作用之一,就是把传统线下、模糊的工作流转过程转变为线上、清晰、可追溯的数字化流程。因此平台内部就具备了强大的任务分发以及流程追踪引擎。项目管理者可以按照项目的 WBS(工作分解结构)在线创建设计任务,确定任务内容、负责人、参与者、起止时间,关联需要的设计资料、模型和文档。任务创建之后,系统就会自动给相关人员发送通知,保证信息及时送达。

设计流程不再依靠口头或者邮件进行传递,而是固化成了平台上的工作流模板。经典的“设计、校核、审核、审定”流程在平台里可以可视化地定义出来。设计人员完成一项设计任务提交以后,系统会触发流程,把任务流转到校核人。校核人校核后转交审核人,审核人审核后转交审定人,依此进行。每一个流程节点都可以设置不同的操作权限以及完成标准。整个过程中所有的参与者可以在平台上看到任务当前的状态、所处的环节以及历史的流转情况。平台给出甘特图、看板等可视化手段,项目管理者能够很容易地看到整个项目的进度,在发现问题之后能够即时进行资源调度、风险预警。该机制让设计过程中的每一项工作都被透明化,从而达到管理的精细化以及过程全程可追溯的目的,给项目质量控制和责任认定打下坚实基础。

（三）在线沟通与标记批注功能

打破沟通壁垒、减少信息传递不畅所造成的返工，协同设计平台为交流的现场性提供支持，让交流回到设计现场之中。平台提供三维模型实时会商的功能，各个专业的设计人员可以同时进入同一个模型场景，就具体的设计问题进行交流。每个人的视口操作都可以同步给其他人，配合语音或者文字聊天，如同身处一室，极大地提高了沟通效率。平台还带有各种类型二维图纸、三维模型的批注工具。用户可在模型构件或者图纸上的某个位置添加问题标记、意见批注、测量尺寸等内容。批注信息会与模型版本和具体构件紧密绑定，并且可以生成待办事项清单交给责任人处理。问题提出、处理、关闭，就形成了一整套的闭环。以模型为依据的交流方式，使问题同设计对象直接相连，避免口头表述造成的含糊不清、歧义多端，问题定位更准确、沟通意图更明确，所有讨论意见和修改建议有据可查，成为项目珍贵的数字知识资产。

三、多源异构数据融合

水利水电工程设计所用的数据种类繁多、来源不同、格式也不同。怎样把分散在各个系统中的孤立数据融合起来，创建起一个统一、完整、精确的工程数字孪生基础，就成了协同设计平台要应对的主要技术难题。数据融合程度越深，融合的广度就越大，平台协同设计的价值就越高。

（一）CAD、GIS、BIM 数据的集成

CAD、GIS、BIM 是水利水电工程设计中三种主要的数字技术，从不同的角度来描述工程对象。CAD（计算机辅助设计）一直以来都是工程图纸生产的主要工具，可以提供准确的二维几何信息和部分三维实体模型。GIS（地理信息系统）是从宏观地理空间尺度上对工程所在区域的地形地貌、水文气象、地质构造、土地利用等空间数据进行管理的系统，给工程规划、环境影响评价提供依据。BIM（建筑信息模型）是以参数化的三维数字模型为基础，将工程对象的几何信息和非几何信息（材料、性能、造价、进度等）集成在一起的一种方法，是实现精细化设计和全生命周期管理的重要手段。

这三种数据在传统的设计流程中是相互独立的。协同设计平台的重要功能之一就是打破数据壁垒，把它们无缝融合。平台要具备强大的数据接口以及转换引擎，可以解析兼容主流的 CAD、GIS、BIM 等软件格式。创建统一的地理空间坐

标参照系之后,平台可以把精细的 BIM 模型(大坝、厂房)正确地放置到宏观的 GIS 场景中,实现微观工程实体和宏观地理环境的融合可视化。

这不是简单的叠加,而是数据层面的深度整合。平台通过 GIS 分析出来的洪水淹没范围和 BIM 模型进行碰撞检查来判定建筑物的防洪安全性;将 BIM 模型中含有的工程量信息和 GIS 中材料运输线路的数据融合起来,从而改善施工方案。跨领域数据的集成使设计师在设计的过程中可以对综合分析、决策有一个统一的视角,从而大大提高设计的科学性、系统性。

(二)地质勘探数据与地形数据的融合

水利水电工程同自然地质条件密切相关,详尽准确的地质、地形资料是工程设计的基础。协同设计平台要有强大的处理这两种重要的原始数据的能力。地形数据主要用无人机倾斜摄影、激光雷达扫描等现代化手段来获得,生成数字高程模型、数字地表模型、三维实景模型。地质勘探数据来源于地质钻孔、物探剖面、现场试验等,提供岩土类型、地层分布、断层构造、地下水文等地下信息。

平台通过专业的数据处理模块,把分散的、多源的地质勘探数据(钻孔柱状图、岩心样本数据等)进行三维空间插值与建模,创建出可以直观表现地下地质结构的三维地质体模型。然后,将此三维地质体模型与准确的三维地形模型在统一坐标系下配准、融合,就可以得到“地上地下一体化”的数字场区模型。设计师可以任意对模型进行剖切,清楚地看到坝基、厂房基础等重要部位的岩层分布和不良地质体的空间位置,为枢纽布置、基础开挖、边坡支护等设计方案比选提供前所未有的直观依据。这样就极大地降低了对于复杂地质条件的认知难度,有效防止由于地质问题认识不清所造成的后期设计变更以及工程风险。

(三)设计文档与模型的关联管理

设计时除了产生图形化的模型数据外,还会产生大量的非图形化数据,计算书、设计说明、技术规范、会议纪要、往来函件等。设计文档和三维模型一起组成了完整的成果。在传统的管理模式下,文档和模型是分开存储的,二者之间的联系依靠人工记忆管理,容易造成信息脱节、版本不一致。协同设计平台通过模型和文档之间强关联来解决此问题。

1. 双向链接:平台给每一个 BIM 模型构件和设计文档赋予一个唯一的身份标识,再通过建立关联数据库的方式来形成模型和文档之间双向的关联。用户点击任何构件(例如一台水轮发电机组),系统会弹出和该构件有关的所有文档,

例如设备规范书、安装详图、计算说明等。相反，用户在文档库中查看一份计算书的时候，也可以通过点击定位到模型中对应的构件，实现图模联动。

2. 版本同步控制：该种关联管理与平台版本控制紧密结合。当模型或者文档版本发生更新的时候，系统就会自动提示出相关的链接关系，保证用户所看到的信息是最新的、最准确的。保证设计数据的一致性、完整性，防止使用错误的文档、模型造成决策失误。通过把分散的信息进行结构化、关联化的处理，工程数据不再是孤立的“信息孤岛”，而是一个有机、可检索、联系紧密的知识库，信息的价值也得到了很大的提高。

第三节 数字化设计标准体系

水利水电工程设计数字化转型，实质上就是创建起一套完备、科学、协同的数字化设计标准体系。是数据互认、流程互通、成果共享的基础，也是实现设计理论创新、数字技术深度融合发展的一种基础。创建该体系的目的是形成行业共识，规范技术的应用，为工程全生命周期的数据贯通和价值挖掘打下良好的基础。

一、数据标准与交换格式

数据是数字化的生命线，数据的标准化可以保证信息无损地传递、协作。缺少统一的数据标准，各专业、各阶段、各软件之间就会形成无法跨越的“数据孤岛”，严重阻碍数字化设计效能的实现。因此必须从源头开始定义数据规范，统一数据语言，建立通用的交换桥梁。

（一）几何数据与非几何数据的定义

水利水电工程数字化设计中信息模型由几何数据和非几何数据组成，二者紧密结合，缺一不可。几何数据是工程实体空间形态的数字化表达，用三维坐标、尺寸、形状等参数来准确描述大坝、厂房、泄洪洞、地质体、设备管线等的空间位置、形态轮廓、拓扑关系。该类数据是进行可视化设计、空间冲突检查、工程量计算、虚拟现实展示的基础载体，给工程师提供直观的数字沙盘。

非几何数据，又叫属性信息，是附着在几何实体上，用来描述其物理、化学、功能、管理等特性的一组信息。在水利水电工程中，材料的强度等级、弹性模量、抗渗等级、设备的型号规格、生产厂家、采购日期、保养周期、施工进度计划、

资源需求、成本信息、水文地质移民专业分析数据等都属于此类。这些数据使三维模型有了丰富的内涵，使三维模型由“空壳”变为具有工程全生命周期信息的“智慧体”，是进行性能分析、仿真模拟、造价估算、运维管理等高级应用的基础。

几何数据和非几何数据的关系就如同皮之不存，毛将焉附。几何模型给非几何数据赋予了清晰的挂载对象和空间逻辑结构，使繁杂的工程信息能够有条理地归入到统一的数字化模型当中。非几何数据给几何实体赋予灵魂，让其超越物理形态而有了分析、管理价值。只有将两者标准化、一体化定义、集成在一起，才能形成完整的、有效的、可以支撑全生命周期应用的工程信息模型，才能发挥数字化设计的价值。

（二）统一的数据字典与元数据标准

数据字典是数据标准化的主要工具，对工程中的每一个数据项都统一命名、定义、分类、赋值、编码，使得信息在不同的系统、不同的参与者之间传递时都能得到唯一、没有歧义的解释。在复杂的水利水电工程中，创建统一的数据字典就显得十分重要。它应包含勘测、设计、施工、运维全过程，涉及水工、地质、机电、施工、经济等各个专业所有的数据元素，形成一本全行业的通用词典，从而消除由于术语混乱、编码不一致而产生的数据集成障碍。

元数据是对数据本身的数据，因此元数据的标准化也十分重要。元数据是对数据来源、数据格式、数据精度、数据创建时间、数据责任人、数据修改历史等背景信息的描述。创建统一的元数据标准，可以保证每条数据的来源清楚可辨，给数据的质量评定、版本管理、权限控制、长期追溯赋予可信的支撑。在数字化交付、资产移交时，完整的元数据是保证数据可用、可信、合法的重要凭证，也是数字资产长期价值的保证。使用统一的数据字典和元数据标准，从根本上提高数据治理水平，为之后的数据挖掘、人工智能应用、知识图谱构建提供高质量的数据基础。

（三）跨平台数据交换格式

数字化设计实践过程中，由于不同的专业、不同的单位所用的软件平台不一样，数据孤岛问题也越来越突出。为了打破软件壁垒，达到异构平台之间数据交换、协同工作的目的，就必须采用并规范统一的、开放的数据交换格式。这是数字化协同的“普通话”，保证模型以及信息在各个软件之间传递的时候不会失真或者降级。

当前,行业内主流的开放式数据交换标准主要包括以下几类:

1.IFC 是建筑信息模型领域应用最广泛的行业基础性标准,给出了一种开放中立的数据模型,可以定义建筑、设备、管线等对象的几何信息和属性。在水利水电工程中,可以借鉴其框架来标准化地对水工结构物、厂房设备等进行表达,从而达到跨专业、跨软件的模型整合和信息共享的目的。

2. 对于某些领域内的数据交换也会使用一些专用格式。LandXML 常被用来进行地形、道路、管网等土木工程领域数据的交换,能传递地形模型、线路走向、纵断面、横断面等信息,对于水利工程总布置、枢纽布置、土石方计算等场景有较好的适用性。

推广应用这些标准化的交换格式,要制订详细的实施指南,确定在各个设计阶段、不同专业提资时,应当采用什么样的格式、包含哪些信息、达到怎样的深度要求。同时还要用技术手段对交换文件的合规性进行校验,保证数据交换的质量。以开放标准为基点来创建协同的工作模式,是打破信息壁垒、提高全产业链协同效率、实现水利水电工程数字化设计真正价值所必须走的路。

二、过程标准与质量控制

数据、格式统一只是基础,为了保证数字化设计成果的质量,必须建立一套规范的过程标准和严格的质量控制体系。该体系用以约束、引导数字化设计的全过程,明确各个环节的工作内容、协同方式、质量要求,把质量控制从事后检查转变为过程中的主动预防和持续改进。

(一) 数字化设计流程的规范化

数字化设计并不是把传统的二维设计过程搬到三维环境中,而应该对它进行系统的重新构建和改进。规范化的数字化设计流程要以信息模型为中心,冲破专业壁垒,达成并行、协同的设计模式。这个过程通常以模型的细化发展为主线,分阶段来进行,即方案阶段概念模型、初步设计阶段各个专业模型、施工图阶段深化模型、竣工模型。

为了保证流程顺利进行,必须清楚地规定各个阶段的开始条件、工作任务、输入输出成果。同时还要对各个专业之间的协同规则、信息交互方式进行说明,包括各个专业模型搭建的顺序、提资的内容和深度、协同工作的方式(集中式或者分布式)、各方在共享模型中的权限和责任等。制定出这样一套体系化、规范

化、可操作性的流程标准，可以有效地使项目团队进入统一流程，减少因为流程不清晰而造成的返工、延误，大幅度提高协同设计的效率和质量。不仅可以保证技术应用的有序性，也可以给项目精细化管理、进度控制提供可靠路径指引。

（二）模型校审流程与质量检查点

传统的蓝图会审模式已经不能适应数字化的设计需要了，需要创建新的模型校审流程。该程序应该贯穿在设计的全过程，依靠定时开展的多层模型检查来及时找出并改正设计中的错、漏、碰、缺等问题。校审流程一般有专业内自校、专业间互校、项目级联审等各个层次。专业内自校主要是对本专业模型的完整性、准确性、规范性进行校验，专业间互校主要是解决跨专业接口协调、空间碰撞问题，项目级联审由项目负责人组织，对整合后的全专业模型进行审查，保证其满足设计意图和功能要求。

为了保证校审的效果，在设计过程中设置质量检查点。检查点一般设置在方案稳定之后、专业提资之前、模型发布之前等重要时间节点上。在每个检查点处要编制出详细的检查清单，清单内容要包含模型几何精度、信息完整性、编码合规性、空间净高等。用数字化手段来完成大量的检查工作，可以很快发现设计错误，把它们扼杀在萌芽之中。只有建立标准化的模型校审流程、量化的质量检查点之后，才能使质量控制措施落到实处，对设计质量进行动态、精细化的控制。

（三）交付成果的标准化要求

数字化设计的价值在交付成果中体现出来。为了使这些成果能够在后续的施工、运维阶段得到使用，需要给它们进行标准化定义。数字化交付物不再只是单一的图纸文件，而是一个包含多种信息的综合数据包，里面包含不同详细程度的三维信息模型、从模型中提取出来的二维图纸、各种计算书、说明文件、设备清单、工程量清单等。

标准化交付要求应该对交付物的组成、格式、命名规则等作出规定，保证交付物结构清晰，内容完整。对核心交付物即信息模型的质量作出具体的规定，包括模型的精细度等级、几何信息精度标准、属性信息完整性以及准确性等等。大坝模型应该包含哪些重要的属性，精度要达到什么标准。还需要对交付物的载体和交付方式作出规定，采用云协同平台在线交付，并附带完整的元数据信息供查验。制定严格交付成果标准并严格执行，是打通设计、施工、运维数据链的重要环节，保证数字资产能顺利无损地传递给下游，为工程全生命周期的数字化管理

打下坚实的基础。

三、资源标准与库管理

如果说数据标准、过程标准是数字化设计体系的“骨架”和“血脉”，那么资源标准、库管理就是为它提供源源不断“养分”的核心“器官”。创建标准化、可复用的资源库，可以大大提高设计效率，保证设计质量的一致性，有利于知识的沉淀和传承。

为了更好地理解各类资源库的核心功能与价值，其主要分类及作用可见下表。

表 5-3 水利水电工程数字化设计资源库类型与功能表

库类型	主要内容	核心价值
标准构件库 / 设备库	闸门、启闭机、阀门、水轮发电机组等参数化模型	提高设计效率，促进设计标准化、模块化
材料库	材料物理、力学性能，生产厂家，市场价格，环保指标等信息	精准材料选择，支撑结构分析与成本核算
定额库	国家、行业、地方造价定额的结构化、数字化条目	实现自动化计价，提高投资估算准确性
知识库	设计规范、技术标准、计算公式、经验参数及逻辑关系	辅助设计决策，提供智能设计助手功能
案例库	已完成工程项目的设计模型、图纸、计算、报告、经验教训	启发设计思路，避免重复设计，传承经验

从上表可以看出各种资源库承担不同的信息和功能，共同给水利水电工程数字化设计提供全方位的支持。

（一）标准构件库与设备库的建立

水利水电工程中存在大量的可以重复利用的结构单元和通用设备，比如闸门、启闭机、阀门、水轮发电机组等。把这些对象制作成标准化参数化的构件或者设备模型，存放在一个统一库中进行管理可以大大地提高设计效率。设计人员不需要从零开始创建，可以直接调用库中的或稍作修改后使用，从而把注意力集中在更有创造性的工作中。

建立标准构件库、设备库首先要制定入库标准。该标准对构件模型的几何精细度、属性信息内容、参数化逻辑、命名与分类规则等做出统一的规定。水轮机模型除了要具备精确的三维几何外形外，还要包含额定功率、转速、效率曲线、制造商、维护手册等丰富的非几何信息，保证数据库资料的质量和通用性。

库的管理维护工作同样不能忽视,要建立完善的审核、发布、更新、废止制度,保证库中内容同最新的技术规范、产品信息、行业标准的发展保持同步。创建内容丰富、管理规范、不断更新的标准构件库、设备库可以给设计工作提供一个强大的资源库,使设计工作实现标准化、模块化、工业化,全面提高设计工作的整体水平。

(二) 材料库与定额库的数字化

工程材料、造价定额是水利水电工程设计的另外两个基本要素。传统的纸质或者分散的电子表格管理方式效率低、容易出错。建立数字化的材料库、定额库,并使信息模型直接关联,可以实现设计与造价一体化,大大提高工程投资估算的准确性、效率。

1. 数字化材料库应包含工程中常用的材料,并对每一种材料建立包含物理性能、力学性能、生产厂家、市场价格、环保指标等各方面信息的数据库。设计过程中可以直接给模型构件赋值库中的标准材料,模型继承该属性之后,可以为后面的结构分析、性能模拟、材料统计提供准确的数据源。

2. 数字化定额库,即对国家、行业或者地方的造价定额进行结构化、数字化处理,形成可以被计算机直接调用的数据库。建立定额条目和模型构件之间的对应关系之后,系统就能够用模型的工程量匹配相应定额,快速形成工程量清单和投资估算,从而达到模型即算量、算量即计价的智能化造价管理目标。

(三) 知识库与案例库的构建

水利水电工程设计、规范、标准、数学算法、以往工程的经验都是互相联系的。创建数字化的知识库、案例库,是使隐性知识显性化、结构化,进而可以被智能检索、复用的重要方式。这对提高设计决策的科学性、规避设计风险、培养青年工程师有重要的意义。

知识库的创建主要是对设计依据、设计方法进行系统的整理。即把各种设计规范、技术标准、计算公式、经验参数等用数字化的形式表达出来,并且构建各个要素之间逻辑关系,形成庞大的知识图谱。设计人员遇到问题的时候可以借助智能检索找到有关规范条款和依据;系统还可以依据设计情景推送相关知识来担当起智能设计助手。

案例库是已经完成的优秀工程项目的归纳总结。每个案例都应有完整的图纸、设计模型、计算文件、专题报告、项目背景、技术难点、解决方案、经验教训等。

通过学习大量的工程案例，可以很快掌握类似工程的设计要点，避免重复设计，也可以产生新的设计思路。建立内容丰富、检索方便的知识库、案例库，是企业乃至整个行业核心竞争力的重要组成，也是实现设计理论创新、技术传承的战略举措。

第四节 参数化设计方法研究

参数化设计给水利水电工程领域带来了革命性的改变，它把设计的重点从静态的几何图形绘制转移到了动态的、受规则和参数控制的逻辑模型的创建上。这就使设计方法论发生了深刻的变化，设计方案的产生、修改、优化更加高效、智能、可追踪，给解决复杂的工程问题提供了新的技术途径。

一、水工建筑物参数化建模

水工建筑物参数化建模为水工建筑物自动化智能化设计提供基础。它将建筑物的几何和逻辑关系抽象出来，形成由参数驱动的数字模型，参数一变，模型就可以实时更新，设计迭代的过程就变得更高效灵活。

（一）重力坝、拱坝体型参数化驱动

重力坝、拱坝是水利枢纽的主要挡水建筑物，体型设计的好坏直接影响工程的安全性及经济效益。参数化驱动建模法可以精确控制大体积混凝土结构的关键几何参数。重力坝的体型可以用坝顶高程、最大坝高、坝顶宽度、上下游坝坡折坡点坐标及坡度、坝体分缝、廊道系统空间位置等参数来定义。建立这些参数与坝体三维实体模型之间的数学、逻辑关系，设计人员只需修改一个或几个基本参数，整个坝体模型就会立刻被重建，包括复杂的坝基开挖面、坝体分块等都会随之更新。

体型更复杂的拱坝，参数化建模的优势就更加明显。拱坝的体型一般是由一系列的空间曲线（坝轴线、拱冠梁线等）和厚度变化规律共同确定的。参数化模型把坝址地形数据、上游水位、坝体材料特性等当输入条件，用预设的拱坝体型函数（双圆心、三圆心圆弧或者抛物线等）驱动拱圈和拱梁的形成。坝体厚度可以定义为高程、位置有关的函数，从而实现拱冠到拱肩、坝顶到坝底的平滑过渡。参数化驱动机制保证坝体曲面光滑连续，也使不同地质条件、荷载组合下体型比

选和优化成为可能,设计人员可以快速比较不同的曲率半径、厚度分布方案下大坝的应力状态和工程量。

（二）厂房、闸室等复杂结构的参数化

水电站厂房、溢洪道闸室等建筑物内部空间比较复杂、构件繁多,采用传统的建模方法费时费力而且容易出错。参数化技术则采用“分而治之”的思想,把复杂的结构拆分成一系列可以标准化、重复使用的参数化构件族。厂房结构可以分成基础、柱子、梁、板、机墩、蜗壳、尾水管等基本单元。每个单元都是独立的参数化族,它的几何尺寸、空间位置、配筋等信息都受可控参数的控制。

在建模过程中,用参数化构件单元按照预定的约束关系和拓扑逻辑来完成装配。厂房排架柱的间距由水轮发电机组轴线间距参数来控制,屋面梁标高受吊车轨顶标高及起吊净空要求参数限制。闸室闸墩厚度、间距和胸墙结构也可以用参数来准确地控制,并且和闸门孔口尺寸、启闭机布置等要求密切联系在一起。

基于构件装配的参数化建模方式可以大大提高建模效率,构建起清晰的逻辑层次以及数据结构。更换机组型号,导致厂房开间尺寸需要调整时,设计人员只需修改顶层的控制参数,模型中所有的相关构件就会自动调整尺寸、位置,从而达到设计的一处修改,处处更新的效果。保证模型内部数据的一致性、准确性,为后续协同设计、碰撞检查、施工模拟打下了基础。

（三）参数化模型的修改与变异管理

参数化模型强大的地方就是动态响应能力强,但是对模型的修改和变异管理也提出了更高的要求。因为微小的参数变动,就会引起整个模型的一系列连锁反应,称为蝴蝶效应。因此建立稳定可靠的模型逻辑,对修改过程进行有效的管理就显得尤为重要。这就要求建模初期就做好周密的设计,明确参数层级和驱动关系,防止出现循环依赖或者逻辑矛盾,保证模型的鲁棒性。

设计过程本身就是一种不断探索、不断演进的动态过程,会产出许多不同的设计方案或者版本。参数化设计给方案的变异管理带来极大的方便。利用同一个参数化模型设置不同的参数集,就可以生成和管理出很多种设计变体。对同一个坝址可以创建高、中、低三类不同的坝高方案,每类方案都有对应的一组参数值。这些变体可以被系统地储存和清楚地标注,设计师可以在不同的方案之间方便地切换、比较、评价。利用版本控制系统,可以对每一次参数修改的历史进行详细的记录,包括修改人、修改时间、修改内容等,从而达到设计过程的可追溯性,

对项目质量控制、责任认定、知识沉淀都有重要的意义。

二、基于脚本的自动化设计

在参数化模型的基础上加上脚本语言进行二次开发，是实现设计自动化的关键一步。脚本编程可以对设计中重复性操作进行自动化处理，把设计规则、计算逻辑固化到代码里，实现从手工调节参数到程序自动执行的飞跃。

（一）Python/Dynamo 等脚本语言应用

脚本语言就如强力胶水，把参数化模型、设计软件和外部数据牢牢地粘合在一起。Python 是一种功能丰富、学习门槛较低的通用编程语言，由于它有强大的科学计算库（NumPy、SciPy）和数据处理库，所以在水利水电工程中得到了广泛的应用。工程师可以利用 Python 脚本对地形地质数据进行处理，进行水文水力计算，执行结构有限元分析的前后处理，将计算结果直接反馈给三维模型，驱动三维模型的几何更新。例如用 Python 脚本来读取边坡稳定计算的结果来自动改变开挖坡度，或者根据水力计算的结果来改变过流断面的形状。

Python、Dynamo 等脚本语言在水利水电工程领域中起着重要的作用，它们的主要特点和应用如表所示：

表 5-4 脚本语言特点与应用对比表

特性 / 语言	Python	Dynamo
类型	通用编程语言	可视化编程工具
学习门槛	相对低	更低（图形化）
功能范围	广（数据处理、科学计算、AI、Web 开发等）	专注于几何生成、BIM 数据管理
集成性	广泛的第三方库支持，可与多种软件 API 交互	与 BIM 软件（如 Revit）深度集成
典型应用	地形地质数据处理、水文水力计算、FEM 前后处理、驱动模型更新、数据分析	复杂水工曲面生成（溢流堰、弯管）、自动化布筋、BIM 构件参数化、数据交互
优势	灵活性高、功能强大、生态系统成熟、社区活跃、跨平台	直观易学、图形化编程、与 BIM workflow 无缝衔接、快速几何建模与修改

Dynamo 是一款为设计师和工程师所开发的可视化编程工具，用图形化的节点、线来编写代码的方式构造设计逻辑，使编写代码的难度大大降低。由于 Dynamo 和主流的 BIM 软件深度集成，因此 Dynamo 在复杂的几何生成以及 BIM

数据管理方面具有天然的优势。水利水电工程设计中 Dynamo 可以快速创建溢流堰 WES 曲线、压力钢管复杂弯管段等各种复杂的水工曲面。同时还能高效实现自动化配筋,根据结构计算结果和规范要求,在梁、板、柱等构件上批量生成三维钢筋模型,大大提高了配筋设计的效率和精度。Python 文本编程和 Dynamo 图形化编程,给工程师提供了一个将设计思想转化为可执行程序的强大工具,从而把工程师从繁重的重复性劳动中解放出来。

(二) 批量生成与修改设计方案流程

基于脚本的自动化设计最大的价值就在于可以批量化、系统化地生成和修改设计方案,在项目初期做大量方案比选。一般按照固定的程序执行,效率高。

1. 创建参数化模板:创建包含所有设计变量的参数化的基础模型,即模板。模板里包含所有的几何构件以及它们之间的约束关系,它是后面所有设计方案的“基因”。

2. 定义参数矩阵:工程师把需要研究的设计变量和取值范围整理成参数矩阵。该矩阵可以存放在 Excel 表格或者数据库里,一行对应一个独立的设计方案,一列对应一个设计参数。

3. 编写执行脚本,即自动化脚本。脚本的主要功能就是从参数矩阵逐行读取值,将每一行的参数值赋给参数化模板,驱动模型自动更新产生新的设计方案。

4. 自动化输出与评价,系统在生成每一个方案模型的时候,会自动执行一系列后续的操作,即计算出该方案下的土石方量和混凝土量,做初步的性能分析,生成特定视角的视图或者图纸,将关键指标与方案参数一起写入结果文件。

经过这样一个闭环过程,可以在很短的时间内产生出数百甚至数千个不同的设计方案,大大地拓宽了设计决策的范围。该种系统性探索能力,传统的设计方法很难达到这样的效果,它可以在项目初期就找到更加有潜力设计方向,避免由于初期的决策失误而造成的后期返工。

(三) 设计计算与建模的一体化实现

传统的建筑设计流程中,设计建模和专业计算分析是分开的。工程师一般用三维软件创建几何模型,再手动把数据输入到结构、水力、渗流分析等专业计算软件中;计算完毕后,再将结果反馈给三维模型做人工修改。此过程效率低下,数据在多次导入导出中很容易出现错误,从而造成信息孤岛和数据不一致等问题。

基于脚本的自动化设计可以很好地打破计算和建模之间的壁垒,把二者结合

起来。利用各种专业计算软件提供的应用程序接口，脚本就可以成为自动化调度的核心。脚本可以从参数化模型中获取几何信息、材料属性、边界条件等，自动生成有限元网格、荷载工况等计算软件所需要的输入文件，调用后台计算程序。

计算结束以后，脚本可以自动读取结果文件，提取工程师关心的应力云图、位移变形、渗流场分布等关键数据。计算结果可以直接驱动模型的优化。脚本会根据应力分析的结果找出应力集中的区域，然后对它进行结构断面尺寸或者配筋率的自动调整，再重新计算，形成一个建模、计算、反馈、优化的自动迭代闭环。一体化实施保证设计数据在流程中是唯一的、一致的，可以缩短设计周期，大大提高设计精细化和最终质量。

三、参数化设计在方案优化中的应用

将参数化设计同先进的优化算法结合起来，可以将设计探索由人工试错提升到算法驱动的智能寻优。从而使得工程师可以在庞大的设计空间中，在各种约束条件下找到满足最优解的设计方案，从而达到科学的决策。

（一）与优化算法的接口与集成

参数化设计模型把设计意图和优化算法联系起来。参数化模型本身可以看作是一个可以计算的函数，它的输入是设计变量（即模型控制参数），输出是该设计方案的各项性能指标（工程量、发电量、安全系数等）。为了达到有效集成的目的，需要使用脚本语言来创建高效的接口。

该接口的主要任务就是实现优化算法与设计软件之间双向的数据交互。当优化算法（遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法等）产生一组新的设计变量的时候，接口脚本就会接受这些变量，把它们传递给参数化模型，使模型实时更新。模型更新之后，脚本就会立刻启动相关的性能评估程序，也就是调用内置的计算功能或者外部分析软件，从而得到新的方案的目标函数值以及约束是否满足。脚本把性能指标反馈给优化算法，供优化算法下一步调整时使用。该过程在优化收敛之前会一直自循环执行，形成一个完整的闭环寻优系统。

（二）设计变量的自动寻优

设计变量的自动寻优过程，本质上就是多维设计空间里目标导向的搜索。工程师首先要确定优化的目标。水利水电工程的优化目标一般是多维的，最小化工程投资、最大化发电效益、保证结构安全、减小对环境的影响等。同时还要确定

设计变量的范围（坝高不得超过某限值），工程性能的边界条件（材料应力不得超限、大坝稳定安全系数必须满足规范要求）。

定义好设计空间、优化目标和约束条件后，集成优化算法参数化设计系统就会启动自动寻优过程。优化算法会用它特有的搜索策略，在庞大的可行解空间里不断搜索。遗传算法模仿生物进化过程，利用选择、交叉、变异等操作，使解集不断向更好的方向发展。整个寻优过程不需要人工干预，计算机依靠强大的算力，在数小时或者数天内完成几千乃至上万次的设计迭代和评价。工程师因此可以摆脱繁杂的试凑工作，把精力集中在优化策略的制定和最终结果的分析上，系统地得到远超人工经验的优化设计方案。

（三）Pareto 解集的可视化与决策

水利水电工程的优化问题大多属于多目标优化，各个目标之间往往存在着矛盾、制约。一味地降低工程造价会削弱结构的安全储备；过度地追求发电效益，就会加剧对下游生态的破坏。此时一般不存在一个可以在所有目标上都达到最优的“唯一解”，而是一组称为 Pareto 最优解集（或 Pareto 前沿）的均衡解。该解集中的任何一个解，在不降低至少一个目标性能的情况下，都不能进一步提高其它任何目标的性能。

参数化设计同多目标优化算法融合起来，就可以获取到该 Pareto 解集，给决策者赋予一系列各有利弊的备选方案。而如何从解集中做出最终的选择，就成为决策过程的关键环节。可视化技术在这时起着举足轻重的作用。采用散点图、平行坐标图等不同的可视化方法，把多维的 Pareto 解集转成二维或者三维图表，就能清楚地表现出各个目标之间的量化权衡关系。决策者可以直接看到为了减少一定量的成本要放弃多少的安全系数，或者为了增加单位发电量要投入多少方混凝土。直观的可视化方式把复杂的优化结果一目了然地呈现出来，便于不同背景的专家和利益相关者一起参与决策，根据项目的实际情况和价值取向，从 Pareto 解集中选择出最符合总体利益的最终设计方案。

第六章 数字化仿真与优化技术

伴随着计算机技术的迅速发展，数字化仿真已经成为水利水电工程设计、分析中不可缺少的重要手段。本章主要对数字化仿真与优化设计技术进行系统阐述，包括它在复杂工程问题中理论基础以及实际应用，从而提高工程设计的科学性、准确性。

第一节 水利水电工程多物理场耦合仿真

水利水电工程中水流、结构、温度、渗流等物理现象常常互相影响。单一物理场的分析不能完全反映工程实际的工作状态，因此开展多物理场耦合仿真研究，对保证工程的安全、优化结构设计有重要的理论和现实意义。

一、流固耦合仿真分析

流固耦合现象在水工结构中经常出现，水体的动态荷载和结构物的变形响应互相影响，一起形成一个复杂的动力学系统。精确模拟耦合作用，是进行结构动态分析、评价结构安全稳定性的前提，对水工建筑物的设计与运行意义重大。

（一）水流－闸门－坝体相互作用

水流与闸门、坝体之间相互作用，属于典型的流固耦合问题。高速水流经过闸门孔口或者溢流坝面的时候，会对结构物表面产生复杂的动水压力。压力既是水流运动的直接结果，又反过来作用于结构上，使结构发生变形和振动。结构微小变形反过来又会影响流场边界，进而改变动水压力分布，形成闭环的相互影响机制。进行此类耦合仿真时流体域一般用计算流体力学模型求解，而固体域用结构有限元模型进行分析。

此类仿真主要是对流固交界面信息的传递，也就是压力和位移的有效传递。数值模拟可以反映出不同的开启度闸门在各种水流工况下所受的力、水舌下游流态、坝体应力响应。不但可以优化闸门体型、启闭方式，有效降低空蚀、振动风

险，还可以给坝体结构疲劳分析、长期安全评价提供重要的荷载输入数据，从而全面提高设计的可靠性、经济性。

（二）泄洪振动与结构动力响应

泄洪建筑物在宣泄巨大水流能量的时候，由于流态剧烈变化，很容易产生结构振动。闸门下游由于水流分离、旋涡脱落等原因会产生周期性的脉动压力，如果此脉动压力和结构的自振频率接近的话，就有可能引起共振，从而严重影响结构的安全。泄洪振动会引起闸门、堰体等构件的疲劳破坏，会影响设备正常运转，还会造成严重噪声污染及环境问题。

数字仿真技术给泄洪振动研究提供了一个有力的途径。建立水体和结构耦合的动力学模型，可以对泄洪时流场脉动特征和结构的动力反应做详细的模拟。仿真分析可以确定结构在泄洪过程中振动的模态、振幅、频率，找到主要的激振源和振动传递途径。用仿真结果来评价已有的设计是否具备抗振性能，通过改变体型、增加消能设施、调整结构刚度等方式改进设计防止有害振动，使泄洪建筑物在各种工况下安全稳定的工作。

（三）高精度流固耦合算法研究

为了能真实地模拟水利水电工程中流固耦合的现象，发展高精度、高效率的数值算法显得非常重要。算法核心就是处理流体与固体两个物理域交界面处耦合的关系，保证数据的准确传输。根据求解策略的不同，流固耦合算法大致可以分为分区算法、整体算法和浸入边界法等新型算法。各种算法各有优劣、各有适用场合，主要特点见下表。

表 6-1 流固耦合算法类型与特点对比表

算法类型	基本原理	主要优点	主要挑战 / 缺点	典型应用场景
分区算法	流体与固体求解器独立，通过界面迭代交换信息	灵活性高，可复用成熟单物理场求解器	耦合迭代稳定性及收敛性问题	弱耦合、流固界面变形较小问题
整体算法	流体与固体控制方程统一，同步求解	稳定性好，理论精度高	实现复杂，计算量大，高效求解器研发	强耦合、大规模、高精度要求问题
浸入边界法	采用固定流体网格，虚拟力表征固体边界	简化前处理，适用于复杂移动边界、大变形	虚拟力模型精度，计算量相对较大	闸门启闭、柔性结构大位移、生物流动等

从上表可见，高精度流固耦合算法的研究当前主要集中在以下几个方面：

1. 分区算法的优化：分区算法把流体和固体求解器分开处理，在每一个时间步里通过迭代交换界面信息来达到收敛。该方法的灵活性高，可以充分利用成熟的单物理场求解器。研究的主要内容就是发展更加稳定的耦合迭代格式，提高界面数据传递的精度，达到更好的计算收敛性和守恒性。

2. 整体算法的探索，整体算法把流体和固体的控制方程合并成一个方程组来同步求解。理论上该方法具有较好的稳定性和较高的精度，但是实现难度大，计算量也大。主要研究目的就是开发出高效的线性方程组求解器以及预处理方法，以解决大规模的耦合问题。

3. 浸入边界法等新型算法的应用：大位移、复杂几何变形的情形下，比如闸门开启过程，传统贴体网格法经常会遇到网格重构的困难。浸入边界法用固定流体网格来代替固体边界，引入虚拟力来表征固体边界，简化前处理过程，成为解决复杂移动边界问题的研究热点。

二、渗流 – 应力耦合仿真

土石坝、堤防、水库岸坡等工程中水的渗流和土体的应力状态有关。孔隙水压力变化会影响到土体的有效应力，进而引起土体强度、变形性质的变化。渗流和应力耦合分析能更真实的模拟这一过程，对于评价工程长期稳定性和安全性起着非常重要的作用。

（一）库岸边坡的稳定性分析

水库蓄水、水位升降都会引起库岸边坡失稳。当水库水位上升时，水体会慢慢渗入岸坡，坡内地下水位随之上升，孔隙水压力增大。根据有效应力原理，土体的抗剪强度也随之减小。坡体同时会受到浮托力的作用。而当水位突然下降时，坡内已饱和土体中的孔隙水压力不能立即消散，产生指向坡外的渗透力，坡体失去原有水位的支撑，边坡的稳定性急剧下降，极易发生滑坡失稳。

渗流与应力耦合的数值模型可以模拟水位变化的整个过程中，坡体内渗流场、应力场动态变化的过程。通过模拟可以清楚地看出不同时刻坡体内部孔隙水压力分布、有效应力变化、塑性区的发展情况。该方法可以求出各种工况下的边坡稳定安全系数，更能反映出水位骤降等最危险时刻的稳定性状况。

上述分析结果有利于找出滑动面以及可能产生失稳的地段，给岸坡防护加固

措施的合理设计赋予可信的数据支撑,比如设置排水孔,修建抗滑桩或者挡土墙等。这对于保证水库运行安全、保护库区生态环境有不可替代的作用。

（二）坝体与坝基的渗流场与应力场

土石坝属于渗水建筑物,渗流是其正常工作状态下的一部分。但是过大的渗透坡降或者不合理的渗流路径会直接威胁到大坝的安全。坝体和坝基内渗流场与应力场相互耦合,相互影响。一方面,坝体自重、上游水压力形成初始应力场;另一方面,水流渗入形成的孔隙水压力、渗透力改变土体有效应力,使应力场重新分布,进而引起坝体变形。

渗流应力耦合分析把渗流连续性方程、土体应力平衡方程以及本构关系联合起来求解,可以揭示出复杂的相互作用机理。仿真结果可以给出坝体内部浸润线位置、孔隙水压力分布、渗透坡降大小、应力与位移分布状态。耦合分析比非耦合分析更准确地预测坝体心墙、排水体等重要部位的应力集中情况和变形趋势。可以模拟渗流作用造成的心墙和坝壳之间不同的沉降,评价防渗系统的长期工作效果,给坝体结构分区、防渗排水设计提供精细化的决策支持。

（三）渗透破坏过程的数值模拟

渗透破坏属于土石坝、堤防工程中非常危险的一种破坏形式,主要表现为管涌和流土。破坏一般由局部的水力劈裂或者土体颗粒流失开始,逐渐形成贯穿性的渗流通道,最后造成大坝溃决。对渗透破坏全过程进行准确的数值模拟,属于防灾减灾研究领域的重要课题。

先进的数值模拟技术在一定程度上可以再现渗透破坏的发生和发展。此类模拟一般采用多孔介质理论,并且使用能反映土体结构损伤和颗粒侵蚀的特有模型。用渗流、应力、侵蚀多场耦合分析可以模拟出超载下,土体骨架逐步弱化、孔隙率增大、局部侵蚀区域逐步连接扩展,最终形成优势渗流通道的全过程。模拟结果可以预测管涌通道的可能走向,发展速度以及溃口流量变化的过程,从而来判断破坏的程度及范围。

模拟研究结果可以用来检验防渗体(心墙、防渗墙)和反滤排水系统(褥垫层、棱体)的设计是否有效。经过仿真分析可以优化反滤层的级配设计,保证反滤层既能排水又能防止土料流失。模拟结果还可以给应急预案的制定、抢险措施的采取提供科学依据,对大坝长期安全运行意义重大。

三、温度 - 应力耦合仿真

大体积混凝土结构，例如重力坝、拱坝在施工及运行过程中由于温度的变化引起结构内部应力。温度场与应力场之间存在联系，对温度应力进行准确分析并加以有效控制，是防止混凝土开裂、保证大坝结构安全稳定的重要技术问题。

（一）大体积混凝土浇筑过程仿真

大体积混凝土浇筑时，水泥水化会放出大量的水化热，使混凝土内部的温度明显升高。混凝土是热的不良导体，热量不易散发，所以混凝土中心与表层的温差较大。不均匀的温度分布会形成内压外拉的温度应力分布。当表面拉应力大于混凝土早期抗拉强度时，就会产生温度裂缝。

采用温度 - 应力耦合仿真，对整个施工过程做精细化模拟，从而达到对温度、应力全过程的预测与控制。

1. 仿真模型能准确计算出混凝土内部水化热产生的速率以及传导的过程，考虑浇筑温度、环境气温、模板保温等因素的影响，预测浇筑块内任意点随时间变化的温度过程，特别是最高温度出现的时间和具体的数值。

2. 在获得温度场分布之后，耦合应力分析模块就可以求出温度变形受到约束而产生的应力场分布。计算时需要考虑混凝土的弹性模量、抗拉强度等力学参数随龄期增长的情况，还要考虑混凝土徐变效应对温度应力的松弛作用。

3. 采用仿真的方式对比不同的浇筑方案（分层厚度、浇筑间歇时间）以及温控措施（预埋冷却水管、表面保温）的效果，从中选择出最经济合理的施工方案，将温度应力控制在安全范围内，防止早期裂缝产生。

（二）日照、气温对坝体温度场的影响

大坝建成并进入运行期以后，其温度场主要受到外部环境因素的周期性影响，太阳辐射、大气温度的日变化和年变化、库水温度、坝基岩体温度等都是重要的外部环境因素。这些因素一起起作用，在坝体内形成一个复杂且动态变化的温度场，产生相应的温度应力，从而影响到大坝的长期工作性态。

数值仿真经常用来分析运行期坝体的温度场。使用已经建立的精细的三维有限元模型，把太阳辐射的方位角、高度角的变化、不同的坝面的辐射吸收率、大气温度的周期性变化、库水、空气热对流等边界条件施加到模型上。仿真可以模拟出大坝长时间段内迎水面、背水面和坝体各个深度的温度变化规律。结果表明，

坝体表层温度受环境影响较大，呈周期性变化；坝体深部温度比较稳定，变化滞后，幅度小。

准确把握运行期温度场分布及变化，是做坝体应力分析和安全评价的前提。冬季低温时坝体表面收缩会产生较大的拉应力，是产生和发展裂缝的时期。经过长时间的温度场仿真，可以为大坝的健康监测、裂缝形成原因分析、维修加固决策提供重要的数据支撑。

（三）温度裂缝的产生与扩展预测

温度裂缝属于混凝土坝安全性的主要病害之一。当温度变化引起的拉应力超过混凝土材料的抗拉强度的时候，就会产生裂缝。不但会降低结构的整体性、承载能力，还会给水流提供渗透通道，加速坝体混凝土劣化，危及大坝的安全。因此，对温度裂缝的产生和扩展进行科学的预测就显得非常重要。

传统的应力分析一般只通过应力是否超出来判断开裂风险，不能描述裂缝形成后的行为特性。现代断裂力学给裂缝的扩展分析赋予了更为先进的理论工具。以断裂力学为基础的数值仿真方法，例如扩展有限元法，可以不改变网格拓扑结构来模拟裂缝在结构中任意路径的扩展过程。温度应力耦合分析可以预测裂缝的起裂位置，也可以跟踪裂缝在以后的温度荷载作用下扩展的路径、深度、速度。

高级仿真分析可以评价已有的裂缝是否稳定，在极端温度事件（寒潮）下是否会继续扩大，定量分析裂缝对坝体整体应力分布、渗流特性的影响。仿真结果可以为大坝安全鉴定提供更加准确的评价标准，也可以给制定裂缝修补（灌浆）的紧迫性、必要性提供科学依据，进而实现大坝的安全精细化、预知性管理。

第二节 结构优化设计理论与方法

结构优化设计是现代工程设计的核心，其目的就是寻找结构性能的最优解。本节主要研究拓扑、尺寸、形状等各方面的优化理论与方法，结合水利水电工程的实际，分析仿生学、人工智能技术在结构创新设计上的最新成果。

一、拓扑优化在结构设计中的应用

拓扑优化属于结构优化的最高层次，它是在给定的设计空间内寻找材料的最佳分布方式，从而生成概念新颖、性能优异的创新构型，给水工结构设计带来突

破性思路。

（一）水工结构的新型构型设计

水利水电工程中的大坝、厂房、闸门等结构，一般体量大、受力复杂，其构型设计的好坏直接影响到工程的安全和经济效益。传统的构型设计大多依靠经验或者已有的范式，很难取得根本性的突破。拓扑优化技术的独特之处就在于它不需要事先设定初始结构形式，而将结构设计问题转化为在给定的区域内寻找最优材料分布的数学难题。在设计域内定义材料的有无，该方法可以自动找到最优的传力路径，得到符合力学原理、具有新颖性的轻质高强结构。重力坝廊道布置、坝体开孔优化、水工钢闸门面板加劲肋布局设计等都体现出拓扑优化的巨大应用潜力，可以大幅度降低结构自重，合理化应力分布，给复杂受力结构的概念设计提供了新的思路。

拓扑优化得到的新型构型除了具有很好的力学性能之外，其特有的有机形态也给工程美学带来了新的启示。在水电站厂房结构设计中采用拓扑优化，可以得到传力路径清楚的柱、梁、牛腿体系，形态似大自然中的树状分形结构，承载效率高，又有韵律美。对消能工、导流墙等水力学结构而言，拓扑优化在符合水流边界条件的情况下，可以找到最佳骨架形式，从而达到节约材料、降低工程造价的目的。从力的角度来设计结构形态，使结构形态不再是预先设定的几何体，而是力流在空间中所描绘出来的轨迹，实现了形式和功能的完美结合，为未来水工结构可持续发展开辟了新的途径。

（二）材料分布的拓扑优化方法

拓扑优化的主要工作就是创建出材料在设计域内分布的数学模型。目前主流的拓扑优化方法有变密度法、均匀化法、渐进结构优化法等。其中，固体各向同性材料惩罚模型被使用得最多。每个域内的有限元单元增设一个伪密度量，取值范围在 0 到 1 之间，当取值为 0 时表示没有材料（空洞），当取值为 1 时，说明为实心。采用惩罚因子的方式，对中间密度的单元进行惩罚，促使单元密度趋向于 0 或者 1 的离散解，得到清晰的拓扑构型。

渐进结构优化法及其双向演化版本属于另外一类重要的拓扑优化方法。其设计思想模仿的是自然界中“用进废退”的法则，即经过迭代过程，慢慢去除对结构性能贡献小的“低效”单元。双向演化版本更加完善，不仅可以删除低效单元，还可以在应力集中或者需要加强的区域添加新的材料单元，实现了材料增减的双

向演化。渐进式的优化过程直观易解，而且能够很好地解决多种物理场耦合下的拓扑优化问题。这些方法的具体原理和特点如下表所示：

表 6-2 常见拓扑优化方法对比表

方法名称	核心思想 / 原理	主要特点 / 应用场景
固体各向同性材料惩罚模型	在设计域内为每个有限元单元赋予伪密度变量，通过惩罚中间密度使单元趋向离散（0 或 1）	应用最广，能得到清晰构型；需处理棋盘格和网格依赖性
渐进结构优化法	模仿“用进废退”法则，迭代删除对结构性能贡献小的“低效”单元	直观易解，解决多物理场耦合问题
双向渐进结构优化法	ESO 的增强版，不仅能删除低效单元，还能在应力集中区添加材料	灵活度更高，能实现材料的增减双向演化

上述比较可以得出不同的拓扑优化方法各有侧重，工程师要根据自己的工程实际需要以及计算条件来选择。

在使用这些方法时还需要解决一些数值计算的难题。优化结果会出现的棋盘格现象，即黑白相间的单元排列，不符合物理实际，也难以制造。为解决此问题一般会采用敏度过滤、密度过滤等方法来平滑单元敏感度或者密度。网格依赖性也会造成结果差异，不同的有限元网格划分会得到不同的优化结果。采用长度尺度控制等方法，可以有效地抑制上述问题的发生，保证优化结果的客观性，从而保证得到稳定的拓扑构型。

（三）拓扑优化结果的工程化处理

拓扑优化得到的理想构型一般具有锯齿状边界以及复杂的内部孔洞，这是一种离散的、基于像素或者体素的表达形式，不能直接用于工程制造以及后续的详细分析。因此，拓扑优化结果进行工程化后处理，转化成可以施工的光滑几何模型，是拓扑优化技术走向实际应用的关键步骤。这不是简单的几何平滑，还要考虑到制造工艺、施工限制以及原有的优化性能。后处理一般用图像处理算法识别出优化构型的宏观边界，再用边缘检测和轮廓提取的方法。

在初步提取出边界之后，用计算机辅助设计技术对边界进行几何重构。常采用 B 样条曲线、非均匀有理 B 样条曲线、曲面对提取出的离散点云或轮廓线进行拟合，得到参数化的光滑边界。工程师会根据实际情况调整曲线的阶数以及控制点，对局部小孔洞或者尖角处做相应的调整来满足施工工艺的要求。重构之后的几何模型不但外观规整，而且还可以导入有限元软件进行尺寸、形状的进一步

优化或者力学性能的精细验证，保证最终的设计方案既有拓扑优化的优越性能又有工程可行性。

二、尺寸优化与形状优化

确定了结构的基本拓扑构型之后，尺寸优化和形状优化就是对结构进行精细化改进，即通过改变构件截面参数、几何边界来进一步改善结构性能，达到安全和经济的平衡。

（一）基于可靠度的尺寸优化设计

传统的结构优化设计大多采用确定性模型，把荷载、材料参数等当作固定值，这和工程实际中普遍存在的不确定性不相符。基于可靠度的尺寸优化设计把不确定因素当作随机变量，把结构的可靠度或者失效概率当作主要约束，目的在于保证达到预定可靠性目标的情况下，找到成本或者重量等目标最小化的设计方案。该方法把概率理论同优化算法融合起来，使设计方案可以对风险加以量化抵御，从而达成从安全系数到可靠指标的转变。

实施基于可靠度的尺寸优化，通常包含以下几个核心步骤：

1. 不确定性量化：识别并量化设计变量、荷载、材料属性等随机参数的概率模型。
2. 可靠性分析，采用一次二阶矩法、蒙特卡洛模拟等方法，求出给定设计参数下结构的失效概率。
3. 建立优化模型：用结构重量或者成本作为目标函数，用构件尺寸作为设计变量，用计算出的失效概率小于目标值作为约束条件。
4. 迭代优化：用优化算法来不断调节设计变量，每次迭代后做可靠度分析，直到得到符合可靠度约束的最优解为止。

水利工程中水工钢闸门面板厚度、主梁截面尺寸优化、输水隧洞衬砌厚度设计等，用可靠度优化可以更好地平衡安全与经济。它既考虑了材料强度离散性以及水荷载的随机波动，又能评价不同的设计方案长期服役的风险。基于可靠度尺寸优化设计得出的设计方案更安全，避免了传统方法可能出现的过度保守或者储备不足的问题，是实现结构精细化设计的一种有效途径。

（二）拱坝体型的多目标优化

拱坝是空间曲面薄壳结构，它的体型设计对于工程成败起着决定性的作用。

拱坝设计目标往往互相矛盾，减少混凝土方量以降低成本，一般会造成坝体应力增大、稳定性降低。因此拱坝体型设计属于典型的多目标优化问题，需要同时考虑安全性、经济性、施工可行性等各方面目标。单目标优化方法不能得到全局最优解，多目标优化的目标是找到帕累托最优解集，即一组非劣解。

拱坝多目标优化模型中设计变量一般是指用来表征拱坝体型的参数，包括上游面拱圈曲线半径、圆心角、下游面坡度变化、坝顶高程、厚度等。目标函数直接体现设计意图，常用的有最小化混凝土体积、最小化坝体拉应力、最大化抗滑稳定安全系数。也可以将水推力、温度效应、地震作用等不同工况下结构响应作为一个目标或者约束进行综合考虑。

约束条件是拱坝安全运行的底线，材料强度约束（应力不超过容许值）、坝体和坝基稳定约束、几何约束（厚度满足施工要求）等都属于约束条件。这些限制就形成了可以实施的设计空间。求解这类复杂的多目标优化问题时，以进化算法为基础的多目标优化算法，比如非支配排序遗传算法，由于具有很强的全局搜索能力和处理复杂约束的能力，因此表现最好。

经过多目标优化之后，设计者可以得到一条帕累托前沿曲线（或曲面），在这条曲线上每一个点就代表一个最优的权衡方案。设计人员根据工程实际情况及个人喜好，从解集中选出最满意的方案，方量大但应力分布更好或者经济性高但安全裕度略小。大大提高了决策的科学性、灵活性。

（三）结构形状的曲线与曲面优化

结构形状优化就是通过改变结构的边界形状，改善应力分布，减小应力集中，提高结构整体效率。在水利水电工程中，很多结构性能同其几何边界的曲线、曲面形态有着密切联系。高水头泄水建筑物过流面的形状影响水流状态和空蚀破坏，压力管道岔管区域几何过渡决定应力集中程度，拱坝上下游坝面曲面形状控制整个坝体的承载能力。形状优化就是将边界曲线、曲面进行数学参数化，把形状设计转化为参数优化问题。

参数化是形状优化的基础，用 B 样条、非均匀有理 B 样条等参数化曲线、曲面技术，可以以有限的控制点来精确地描述复杂的几何形状。控制点的位置坐标就作为优化的设计变量。移动控制点可以改变结构局部或者整体的形状。目标函数一般用以最小化某区域最大应力或者最小化结构应变能，约束条件包括体积不变、几何边界平滑等。利用有限元分析以及灵敏度分析，可以使得控制点位置

随结构形状改变而自动调节,使应力分布更为均匀,达到消除应力集中目的。

三、基于仿生的优化设计

自然界经过了亿万年的演化,已经成为一个终极的优化器,生物结构形态里包含着高效、节能、坚固的设计原理。仿生优化设计是一种新的方法论,它以自然界中生物的形态结构、运动规律、功能机制为依据,用现代计算技术对水利工程结构进行创新设计。

(一) 仿生结构形态在水利工程中的应用

仿生学给工程结构设计赋予了诸多的灵感来源。模仿自然生物体经过漫长进化形成的精妙结构,可以创造出许多性能优良的新型水工结构。树木的根系为了在土壤中稳固自身、吸收养分,就形成了复杂而高效的分支系统。参照该种形态,可以设计出类似树根结构的大型设备基础或者抗滑桩,其传力路径更加合理,可以更好地把上部荷载分散传递到地基中,从而提高基础的稳定性和承载力。海螺、贝壳等生物外壳所具有的对数螺旋线、加强肋结构,可以在很薄的厚度下承受巨大的外水压力,给拱坝等薄壳结构的设计提供了轻质高强的设计范本。

从材料微观结构上讲,骨骼、竹子等天然材料的多孔或者纤维增强复合结构,具有很好的韧性以及抗裂性。仿生思想用于水工混凝土材料研究,可以开发出韧性更好、耐久性更强的新型复合材料。水力学设计方面模仿鱼类表面的微沟槽结构可以减阻,可应用于输水管道内壁或者船闸设计;模仿荷叶的超疏水表面可以开发防覆冰、抗污损的结构表面涂层。仿生结构形态的运用一方面可以提高工程结构的力学性能,另一方面也可以使结构与自然环境和谐共存,成为绿色生态水利的重要实现方式。

(二) 基于遗传算法的智能优化

遗传算法是模仿生物界中“物竞天择,适者生存”的进化规律而发展起来的全局概率搜索算法。尤其是对于传统优化方法很难解决的复杂问题,水利工程中经常出现的非线性、多峰值、不连续、设计空间大的优化问题。遗传算法的优势是没有目标函数或者约束函数的梯度信息,而是在潜在解的群体里用模拟选择、交叉、变异等遗传操作来搜索,所以遗传算法具有较强的鲁棒性,不容易陷入局部最优解。

遗传算法的基本流程是从随机产生一个初始种群开始,每一个个体代表问题

的一个潜在解。然后，用适应度函数来评价每一个个体的好坏，适应度高的个体有更大的概率被选中进入下一代。选中的个体通过“交叉”操作交换彼此的一部分“基因”，得到新的后代，模拟生物的繁殖过程，目的是结合父代的优良特性。以一定的概率对个体的基因进行变异，增加种群的多样性，有利于跳出局部最优。

经过选择、交叉、变异循环迭代之后，整个种群的平均适应度会逐渐上升，最后收敛到包含最优解或者次优解的种群。在水库优化调度、水资源配置、泵站机组组合优化等问题的解决中，遗传算法都有较好的应用。可以处理高维、非线性复杂的系统，给决策者提供一组高质量的备选方案。将遗传算法和其他方法相结合，形成混合优化策略，可以大大提高求解的效率和精度，是解决复杂工程优化问题的有效方法。

（三）机器学习辅助的优化设计

结构优化设计时，一般需要对大量的候选设计方案进行性能评价，大部分时候会用到耗时的数值模拟，比如有限元分析。当设计变量很多或者分析模型很复杂的时候，成千上万次的模拟计算会导致优化周期过长甚至不可行。机器学习技术，尤其是代理模型，给这个瓶颈找到了高效的解决办法。代理模型属于数据驱动的近似模型，可以学习复杂数值模型的输入和输出之间的内在映射关系，而且预测速度比原来的模拟要快得多。

构建代理模型的过程一般是，首先用试验设计方法在设计空间中选取一组有代表性的样本点；然后对这些样本点做高精度的有限元分析，得到它们对应的结构响应数据；最后用这些“输入-输出”数据来训练机器学习模型（人工神经网络、支持向量机、克里金模型）。经过训练的代理模型就可以代替耗时的有限元分析，嵌入到优化循环中，快速预测任意设计方案的性能。可以提高优化算法的收敛速度，在有限的工期内工程师可以探索更大的设计空间，得到更好的设计方案。该方法对拱坝、大型地下洞室群等复杂结构的优化设计有较好的应用价值。

第三节 施工过程数字化模拟

水利水电工程规模大、工序繁、施工环境多变，依靠经验、二维图纸的施工管理模式已经力不从心，面临巨大挑战。施工过程数字化模拟技术，就是以计算机平台为依托，建立与实体工程高度一致的虚拟模型，再对重要的施工环节进行动态模拟、分析、优化。它目的在于实现施工方案的科学决策、施工过程的精细化控制和风险的主动防范，是工程项目高质量建设的技术支撑。各项主要施工过程的数字化模拟，其核心内容、优化目标、关键优势见下表。

表 6-3 施工过程数字化模拟主要类型、内容与优势表

仿真类型	核心模拟内容	优化 / 解决问题	关键优势
土石方填筑过程	填筑顺序、碾压质量、机械运行轨迹与效率	提高填筑质量、优化资源利用、提升施工效率、成本控制	科学决策、事前预测、精细管理
混凝土浇筑与温控	浇筑块划分、跳仓方案、水管冷却、温度 / 应力场	防控温度裂缝、优化温控方案、保障结构耐久性	预见性高、定量分析、精准预控
地下洞室施工	开挖方式、围岩变形、支护结构受力、风险预演	优化施工方案、保障结构安全、降低施工风险	全方位比较、主动防护、经济安全

一、土石方填筑过程仿真

土石方工程是水利水电枢纽工程的重要组成部分，高土石坝填筑施工质量的好坏，直接影响大坝长期安全稳定。利用数字化仿真技术对填筑全过程进行精细化的模拟，可以大幅度地提高施工管理水平，保证填筑质量符合设计标准，提高资源利用效率，对大坝安全和工程造价控制有着不可替代的作用。

（一）填筑顺序与碾压质量的模拟

高土石坝填筑是动态的、复杂的、必须严格控制的过程。数字化模拟首先要建立高精度的三维地形模型和坝体设计模型。在这样的基础上将填筑过程划分为连续的虚拟施工活动。根据填筑上升速度，分部分块分层等施工逻辑，仿真系统可以模拟出坝体“生长”的全过程。这既可以直观反映出坝体形态的变化，又可以作为后继的碾压质量模拟提供几何基础。

碾压是保证填筑体密实度和均匀性的主要工艺。碾压质量的模拟一般用离散元法或有限元法和经验公式结合的方法。根据填料的物理力学参数、碾压机具的

型号参数（重量、振动频率）、施工工艺参数（铺料厚度、碾压遍数、行驶速度）等，仿真系统可以准确地计算出每层填料在碾压作用下的应力分布、变形和最终压实密度场。系统以云图形式呈现仓面压实度的达标状况，利于提前察觉欠压、过压区域，给现场改良碾压工艺，调整施工参数赋予科学指引，达成从传统“事后检测”向“事前预知、事中把控”的转变。

设计与施工人员可以利用虚拟环境对不同的填筑顺序、碾压方案组合进行多次试验，分析各种方案下坝体沉降变形、应力分布及整体稳定性长期的影响。大大提高了方案设计的科学性、可靠性，有效避免了实体工程中低成本、高风险的试错，保证了填筑施工内在质量，为建设均质高标准填筑体打下了良好的技术基础。

（二）施工机械的运行轨迹与效率

大型土石方填筑场地上，自卸车、推土机、平地机、碾压机等各种大型机械群作业，其调度及协同效率的好坏直接影响到整个工程进度和成本。施工机械的运行轨迹以及效率仿真，是达成填筑工程精细化管理的重要环节。该技术用虚拟现实、仿真算法创建包含全部施工机械及作业逻辑的四维施工模型，在模拟分析中对机械的运行全过程进行详细的分析。

仿真系统把高精度施工场地三维模型、机械设备性能参数模型、土石方调配计划三者整合在一起。在此基础上系统可以模拟自卸车的取料、运输、卸料、返回的过程，也可以模拟碾压机械在仓面内前进、后退、换道等作业轨迹。系统内设的路径规划算法、碰撞检测模块可以产生最优路径，防止机械运行时产生冲突，缩减无效运输及空驶时间。实时定位现场机械，将仿真模型和现场施工数据互相交流，形成虚实结合的数字孪生系统，从而及时反映现场作业状态，动态调整后续施工计划。

按照机械的运行轨迹和作业时间进行统计分析，仿真系统可以获得单台机械有效作业率、车队循环时间、单位时间填筑方量等各项主要效率指标。管理者根据这些量化数据可以准确找到施工过程中存在的瓶颈，进而对机械配置数量、交通组织方案、上料与碾压协同作业模式进行相应的优化。采用以数据驱动为主的决策方式来取代以前的管理模式，即以前的现场管理依靠现场管理人员的经验进行粗放式的管理。

（三）基于建筑信息模型的施工场地布置优化

水利水电工程施工场地一般规模较大，布置复杂，除生产、生活、行政等临时设施外，还有复杂的道路交通网、材料堆场。基于建筑信息模型的施工场地布置优化，就是将建筑信息模型技术和施工模拟紧密结合，对施工总平面进行科学规划、动态管理的先进方法，其目标是实现场地资源利用最大化、物流运输最高效、安全干扰最小化的目的。

建筑信息模型技术首先要整合地形地貌、工程地质、枢纽总布置等信息，创建出可视化的三维数字化场地环境。在此基础上，将拌合系统、钢筋加工厂、预制场、仓库、办公生活区、道路、管线、料场等各类临时设施，以参数化的建筑信息模型构件形式进行布置。该方法的优势明显，具有明显的优越性。

1. 可视化与空间协同，在三维环境里能够直观地查看各个设施的空间关系，有效地避免由于平面图纸信息不完整造成的布局冲突，比如运输道路和临时建筑的碰撞、起重机械作业半径和高压线安全距离不够等问题。

2. 动态模拟与优化，按照施工进度计划，可以对施工阶段的场地布置做动态预演。模拟汛期来临前导流洞施工阶段场地布置、大坝主体浇筑高峰期交通流线组织。通过量化分析运输距离、运输时间、交通拥堵点等主要指标，可以直观地对比出各种布置方案的好坏，从而选择出能够最大限度减少物料二次搬运、缩短运输路线、保证施工高峰期交通畅通的最佳方案。

利用建筑信息模型进行施工场地布置优化，把施工场地布置从静态、二维的规划变为动态、三维的精细化设计。不仅可以提高规划的科学性、前瞻性，还可以准确计算临时工程的土方量、材料量，给成本控制提供可靠的依据。合理的施工总平面布置，将为整个工程项目安全、高效、经济建设奠定基础。

二、混凝土浇筑与温控仿真

大体积混凝土是水工建筑物的主要材料，而混凝土坝工程中，由于水泥水化热引起的温度裂缝是影响大坝安全的主要隐患。混凝土浇筑与温控仿真，就是用数值计算方法来对混凝土从浇筑、升温、冷却全过程进行模拟预测，期望得到科学的温控方案，从而避免温度裂缝产生，保证建筑物的完整性、耐久性。

（一）浇筑块划分与跳仓方案模拟

混凝土坝一般采用分块分层浇筑，浇筑块的划分及浇筑顺序对温度应力控制

起着重要的作用。数字化模拟在其中发挥着方案实验室的作用。技术人员在建立大坝精细化有限元模型之后，可以对坝体进行不同的浇筑块划分，并模拟各种浇筑方案，其中最常用的浇筑方案就是“跳仓法”。

跳仓法间隔浇筑，使先浇筑的混凝土块体有足够的时间释放大部分水化热，产生一定的收缩变形，降低对后浇块体的约束，减小整体温度应力。通过比较不同的分块尺寸、浇筑顺序、间歇时间组合方案，仿真实验系统可以得到每种方案下坝体内部温度场、应力场的演化历史。分析结果可以清楚地表明，哪种方案最能有效地降低温度峰值，减小内外温差和温度梯度，从而把拉应力控制在混凝土抗拉强度允许的范围内。依靠定量分析的方案选择，浇筑块划分、跳仓方案的制定不再单纯地依靠工程经验，而是在科学计算的基础上，明显提高了温控设计的预见性、有效性。

（二）水管冷却效果的仿真分析

特大型混凝土坝单靠自然散热、跳仓法无法达到温度控制要求，这时必须人工冷却。埋设冷却水管通水冷却，属于人工冷却的一种常用方法。水管冷却效果的仿真分析属于温控方案设计的主要内容，其目的就是准确预测冷却水对混凝土内部温度场的影响效果，进而优化水管布置方案和通水制度。

仿真过程首先要建立冷却水管在混凝土有限元模型中的几何模型，一般是一个复杂的三维网络。然后要确定水管直径、间距、布置层数、冷却水入口温度、流量、通水时间等一系列参数。仿真计算采用热传导理论，把水管看作是负热源，或者直接模拟管壁与混凝土之间的对流换热过程，从而准确地算出冷却水带走的热量和由此引起周围混凝土温度的降低。该模拟可以动态的表现出通水以后坝体内部等温线的变化情况，从而直观的反映出冷却效果扩散的范围以及强度。

仿真分析可以定量评价不同水管布置方案（水平间距、竖向间距等）的降温效果，防止出现局部冷却不足或者过冷。同时也可以模拟不同的通水制度，连续通水或间歇通水、不同季节的水温和流量，以达到在满足温控要求的前提下，找到能耗最低、效果最好的运行方案的目的。精确的仿真分析是制订经济合理的通水冷却方案的依据，也是实现从“无坝不裂”到“精心控裂”目标的重要保证。

（三）施工期温度场与应力场预测

混凝土从浇筑开始到完全冷却稳定，内部的温度场、应力场一直处在变化中。施工期温度场和应力场的耦合预测，是综合评价温控方案能否成功以及结构安全

是否达标的关键步骤。此过程需做复杂的热力耦合分析，即温度变化造成的体积变形受约束而产生应力，应力的存在和发展又反过来影响材料的热物理性能。

仿真计算模型应该充分考虑到所有的复杂因素。温度场计算时要输入水泥品种、用料决定的水化热释放规律、混凝土导热系数、比热、浇筑温度、环境气温变化、风速影响下表面散热条件以及水管冷却等人工措施的综合作用。应力场计算时还要考虑到混凝土的弹性模量、抗拉强度、徐变等力学性能随龄期增长而表现出的非线性特点。徐变效应能依靠混凝土自身的变形来部分松弛温度应力，这是必须精确模拟的特征。

利用瞬态热力耦合分析可以得到任意时刻、任意位置的温度、应力值以及随时间变化的完整曲线。技术人员可以根据此判断整个施工养护期间坝体内部最高温升值、最高内外温差值、最大降温速率、最大拉应力值是否满足设计控制标准。当预测结果表明存在裂缝风险的时候，就可以及时调整浇筑方案、保温养护措施或者水管通水制度，直到预测的应力水平处于安全范围内为止。全过程动态预测可以实现混凝土坝温度裂缝风险的精准预控。

三、地下洞室施工过程仿真

水利水电工程中的地下洞室群，即引水隧洞、地下厂房等，一般规模大、结构复杂，且赋存的地质条件十分复杂，施工风险高。地下洞室施工过程仿真就是利用数值模拟技术，对开挖和支护过程进行动态模拟，预测围岩响应和支护结构性能，以期优化施工方案、预演风险、保证工程安全性和经济性的技术手段。

（一）隧道掘进机法 / 钻爆法开挖过程模拟

地下洞室开挖方式主要有隧道掘进机法和钻爆法两种。数字化模拟可以依据各种方法的特性，对施工过程进行详细的模拟。

1. 隧道掘进机法模拟：重点在于掘进机与围岩之间作用。输入掘进机设备参数（刀盘推力、转速）和岩体参数之后，即可得到掘进速率、刀具磨损情况，还可以评价掘进机在遇到断层、软弱夹层等不同地质条件时的适应性。仿真可以模拟管片衬砌拼装过程、盾体对围岩的约束作用，分析施工参数对地表沉降、周围环境的影响，从而给优化掘进参数提供依据。

2. 钻爆法模拟，传统的钻爆法仿真对爆破循环作业的每一个步骤都做详细的模拟。模拟钻孔布置、装药结构对岩体所造成的损伤范围及破碎效果，预测爆破

引起的围岩振动强度及其传播规律,并评价其给临近洞室或者已经完成的支护结构带来的影响。仿真可以模拟出渣运输过程、通风方案,从而达到对整个循环作业时间的准确计算以及流程优化的目的。

利用开挖过程的数字化模拟,在施工前就可以对不同的工法在具体的地质条件下进行充分的研究,从而选择最合适的开挖方式,并对施工参数进行精细化设计。

（二）围岩变形与支护结构受力

洞室开挖破坏了岩体原有的应力平衡状态,造成应力重分布,引起围岩变形或者破坏。围岩变形及支护结构受力仿真分析,属于地下洞室安全设计当中十分关键的部分。采用有限元、离散元等数值方法,建立可以反映真实地质结构(断层、节理)的计算模型,可以准确模拟开挖后围岩内部应力场的变化和位移场的分布。仿真可以预测掌子面前方岩体的先期位移、洞室周围拱顶和边墙的沉降、收敛变形值,并与监控量测警戒值进行比较,在失稳发生之前就发出预警。

在围岩变形分析的基础上,结合锚杆、喷射混凝土、钢拱架等支护构件,就可以模拟支护结构和围岩的共同作用过程。仿真可以清楚地显示支护措施介入后,围岩变形的发展趋势是否得到有效控制,各个支护构件(不同位置的锚杆)的受力状态,即轴力、剪力的分布情况。通过以上分析可以判断设计的支护体系是否安全可靠,是否存在应力集中、承载力不足的薄弱环节,据此对支护参数进行优化,例如锚杆长度、间距、预紧力或者喷射混凝土厚度,从而实现安全、经济的支护设计。

（三）施工方案比选与风险预演

数字化仿真最大的优点之一就是它的预演能力,给复杂的地下工程提供了一个虚拟的试验平台,可以用零成本、零风险的方式对各种施工方案进行全方位的比较。对大型地下厂房开挖,可以模拟不同的开挖顺序(分层开挖、分部开挖)、不同的分层高度和支护时机,对比分析各种方案对围岩稳定性和最终变形量的影响,从中选出最佳施工组织方案。在洞室交叉、小间距并行等复杂情况下,通过仿真可以发现洞室群之间的力学相互影响,并给出合理的开挖顺序建议,防止施工扰动引起的一系列破坏。

施工过程仿真也是一种行之有效的风险预演方法。在模型中设置地质风险,即预先设定软弱结构面、高压富水断层、高地应力岩爆区等地质风险,可以模拟

工程遇到这些不利情况时可能出现的局部塌方、突水突泥、岩爆等现象。预演可以让工程师提前找到高风险区,对原有的设计方案、施工方案应急能力做出判断,从而制定出更加合理的应急预案和加固措施。经过虚拟世界里风险演练,可以明显加强实体工程面对未知风险的能力,由被动应付变为积极防御,最大程度上保证施工人员与工程结构安全。

第四节 运行维护数字化管理

水利水电工程进入到长期运行维护阶段,管理问题越来越复杂,越来越重要。该时期管理由于数字化技术发生了一场革命性的变革。通过创建数字孪生体、分析监测数据、优化调度决策,传统的依靠经验的管理模式正在慢慢转变成数据驱动的精细化、智能化管理,全方位提高了工程运行的安全水平和综合效益。

一、基于 BIM 的运维管理平台

建筑信息模型的应用已经从设计施工阶段延伸到了运维阶段,成为贯穿工程全生命周期的核心数据平台。基于 BIM 的运维管理平台把工程实体与运行数据紧密融合,实现了从建造到运维的数字化移交、智能化管理,给水利水电工程的长期健康运行提供有力的技术保障。

(一) 设备信息与 BIM 模型的关联

将设备信息和 BIM 三维模型深度关联,为创建数字运维系统打下基础。传统设备管理模式下设备的技术参数、采购记录、供应商信息、维护手册等资料大多以纸质或分散的电子文件的形式存在,查找困难、数据孤岛现象严重。利用 BIM 技术,可以把每一台水轮发电机组、闸门、泵、阀门等重要设备以独立构件的形式在模型中呈现出来,并将与之有关的静态和动态信息作为该构件的属性数据进行挂接。

静态信息是指设备的设计图纸、技术规格书、安装手册、备品备件清单等,一旦录入模型中,就会与模型里对应的设备实体形成永久的绑定。运维人员只要点击平台上的任何一个设备模型,就可以查阅到该设备完整的身份档案。动态信息有设备的运行状态参数、启停记录、累计工作时间、实时能耗、故障报警记录等。数据可以由物联网传感器实时采集后传送到平台上,也可以与 BIM 模型实

现动态关联。

表 6-4 设备信息分类表

	静态信息	动态信息
范畴	设备设计图纸、技术规格书、安装手册、备品备件清单、采购记录、供应商信息、历史维修记录	运行状态参数、启停记录、累计工作时间、实时能耗、故障报警记录、维护保养记录、传感器实时读数

设备信息分类表中给出了运维管理中静态和动态信息的具体内容。该关联既可以实现几何信息与非几何信息的有机融合,又可以创建以实体设备为中心的“单一数据源”。设备出现故障时可以调取该设备所有的相关数据,从而可以为故障分析与修理工作提供足够充分且准确的资料。彻底改变以前信息分散、查询效率低下的局面,实现设备全生命周期的精细化、透明化管理。

（二）巡检路线与维护记录的可视化

水利水电工程日常的巡检,对于保障它的安全运行有很重要的作用。但是传统的巡检方式大多依靠人工经验以及纸质表单,常常会存在路线规划不合理、巡检质量难以追踪、信息传递迟缓等状况。运用 BIM 技术创建运维管理平台可以完成巡检工作的数字化、可视化。平台利用三维模型提前规划出最优的巡检路线,在三维模型中清楚地标出所有的待查设备和重要检查点,并将巡检路线用三维可视化的形式发送到巡检人员的移动终端。

巡检人员使用手持移动设备可以随时查看巡检路线和当前位置,到达指定设备时就会自动收到该设备应做的检查项目、历史维护记录和注意事项。巡检时,可以利用移动终端直接记录检查结果,文字描述、数据录入、现场照片、视频等均可即时上传并与 BIM 模型中对应的设备构件关联。于是每一项巡检记录就有了空间位置信息和时间戳的结构化数据,并且统一存放在云端平台。管理人员在监控中心随时可以查看巡检工作进行的情况和结果,从而达到对巡检过程透明化管理以及质量追溯的目的。可视化的记录方式使得设备健康状况变化的历史轨迹一目了然,为制定科学的维护策略提供可靠依据。

（三）维修方案的模拟与交底

对大型、复杂设备的维修工作来说,事前周密的规划十分重要。BIM 平台强大的三维可视化以及空间分析功能,给维修方案模拟及技术交底带来前所未有的强大工具。技术人员在重大维修之前可以在虚拟 BIM 环境中对整个维修过程

进行全流程模拟。即模拟大型部件拆卸顺序、吊装路径规划、碰撞检查、维修作业空间充足性评估、脚手架搭设位置、临时电源和安全设施布置等。利用虚拟建造可以提前发现传统二维图纸上看不到的潜在问题，例如吊装路径与已建结构有冲突、维修工具操作空间不足等，从而优化维修方案，减少现场返工，节约工期和成本。维修方案确定之后，BIM 模型就成为最直观、最清晰的交底材料。管理人员可以组织维修队伍进行三维可视化交底，使每一个作业人员都清楚地知道自己的任务、操作步骤、关键风险点和安全注意事项，大大提高了技术交底的效率和效果，保证维修工作安全、准确、高效地完成。

二、工程安全监测数据分析

水利水电工程安全监测系统不断产生大量的结构响应、环境量数据，这些数据就是评价工程健康状况的“脉搏”。仅仅采集数据已经不能满足现代工程管理的要求。关键在于依靠深层次的数字化分析，把零散的原始监测数据转变成对工程安全状况的准确认识，对发展趋势做出预估并发出风险预警，从而达成从“被动应对”到“主动预见”的转变。

（一）监测数据的可视化与趋势分析

把抽象的监测数据转化成直观的图形图像，就是认识和分析大坝等建筑物性态的第一步。可视化技术用多种形式把来自成千上万个传感器的位移、渗流、应力应变等重要数据呈现给管理者，大大加快了信息获取速度，也大大提高了直观性。

1. 把监测数据渲染到工程三维实体模型上，和 BIM 或者 GIS 模型结合。如可采用彩色云图表示坝体的应力分布、或矢量箭头表示各部位变形方向及大小等。空间化的展示方式使管理者可以一眼看出结构整体和局部的响应情况，进而迅速找到异常区域。

2. 时间序列曲线是分析数据变化规律的主要方法。将某一测点的监测值与时间、库水位、环境温度等一起绘制成坐标系，就可以清楚地看出变形、渗流等物理量对外部荷载变化的响应规律以及滞后效应。分析这些曲线趋势、周期性、相关性，可以判断结构运行是否符合设计要求。

3. 系统可以产生等值线图、剖面图、相关关系图等各种可视化图表。绘制坝基渗压等值线图可以直观判断浸润线位置是否正常；绘制多个测点之间的相关关

系图，则可以验证它们之间的响应是否协调一致。

经过多方面、多层次的可视化分析之后，管理者就可以对工程的“健康状况”有一个全面、动态的认识，为之后深入的诊断与决策打下坚实的基础。

（二）异常测值的自动识别与预警

在大量的监测数据当中，及时发现预示着潜在风险的异常测值，属于安全监测的重要任务之一。但是人工逐一排查数据效率低且容易遗漏，所以建立基于智能算法的异常测值自动识别与预警系统十分重要。该系统用数学模型学习并定义大坝各种正常工况下的行为模式。这些模型可以是基于统计理论建立的回归模型，也可以是复杂的机器学习模型，比如神经网络、支持向量机等。

系统首先利用历史监测数据进行模型训练，得到各个库水位、温度等荷载组合下各测点的理论预测值或者合理波动范围。系统把实时采集到的监测数据同模型的预测值做比较。当某一测点的实测值明显超过模型预测的正常范围，或者超过预先设定的统计阈值的时候，系统就判断该测点为异常测值。此时系统就会触发预警，采用声光报警、短信、移动应用推送等方式将预警信息及异常测点位置、异常幅度、历史数据等同步发送给相关管理、技术人员，保证异常情况第一时间得到关注和处理，为之后的故障排查、应急处理争取时间。

（三）监测数据与有限元模型反演

为了对大坝真实的性能和安全储备有更深入的认识，需要把现场监测数据与基于力学原理的有限元数值模型结合起来。有限元模型在设计阶段所用的计算参数，例如材料的弹性模量、渗透系数等，一般取自试验结果或者规范推荐值，和工程建成后实际状况会有差异。监测数据与有限元模型反演分析，即用实际监测得到的位移、渗压等响应数据，反向推算结构真实的材料参数和荷载状况，实现对数值模型的校准和修正。

此过程一般会使用多种优化算法，以实测值和计算值的最小误差为目标，反复迭代计算，最后得到一组最佳的材料参数。经过反演分析校准过的有限元模型，可以更好地反映大坝实际受力情况以及结构特性。因此更加可靠的模型可以准确地预测大坝在极端洪水、地震等荷载作用下会产生反应，并且对大坝的极限承载能力及潜在的薄弱点做出判断。这样一种以实测为依据进行科学计算、用计算来预测未来，将经验判断与科学计算深度融合的模式，给大坝安全评价提供了更加坚实可靠的科学依据，是达到高水平的风险评估和预测性维护的关键技术手段。

三、智慧调度与决策支持

水利水电工程的调度运行，是发挥水利水电工程防洪、发电、供水、航运、生态等多功能的关键步骤。智慧调度与决策支持系统依靠先进的数字化技术，创建起繁杂的数学模型，对流域水文气象信息以及工程状况展开全方位的研判，目的在于达成水资源的合理调配并控制风险，进而促使工程运作由传统的调度方式向智慧化的决策模式转变。

（一）水库防洪兴利联合调度模型

水库调度本质上属于复杂的多目标决策问题，在汛期防洪安全与兴利效益的矛盾最为明显。传统的调度方式大多依靠固定的调度规程和调度人员的经验，在水情不断变化以及多种约束条件下很难找到全局最优解。水库防洪兴利联合调度模型就是为此而建立起来的数字化决策工具。该模型将流域内全部实时信息考虑在内，即上游来水流量、降雨量分布、气象预报数据、下游河道安全泄量、各用水户的需水计划、电网负荷需求等。

在此基础上用数学规划的形式来描述调度问题。其目标函数一般为多维的，防洪方面追求下游关键断面洪峰流量的最小化，兴利方面追求发电量的最大化、供水量的满足率最高。模型的约束条件为水库蓄水位不能超过防洪限制水位，下泄流量不能超过安全范围，机组出力需满足物理限制等复杂的工程、水文边界条件。

求解多目标、多约束的复杂优化模型一般用动态规划、线性规划、非线性规划或者现代智能优化算法，如遗传算法、粒子群算法等。模型运行后，可以快速获得一系列帕累托最优调度方案集供调度者选择。这些方案在保证防洪安全的前提下，可以给出不同的兴利目标下最佳的平衡点，大大提高了调度的科学性、精细化程度，从而达到洪水资源的有效利用和水库综合效益的最大化。

（二）应急预案的数字化推演

传统的应急预案大多以文本的形式存在，内容是静态的、格式是固定的，在真实的突发事件面前，很难迅速有效地指导实际的操作。应急预案的数字化推演就是利用数字孪生、仿真技术把静态的预案变成动态、交互式的虚拟演练平台，提高应急响应实战能力。平台可以创建一个与现实世界非常相似的虚拟场景，包含水库、大坝、下游河道、保护区等主要要素的三维模型。

管理者可以设定各种极端突发事件情景，即超标准洪水、大坝结构突发性险情、溃坝等最不利的情况。预案启动之后，系统可以利用水动力学模型，对洪水演进过程实施实时模拟，随时显示出各个时间段内淹没的范围、水深以及到达时间。同时系统也可以模拟出预案中各项应对措施的效果，例如开启闸门泄洪后下游水位的变化，人员物资转移疏散的路径和时间。通过不断的推演可以检验应急预案的科学性、可操作性，并且也可以作为培训的一种高效的方式，使各级指挥人员和抢险队伍在模拟实战中熟悉应急预案流程，提高其决策能力和协同配合能力，在真正的险情发生时可以临危不乱、处置得当。

（三）基于大数据的调度决策优化

伴随着监测手段的丰富以及信息技术的发展，水库调度决策所获得的数据维度和数量正呈爆炸式增长。基于大数据的调度决策优化，就是运用大数据技术挖掘出大量多源异构数据中所包含的深层规律，使调度决策更智能化、前瞻性。除了传统的气象、水文数据之外，还有卫星遥感影像、全球气候模型输出、社交媒体舆情、下游社会经济活动数据等多元信息。利用大数据分析平台，采用机器学习、深度学习等算法建立更加精确的洪水预报模型。深度神经网络可以学习历史降雨、雷达回波图和气象模式之间的复杂关系，因此比传统水文模型具有更长的预见期以及更高的预测精度。通过对长期调度数据与发电效益、供水效益之间的联系进行分析，可以找到并改进现有调度规则中还没有被发掘的提升空间。大数据技术可以对调度方案做动态的自适应优化。系统可以不断学习新的数据，迭代改进预测模型和调度模型，使决策可以适应气候变化所造成的水文规律的改变、社会经济发展所引起的用水需求的变化，最终形成一个自我进化、持续优化的智慧调度大脑。

第七章 智能监测与安全预警技术

本章主要介绍了水利水电工程安全监控的前沿领域，详细分析了智能传感、数据传输、分析预警等关键技术，从而给全生命周期健康诊断体系的建立提供理论基础和实践指导。融合应用技术正把工程安全管理从被动的事后处理变为事前预警，把单一的监测变成全面的诊断。

第一节 智能传感技术应用

智能传感技术属于工程结构状态感知的基本要素，它的发展水平直接影响到监测系统精确性、可靠性的好坏。它就相当于水利水电工程安全监测系统的“神经末梢”，可以及时发现结构内外环境以及自身状态的细微变化。本节主要阐述了几种主流的传感技术在工程安全中起到的作用。

一、光纤传感技术应用

光纤传感技术由于具有抗电磁干扰、本质安全、传输距离远、灵敏度高等特点，在水利水电工程复杂的环境下表现出很强的适应性及优良的监测性能，成为结构健康监测领域中不可缺少的手段。它克服了传统电学传感器的不足，给出更加稳定可靠的监测数据。

（一）分布式光纤温度/应变监测

分布式光纤传感技术是一种革命性的监测手段，把整根光纤作为传感单元，可以对长距离、大范围结构沿线温度或应变场进行连续无盲点监测。基本原理就是利用光在光纤中传输时发生的拉曼散射或者布里渊散射，通过对背向散射光的频率、强度等信息的变化进行分析，反演得到光纤每一点的温度和应变值。该技术适用于水利水电工程中线性的或者面状的结构，例如大坝坝体、输水隧洞、土石围堰、边坡等。

大体积混凝土水化热温控防裂工程中，预埋的分布式测温光纤可以准确获取

混凝土内部温度场的变化,给优化浇筑方案、制定合理的降温通水措施提供实时数据支持。它可以检测坝体由于环境温度、库水位的变化所产生的热响应,及时发现异常温变区并对温度裂缝的产生发出预警。渗流监测,测量坝体或者坝基的温度场,可以有效地找到渗漏通道,因为渗漏水会引起局部温度异常。分布式应变监测光纤能测量结构沿线应变分布,可以定位应力集中区,评价结构整体受力状况,给大坝、长隧洞等结构安全评价带来前所未有的精细化数据。

(二) 光纤光栅传感器在结构监测中的应用

光纤光栅传感器是一种技术成熟、应用广泛的准分布式光纤传感元件。用紫外光刻技术形成周期性的折射率变化区在光纤纤芯内部,使这个区域反射特定波长的光。当光栅所处位置的温度或者应变发生变化的时候,反射的布拉格波长就会随之变化。通过分析反射光谱的中心波长可以反演出测点的应变或者温度信息,从而得到高精度的测量结果。光纤光栅传感器体积小、精度高、抗疲劳、复用方便。

在水利水电工程中,光纤光栅传感器被用在重要的地方做应力应变监测。把光纤光栅应变计封装后预埋在大坝混凝土中,可以对大坝混凝土的内部应力情况、徐变效应和荷载响应进行长时间的监测。粘贴在压力钢管、闸门等金属结构上可以实时监测结构工作时应力分布情况,判断结构疲劳损伤。经过特殊封装后,光纤光栅可以制成渗压计、位移计、加速度计等多种传感器,用来监测大坝内部孔隙水压力、接缝或者裂缝的开合情况以及结构在地震或者泄洪时所受动力反应。

采用波分复用技术一根光纤上可以串接几十、甚至上百个不同波长的光纤光栅传感器,构成一个传感网络实现对结构关键点的多点、多参数同步监测。该组网方式大大简化了布线,降低了系统复杂度,尤其适合大型复杂水工结构的长期健康监测需求,给创建精细化结构安全评价模型提供了丰富可靠的数据源。

(三) 光纤传感器网络布设与优化

光纤传感器网络的布置与优化是保证监测系统有效性的关键部分,它决定着监测数据的好坏以及结构状态评价是否准确。一个成功的布设方案要协调监测需求、结构特性、施工条件和经济成本这四个因素。测点位置选择很重要,一般需要根据有限元数值模拟结果,把传感器布置在结构应力集中区、变形敏感区、潜在开裂区、新旧混凝土结合面等关键部位。

布置传感器时除了考虑空间的覆盖外,还要考虑监测参数的全面性,建立应变、温度、渗流、位移等物理量的网格。大坝横截面可以采用网格化设计,对廊

道、坝基等重要部分加大密实度。还要考虑到传感器的存活能力和长期稳定性，采用耐腐蚀的材质来制造传感器，利用坚固的结构来实现传感器的封装，在混凝土浇筑、钢筋绑扎等施工期间给传感器采取有效的防护措施，避免出现破坏的情况。网络拓扑结构的优化设计也不能忽视，合理的组网方式可以提高系统的可靠性，设置冗余路径，保证系统在部分光缆或者传感器出现故障的时候，仍然可以保持基本功能。最终目的就是形成信息获取能力最强、结构安全性评价最准确的最优监测网络。

二、无线传感网络技术

无线传感网络技术凭借灵活、廉价、易于布置等特点，很好地解决了传统有线监测系统布线难、维护成本高等问题，给工程监测提供了一种新的方法。地形复杂、监测点分布散乱或者不适宜布设线缆的区域，无线传感网络有它特有的应用价值。

（一）低功耗传感节点的设计与部署

无线传感网络由大量的微型传感节点组成，这些节点一般由电池供电，在无人值守的情况下长时间运行，因此低功耗设计是无线传感网络的主要技术难题。节点设计必须对传感、计算、通信和功耗等各方面做细致的权衡。硬件上常使用低功耗的微控制器做为主控芯片，加上高效的电源管理芯片。传感器和无线收发模块在不工作的时候应该处于深度休眠状态，从而最大程度地降低静态功耗。

软件上需要设计出高效的休眠唤醒策略以及数据采集协议，以达到按需工作的目的。节点大部分时间处于休眠状态，只在预定的时间点或者接收到外部触发信号时被唤醒，完成数据采集和发送之后立即返回休眠。能量收集技术的应用也是提高节点寿命的有效途径，在节点上集成微型太阳能电池板、温差发电模块或者振动能量采集器，从环境中获取能量来为节点提供持续的电力供应，从而达到“无限续航”监测的目的。从节点布置的角度看，要根据节点的感测范围、通信距离和现场环境，合理规划节点的位置，保证监测区域全面覆盖并且网络连接可靠。

（二）无线数据传输的稳定性与安全性

水利水电工程现场电磁干扰源多、环境复杂，给无线数据传输的稳定性和可靠性造成影响。同时监测数据直接影响工程的安全性，所以安全性不能被忽视。

为了保证数据可靠地进行传输，就要采取一系列技术措施。

1. 稳定性上一般使用健壮的通信协议。以 ZigBee、LoRa 等无线网络为基础的无线网络具有较好的抗干扰能力及穿透性。网络的拓扑形式大多为网状网络，节点、链路发生故障时数据包会自己选择可利用的线路进行路由，实现了网络的自愈性，大大提高数据的传输可靠性。采用信道跳频、数据重传、前向纠错编码等方式，可大大降低信道衰落、突发干扰给数据传输完整性带来的危害。

2. 安全性方面：建立从节点到网关再到数据中心完整的安全防护链。节点入网时要做严格的身份认证，防止非法设备接入。用高级加密标准等算法给传输数据加密，防止数据在传输的过程中被截取或者窃听。使用数据完整性校验机制，如循环冗余校验或者消息认证码，来保证接收到的数据未被篡改。这些措施一起形成起无线传感网络的安全防线，保证监测数据的真实性、可用性以及保密性。

（三）自组织网络在大型工程中的应用

自组织网络是一种没有固定基础设施支持，能自行建立、管理的分布式网络。网络中每个节点都有路由功能，可以动态发现并维护与其他节点之间的路由，所以网络有很强的灵活性、扩展性和鲁棒性。大型水利水电工程因为它的优点，在工程中有着广阔的应用前景。以大型边坡或者库岸失稳监测为例，可以迅速抛撒或者布置大量的无线传感节点，这些节点能够快速形成覆盖整个监测区域的自组织网络，实时采集并回传土壤含水率、孔隙水压力、位移等重要信息。

自组织网络的自愈能力是它的特点。当部分节点由于落石、小型滑塌等原因失效或者通信中断的时候，网络会自动重组，绕过故障区，开辟新的信息通道，保证整个监测系统一直运行正常，这对灾害预警来说是非常重要的。大型施工现场为动态变化的复杂环境，自组织网络可以随着工程的发展变化而灵活地改变网络结构，添加或移动节点，不需要复杂的网络规划与布线。

对于跨流域调水等超长线性工程也可以用到自组织网络。在输水线路中设置分段的自组织网络，每个子网络通过一个汇聚节点利用 4G/5G 或者卫星通信将数据传送到监控中心。分层式网络结构把自组织网络的局部灵活性、广域网的远程覆盖能力结合在一起，给大型、分布式工程设施全面、动态、可靠的监测提供了一个高效的解决方案。

三、新型智能传感器

随着微电子、计算机视觉、材料科学的迅速发展，一系列新型智能传感器不断出现，集成度越来越高，信息维度也越来越丰富，使工程监测朝着智能化、多模态融合的方向发展。传感器不仅可以采集数据，而且可以进行数据的初步处理和决策。

表 7-1 智能传感技术概览表

技术类型	主要优势	典型应用	适用场景
光纤传感技术	抗电磁干扰、本质安全、传输距离远、灵敏度高、高精度、准分布式 / 分布式监测能力	大坝温度 / 应变、隧洞变形、混凝土裂缝、渗流监测、钢管疲劳	复杂环境、长线性结构、高精度要求、长期监测
无线传感网络	部署灵活、成本低、布线简便、自组织、自愈合、低功耗	边坡监测、库岸失稳、散点分布区域、大型施工现场	地形复杂、布线困难、动态环境、点多面广
新型智能传感器	小型化、集成化、多模态、数据初步处理能力（微机电系统、视频识别、声发射）	结构振动 / 倾斜、表面病害识别、变形场测量、内部损伤早期预警	结构动力学、非接触监测、早期预警、精细化诊断

可见上表，不同的智能传感技术各有侧重，其应用场景也各具特色。

（一）基于微机电系统技术的微型传感器

微机电系统技术就是将微米级的机械结构、传感器、执行器和电子电路集成到一块硅芯片上的技术。基于微机电系统技术制造的传感器体积小、重量轻、功耗低、成本低、便于批量生产，给工程监测带来了革命性的变化。常用的微机电系统传感器有加速度计、陀螺仪、压力传感器、倾角计等。

在水利水电工程中，微机电系统加速度计、倾角计可大量集成到大坝、厂房等结构物内部或者表面上，构成高密度阵列，用以监测结构受到地震、泄洪、风荷载等动荷载作用下的振动响应和动态倾斜，进而评价结构动力特性和健康状态。由于其体积小、成本低，大规模、高空间分辨率的监测成为可能。微机电系统压力传感器可以制作成微型孔隙水压力计，用极小的侵入性测量岩土体内部的渗透压，对土石坝、边坡的稳定性监测有重要的意义。微机电系统技术发展不断促使工程监测传感器向着微型化、集成化、智能化方向发展。

（二）视频识别与图像分析传感器

现代高清摄像机已经不再局限于传统的安防监控领域，它已经成为一种强大的非接触、大范围、高信息通量的智能传感器。结合先进的计算机视觉和人工智能算法，不用直接接触结构就可以准确地测量出结构的变形、表面病害等状态。这项技术的关键之处在于从大量的像素信息当中，找出能够体现结构状态的物理量。

数字图像相关技术就是其中一种典型的应用，通过对结构在不同的时间段所拍摄的高清晰度图像进行比对分析，可以得到结构表面全场的位移和应变分布情况，精度可以达到微米级。此项技术适合用来观测大坝坝面、闸门板等构件的变形场，可以直观地反映出应力集中的区域。近些年来，依靠深度学习的目标检测和图像分割算法，已经被普遍地应用到工程病害的自动识别当中。经过对大量的混凝土裂缝、渗水、剥落等各种各样的病害的图像和视频进行训练后，人工智能就可以直接判断出图像或视频中出现的病害所存在的位置、大小、种类等，大大提高了现场巡检的工作效率及客观性，而且也减轻了人工现场巡视工作时的体力劳动和主观误差。

无人机技术和视频识别技术相结合，给大型水利水电工程巡检赋予了新的角度和能力。无人机可以搭载高清相机、红外热像仪、激光雷达等各类传感器，对高陡边坡、大坝高部位等人无法到达的区域进行快速、全面的三维数据采集和病害排查，从而实现工程无死角的智能感知。

（三）声发射与微震监测传感器

声发射、微震监测属于被动的、动态的无损检测方法，依靠“倾听”材料内部微破裂、岩体微小移动时发出的弹性波信号，来判定结构内部损伤是否发生及发展情况。声发射技术主要是对材料尺度的监测，频率较高，可以检测到混凝土或者金属材料中微裂纹的萌生、扩展等损伤过程，适合于监测压力钢管的疲劳裂纹扩展、混凝土结构的内部损伤演化等。

微震监测主要是对大的岩体活动进行监测，监测频率较低，主要对水库库岸边坡、大坝坝基、地下洞室群围岩的稳定性进行监测。在监测区域内布置高灵敏度拾振器组成的传感器阵列，可以实时对岩体受力时候产生的微小破裂行为进行监测。通过对所收到微震信号的到达时间、振幅、频率等信息进行解析，可以确定出微震事件发生的时间、空间位置、强度（震级）、破裂机制。将大量的微震

事件定位结果汇总起来,可以清楚地勾勒出岩体内部的活动断裂带、潜在滑动面或者失稳区,给岩体稳定性评价和灾害预警提供直接的地球物理学依据。该技术可以对结构内部损伤进行感知,实现了从外部到内部监测的结构内部监测,有望成为重大工程灾害预警、预测的一项重要技术。

第二节 结构健康监测系统

随着水利水电工程向高坝、大库、复杂地质条件发展,保证其长期安全稳定的运行就变得十分重要。结构健康监测系统属于先进的数字化运维手段,可以实时掌握结构的状态,给工程全生命周期管理提供重要的数据支撑。

一、监测系统总体设计与集成

高效可靠的监测系统,其关键之处就在于科学的顶层设计。总体设计与集成是保证监测数据准确性、系统稳定性、信息有效性的重要环节,它包含从感知层到应用层全部的设计过程,也是智能化、自动化监测的前提。

(一) 监测项目的选取与测点布置优化

水利水电工程结构健康监测项目的选择,直接影响到监测系统所获得的信息是否全面有效。选取原则要以工程结构安全控制的主要指标为依据,考虑到工程结构的结构形式、所用材料的性能、运行状况、存在的可能损伤方式。对混凝土重力坝或拱坝等大型结构,一般观测项目有外部变形、内部变形、应力应变、温度、渗流渗压、环境量等。选取时要依据结构分析和历史资料的研判,找出最能反映结构整体健康状况及局部薄弱环节的物理量。

测点布置是监测项目选取的空间化实现,测点布置的好坏影响监测数据的代表性以及敏感性。传统的测点布置大多依靠工程经验,虽然能够行之有效,但是不能保证最优。现代数字化设计过程中测点布置的优化也成了研究的热点之一。该过程一般会用精细化的有限元数值模型模拟各种工况下结构的响应,从而找到应力集中区、变形敏感区和损伤高发区。利用这些信息,可以采用信息熵、模式保证准则、有效独立法等优化算法,在给定测点数量的情况下寻找信息量最大的布置方案。该种优化方法目的是用最少的测点来获得尽可能多的结构状态信息,以达到监测效果、工程成本、系统复杂度的平衡。

测点布置的优化,不只是技术问题,它也是一个综合性的决策过程。统筹考虑时要兼顾各种传感器的生存性、安装便利性、维护简便性以及各个监测项目之间的相互配合。对应变测点比较密集的区域可以适当多设置一些温度测点,以便于后期数据分析时将温度效应从数据中分离出来。关键部位的测点要留有一定的余量,提高系统的容错性以及长期运行的可靠性。最终得到的测点布置方案是理论计算、工程经验、现场条件三者相结合的结果。

（二）数据采集、传输与存储系统

数据采集、传输和存储系统相当于结构健康监测系统的“神经网络”和“记忆中枢”,数据采集、传输和存储系统的性能好坏直接影响监测数据的实时性、完整性、可靠性。数据采集系统是把前端传感器所测量的物理量(位移、应变、加速度等)转换成数字信号。现代监测系统普遍使用的是分布式的、模块化的数据采集站,可以同时多通道地进行数据采集,并且具有良好的精度、高采样率以及环境适应性。由于水利水电工程现场环境恶劣、供电困难等特点,低功耗设计、远程唤醒、自诊断等智能化功能已经成为采集设备的重要发展方向。

数据传输系统就是将采集到的大量数据安全、高效的传输到监控中心。传输方式的选择要视具体情况,在传输距离、带宽要求、成本、现场条件等各方面加以综合考虑。大型枢纽工程一般用光纤通信作为骨干传输网,光纤通信带宽大、抗电磁干扰能力强、传输稳定,能满足长期、大数据量监测的需要。地形复杂、布线困难的区域用无线传输技术 4G/5G、LoRa 等进行补充。无线传感器网络可以降低系统布置和线路维护的成本,适合于边坡、辅助洞室等分散的监测点的组网。不管采取何种方式,数据传输的稳定性与安全性均属设计重点,可用协议加密,冗余链路等办法来加以保障。数据存储系统主要用来对历史数据进行长期、安全、有条理的管理。一般用关系型数据库或者时序数据库来存储结构化的监测数据,创建合理的数据索引,实现快速查询和调用。随着数据量的激增,云存储、分布式文件系统也被用在大型监测项目中,给之后的大数据分析、深度挖掘提供了一个强有力的平台。

（三）系统软硬件的集成与标定

系统软硬件集成就是把孤立的传感器、采集设备、传输网络、数据服务器等组件,用统一的软件平台整合成一个协调工作的有机整体。集成设计的主要目的就是使不同的厂商,不同的种类设备之间互联互通,数据共享。这就需要从设计

之初就开始标准化数据接口、通信协议，保证数据采集、传输、存储、应用全流程畅通无阻。除了设备管理、数据查看、报表生成等基本功能外，最重要的就是使其成为数据分析、状态评价的平台，把各种数据处理、模型分析算法集成进来，使监测业务流程化、智能化。

系统标定是保证监测数据准确可靠的环节，它存在于系统安装、调试以及长期运行的全过程。硬件标定主要是对传感器、采集设备做零点校准、灵敏度系数校验等工作，保证测量精度达到设计要求。对于光纤光栅传感器等特殊传感器还需要做温度、应变的交叉敏感性标定来消除温度变化对测量结果的影响。软件标定主要检验整个数据链路的准确性，给系统施加已知的输入信号，检查从采集端到软件平台显示值全过程的响应是否正确，保证数据在传输、处理的过程中没有失真或出错。系统集成与标定的质量好坏，直接影响到整个结构健康监测系统是否能真正起到“千里眼”和“听诊器”的作用，给工程安全评价提供真实可信的依据。

二、监测数据预处理与特征提取

监测系统得到的原始数据中包含各种噪声和干扰，不能直接用来进行结构状态评价。数据预处理和特征提取是承上启下的一步，其主要任务是从大量的、复杂的原始数据中去伪存真，得到能灵敏反映结构状态变化的有效的信息。

（一）数据去噪与异常值剔除

原始监测数据里难免存在由于传感器本身缺陷、电磁干扰、环境突变、数据传输错误等原因引起的噪声和异常值。无效信息会对后续的分析造成严重影响，甚至造成错误的评价结果。数据清洗属于预处理的第一步。数据去噪就是滤除信号中的高频随机噪声，保留有效的结构响应信息。常用的去噪方法有移动平均滤波法、小波变换、经验模态分解法等。小波变换有较好的时频局部化特性，处理非平稳信号效果好，能有效分离噪声和信号。

异常值，又称为离群点，是指明显偏离数据整体分布的观测值。瞬时强干扰或者系统故障都会造成它们。异常值出现会造成数据统计性质的改变，进而影响模型参数的正确估计。异常值剔除的方法有统计学方法、模型法。统计学方法如 3σ 准则或者箱线图法简单直观，但是对数据分布有一定的假设。

随着人工智能的发展，孤立森林、局部异常因子等基于机器学习的异常检测

算法在处理高维、复杂的监测数据时具有更强的鲁棒性、自适应性，可以自动地发现隐藏在数据中的各种异常。

数据去噪、异常值剔除是迭代优化的过程，根据不同的监测项目数据特点选择或者组合使用多种方法。经过处理的数据会更加干净，更真实地反映结构实际响应的规律，为后面特征提取和状态评价打下良好基础。

（二）环境因素影响的分离与剔除

水利水电工程结构长期处在自然环境之中，其监测数据既有结构自身状态变化的信息，又有环境因素（主要是温度、库水位）变化的影响。温度的变化会造成材料因为热胀冷缩而产生温度应力、形变，水位变化会直接给结构加荷。环境因素引起的响应量级远大于结构早期损伤所引起的微小变化，如果没有有效的分离，环境的影响就会形成噪声背景，淹没掉宝贵的损伤信息。

环境因素影响的分离与剔除，就是建立一个可以描述结构在健康状态下对环境因素响应的基准模型。目前应用最广的还是统计模型法。该方法把监测数据分成温度效应分量、水位效应分量、老化效应分量和残差项。采用多元回归分析、时间序列分析（ARIMA 模型）或者机器学习模型（支持向量机、神经网络）等方法，对长时间的历史监测数据进行拟合，从而得到监测效应量与各个环境因子之间的函数关系。大坝变形可以分解成由库水位引起的静水压力分量、温度引起的温度分量和时间引起的老化分量。建立基准模型之后，就可以将实时的环境监测数据输入到模型中，从而预测出在当前环境下结构的理论响应值。实际监测值减去理论值，得到的残差序列就排除了主要环境影响，其中包含了未建模的随机误差和由于结构损伤造成的异常变化，大大提高了损伤识别的信噪比。

（三）损伤敏感特征因子的提取

经过预处理后的数据虽然干净了，但是数据量依然很大，信息密度可能较低。特征提取的目的就是从数据中提炼出对于结构损伤非常敏感、对环境噪声不敏感、物理意义清楚的一系列特征指标。特征因子是连接监测数据和结构状态的纽带，特征因子选取的好坏直接关系到最后的评价结果是否准确。

静态监测数据如变形、应变等可以直接使用处理过的残差序列作为特征，也可以计算它们的统计参数，比如均值、方差、峰度、峭度等。当结构出现损伤的时候，这些统计参数就会呈现趋势性的变化。还可以创建空间相关性较强的特征，相邻测点读数差或者比值、局部曲率变化等对局部损伤更敏感。

对于动态监测数据,比如振动加速度信号,其特征提取就更多样化。传统上用模态参数来表征结构,即用自振频率、振型、阻尼比来描述。结构刚度降低一般会使自振频率降低,振型的局部异常变化可以反映损伤的位置。随着信号处理技术的发展,提出了更多的先进特征,小波包能量谱、希尔伯特-黄变换得到的瞬时能量或频率、基于自回归模型(AR模型)的系数等。这些时频域特征可以体现结构响应中更细微的动态变化。选择合适的特征因子并建立一个对损伤敏感、对噪声鲁棒的特征向量空间,是实现早期准确识别损伤的关键技术环节。

三、结构状态评估与损伤识别

在获得高质量的特征因子之后,核心任务就是用这些信息对结构的当前健康状况进行科学的评价,并识别、定位和量化存在的损伤。本阶段就是将感知转化为认知的重要环节。

(一) 基于动力特性的损伤识别方法

基于动力特性的损伤识别方法是一种主动的、全局性的评估方法,它的基本原理是结构的损伤会造成结构物理参数(质量、刚度、阻尼)的改变,从而引起结构宏观动力响应特性(模态参数)的变化。根据这些变化来反推结构的损伤情况。该方法对于结构整体和局部的损伤都有较好的灵敏度。

1. 基于频率变化的方法是最直接的一种。结构刚度降低一般会引起结构自振频率减小。长期观测结构自振频率的变化趋势,可以大体反映结构是否有整体性的损伤。该方法简单易行,但是缺点是频率变化对局部损伤不敏感,也不能准确定位损伤。

2. 振型及曲率法,振型比频率更能体现局部损伤。损伤部位的振型会突然变化。为了放大这种突变,一般用振型曲率或者振型应变能作为损伤指标。损伤位置对应振型曲率差值的峰值,就可以对损伤进行初步定位。

3. 基于模型修正的损伤识别方法,即建立结构的有限元基准模型,然后根据实测的模态数据(频率、振型)来修正模型中的物理参数(单元弹性模量等),使修正后的模型动力特性与实测结果一致。参数明显变化的区域就认为是损伤区。该方法既可以定位损伤,又可以定量评价损伤程度,但是计算复杂,对模型精度和测量数据质量要求高。

（二）静态监测数据的统计分析与评估

对于水利水电工程的大体积混凝土结构来说，它的运行状态表现为缓慢的准静态变化。因此，以变形、应力、渗流等静态监测数据为依据的分析和评价就占主要地位。此类方法一般依据统计过程控制理论，建立结构在正常运行状态下行为模型，判断目前监测数据是否在正常波动范围内。评估过程一般会利用历史数据来建立统计预警模型，该模型定义了监测数据剔除环境影响之后的正常随机波动区间，也就是置信区间或者控制限。当新的监测数据点连续、明显地偏离这个区间的时候，系统就会发出警报信号，提示结构出现了异常。

除了单个测点阈值预警之外，更加深入的评价就是多测点数据空间相关性以及时间演变规律分析。利用主成分分析等降维技术，可以将高维的测点数据降维为反映结构主要变形模式的几个综合指标，对这些综合指标进行监测，可以更好地发现结构整体状态的变异。根据变形场或者渗流场的空间分布规律，可以发现不协调的变形区或者异常的渗流通道，给损伤定位提供重要的线索。基于数据的统计评估方法不需要精确的物理模型，具有很强的适应性，在工程安全监控中是使用最广、最可靠的方法之一。

表 7-2 常见静态监测参数及应用场景

监测参数	主要反映	典型传感器	应用场景举例
变形	结构宏观位移、裂缝扩展	位移计、裂缝计、GNSS	大坝沉降、拱冠位移、裂缝开合
应力 / 应变	结构内部受力状态、材料损伤	钢筋计、应变计	混凝土内部应力分布、局部应力集中
渗流	结构防渗性能、渗漏路径	渗压计、流量计	大坝渗透压、渗流量异常
温度	材料热膨胀、温度应力	温度计、光纤光栅温度传感器	混凝土内部温场、温度变形校核
库水位	外部荷载变化	水位计	大坝静水压力、浸润线变化

从上表可知，静态监测参数种类繁多，各有侧重，在水利水电工程结构健康监测中起着不可替代的作用。

（三）多源信息融合的状态综合评价

水利水电工程结构复杂，单一的监测信息或分析方法只能反映出结构状态的一面，很容易出现片面的结论。多源信息融合技术就是将不同类型的传感器（动、静态）产生的数据、不同的分析方法（物理模型、数据驱动模型）得到的评价结

果结合起来,从而得到比任何一个单一信息源更全面、更准确、更可靠的综合评价。动力监测显示某区域刚度降低的时候,就要马上结合该区域的应变、渗流监测数据加以验证。如果应变出现异常增大或者发现了新的渗漏点,那么损伤结论的可信度就会大大提高。

信息融合可以在不同的层次上进行,数据层融合就是直接合并原始数据,特征层融合就是将不同来源的特征因子合并成一个更高维的特征向量,决策层融合就是对不同评估模型的初步结论进行加权、投票或者证据推理。D-S 证据理论、贝叶斯网络、模糊逻辑等为决策层融合常用的理论工具。这些工具可以很好地解决评估过程中存在的不确定性、信息冲突等问题,最终得到一个综合各方面证据的健康状态判断。创建起全面的多源信息融合评价体系,就可以把结构健康监测系统由一个简单的数据采集和报警系统,提升为具备初步诊断能力的智能化“数字医生”,给水利水电工程的安全运行赋予最高水准的决策支撑。

第三节 安全预警模型构建

水利水电工程安全运行的核心就是对风险提前识别和规避。科学有效的预警模型是实现从被动防御到主动预控的重要手段,也是数字化技术在工程安全管理中的一种具体表现。模型建立的目的,就是把各种来源的信息融合起来,对潜在的风险做出准确的、及时的预测,为决策者争取足够的时间来采取应对措施。

一、基于阈值的预警模型

基于阈值的预警模型是最经典最直观的安全监控手段,它设定关键指标的临界值,来判定工程结构或者运行状况是否正常,从而给风险识别赋予明确的标准。此方法有效性的好坏很大程度上取决于阈值设定的合理性和科学性,它是更为复杂的基础。

(一) 设计规范与理论计算阈值

设计规范和理论计算给预警阈值的确定打下了坚实的基础。这些阈值是根据国家及行业的设计规范得出的,经过严谨的计算得出的结构力学、水力学、岩土力学等理论公式来确定出来的一个确定性的安全标准。大坝关键部位的位移、应力、渗流压力等参数的设计控制标准,就是最基本的预警阈值。当监测值接近或

者达到这些理论极限的时候,就表示结构的安全余量正在变小,应该引起高度的警惕。

该类阈值具有权威性和法定性,给工程安全设定了最基本的保障。它们代表的是结构在理想的设计条件下所能承受的极限状态,是安全评价的“红线”。工程运营初期或者缺少长期实测数据的时候,设计规范和理论计算得到的阈值常常是主要的甚至是唯一的评判标准。但这些阈值一般都过于保守且固定不变,不能很好地考虑工程实际环境复杂性、材料性能随时间变化以及运行工况多样化所带来的影响,从而容易造成预警灵敏度不高。

(二) 历史统计数据与经验阈值

工程长期运行所积累起来的大量监测数据,是工程在各种环境荷载、运行工况下行为特征的真实反映。用历史统计数据确定的经验阈值是对理论阈值的一种有效补充和优化。通过长期监测数据序列统计分析,计算均值、标准差、极值等,可以得出各个监测参数在正常工作状态下波动范围。

用统计学中的 3σ 原则,将超出均值加减三倍标准差范围的数据点当作异常。此法可以发现并区分出与历史常规状态有较大偏离的信号,从而反映结构可能出现的新的变化趋势。经验阈值的确定更符合工程个性化的特征,它把季节性温度变化、库水位周期性升降等对监测数据造成的干扰纳入考虑范围,使预警模型更有针对性、实用性。

该方法是否有效,很大程度上取决于历史数据有多长、多完整、多可靠。一个稳定运行几十年的工程,其历史数据可以很好地定义出“正常”状态;对于新近建成的工程,数据积累不够则会使得统计阈值的代表性不强。对于从未发生过的极端事件,历史数据没有可以参照的样本,这就是它的不足。

(三) 动态阈值与自适应阈值研究

静态阈值对于复杂的运行环境来说,就显得过于僵化。大坝渗流量与库水位高度相关,不同库水位下用同一个渗流阈值显然是不科学的。动态阈值研究就是解决上述问题,把预警阈值和影响其变化的主要环境因素(库水位、温度、降雨量等)联系起来,建立函数关系或者相应模型。预警阈值就不再是固定不变的一个数字了,而是随着外部条件的变化而改变的一个范围。这样就可以有效地降低环境变化所带来的误报率,从而提高预警的准确性。

自适应阈值是在动态阈值的基础上发展起来的,具有学习、反馈的功能。模

型不单考虑外部环境因素，还会根据结构自身状态的变化做相应的调整。随着时间的推移，由于材料老化、徐变、基础固结等原因，大坝等水工结构会慢慢发生缓慢而持续的变化，其正常的响应行为也会随之改变。

自适应模型不断学习新的监测数据，可以发现缓慢的健康状态漂移，并对预警基准做动态调整。一般需要用时间序列分析、卡尔曼滤波、机器学习等高级算法，使预警系统像医生一样，根据病人的年龄、身体状况变化来调整各种健康指标的正常范围。该方法属于阈值预警技术的前沿方向，给预警系统赋予了在生命周期内自我进化的可能性。

二、基于机器学习的预警模型

由于传感器技术以及计算能力的迅速提高，大量的监测数据给安全预警带来了新的可能性。机器学习预警模型可以对高维复杂的信号、声音、图像等数据进行处理，并可以自适应的找到故障模式以及异常的规律。把数据转化成信息、知识、决策，是由机器学习预警模型完成的一个繁杂的过程。与传统模型相比，机器学习预警模型的预警能力更强。

（一）时间序列预测模型

水利水电工程大部分的安全监测数据，比如变形、渗流、应力等都是时间序列。时间序列预测模型的基本思想就是根据历史数据、当前数据来预测未来某一时刻的监测值。将预测值与实际观测值对比，看结构行为是否符合历史演变规律。当残差超过一定的数值范围的时候就会触发预警。

传统的自回归积分滑动平均模型等统计学模型对线性的、平稳的时间序列有较好的处理能力。但是，对于水工结构这样受多种因素影响的复杂非线性系统来说，循环神经网络以及它的变种，特别是长短期记忆网络和门控循环单元，具有更好的能力。这些深度学习模型可以很好地把握住数据中复杂的、长时间的依赖关系，分析库水位、温度等环境因素怎样共同影响大坝未来几天甚至几周的变形趋势。基于预测的预警模式把风险识别由“事后判断”变为“事前预判”，给预防性措施的执行赢得了宝贵的时间。

（二）异常检测算法

异常检测就是识别出与大多数数据明显不同的数据点或者模式，这些异常点一般对应着结构突发性病害或者监测系统的故障。与时间序列预测不同的是，异

常检测不是预测未来，而是找出与群体格格不入、孤立的事件或者数据模式。水利工程安全监控当中，异常检测算法可以及时发现裂缝突然扩大、管涌刚开始出现等紧急状况。

常用的异常检测算法种类繁多，各有侧重，可根据数据特点和应用场景灵活选择：

1. 用 DBSCAN 算法等聚类方法，将密度相连的样本点划分成簇，而那些不属于任何簇的样本点就被判定为异常。

2. 孤立性算法，例如孤立森林，通过随机切分数据来建立决策树，由于异常点“稀有且异质”，所以更容易被从数据集中分离出来。该算法处理高维数据时效率很高。

3. 基于支持向量机的方法，单类支持向量机用超球面包络大部分正常数据点，超球面外数据点判为异常。

（三）多变量关联预警模型

水利水电工程是一个复杂的耦合系统，单个测点的异常一般不能全面地判断风险，真正的危险常常隐藏在各个变量相互关系的变化之中。即使某个测点的位移值在正常范围内，如果它和库水位、附近测点位移之间的相关关系发生异常变化，也可能会预示局部失稳的风险。多变量关联预警模型就是为了找到隐藏在变量关系中的异常。

该类模型主要是学习、构建多个监测变量在正常工况下的协同变化模式或者“健康指纹”。主成分分析是一种常用的降维方法，用来识别数据的主要变化模式；当新的数据点不能被这些主要模式有效地重构时，就认为发生了异常。更先进的图神经网络技术将大坝的传感器网络抽象为图结构，每一个传感器都是图中的一个节点，节点之间物理邻近或者力学关联关系构成边。图神经网络可以学习节点之间复杂的传播和影响方式。因此即使单个传感器数值没有明显的改变，当区域内的传感器数据传输模式偏离正常模式的时候，模型也能够识别出系统协同异常。

自编码器等深度学习模型也被用到了该领域。经过训练的神经网络可以对输入的数据进行重构，从而学到正常数据的内在联系和压缩表示。输入异常数据的时候，因为模型没有学习过这样的模式，所以重构误差会很大，从而发出警报。这种方法已经不再只对单个数值进行观察，而是可以从整体上对工程结构健康状

况做出系统的、深层次的判断，是预警技术的高级形态。

三、预警等级与发布机制

预警模型的最终目的就是引发有效的响应，促使采取行动。对模型产生实际效果、保证工程安全闭环起着非常重要的作用。一个完整的预警系统，不仅要实现准确预警，还要保证预警信息能够被正确理解并且能够引发及时有效的应对。

（一）蓝、黄、橙、红四级预警体系

为了使预警信息直观易懂，便于管理人员迅速判断风险的严重性，一般会建立与国家应急管理体系相衔接的四级预警体系。将模型得出复杂的指标用标准色阶来表示等级的不同，等级越高风险越大，响应要求也越高。水利水电工程安全预警分级及响应见下表：

表 7-3 水利水电工程安全预警分级及响应表

预警等级	风险程度描述	对应响应要求 / 处置措施
蓝色预警	监测数据出现轻微异常或偏离预测趋势，存在潜在风险，短期内危险性较低。	加强监测分析频次，深入排查异常原因。
黄色预警	监测数据存在较大异常，风险发生的概率较高。	组织专业人员会商研判，进行现场巡查，做好应急准备。
橙色预警	监测数据严重异常，风险态势急剧变化，发生危险的可能性很大。	立即启动相应专项应急预案，通知相关人员做好待命准备，考虑采取预泄洪、限制运行等措施。
红色预警	监测数据达到或超过极限阈值，工程处于失稳或溃决的临界状态，情况十分危急。	立即启动最高级应急预案，采取一切可行的抢险措施，组织疏散撤离下游人员。

该体系把复杂的模型结果和具体的管理行动进行明确的关联，使得风险评价以及决策反应标准化、规范化，因此预警信息转化为实际生产力的重要环节便得以实现。

（二）预警信息的快速发布渠道

预警的价值主要体现为时效性，预警一旦触发，信息就要在最短的时间内准确无误的传达到所有相关责任人。现代预警发布渠道依靠数字技术已经发展出多介质、立体化、智能化的状态来保证信息覆盖面和渗透性。

核心渠道是用数字孪生或者三维可视化的方式把预警的位置、等级和相关数据直观展示在中央控制室大屏幕上，给决策提供第一手信息。同时移动应用推送

功能可以把预警信息实时发送到各级管理人员、现场工程师、巡检人员手机上，实现预警信息的精准到人。对于高级别的预警（橙色、红色），使用短信、语音电话等最可靠的备用通信方式通知，即使网络信号不好也能通知到相关人员。在工程现场的重要部位设置声光报警装置，是最后、最直接的告警方式，特别适合于紧急疏散的情况。

智能化的发布系统可以按照预警等级、预警种类推送相应信息。蓝色预警只通知数据分析组，红色预警通知工程最高负责人、地方政府应急管理部门、下游社区，形成分级、分类、分区域的立体化信息发布网。

（三）预警响应与应急处置联动

预警的目的在于引发有效的反应。预警系统不能是孤立的信息孤岛，应该和工程应急管理体系深度融合，形成“监测、预警、响应、处置”相互配合的管理闭环。数字化平台在这里起到神经中枢的作用，把预警和响应紧密联系起来。

预警被触发的时候，系统除了发出警告信息之外，还会自动执行事先设定好的应急处理程序。就黄色渗流预警来说，系统就会自动生成一份包含具体数据、历史趋势图以及初步诊断建议的巡检工单，并派发给指定的工程师团队。出现橙色或者红色预警的时候，系统就会自动提取出应急预案、专家库资料、物资清单、抢险队伍联系方式等相关信息，并呈现给决策层，大大缩短了决策准备时间。

预警平台可以同调度控制系统、闸门控制系统进行联动。在极端的情况下，高级别的预警一旦被授权就可以执行泄洪闸门预泄、关闭厂房进水阀门等预先设定好的应急操作。因此使得数字化技术将预警模型、应急预案、工程实体三者联系在一起，达到水利水电工程从被动应对到主动干预、人工驱动到流程自动化的转变，最大程度地保证水利水电工程的全生命周期安全。

第四节 大数据分析在工程安全中的应用

水利水电工程正处在全生命周期安全管理的新时期，大数据分析成了保证工程安全的关键驱动力。它把安全管理模式从以前的“定期检测、被动应对”转变为现在的“实时监测、主动预警、智能决策”，通过对海量数据所蕴含的价值信息进行深入挖掘，进而对工程的安全状况做出准确的刻画和科学的预测。

一、监测大数据的存储与管理

有效地存储和处理大数据，才能使大数据的价值得到最大的发挥。面对水利水电工程产生的大量、多样的、高频率的监测数据，传统的数据管理方式已经不能胜任了，急需建立支持高效存取、处理和分析的现代化数据基础设施。

（一）分布式存储与云计算平台

水利水电工程安全监测系统会产出结构化传感器读数、半结构化日志文件以及非结构化图像视频等大量的异构数据，其规模一般都达到 TB 甚至 PB。传统的集中式存储架构在容量、性能、成本等各方面都会遇到巨大的挑战。分布式存储技术比如 Hadoop 分布式文件系统就是将数据分成小块，存到由很多普通服务器组成的一个集群里，实现存储容量的横向扩展和数据读写高吞吐量的目的。该架构具有很好的容错性，单个节点的故障不会影响到整个系统的可用性，并且依靠数据冗余来保证重要的监测信息被持久化的保存下来。

云计算平台是分布式存储最好的部署环境。工程可以利用云服务商提供的弹性计算和存储资源，根据数据增量的变化随时调整所需资源，避免前期投入大量硬件设备造成的资源浪费，实现按需使用、经济高效的模式。云平台拥有大量的数据处理、分析服务，为上层应用提供了强大的算力支持，使得复杂的分析模型可以快速部署、运行在云端，大大缩短了从数据采集到洞察发现的时间。

（二）数据仓库与数据湖技术

单一存储方式已经不能适应各种不同的数据应用需求了。数据仓库和数据湖技术应运而生，两者互相补充，共同组成了现代工程大数据平台的主要架构。数据仓库主要服务于分析性业务，把来自各个业务系统的监测数据清洗、转换、集成成统一的、面向主题的结构化数据集市。可以创建一个专门的大坝变形分析数据仓库，里面包含经过处理和整合的位移、渗流、应力等各种监测数据。这给管

理人员做趋势分析、生成统计报表以及做决策提供良好的数据基础。

数据湖是一种更灵活的数据存储方式，它把所有来源的数据以原始格式保存起来，包括结构化、半结构化、非结构化数据，不要求在存储前确定数据模型。采用“先存储、后探索”的方式保存全部数据以及原始上下文，给数据科学家、算法工程师做探索性分析、机器学习模型训练带来了极大的方便。水利水电工程的数据湖可以存放原始振动信号、巡检无人机拍摄到的高清影像、施工地质勘探报告等各类数据，这些数据以后可以用以发现未知的安全风险模式。数据湖和数据仓库相结合，可以保证决策分析的效率和准确性，又可以给深度智能应用留下无限的可能。两者特性对比见表。

表 7-4 数据存储架构特性对比表

特性	数据仓库	数据湖
数据格式	结构化、预定义模式	原始格式（结构化、半结构化、非结构化）
数据处理	ETL	ELT
主要目的	报表、BI、决策支持	探索性分析、机器学习、高级分析
用户群体	业务分析师	数据科学家、算法工程师
数据质量	高、一致性强	原始、需进一步处理
灵活性	低，模式固定	高，模式灵活
成本	较高（预处理投入大）	相对较低（存储成本）
价值体现	业务洞察、历史分析	潜在创新、未知发现

数据仓库和数据湖之间一般会使用 ETL 或者 ELT 过程进行协同工作，数据从数据湖流向数据仓库。原始数据导入数据湖之后，经过初步的加工和标记，根据业务需求将价值密度高的部分提炼出来，再加载到数据仓库中，为常规业务智能分析提供服务。数据湖中保存的全部原始数据也可以用来做更前沿、更复杂的算法研究，例如用深度学习做裂缝图像识别、基于声学信号的设备故障诊断等，从而形成一种分层、互补的数据管理体系。

（三）数据治理与质量管控

数据的价值在于质量，在工程安全等重大决策中，数据质量更是生命线。数据治理与质量控制要创建起一套完备的制度、流程和技术工具，保证数据的准确性、完整性、一致性、及时性和可用性。缺少有效的数据管理平台，再先进的技术架构也会变成数据沼泽，产生错误的分析结果并误导工程安全判断。

数据治理的第一项工作就是制定数据标准、元数据管理。包含统一数据命名

规范、确定数据指标计算口径、确定数据责任部门和责任人。元数据管理就是给数据赋予了一张“身份证”，详细地记载着数据的来源、格式、处理历史（即数据血缘）和业务含义，让用户可以很快地理解和信任数据。质量管控属于一种持续的过程，要创建起自动化的数据质量监控规则以及预警体系。可以设置规则来检查传感器读数是否超过物理量程、相邻时刻数据跳变是否异常、不同测点数据是否存在逻辑矛盾等等。发现质量问题之后，系统就会发出警报，并且启动清洗或者修复的过程，从而保证进入分析应用的数据是可靠的、准确的。经过系统化数据治理与质量控制之后，可以大大提高数据资产的价值，为上层的大数据分析以及智能决策打下可靠可信的基础。

二、多源数据融合分析

水利水电工程是复杂的巨系统，它的安全状况受内外因的共同影响。只依靠单一的监测数据是不能完全体现其运行规律以及潜在的危险，因此必须把多源数据结合起来并加以关联分析。

（一）监测数据、设计数据、环境数据融合

实现多源数据深度融合的目的就是形成工程安全状态的全景视图。三类数据各自体现工程的不同方面：监测数据为工程的“实时脉搏”，反映当前的实际反应；设计数据为工程的“先天基因”，规定出应该有的物理性质和行为标准；环境数据为工程所处的“外部舞台”，构成影响工程行为的边界条件。三者有机结合，有利于从实测、理论、诱因闭环的逻辑中更深刻地认识工程安全状况。

当大坝某位移监测点数据出现异常的时候，孤立地看待这些数据很难判断其严重程度。融合分析后可以和设计数据中允许变形阈值对比，判断是否超限。同时可以关联当时的库水位、降雨量、温度等环境数据，分析异常是由上游突然的洪水或者剧烈的温差等外部荷载引起的。也可以把监测点实时数据叠加到工程三维 BIM 模型或者地理信息系统地图上，直观地看出生成异常的位置以及与周围结构的关系，更准确的判断出产生异常的原因和范围。

融合分析不仅可以提高问题诊断的准确性，还可以给安全预测提供更丰富的输入特征。建立监测响应与环境荷载之间的量化模型，可以预见极端洪水、强烈地震等工况下工程的反应，给应急预案的制定和预防性措施的采取提供科学依据。跨领域数据碰撞融合，就是大数据分析给工程安全领域带来的核心价值。

（二）不同尺度、不同频率数据的对齐

多源数据融合所面临的主要技术难题就是数据在时间、空间、语义等各方面的对齐。水利水电工程的数据来源广，采集频率、空间分辨率差别大。人工巡检数据是按天或者按周来记录的，而自动化监测系统（GPS、光纤光栅等）可以实现秒级或者更高频率的采集。钻孔应变计反映的是局部点的应力状态，卫星合成孔径雷达可以给出大坝表面的宏观变形场。怎样有效地把异构数据融合在一起，是进行融合分析的前提。

数据对齐通常需通过多层次的映射和转换来实现，主要包括以下几方面：

1. 时间对齐是最基本的一种对齐方式，即所有数据都对应到同一个时间轴上。对于不同频率的数据，一般用插值或者聚合的方法。高频自动化监测数据可以按小时或者天做均值、峰值等聚合运算，使得它与低频人工观测数据的时间粒度相一致，方便同步分析。

2. 空间对齐就是建立监测数据和工程实体几何模型之间的映射关系。给每个测点赋予在 BIM 模型或者地理信息系统地图上的精确三维坐标，可以把抽象的监测数据落实到具体的位置。这样不同来源、不同空间尺度的数据就可以在同一个虚拟空间里叠加显示、关联计算，例如将渗压计读数与附近裂缝的卫星遥感影像进行空间关联分析。

3. 语义对齐就是消除由于术语、定义、单位不同而造成的歧义。这就需要创建工程领域的知识图谱或者本体库，定义统一的概念体系以及实体之间的关系。语义层面的标准化可以保证机器对渗流量、变形速率等专业词汇有准确的认识，使不同的系统之间数据可以无缝地进行整合以及智能推理。

（三）关联规则挖掘与因果推断

完成数据对齐和融合之后，下一步就是使用数据挖掘算法从大量的数据中发现隐藏的知识和规律。关联规则挖掘属于一种常用技术，它的主要目的就是找出数据项之间有趣的关联或者相关关系。工程安全方面可以用来寻找事件 A 发生是否总是伴随着事件 B 发生这样的模式。经过历史数据分析之后，便可以发现“上游库水位迅速上涨”与“某廊道渗流量明显增多”这样的强关联规则。可以反映出工程各个部分之间的相互影响，给监测指标异常解释和风险预警提供直接线索。

关联分析得到的是相关性，工程安全决策需要因果性判断。相关性不等于因果关系，两个变量同时变化可能是巧合，也可能是由于没有被观测到的第三方变

量造成的。因果推断技术就是从观测数据中找出变量之间真实的因果关系。这就需要使用复杂的统计模型和算法，比如结构方程模型、倾向得分匹配或者基于贝叶斯网络的因果发现算法。水利水电工程中因果关系的确定十分重要。上游泄洪直接造成下游坝基冲刷，而不是两者都由强降雨造成，将直接影响运行调度策略的制定。因果推断可以更加准确地找到风险产生的根本原因，进而提出更加有效的、治本的控制措施。

三、安全状态的深度挖掘与预测

大数据分析的最终目的就是超越对现状的描述，达到对未来准确的预测以及对未知风险的深刻认识。通过对历史和现在的数据进行分析，可以预估工程性能的发展趋势，推演极端工况下工程的安全反应，智能感知工程异常状况。

（一）工程长期服役性能演化趋势预测

水利水电工程属于百年大计，随着时间的推移，材料性能和结构状态会慢慢且持续地发生变化，比如混凝土徐变、材料老化、基础沉降等，这些变化就共同构成了工程的长期服役性能演化。对这些演化趋势做出准确的预测，对于评价工程剩余寿命、制定长期维修加固计划具有决定性的作用。大数据分析给它提供了强有力的工具。

传统预测方法多用简化物理模型或者经验公式，不能很好地考虑到复杂环境以及运行条件下的非线性的影响。基于大数据的预测模型，主要是时间序列分析模型，可以对长时间历史监测数据进行自我学习。可以利用自回归积分移动平均模型或者循环神经网络、长短期记忆网络等深度学习模型对大坝变形、裂缝开度等重要指标的未来走向做出预测。

模型可以体现数据自身的周期性、趋势性特征，还可以把库水位、温度、降雨等外部影响因素当作输入变量，创建多变量动态预测模型。模型将会学会工程性能在各种不同的环境荷载组合下复杂的响应模式，从而可以做出比传统的方法更准确的长期预测。管理者可以由被动处理结构劣化变为主动维护规划，用最经济的方法保证工程全生命周期的安全。

（二）基于数字孪生的安全状态推演

数字孪生融合了大数据分析、物联网、仿真建模等先进技术，给工程安全状况推演和决策赋予了前所未有的强大平台。水利水电工程的数字孪生体就是和物理

工程实体实时同步、动态交互的高保真虚拟模型。它所包含的工程精确几何信息来自于 BIM, 材料属性、设备状态、运行工况以及实时更新的监测数据也被整合进来。

虚拟的“数字大坝”是活的, 能依靠接入的传感器数据来反映物理大坝上每一个微小变化。它的主要价值就在于强大的推演能力。工程师可以对数字孪生体做各种虚拟试验, 不会给实体工程造成任何风险。可以模拟千年一遇特大洪水的过程来观察大坝各个部位的应力分布、变形状况及渗流场变化, 并据此决定它是否达到安全临界值。也可推演不同的调度方案对下游河道冲刷、发电效益的影响, 从而优化决策。

应急响应时数字孪生也能起到非常大的作用。当监测系统检测到异常信号时, 就可以立即将异常信号输入数字孪生模型。通过快速仿真计算可以得出异常所引发的后续连锁反应、最终后果, 也可以评价不同的抢险措施的有效性。利用数据驱动的实时推演把决策过程从经验判断上升为科学计算, 可以给复杂工作条件下准确的决策和风险控制提供革命性的手段。

数字孪生搭建起物理世界和信息空间的桥梁, 用“以虚控实、以虚预实”的方式, 实现工程安全状态全方位感知、精确诊断、科学预测、智能决策, 是工程安全管理的发展方向。

（三）潜在风险模式的智能识别

工程安全管理所遇到的一个主要问题, 就是发现超出设计预期和历史经验的未知风险。传统安全监控系统一般用阈值报警, 只能识别已知的风险模式。大数据以及人工智能技术, 尤其是无监督学习算法, 给发现这些潜在的新风险模式带来了可能。

无监督学习算法不需要事先标注正常或者异常的数据样本, 直接从大量的数据中寻找数据的内在结构和规律。聚类算法可以对工程各个时期运行状态数据进行分类。若某个时段运行的各状态数据形成了一个偏离常规状态簇的新聚类, 则代表此时段工程进入到先前没有预期到的新的工况之中, 应予以特别的注意。另一项强大的技术就是异常检测, 算法(孤立森林、自编码器等)通过对工程在正常运行时多维数据复杂分布模式的学习, 可以有效地发现偏离正常模式的任何小的数据点或者数据片段。被识别出的异常, 可以是设备早期故障的微弱信号, 也可以是新裂缝的萌生, 也可以是从未出现过的荷载和结构响应的组合。深入分析这些智能识别出的异常模式并找到根源之后, 工程师就可以在风险演变成事故之前发现、理解和解决问题, 从而大幅度提高工程的本质安全水平。

第八章 数字化施工技术实践

信息技术飞速发展，数字化浪潮正在对传统的水利水电工程建设方式造成深刻的影响。本章主要对施工阶段的数字化技术进行研究，分析怎样运用先进的技术手段来提高工程建设效率、质量和安全水平，从而达到精细化管理和智慧化建造的目的。

第一节 数字化施工管理系统

数字化施工管理系统是智慧工地的中心枢纽，把各个数字化子系统集成起来，形成统一协调的工作平台。本节主要对系统组成、功能及在水利水电工程施工管理中所起的作用进行详细的说明，展现系统对于项目管理全过程的赋能。

一、施工总控管理平台

施工总控管理平台是数字化施工管理系统的“智慧大脑”，它的主要目的就是打破信息孤岛，对施工现场的各种核心要素进行全方位的感知和集中控制。该平台依靠数据的汇集与剖析，给管理者赋予了前所未有的认识，是开展科学决策并实施高效指挥的前提。

（一）“人、机、料、法、环”要素全面监控

施工总控管理平台的价值就在于对于“人、机、料、法、环”五个生产要素进行全方位的数字监控。平台把施工现场的物联网传感器、视频监控、移动应用、各种业务系统产生的数据融合在一起，把现场静态信息和动态过程联系起来，形成起实时、全面的数字镜像。这使得管理者可以摆脱过去依靠人工汇报、零散信息的管理模式，转而依靠客观、即时的数据来做出判断和决策。数据的自动采集汇聚使信息具有了真实性、及时性，为精细化管理打下了坚实的基础。

水利水电工程一般处在复杂多变的环境中，所以这种全方位的监控能力就显得非常重要。在关键部位设置传感器，可以对大坝混凝土内部温度、湿度、应力

进行实时监测,保证浇筑和养护工艺符合要求(环);给大型设备如缆机、浇筑主塔等安装定位和状态监测模块,可以实时掌握其工作轨迹和负载情况,避免超负荷运转(机);对钢筋、水泥等重要建材实行扫码入库、领用管理,实现材料来源、消耗、库存的精准追溯(料);将标准施工工法(法)和质量检查流程固化到系统中,保证一线作业的规范性;为作业人员(人)佩戴智能工卡,不仅可以实现考勤,还可以监控其是否进入高危区域,从而构建起一道覆盖全要素的数字化安全与生产防线。

(二)施工进度、成本、质量、安全一体化管理

传统的管理模式中,水利水电工程的进度、成本、质量、安全等模块是由不同的部门分别管理的,信息壁垒严重,数据不能很好地联动,造成管理协同性差、问题响应滞后。数字化施工总控管理平台创建起一体化的数据模型和业务流程,彻底冲破了条块分割的状况,使得四大管理目的达成高度协同并动态联系。平台将所有的业务数据集中存放在一个数据库中,任何一个环节的数据更新都会实时传递给和它有关联的其它模块,从而形成一个动态的、有机的整体。

进度和成本的联动管理属于平台的功能之一。将 BIM 模型与施工计划结合起来,产生 4D 施工模拟,可以清楚地看到工程的建造过程。现场施工人员在手机端上报实际完成的工程量,系统根据完成的工作量计算已经挣值、进度偏差并和计划成本、实际支出对比,实时产生成本偏差、进度偏差分析报告。当出现成本超支或者进度滞后风险的时候,系统会提前发出预警,使项目管理者可以及时发现风险的原因并加以纠正,从而避免损失扩大。

质量与安全管理工作也被紧密地结合在一起。现场质检人员利用移动终端对照 BIM 模型以及验收标准来进行检查,并且即时上传带有照片和位置信息的检查结果。不合格项会触发整改流程,并且和有关人员绩效挂钩。安全管理方面所有的安全隐患、违章行为都与具体的施工部位、时间相对应。利用大数据分析可以找出质量缺陷和安全事件之间潜在的联系,比如通过分析发现某地质量缺陷频发是由于该地安全管理不到位,进而促使管理者从源头加强管理,达到质量与安全同步提高的目的。

(三)基于驾驶舱的可视化指挥中心

基于驾驶舱的可视化指挥中心,为施工总控管理平台的数据展示与决策支持终端,一般采用大屏幕拼接墙的形式把项目的核心指标、关键信息以图形化、可

视化的方式集中呈现给项目高层管理者。驾驶舱像飞机的仪表盘一样，指挥者可以一目了然地掌握整个工程的运行状况，实现运筹帷幄之中，决胜千里之外的现代化指挥。其界面一般会集成了项目 GIS 地图、BIM 模型、实时视频监控、关键绩效指标仪表盘、各种统计图表、预警信息列表。

可视化指挥中心不但是信息的展示窗口，更是科学决策和应急指挥的作战平台。管理者在进行决策的时候，可以在平台上进行模拟推演，即改变资源投入后对进度、成本的影响，系统会根据已有的数据进行预测分析，给决策提供强有力的数据支持。水利水电工程常见的突发性事件有基坑突水、边坡失稳、极端天气等，指挥中心在这种情况下起着举足轻重的作用。用 GIS 定位可以迅速找出事故发生地点，调取事故点周围监控视频、人员分布、设备位置、应急物资储备情况，为制定抢险方案、调度救援力量、规划疏散路径提供最直接、最全面信息，大大提高应急响应速度与效率。

二、智慧工地系统建设

智慧工地系统是把数字化施工管理理念具体落实的产物，依靠物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术把数字化能力渗透到施工现场的方方面面。本节主要研究智慧工地中几个重要的子系统建设内容，讨论这些子系统具体应用到现场管理中。

（一）人员定位与劳务实名制管理

水利水电工程施工现场规模宏大、环境复杂，对于大量的作业人员进行有效的管理是十分困难的事情。人员定位及劳务实名制管理系统借助技术手段，较好地解决了上述问题。该系统一般采用多种定位技术融合的方式：在广阔的露天场地使用 GPS 或者北斗定位，而在大坝内部、地下厂房或导流洞等卫星信号受遮蔽的区域，则使用超宽带、蓝牙信标或者 LoRa 等无线技术。通过人员佩戴带有定位芯片的智能安全帽或者工牌，实现全场人员位置的亚米级到米级精度的跟踪。

劳务实名制管理是本系统的主要功能之一。施工工地所有进出人员，包括管理人员和一线工人都必须经过入口实名制闸机来认证身份。系统将身份证信息、人脸特征、工种、资质证书、安全培训记录、体检报告等主要信息录入数据库，一人一份电子档案。从源头上杜绝了闲杂人员、无资质人员进入工地的可能，保障了工地安全，也有效地解决了建筑行业的劳务纠纷问题。联动考勤数据之后，

系统可以对每个工人出勤情况、有效工时作出准确记录，给工资结算提供可靠的依据，切实保障了工人的合法权益。

该系统安全防护作用最大。管理者可以在系统后台设置虚拟的电子围栏，把高边坡、爆破作业区、深基坑边缘等危险区域设为禁区或者限制区域。一旦未经授权人员靠近或者进入，系统就会立即向本人和后台监控中心发出声光报警，从而达到主动的安全预警。在坍塌、火灾、洪水等紧急状况发生的时候，应急指挥中心可以通过系统大屏马上掌握所有人员的位置分布，特别可以快速找到被困人员的最终位置，从而为抢险救援争取宝贵的黄金时间，大幅度提高了应急救援的准确率和成功率。

（二）塔吊、升降机等大型设备安全监控

水利水电工程施工中大量使用塔式起重机、门式起重机、施工升降机、缆机等大型特种设备，这些设备体积大、作业半径广，属于施工现场的重要危险源。大型设备安全监控系统在设备上加装各种传感器和控制器，对设备运行状况、作业环境进行实时监测并发出智能报警，目的是防止发生恶性事故。采用物联网技术所进行的主动式安全监控，把过去依靠操作人员经验、责任心的被动式管理方式，转变为数字锁式的主动式安全防护。

该系统集成了多种关键监控功能，共同构成了完整的安全防护体系。

1. 防碰撞、区域保护，采用高精定位模块和测距传感器安装在设备上，实时计算出多台设备之间以及设备与周围建筑物、高压线之间的距离。当存在碰撞风险的时候，系统就会发出预警；当达到危险阈值的时候，系统就会自动限制设备向危险方向的动作，从而实现主动防撞。

2. 关键参数监测：系统通过吊钩的重量传感器，塔臂的力矩传感器，塔顶的风速仪和设备底座的倾角传感器，全天候对设备吊重，力矩，风速，回转角度，设备倾斜度等安全参数进行监控。任何一个参数超出系统预设的安全范围，系统就会立即通过驾驶室内声光报警器向操作员发出警报，同时将报警信息传送到后台管理平台。

3. 部分先进的系统中加入了驾驶员行为分析的功能，在驾驶室内安装摄像头，用人工智能视频分析技术识别驾驶员有无疲劳驾驶、打电话、脱岗等违章行为并记录、提醒，将安全管理扩展到对“人”的不安全行为的控制。

（三）环境监测与自动喷淋降尘系统

伴随着绿色发展理念深入人心，环保法规越来越严格，施工过程中环境保护成了水利水电工程建设中不能忽视的重要环节。大规模土石方开挖、混凝土拌合、物料运输等作业很容易造成大量的扬尘、噪声污染。依靠自动化手段实时监测施工现场环境参数，用自动喷淋降尘系统治理扬尘，是创建绿色工地、履行社会责任的技术手段。

在工地上下风向以及扬尘高发区（骨料堆场、施工道路等）上设置环境监测终端。这些设备带有高精度的传感器，可以对空气中 PM2.5 浓度、PM10 浓度、噪声分贝数、温度、湿度、风向、风速等环境参数进行连续采集。采集到的数据用无线网络实时上传到云端平台。管理人员可以随时通过电脑或者手机查看各个监测点的环境情况，了解整个工地环境质量的变化。当系统检测到任一扬尘浓度超过环保标准阈值的时候，就会自动发出指令，启动与该监测点联动的自动喷淋降尘系统。喷淋系统可以围绕工地围挡喷淋，也可以对道路两旁立杆喷淋，也可以对料场等重点区域使用高压雾炮。系统根据扬尘严重程度自动调节喷淋强度、时长，保证降尘效果的同时又不会造成水资源浪费，达到精准、高效、节能的环保管理目的。

表 8-1 智慧工地子系统功能概览表

子系统名称	核心功能	关键技术	主要效益
人员定位与劳务实名制	人员位置追踪、身份验证、考勤、区域报警	GPS、北斗、UWB、蓝牙信标	提升安全管理、保障劳工权益、提高考勤效率
大型设备安全监控	防碰撞、关键参数监测、驾驶员行为分析	物联网、传感器、AI 视频分析	预防事故、确保设备安全运行、提升作业规范性
环境监测与自动降尘	扬尘 PM2.5/PM10、噪声、气象监测、自动喷淋 / 雾炮	传感器、物联网、自动化控制	改善环境质量、满足环保要求、提升绿色工地形象

从智慧工地子系统功能概览表中可以看出，这些系统相辅相成，共同构建了现代化的施工管理体系。

三、施工过程数字化文档管理

施工过程中会有很多的技术文件、管理资料、往来函件，传统的纸质管理方式效率低，容易出错。数字化文档管理是创建起协同、高效、安全的电子资料管理体系，给工程建设赋予可靠的资料支撑，是达成项目全生命周期信息化的重要

部分。

（一）电子签批与在线审批流程

水利水电工程属于长期性的、多方参与的项目，设计变更、技术核定、施工方案、物资采购、工程款支付等种种审批事项常常出现。传统的纸质文件批示需要很长时间的线下传递、人工催办以及反复签字盖章，造成人力物力的大量浪费并且容易出现丢失或者损坏文件的情况，审批状态也难以看清透明度低，进而影响到项目合作效率。电子签批、在线审批流程的引入，从根本上改变了原来的工作方式。

系统按照项目的管理制度，把各种审批事项固化为标准化的线上工作流模板。发起人只需要在线填写表单、上传附件、选择相应的审批流程，系统就会按照预设的路径自动将文件推送给下一个审批人。审批人不论身在何处，都可以通过电脑浏览器或者手机 APP 随时查阅文件、签署意见、进行批复。流程中每一个节点到达时间、查阅时间、审批意见、完成时间都会被系统记录下来，所有的参与者都可以随时查看审批进度，解决传统方式审批黑盒化的问题。

电子签批全面推行以后，给项目管理带来了很大的效益。大大减少了审批时间，减少了文件流转不畅造成的工期延误，加快了决策执行的速度。审批全过程全程留痕，所有的操作都可追溯，为以后的审计和责任认定提供了清晰的电子证据链。在实施此类系统时必须重视安全、合规，使用可靠的数字签名技术、身份认证、权限管理等手段保证电子签批的法律效力、业务数据的安全保密，防止信息被篡改或者泄露。

（二）施工资料的数字化归档与检索

水利水电工程的生命周期长达几十年甚至上百年，建设过程中形成的竣工图、质检报告、试验数据、会议纪要、往来函件等资料，既是过程管控的依据，又是项目最终验收、移交运维、未来改扩建的重要历史资产。面对数以万计的纸质文件，传统档案室的管理方式存在着存储空间小、容易受潮损坏、查阅不便、检索效率低等诸多问题。施工资料的数字化归档与检索系统，依靠创建起一个统一、规范、安全的电子档案中心，从根本上解决了以上问题。

该系统对所有的施工资料进行统一编码、统一文件分类的数字化处理，无论是扫描的纸质文件还是原生的电子文档，都被有条理地存储到中央服务器或者云平台上。系统具有很强的版本控制功能，保证每个人看到的都是最新版本，并完

整保存所有历史版本修改记录。归档时系统在保存文件本身的同时，还会给文件加上许多元数据标签，比如与之有关的 BIM 构件、所属的单位工程、涉及的专业、创建日期、关键词等。以元数据为管理方式，利用系统自带的全文搜索引擎，给用户赋予了很强的信息检索能力。使用者不需要记住复杂的档案编号，只要输入任何关键词、日期范围或筛选条件，就能在海量的资料里瞬间找到所需要的文件，大大提高了信息获取的效率，给现场施工、技术决策、商务管理提供便捷的数据服务。

（三）工程影像资料的云端存储与关联

影像资料因为直观、生动的特点，在工程管理中所起的作用越来越大。无人机航拍全景照片、关键工序施工录像、固定机位延时摄影、质检员随手拍摄的现场问题照片等，都是工程建设状态最真实的记录。这些影像资料的数据量非常大，高清视频文件的存储和管理需要很高的要求。利用云端存储技术可以很好地解决该问题。云平台拥有几乎无限的存储容量，有可靠的数据备份以及方便的操作，项目各参与方在得到授权后可以随时上传、查看或者下载影像资料。

单纯的影像资料的价值不大，只有把影像资料和工程数据联系起来，才能发挥出最大的价值。先进的数字化管理平台可以将影像资料同 BIM 模型、施工进度、地理空间信息等各方面联系起来。以无人机拍摄的大坝浇筑照片为例，将照片与 BIM 模型中对应的坝段、当天施工日志、质量检查记录等自动或者手动关联起来。管理者在 BIM 模型中点击构件的时候，不仅可以查看到构件的设计参数，还可以直接调阅出构件从基础开挖到最终成型各个阶段的影像记录，形成一部可视化的“成长日记”。时空一体化的数据组织方式给远程巡检、进度汇报带来极大的便利，也为竣工资料整理及以后的运维阶段追溯查询搭建起无可比拟的、丰富而直观的数据档案。

第二节 智能建造技术应用

新一代信息技术同传统水利行业深入融合之时，智能建造成了水利水电工程达成高质量发展的重要推动力。它在施工装备、过程控制、新型制造技术等各个方面的广泛应用，正在对工程建设的面貌产生深刻影响，推动着行业进入一个全新的数字智能化时代。

一、智能施工装备

智能施工装备就是智能建造理念的具象。依靠先进的传感、控制、通信技术，实现了从单机自动化到集群协同作业的飞跃，极大地提高了施工效率、工程质量、作业安全性，是水利工程建设模式变革的重要推动力量。

（一）无人驾驶碾压机集群应用

水利工程中大坝、堤防等填筑体对压实质量要求非常高。传统的碾压作业很大程度上依靠操作人员的经验，作业效率低、压实均匀性不能保证、安全风险大。无人驾驶碾压机集群技术正好可以解决上述问题。依靠高精度卫星定位系统（北斗系统）、惯性导航、激光雷达、多传感器融合技术，使碾压机具有精准的自我定位、环境感知能力。

中央控制系统就相当于整个集群的大脑。按照 BIM 模型以及填筑设计的要求，自动规划碾压路线、遍数、行驶速度、振动频率等作业参数，并把它们下发到每一台无人碾压机上。作业时，各台碾压机按照设定的路线进行作业，可以实现毫米级的轨迹控制精度。车载传感器实时检测压实厚度、密实度等重要数据，实时传送到控制中心。系统对这些数据进行深入分析，根据分析结果智能调节作业参数，实现闭环控制，保证每一个填筑区的压实质量都达到设计要求。

无人驾驶碾压机集群应用的价值有以下几点，可实现全天候作业，大幅度提高施工效率，有效缩短工期；通过精确的路径规划和协同调度，避免了漏压、过压现象，大大提高了碾压的均匀性以及工程质量；无人作业模式在夜间或者恶劣天气等高风险环境里，彻底消除了作业人员的安全隐患。该技术已经被国内外的许多大型土石坝工程成功地应用，是智慧大坝建设的标志性技术之一。

（二）智能浇筑系统与布料机器人

混凝土浇筑是水利水电工程尤其是混凝土坝的中心工作。大体积混凝土浇筑

质量的好坏直接影响大坝长期安全和稳定。智能浇筑系统和布料机器人结合在一起,可以实现混凝土从生产、运输到入仓浇筑的全过程智能化控制,从而保证浇筑过程的精确、迅速、均匀。

系统把物联网、大数据、人工智能等技术应用到混凝土的生产以及运输过程之中。它的工作原理是在拌合站、运输缆机或者车辆上装设传感器,对混凝土拌合时间、坍落度、温度等参数进行实时检测。出现异常时系统立刻发出预警,不合格的混凝土不能进入浇筑仓位。实时跟踪浇筑进度可实现混凝土生产和运输的智能调配,达到供需精确匹配的目的,缩减等待时间,降低材料浪费。

布料机器人把传统混凝土入仓方式完全改变。大型混凝土坝施工中,传统上多采用缆机吊运混凝土罐浇筑,落点靠人力控制,容易造成混凝土离析、局部堆积。智能布料机器人一般是指安装在浇筑作业面上的多自由度机械臂,可以接收中央控制系统的指令,并通过激光扫描仪对仓内环境进行实时的三维感知,从而实现混凝土的自动、均匀铺设到指定位置。

机器人严格按照事先设定的“平铺薄浇”工艺要求进行工作,可以精准地控制每次下料的厚度,避免出现局部堆积、骨料分离的情况,进而大大改善了层间结合质量。精确布料有利于混凝土内部热量的均匀散发,对控制温度裂缝十分有利。智能浇筑系统同布料机器人相配合使用,既提高了浇筑质量与效率,又将作业人员从危险、高强度的劳动中解放出来,是水利工程智能化发展的重要体现。

(三) TBM (隧道掘进机) 智能导向与控制

隧道掘进机是完成长距离引水隧洞、交通洞等地下工程的大型设备。在复杂的地下环境中,TBM 怎样才能始终按照设计轴线准确掘进,就是施工面临的主要技术难题。TBM 智能导向与控制集成系统融合了高精度测量、地质超前预报、智能控制算法,其目的是使 TBM 掘进过程达到自动化、智能化的目的。

智能导向系统的关键就是实时精确定位。系统一般采用激光经纬仪、陀螺仪、倾角传感器等多元数据融合的方法,对 TBM 主机在三维空间中的里程、平面偏移、高程偏移、俯仰角、横滚角、方位角等位置姿态进行不间断测量。测量数据同 BIM 模型预先设定的隧道设计轴线做即时比较,系统可以很快发现 TBM 的任何微小偏离。根据偏差数据智能控制系统自动算出推进油缸的最佳推力组合,然后精准调节各油缸伸缩量以使 TBM 掘进方向与设计线路保持一致,像地下巡航导弹一样一直准确跟随设计线路。自动闭环控制可以保证隧道成型的精度,减少

后续衬砌工作量，同时也可以大大提高掘进效率。

表 8-2 智能施工装备应用及优势表

装备类型	主要应用场景	核心优势
无人驾驶碾压机集群	大坝、堤防等填筑体压实	全天候作业、提高效率、确保压实均匀性、消除人员安全隐患
智能浇筑系统与布料机器人	混凝土坝等大体积混凝土浇筑	确保浇筑精度与均匀性、提高质量与效率、减轻工人劳动强度、有效控制温度裂缝
隧道掘进机智能导向与控制	长距离引水隧洞、交通洞等地下工程	保证掘进精度、提高效率、减少后续衬砌工作量、降低工程风险

以上智能施工装备的应用及优势见表。

二、施工过程智能控制

智能建造不但是装备层面的升级，更是施工全过程精细化、智能化的管控。依靠实时感知、数据处理、智能决策来全面保障工程质量、安全和进度，使工程的建设从以往的经验型转向以数据为基础。

（一）基于视觉识别的施工质量智能检测

传统的施工质量检测大多依靠人工巡检、抽样检测，主观性强、效率低、覆盖面小。用遍布工地的摄像头或者无人机加上深度学习的视觉识别技术，将质量检测带入智能化、实时化、全方位的崭新阶段，给施工质量提供强有力的技术支撑。

这项技术的关键就是训练出有经验的人工智能模型。人工智能模型经过海量图像数据的学习和训练之后，就能像有经验的质检员一样，可以自动识别出施工现场出现的各种质量问题。具体的应用包含如下主要的环节：

1. 混凝土表面缺陷检测：对养护期满的混凝土坝面或者衬砌表面，可以用无人机搭载高清相机进行巡检拍摄。视觉识别算法可以准确检测出表面出现的各种缺陷（裂缝、蜂窝、麻面等），测量出缺陷的位置、长度、宽度等信息，自动生成检测报告，效率和精度都比传统的人工检测要高得多。

2. 钢筋工程质量控制：在钢筋绑扎完成、模板封闭之前，用固定相机或者手持设备拍摄出来的是否满足设计要求的钢筋的直径、数量、间距和钢筋接头的质量等是否符合要求，发现施工偏差发出预警。

3. 施工安全行为识别，在施工安全行为识别方面，视觉识别技术也被广泛地应用到安全管理当中。系统可以自动识别现场人员是否佩戴安全帽，高空作业

时是否系挂安全带等不安全行为,发现之后立即发出警告,有效防止安全事故的发生。

（二）大体积混凝土温控智能通水系统

大体积混凝土结构如重力坝、拱坝等,在施工时水泥水化反应会放出大量的热量,使混凝土内部温度急剧升高。如果不加以有效控制,过大的内外温差就会产生温度应力,进而产生贯穿性裂缝,对工程的安全造成严重威胁。传统的冷却水管通水降温方式,依靠人工定时打开和关闭阀门来控制,控制粗放,效果难以保证。

大体积混凝土温控智能通水系统彻底改变了这一状况。该控制系统集温度传感、自动控制、数据分析、预测模型于一身,是一个闭环智能系统。浇筑前,需在混凝土内部预埋大量带有唯一地址码的温度传感器和冷却水管网络。浇筑完毕后,这些传感器就会对混凝土内部不同深度的温度展开持续的采集工作,然后经由无线的方式把数据传送到中央控制平台。

控制平台的核心就是智能决策系统。它根据有限元传热学理论,结合机器学习算法,对实时采集的温度数据、气象信息、混凝土材料属性等进行分析,进而准确地预测出混凝土内部温度场的分布趋势。根据预测结果以及设定的温控标准(最高温度、降温速率、内外温差等),系统会得出最优的通水方案,并且经由控制网络里的智能电动阀门,对每一条冷却水管的通水流量及通水时间实施精确的控制。“按需制冷”的精细化控制可以防止温度裂缝产生,保证大坝结构安全,最大限度节约水资源、能源消耗,从而达到质量、安全、经济效益的统一。

（三）高边坡开挖的智能爆破控制

水利水电工程中常常会遇到高陡边坡开挖,高陡边坡的稳定性和安全性十分重要。爆破开挖是主要手段,控制精度好坏直接影响边坡扰动程度和最终稳定性。智能爆破控制技术采用数字化手段,在地质建模、爆破设计、精准起爆这三个方面着手,力求外科手术式地实现岩石精确的破碎。

一切从精细地质勘察开始,用无人机倾斜摄影、三维激光扫描等技术可以快速获取高边坡的精细三维地形模型。根据地质钻探和物理勘探的数据建立包含岩体结构、节理裂隙分布等信息在内的透明化的三维地质模型,给爆破设计提供可靠的参考依据。

数字化爆破设计时,工程师可在三维地质模型上做虚拟布孔,用专业的爆破

模拟软件仿真不同的起爆网络、炸药单耗下爆破的效果,即岩石破碎范围、块度分布、边坡应力场变化、对保留岩体的扰动影响等。通过不断的调整与优化来找到能量利用效率最高、围岩破坏最小的爆破方案。施工时采用带高精度定位系统的智能钻机进行钻孔作业,保证炮孔位置、深度、角度与设计完全一致。采用高精度数码电子雷管,可以做到每一个炮孔起爆时间的毫秒级控制。合理的延时设计可以控制爆破能量释放的方向,达到逐孔爆破、能量叠加或者衰减的目的,在破碎目标岩体的同时最大限度地保护最终开挖轮廓线的完整性,减少超挖和欠挖,从而保证高边坡的长期稳定。

三、3D 打印与增材制造

3D 打印技术又称为增材制造,正由工业制造领域向土木工程领域深入发展。以数字模型为依托,用材料逐层堆积形成实体,给水利水电工程构件的制造、快速修复和个性化设计带来革命性的变革。

(一) 建筑 3D 打印在小型水工建筑中的应用

传统的现场浇筑混凝土结构工序多、模板耗量大、工期长、人工成本高。建筑 3D 打印技术,尤其是混凝土 3D 打印技术,给改变现状提供了一种可能性,尤其在水工建筑领域中具有很大的潜力。该技术使用计算机程序控制的大型龙门架或者机械臂喷头,把特种改性水泥基复合材料按照预先设定的数字模型路径,逐层连续打印出来,直接成型成建筑物或者构件。

在水利工程中,这项技术主要用在建造结构简单、体积小的构筑物,比如灌溉渠道、排水沟、小型挡水墙、河道护坡模块、设备基础等。3D 打印相较于传统工艺来说具有明显的优势,它不需要立模和拆模,大大简化了施工工序,缩短了建设周期;打印过程由计算机精确控制,保证构件的尺寸精度和质量稳定性;而且该种建造方式减少了建筑垃圾和材料浪费,更加环保。

3D 打印技术冲破了传统设计所限。传统工艺难以制造出的复杂曲面以及异形结构,利用 3D 打印却能够非常容易地制作出来。工程师可以按照流体力学最优原理来设计渠道断面或者导流墙的形状,从而减小水流阻力,提高输水效率,这是传统模板工艺所不能比拟的。偏远山区或者交通不便之处,小型化的 3D 打印设备便于带至现场,可快速且低成本地展开现场施工,给农村水利设施的修建和保养赋予了一条高效的方式。

（二）异形构件的 3D 打印制造

水利水电工程中存在着大量的异形、非标准构件，例如水轮机导叶、泄水建筑物消能坎、复杂管网连接件和用于物理模型试验的缩尺模型等。构件形状复杂、精度要求高，用传统的铸造、锻造或者机加工方式制造，模具费用高、加工周期长，对结构特别复杂的内部流道或中空夹层更是无能为力。

3D 打印技术可以很好地解决这个问题。根据三维 CAD 模型，采用高分子材料做快速原型制作或者直接用复合材料、高性能混凝土打印功能件，均可以实现所见即所得的快速精确制造。用水工模型试验为例来说，3D 打印可以快速制作出各种复杂边界条件的缩比模型，用来检验并改进设计方案，大大缩短研发周期。对需要轻量化、高强度的结构件，3D 打印可以制作出内部带有复杂拓扑优化晶格结构的构件，在保证承载能力的前提下大大减轻构件自重，这是传统制造工艺无法实现的。没有模化的制造方式使得小批量、定制化的生产成为可能，给水利工程精细化设计、功能创新开辟了一条新途径。

（三）金属 3D 打印在备品备件中的应用

水电站运行维护对于电力稳定供应起着重要的作用。很多大型水轮发电机组、闸门启闭机等关键设备，在长时间运转之后常常会遇到部件磨损、老化甚至停产的状况。传统的备品备件采购周期长、仓储成本高，特别是对老旧机组或者进口设备来说，备件的获取更加困难，一旦损坏就容易造成机组长时间停运，造成巨大的经济损失。

金属 3D 打印技术，例如选区激光熔化或者激光熔覆，给解决这个“卡脖子”难题提供强有力的支撑。当关键金属部件（如叶片、密封环、轴瓦等）损坏时，用三维扫描技术逆向获取该件的三维数字模型。然后利用金属 3D 打印设备，用高性能金属粉末（不锈钢、钛合金、高温合金等）直接打印出新的备件。整个过程可以几日内完成，形成了备件的按需、就地、快速制造模式。该种模式很好地解决了备件供应的问题，大大降低了备件的库存成本。技术人员还可以在逆向建模的基础上对原有的设计进行优化，改进流道、增强易磨损部位，甚至打印出性能比原厂更好的加强件，从而提高设备的运转效率和可靠性。

第三节 施工质量数字化控制

水利水电工程的质量是它的生命线，直接影响到工程的安全、效益、耐久性。传统的质量控制方法大多依靠人工检测、抽样检查和纸质记录，从而引发数据离散、追溯困难、信息滞后、主观性强等众多问题。施工质量数字化控制就是用物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术来构建起覆盖施工全过程实时、精确、智能的质量控制体系，实现由事后检验到过程控制、事前预警的根本性转变。

一、质量检测数字化

质量检测属于质量控制的基本环节，质量检测的数字化转型是开展智能管控的前提。利用先进的传感设备、自动化检测技术，把以前靠经验、局部抽检的方式，转变为依靠大量客观数据进行全面、连续、精确的科学评价，给施工质量提供可靠的度量依据。

（一）智能压实监控与压实质量评价

土石坝、堤防等填筑工程压实质量的好坏，直接关系到整个工程的安全稳定和防渗性能。传统的压实质量检测主要依靠环刀法、灌砂法等现场取样试验，但是这些方法普遍存在检测频率低、覆盖面小、具有破坏性、结果反馈滞后等缺点，不能有效地指导现场施工。智能压实监控技术完全改变了这种状况，在压路机上安装高精度全球导航卫星系统定位模块、振动传感器和数据处理终端，对压实过程进行全方位、实时的监测。系统能够记录压路机行驶轨迹，碾压速度、碾压遍数，振动频率、振幅等连续的参数并且可以显示。

实时采集的数据上传到云平台之后，经过特定的算法模型处理，就能得到覆盖整个作业面的可视化压实质量图谱。不同的颜色色块能直观反映出各个区域的碾压遍数是否达标，压实度、密实度等重要的评定值。施工人员及管理人员通过驾驶室显示屏或者远程终端，就能查看到“欠压”、“适压”、“过压”区域分布图，进而根据具体情况调整施工方案，对薄弱环节加强压实，既不会造成盲目碾压或者过度碾压的现象，又能使压实均匀性、密实度得到保证，同时大大提高施工效率并降低能源消耗。此种依据过程参数的连续性评价方式，可以完全覆盖压实质量，从根本上提高填筑工程的内在质量。

（二）混凝土强度无损检测与智能评估

混凝土在水利水电工程中使用量最大，强度是结构安全的关键因素。传统的混凝土强度检测依靠同条件养护试块的抗压试验，但该方法存在明显的不足，试块的养护条件很难与实际结构物内部的温湿度环境完全一致，检测结果只能代表试块强度，不能完全反映结构物本身的真实强度。试块检验具有滞后性，一般要等 28 天标准龄期才能得到结果，不能给施工过程提供及时的决策依据。

混凝土强度无损检测及智能评价技术给这个难题提供新的解决思路。该技术采用回弹法、超声波法等多项非破损检测技术，对混凝土结构物表面测量，从而得到和强度有关的物理参数。单一无损检测方法会受到各种因素的影响，精度不高。智能评估系统依靠大数据以及人工智能算法，把多种无损检测数据（回弹值、声速、声时）同结构物内部预埋的温度、湿度传感器数据融合起来，再联系少量钻芯取样试件得到的真实强度数据，创建起一个多参数、高精度的强度预估模型。该模型可以排除环境因素和材料差异的影响，对结构物的任意部位、任意龄期的混凝土强度进行准确的“层析成像”式的评价。因此，可以对大体积混凝土内部水化热和温度应力进行实时监控，为模板拆除、预应力张拉、后续荷载施加等关键工序提供科学、及时的决策依据，既保证施工安全，又优化施工工期。

（三）基于三维激光扫描的体型检测

水利建筑物体型尺寸精度，大坝坝面、泄水建筑物过流面、隧洞衬砌等的平整度、轮廓符合度直接关系到工程的安全运行和水力学性能。传统的全站仪等点式测量方式效率低，测点密度小，不能完全反映结构物的真实形状，特别是对于复杂的曲面结构，更难达到精准的质量控制。

基于三维激光扫描的体型检测技术，使用地面三维激光扫描仪或者无人机搭载的 LiDAR，可以快速获取被测对象表面数百万甚至上亿个密集的三维坐标点，从而得到高精度的点云数据。这些点云数据可以迅速得到被测对象的精细化三维实景模型。将该“竣工态”模型与设计阶段的建筑信息模型进行精确配准和对比，可以得到结构物表面任意一点的偏差，并以彩色云图的形式直观地显示超欠挖、平整度、坡度等体型质量指标。用非接触式测量方式不仅可以大幅度地提高了检测效率和安全性，更重要的是实现了点检测到面控制的飞跃。为之后的修补、找平工作提供准确的指导，也可以作为工程实体质量的数字化档案，给工程长期健康监测与维护提供宝贵的初始数据。

二、质量过程追溯

工程质量不是靠检查得出的，而是建设出来的。要达到高质量的工程，就必须在施工的每一个环节上进行精细化的管理以及严格的控制。质量过程追溯系统利用物联网、移动互联网、二维码或者射频识别技术给每一个构件、每一道工序、每一批材料赋予唯一的数字身份，从而形成一条完整、透明、不能篡改的质量信息链。

（一）原材料进场到使用的全链条追溯

原材料是工程质量的源头，它的品质好坏直接决定了工程实体最终的质量。创建原材料进场到使用结束的全过程追溯体系，是源头上控制质量最有效的办法。该体系的核心就是给每一批次的原材料，例如水泥、钢筋、外加剂、骨料等，贴上一个带有其身份信息的数字化标签，一般是二维码或者射频识别芯片。

原材料到施工现场后，通过扫描数字标签就可以快速录入供应商信息、生产批号、出厂合格证、第三方检测报告等信息。系统把有关的信息同采购订单相匹配，达到快速准确的进场验收的目的。原材料的入库、出库每一次都会被即时记录，与施工部位或者混凝土配合比相联系。具体的过程见表所示：

表 8-4 原材料全链条追溯流程

环节	具体操作	关键特征
数字身份赋予	原材料进场时，赋予唯一的数字标签。	关联所有原始信息，如供应商、批号等。
扫码入库	验收合格后，通过扫描标签记录入库。	记录材料在仓库中的具体位置。
扫码领用	施工班组按任务单扫描标签领用材料。	自动记录领用人、时间、用途（如浇筑仓位）。
信息绑定	材料使用后，其信息最终与 BIM 模型中具体构件绑定。	发现质量问题时，可迅速追溯到该构件所用原材料的详细信息。

通过上述流程，一旦出现质量问题，就可以沿着这条数字链条，迅速查找到该构件所用的每一批原材料的详细信息，给质量问题的精准定位、责任界定提供强有力的技术支持。

（二）工序质量数据的实时采集与上传

施工过程包含成千上万道工序，每一道工序的质量都是成品质量的基础。传统的工序质量控制依靠纸质施工记录、验收单，存在着填写不规范、信息传递滞后、数据容易丢失或者篡改等诸多弊端。工序质量数据实时采集上传系统，给现

场施工人员、质检人员配备移动智能终端（平板电脑、智能手机），将标准化的施工工艺、质量验收规范嵌入到应用程序中。

现场人员完成钢筋绑扎、模板安装、混凝土浇筑等一道工序之后，需要按照应用程序中的电子表单要求打卡填报。除了填写尺寸、数量等量化数据之外，还可以上传现场影像资料，用照片或者视频的形式来佐证。钢筋验收时，质检员除了要填写钢筋间距、排距、保护层厚度等数据，还要上传带有时间、地点水印的现场照片。所有的数据都是通过无线网络实时上传到云端服务器，然后和建筑信息模型中相应的构件进行关联。管理人员在办公室就可以通过项目管理平台，对现场每一道工序的完成情况、质量状态进行实时监控，实现了管理的扁平化、透明化，保证施工过程中每一个细节都有据可查、有迹可循。

（三）质量缺陷的定位、分析与整改闭环

施工过程比较复杂，质量缺陷的出现是难以避免的。关键在于怎样快速准确地发现问题、高效彻底地完成整改，形成管理闭环。传统的管理方法大多使用口头传达和纸质通知单来管理缺陷，这样导致流程不透明，不能有效地追踪整改的过程，容易造成相互推卸责任、整改不到位、问题被忽视。

数字化的质量缺陷管理系统创建起标准的线上协同工作流程。当任何一方（监理、质检员、普通工人等）在现场发现质量问题时，可以利用移动应用程序精确定位缺陷的位置，在上传问题照片、视频、文字描述等之后，就会形成一张数字问题单。系统根据事先设定的规则，把该问题单推送给相应的责任单位和责任人。责任方接到通知以后，在规定时限内制订整改方案，将方案报请上级部门审批。整改过程中要实时上传进度照片及说明。整改完成之后提交复检申请。最初发起人或者指定的验收人会到现场检查，确认问题解决后，在系统中将问题单关闭。发现、派发、整改、复核、关闭全过程都被系统记录下来，每一个环节的负责人以及耗时也都清楚可见。闭环管理模式可以保证每一个质量问题都能得到解决，过程数据也可以为责任认定、绩效考核提供客观依据。

三、质量大数据分析

对施工期间产生的大量的多源异构质量数据进行收集和分析，是实现质量管理从被动应对到主动预见的主要方式。质量大数据分析用统计学、人工智能的方法，从数据中找出隐藏的规律和联系，从而改善施工工艺、预防质量通病、预估

质量风险。

（一）施工质量通病的统计分析与预防

施工质量通病，比如混凝土裂缝、蜂窝麻面、钢筋露筋等一直困扰着工程。通过对数字化质量管理平台中积累起来的缺陷数据做统计分析，可以找到这些通病发生的规律。系统能够从大体积基础、薄壁结构、不同季节的施工项目以及不同的施工班组等各方面的数据入手，探究缺陷种类分布频率。

这样就可以找到质量问题高发的重灾区。数据分析可以发现某班组模板支护方面反复出现同样的问题，或者冬季施工混凝土表面裂缝出现率较高。根据以上有统计学意义的分析结果，项目管理团队就可以采取相应的预防措施，修改施工方案、优化材料配合比、对施工人员进行专项技术交底和技能培训、加强某项工作检查和监督等。以数据为依据的决策方式使质量预防工作由凭经验、拍脑袋转变为有据可依、精准施策的科学管理，大大降低了质量通病的发生率。

（二）施工参数与质量指标的相关性分析

工程质量的好坏是由施工参数综合作用的结果。这些参数有材料性质（水泥标号、骨料级配），工艺参数（振捣时间、碾压速度），环境因素（温度、湿度）等。探究这些复杂的施工参数同最终的质量指标（混凝土强度、压实度等）之间的内在联系，对改进施工工艺、提高工程质量有着十分重要的意义。

用多元回归分析、神经网络、决策树等机器学习算法对大量的过程数据和结果数据进行建模分析。对于混凝土浇筑过程中的各个参数（配合比、搅拌时间、运输距离、浇筑温度、养护方式等）和最后无损检测得到的强度数据进行分析，就可以建立一个准确的强度预测模型。该模型不仅可以预测强度，更重要的是可以找出影响强度最大的参数。因此技术人员可以对施工参数进行优化组合，得到最优的施工工艺指导方案，在保证质量的前提下，达到成本最优或者效率最高的目的。这样的分析使施工过程从“黑箱”变成“白箱”，即可以被量化的分析和持续的优化。

（三）基于历史数据的质量预测

质量管理的最高境界是以防为主。以历史数据为依据的质量预测，是达到此目的的最终途径。当项目积累到足够多的数据（原材料数据、施工过程参数、环境数据、人员信息、以前的质量缺陷记录等）的时候，就可以建立一个综合的质量风险预测模型。该模型使用深度学习算法，可以学习并识别出引起各种质量缺

陷的典型模式或者前兆。

在后续施工中把现场采集的数据输入预测模型中进行实时运算。模型会按照当前的参数组合，即时对下一道工序出现质量缺陷的可能性做出评价。当模型发现高温天气、长距离运输、某批次外加剂这三个因素在历史上与混凝土早期开裂高度相关时，系统就会在浇筑工作开始前向管理人员发出高风险预警。管理人员收到预警之后可以立即采取干预措施，即调整配合比、增加冰块降温、改变运输路线等，有效地防止质量缺陷的发生。这样前瞻性的质量风险管控能力，就表示工程质量管理迈入了依靠数据推动的智能化、预知的新时期。

第四节 施工进度数字化管理

水利水电工程施工进度管理的好坏，直接影响到项目投资效益、资源配置和合同的履行，是决定项目成败的重要因素。传统的进度管理方式依靠人工填写、经验判断，这就不可避免地会出现数据滞后、信息孤岛、主观判断偏差等弊端。伴随着数字化技术的发展，施工进度管理正由原来的粗放型、动态型、智能化方向转变。它依靠多源数据融合和智能分析，可以实现施工全过程精确控制以及提前预警。

一、BIM+4D 进度模拟

BIM 技术同第四维时间维度融合起来，就产生了可视化施工过程模拟平台。它把过去抽象的横道图、网络图变为与三维空间模型联动、直观可见的施工过程。该种模拟技术让各方能够在施工之前进行预先演练，从而发现并处理存在的可能影响到进度、逻辑方面的隐性问题，也是推行精益化建造和主动式进度控制的关键手段。

（一）基于 BIM 模型的进度计划可视化

基于 BIM 模型的进度计划可视化，就是将施工进度计划（P6 或者 Project）中各个任务与 BIM 模型中对应的构件关联起来，从而生成动态、可视化的施工模拟动画。管理者利用 4D 模型可以清楚地看到大坝逐层浇筑、厂房分区分块建设、引水隧洞分段掘进等施工过程。可视化表达方式明显提高了计划的可读性以及沟通效率，使复杂的施工部署和逻辑关系一目了然。管理人员、技术人员和非专业

决策者等可以通过 4D 模拟来充分理解整个建造过程,使各个部门对于工期要求达成统一。

可视化模拟既可以直观地显示计划,也可以做为强有力的计划审查工具。在模拟的过程中很容易发现计划中存在的逻辑错误、空间冲突、施工顺序不合理等问题。通过模拟,可以发现脚手架安装计划和主体结构混凝土浇筑计划存在时间冲突,或者大型设备进场路线被后续施工构件阻挡。在施工前发现这些问题,项目组可以及时调整施工方案和进度计划,避免返工、延误等现象的发生,从源头上保证计划的科学性、可行性,实现事前规避而不是事后补救。

(二) 实际进度与计划进度的动态对比

BIM 和 4D 技术不仅可以在施工前期进行模拟,在施工过程中也可以进行动态跟踪控制。把现场实际采集到的进度数据输入 4D 模型平台,就可以实现计划进度与实际进度的实时可视化对比。对比结果一般用颜色编码表示,按时完成的构件用绿色标示,正在施工的用黄色标示,滞后的用红色标示。管理者只需浏览模型就可以很快了解到整个工地的情况,并且可以准确找到进度偏差发生的具体位置和构件。

这样的动态对比分析给进度管理工作赋予了强有力的数字化支撑,偏差分析变得越发精准高效。管理人员可以任意选定某一个时间节点,然后将该时间节点上计划的完成工程量与实际的完成工程量作对比,系统会自动生成包含完成率、偏差率等关键指标的量化比较报告。基于模型的对比可以克服过去依靠大量报表、文字描述等局限,把进度偏差同具体的空间位置、工程实体紧密联系起来,使问题诊断更集中,纠偏措施更具有针对性。由原来的看报表到现在的看模型,使进度控制更为透明、直观、及时。

将实际进度数据与 BIM 模型相结合,可以得到带有时间信息的竣工 BIM 模型或者过程 BIM 模型。这类模型可以保存建筑物最终的状态,也可以记录建筑物建造过程中每一个关键时间点的信息。该资料对项目以后复盘、经验总结、索赔分析、未来项目规划起到非常重要的数据资产作用。通过回放施工全过程可以分析某一延误事件的连锁效应,可以评价各种纠偏措施的实际效果,可以给项目管理水平的持续改进提供科学依据。

(三) 关键路径的识别与预警

在复杂的网络计划中,关键路径是总工期最长的线路,该路径上的任何一个

工作延误都会使整个项目的工期延长。在 BIM 和 4D 环境下, 关键路径的管理变得更智能、更主动。系统可以自动计算出当前进度计划的关键路径, 并把组成关键路径的所有工作及其对应的构件在 4D 模型中用高亮的方式显示出来, 从而使管理者一直关注影响项目总工期的核心任务。

数字化平台可以对关键路径上各个活动进行持续的监控, 并建立预警机制。系统会在关键路径上某项工作实际进度落后于计划, 或者预测该工作未来可能延误的时候自动触发预警, 以仪表盘、短信或者移动应用推送等形式及时通知相关管理人员。预警信息一般会包含延误任务的名称、延误程度, 还可以和 BIM 模型进行关联, 直观地展示受影响的构件和区域。前瞻性的预警机制使管理者可以在问题刚开始的时候就对其进行干预, 进而采取措施来加快关键工作的进度或者调整以后的工作计划, 以最大限度地减少其对总工期造成的影响。

1. 传统项目执行过程中, 关键路径一旦确定, 变动性就很小。在数字管理系统中可以根据实际进度进行动态更新、重新计算关键路径。非关键工作出现严重的延误时, 就可能变成关键工作, 从而形成新的关键路径。系统能实时反映出这些变化, 促使管理者不断调整管理重心, 保证资源首先投放到最关键的环节中去。

2. 缓冲区管理与风险预警, 按照关键链法的思想, 系统可以给关键路径设置时间缓冲区。监控缓冲区消耗速度, 可以提前发出警报。缓冲区消耗速率超过设定阈值的时候, 系统就会给管理者发出警示, 即使关键工作本身还没有出现延误的情况, 也意味着风险正在慢慢积累起来, 应该及时采取防范措施。

二、进度数据自动采集

施工进度数据的准确、及时是开展数字化管理的前提。传统手工统计、填报效率低且容易出错, 影响进度管理精细化的水平。进度数据自动采集技术, 采用物联网、计算机视觉等技术手段, 对施工现场的人、机、料、法、环等生产要素状态进行自动、连续、准确的采集, 给上层进度分析和决策提供高质量的数据源。

进度数据自动采集技术多种多样, 其核心原理、采集对象及优势各有侧重, 具体可见下方对比表:

表 8-5 施工进度数据自动采集技术对比表

采集技术	核心原理	采集对象	主要数据	核心优势	适用场景
GPS/ 北斗定位	卫星定位技术	施工机械	位置、轨迹、工时、状态	实时监控, 提升设备利用率	土石方、运输、大型设备管理
图像识别	计算机视觉、AI	构件、工程量、进度	完成量、形状、尺寸	非接触、效率高, 减少人工依赖	大坝、结构件、预制件、施工现场巡检
人员考勤	生物识别、IoT	施工人员	考勤、位置、工时	准确防作弊, 优化劳动力配置	人员密集的施工现场, 安全管理

（一）基于 GPS/ 北斗的施工机械定位与工时统计

大型水利水电工程中土石方开挖、填筑、混凝土运输等均离不开大量的施工机械。为挖掘机、推土机、自卸车、混凝土搅拌运输车等重要设备安装 GPS 或者北斗定位终端, 是实现其作业状态自动监控的有效方法。终端可以高频次地把设备的实时位置、运行轨迹、速度、发动机工作状态等信息传送到中心服务器。对后台数据加以分析, 便能创建起详尽的设备电子台账。

管理平台依靠电子围栏技术, 可以准确地判定设备是否在指定的工作面工作。根据发动机点火熄火信号或者振动传感器数据, 系统可以自动识别出设备的工作、怠速、停机三种状态, 然后对每台机器的有效工作时间、无效工作时间、利用率、工时消耗进行统计。系统可以自动记录自卸车从装料区到卸料区的运输次数、单次循环时间, 从而准确地计算出它完成的土方运输量。

自动化统计使现场管理人员不再需要花费大量时间手工记录, 提高了数据采集效率和准确性, 避免了人为虚报、漏报的情况。更主要的是, 积累起来的设备运行大数据为设备调度优化、油耗分析以及维修保养预测打下了坚实的基础。管理者可以清楚地了解到设备的资源分布情况以及使用状态, 发现闲置或低效的设备进行合理的调派, 使施工效率提高, 机械使用成本下降。数据的客观性给分包商工程量结算提供可靠的依据, 减少纠纷的发生。

（二）基于图像识别的工程量自动计算

利用计算机视觉、人工智能技术对施工现场的图像、视频数据进行分析, 实现工程量自动识别计算, 也是推进进度数据采集智能化的又一途径。该技术一般利用无人机、固定监控摄像头或者现场工作人员手持设备拍摄的影像资料, 再用后台图像识别算法进行处理。无人机可以定时对大坝填筑区或者土石方开挖区进行航拍, 采用倾斜摄影的方式获取高精度的三维点云模型。通过对不同时期点云

模型进行对比分析,可以得到该时间段内挖方量或者填方量,精度远高于传统的手工测量。

结构工程施工时,图像识别技术也有很大的用处。在关键位置设置监控摄像头或者质量安全员定期拍照上传,系统可以利用目标检测算法识别新完成的钢筋绑扎、模板安装或者混凝土浇筑构件。系统可以将识别结果同 BIM 模型做对比,自动更新构件施工状况并累计完成工程量。算法不仅可以自动统计已经安装的预制板的数量,还可以分析混凝土浇筑泵车作业视频来估算浇筑方量。从而达到对形象进度的自动化和非接触式采集。

此项技术很大程度上减轻了进度数据采集对人工的依赖,在环境复杂、危险或者人工作业难以到达的区域,其优势更加明显。自动化获得的工程量数据可以很快地被项目管理平台接收,从而为进度款的拨付、材料需求的预测、进度的偏差分析等提供客观依据。随着算法的不断完善、训练数据的不断增多,图像识别的准确率和适用范围也越来越大,施工现场可以发挥数据感知的智能之眼的作

（三）人员考勤数据的自动汇总

施工现场人员管理属于进度控制的重要组成,保证足够的、合适的劳动力投入是任务按时完成的前提。传统的签到或者打卡方式存在代打卡、数据整理量大等缺点。智能化考勤系统用上了生物识别技术、智能硬件等手段,实现了自动、精准地采集施工现场人员出入信息、工地人员分布情况的功能。在施工现场出入口设置人脸识别闸机,工人出入必须经过实名身份认证并记录打卡时间,数据实时上传到云端,从根本上杜绝了考勤作弊的现象。

给工人佩戴内嵌芯片的智能安全帽或者利用移动通信基站的定位技术,系统就可以获得员工的全部位置信息。在 BIM 模型中划分出虚拟作业区域之后,系统可以统计出每一个工作面、每一个施工班组实时在岗人数和累计工时。这些数据对度量劳动力投入是否充分、分析劳动效率、做人工成本核算等都非常重要。当某个关键作业面的实际到岗人数少于计划投入时,系统就会向项目经理发出预警。人员考勤数据自动汇总分析一方面可以加强现场安全、纪律管理,另一方面也可以给进度计划的资源合理性评价、动态调整提供精确到个人的数据支持。

三、进度智能优化与调整

在得到大量的、实时的、准确的进度数据之后,数字化管理的价值才从“监

测”升华为“决策支持”。进度智能优化与调整功能依靠算法、大数据分析技术，对复杂的施工系统做模拟、预估、改进，从而帮助管理者制定出更加科学、具有韧性的发展战略，达到施工过程的智能化干预和闭环管理。

（一）资源冲突的智能检测与协调

水利水电工程施工现场通常场地狭小，多工种、多工序交叉作业频繁，很容易产生资源冲突。除了劳动力、设备、材料等物理资源使用上的冲突外，还包括吊装区、运输道这些空间占用方面的冲突。智能化管理平台利用 BIM 模型以及施工计划来开展资源冲突模拟检测。系统会用四维虚拟环境把进度计划中的各个任务所需要的人员、设备、材料清单以及在某一时期内所占用的物理空间全部模拟出来。

系统在模拟的时候会自动找出可能的冲突点。系统会识别出两台塔吊在某一时间段内作业半径重合，存在碰撞危险；或者计划某日进行的大体积混凝土浇筑，其材料运输路线与另一区域正在进行的钢筋吊装作业区域冲突；或者系统检测到两个不同的分包单位在同一天为同一个区域安排工作，现场空间不能容纳双方工人和设备。一旦系统检测到时间、空间冲突，就会立即产生一份包括冲突类型、发生时间、地点、相关任务及资源等的冲突报告，用 BIM 模型可视化表示出来，从而帮助项目组提前协调修改方案，避免现场混乱、工期延误和安全事故的发生。

（二）基于遗传算法的进度优化

工期紧张、资源有限或者成本约束严格的复杂情况下，怎样制定最优施工进度计划，属于典型的多目标优化问题。遗传算法等启发式优化算法给它提供了一种高效的解决办法。该类算法模仿生物进化中优胜劣汰的原则，用计算机程序在庞大的解决方案空间里自动搜索，找到满足一定约束条件下的最优或者近优解。在进度优化中，每一个进度计划都当作一个“个体”，而其总工期、总成本等指标就作为它的“适应度”。

项目管理者可以向系统输入项目的基本约束，即各项工作的逻辑关系、资源可用性上限、成本预算等，也可以设定优化目标，即总工期最短、总成本最低或者资源波动最小化。遗传算法程序会随机生成一批初始的可行进度计划方案（即种群），然后利用选择、交叉、变异等操作不断地迭代演化，得到更好的方案。经过成千上万次的迭代计算，算法最后收敛到一组满足要求并且表现较好的进度计划。在很短的时间内对人力所无法达到的大量可能性进行评价，给管理者提供数据支撑的、经过充分优化的进度方案建议，从而达到项目计划深度优化的目的。

（三）进度延误的原因分析与对策推荐

进度偏差出现的时候，找到延误的原因并采取有效的纠正措施就显得格外重要。智能化进度管理软件能将历史数据、专家经验、实时信息融合到一起，构造出进度延误诊断与决策支持模型。当系统检测到某项工作出现延误的时候，就会自动关联该工作的各项数据，当天天气情况、相关设备运行日志、材料到场记录、班组出勤情况、质量检测报告等。

采用数据挖掘、知识图谱技术对数据进行分析，可以找到造成延误最有可能的原因。系统会识别出混凝土浇筑延误恰好发生在连续降雨的天气里，或者其上游工序钢筋绑扎的质量验收记录多次不合格而需要返工。系统把各种原因按可能性大小排序后呈现给管理者，从而帮助管理者很快判断出问题的主要症结。依靠数据驱动的归因分析，克服经验判断的片面性、不准确性，使问题诊断更加客观、深入。

诊断出问题后，决策支持系统还可以给出纠偏对策。系统内嵌的知识库包含应对各种延误情况的策略，比如“赶工”（增加资源投入），“快速跟进”（并行施工），调整逻辑关系，修改施工工艺等。根据项目的实际情况以及约束条件，系统能对不同对策所造成的工期、成本和资源的变化情况进行模拟，并对它们的可行性及风险进行评价。系统最后会给管理者提供带有各种备选方案的决策建议报告，列出各种方案的优点、缺点和预期结果，给管理者在复杂的情况下作出科学、高效的决策提供强有力的 AI 支持。于是就形成了由监测、诊断、决策、执行构成的闭环，使项目应对风险及不确定性的能力得到明显提高。

第五节 工程示例 — 白鹤滩水电站设计理论创新与数字化技术实践

白鹤滩水电站位于云南省巧家县与四川省宁南县交界处的金沙江下游，是全球在建规模最大、技术难度最高的水电工程之一，总装机容量 1600 万千瓦，坝体为 289 米高的混凝土双曲拱坝，工程建设中突破多项世界级技术难题，其设计理论创新与数字化技术实践代表了中国水电行业的最高水平，具体内容如下：

一、设计理论创新：突破行业技术瓶颈，构建特高拱坝设计新范式

（一）高拱坝结构优化设计：应对“不对称河谷”的全球难题

白鹤滩坝址地处金沙江干热河谷，两岸地形呈现“左缓右陡”的不对称特征（左

岸坡度约 20° 、右岸坡度达 65° ），传统拱坝对称受力设计无法适配复杂地形。设计团队创新构建“非对称拱坝受力平衡理论”，通过三大核心技术突破实现结构稳定：

1. 坝轴线偏转与受力中心调整：将坝轴线沿河谷走势偏转 15° ，使拱坝推力合力方向精准指向两岸岩体完整区域，同时优化拱圈曲率（拱顶厚度 14 米、最大底宽 72 米），坝体承受的 1650 万吨总水推力（世界第二）均匀传递至坝肩，避免局部应力集中；

2. 双曲拱坝体型优化：采用“椭圆双曲 + 变厚度”设计，坝顶弧长 709 米，从拱顶到坝底厚度渐变（拱顶 14 米至基础 95 米），配合 ADASO 拱坝体型优化程序，使坝体应力分布均匀性提升 30%，较传统拱坝混凝土用量减少 8%；

3. 坝肩岩体加固技术：针对两岸玄武岩似层状结构，创新采用“固结灌浆 + 预应力锚索”联合加固方案，在左岸斜顺向坡布置 3000 余根 $\Phi 150\text{mm}$ 预应力锚索（单根张拉力 2000kN），右岸斜反向坡实施深孔固结灌浆（最大深度 60 米），使坝肩岩体完整性系数提升至 0.92，满足特高拱坝长期稳定需求。

该理论实践使白鹤滩拱坝成为全球首座在不对称河谷中建成的 300 米级特高拱坝，坝体各项性态指标（变形、应力、渗流）均优于设计值，2023 年入选“全球十大工程成就”。

（二）大体积混凝土温控防裂理论：打破“无坝不裂”百年魔咒

白鹤滩坝体混凝土总量超 800 万立方米，金沙江干热河谷昼夜温差达 20°C 、夏季地表温度超 70°C ，传统温控技术难以避免裂缝。设计团队创新“材料 - 理论 - 控制”三位一体温控体系，实现全坝无温度裂缝：

1. 低热水泥材料创新：全坝采用三峡集团自主研发的低热硅酸盐水泥，其水化热峰值较普通水泥降低 40%（3 天水化热 $\leq 230\text{kJ/kg}$ ），从源头上控制混凝土温升；同时掺加 40% 粉煤灰、20% 矿渣粉作为掺合料，进一步降低绝热温升至 25°C 以内；

2. “三期九阶段”温控理论：基于混凝土水化热演化规律，将温控过程分为“升温期、恒温期、降温期”3 个阶段，细分为 9 个控制节点（如浇筑温度 $\leq 18^{\circ}\text{C}$ 、最大温升 $\leq 27^{\circ}\text{C}$ 、降温速率 $\leq 0.5^{\circ}\text{C}/\text{天}$ ），提出“小温差、慢冷却、早保温、长养护”新理念，避免温度应力超过混凝土抗拉强度（28 天抗拉强度 $\geq 2.4\text{MPa}$ ）；

3. 智能温控系统闭环控制：坝体预埋 1.2 万支数字温度计、3000 余组智能通水阀门，构建“实时监测 - 仿真预测 - 自动调控”闭环。当监测到某仓混凝土温

度超 25℃时，系统自动调节冷却水流量（0-50m³/h）与温度（5-15℃），使混凝土最高温度严格控制在 27℃以内，温控指标符合率 100%，较同类工程裂缝发生率降低 100%。

此项创新使白鹤滩成为世界首座 300 米级全坝无温度裂缝的特高拱坝，2025 年被科普中国评价为“破解水电工程百年难题的技术奇迹”。

（三）巨型地下洞室群稳定技术：应对高地应力与复杂地质

白鹤滩地下厂房洞室群总长 217 公里，包含 16 台百万千瓦机组厂房、8 条引水隧洞（直径 13 米），洞室群埋深超 300 米，地应力达 30MPa，传统开挖技术易引发围岩变形。设计团队创新“分级加固 + 动态监测”理论：

1. 高地应力围岩稳定控制：基于 FLAC3D 数值模拟，预测洞室开挖后围岩塑性区范围（最大深度 5 米），采用“喷锚支护（喷射混凝土厚 15cm+Φ25mm 锚杆间距 1.5m）+ 钢拱架（I25b 型钢间距 1m）+ 深层锚索（Φ15.24mm 锚索深度 20m）”分级加固，使围岩变形量控制在 5mm 以内；

2. “小洞进大洞”开挖工法：针对厂房顶拱高 30 米、跨度 34 米的大断面，创新采用“先开挖导洞（断面 5m×5m）→扩挖中层→开挖底层”的分层开挖方案，每层开挖高度 ≤5 米，减少单次开挖对围岩的扰动，洞室开挖成型率达 98%；

3. 实时监测预警系统：在洞室周边布置 500 余组多点位移计、200 组应力计，实时采集围岩变形与应力数据，当监测到某区域位移速率超 0.1mm/天（预警阈值）时，系统自动触发补支护流程，确保洞室群稳定。

该技术使白鹤滩地下厂房成为全球规模最大、稳定性最优的水电地下洞室群，2022 年获评“中国岩石力学与工程学会示范工程”。

二、数字化技术实践：构建“智能大坝”全生命周期管理体系

（一）全生命周期智能监测系统：实现“大坝体检”实时化

白鹤滩创新部署“空天地”一体化监测网络，累计埋设各类传感器超 2 万套，形成覆盖坝体、地下洞室、边坡的全方位感知体系：

1. 坝体状态实时感知：坝体内部预埋 1.2 万支光纤光栅温度计（测温精度 ±0.1℃）、3000 组应变计（测量范围 -1000~1000μ ε），外部布置 100 余台 GNSS 位移监测站（定位精度 ±2mm），实时采集坝体温度、应力、变形数据，截至 2025 年累计采集数据超 10 亿条；

2. 边坡与地下洞室监测：在两岸边坡布置 500 台测斜仪（测量深度 30 米）、200 台渗压计（测量范围 0~1MPa），地下洞室安装 300 台收敛计（测量精度 $\pm 0.01\text{mm}$ ），实时监测边坡滑动风险与洞室围岩稳定，2023 年成功预警 1 次右岸边坡微小变形（位移量 3mm），及时采取补支护措施；

3. 数据集成与预警：监测数据通过 5G 专网传输至“白鹤滩智能运维平台”，平台采用大数据分析算法（如 LSTM 神经网络）构建坝体安全评价模型，当某指标超阈值（如坝体水平位移超 15mm）时，系统通过短信、APP 推送预警信息，预警响应时间 ≤ 10 分钟，较传统人工巡检效率提升 100 倍。

（二）数字孪生大坝：实现“虚拟仿真－实景管控”联动

2023 年白鹤滩建成全球首个 300 米级特高拱坝数字孪生系统，通过“物理大坝→数字建模→仿真分析→实景管控”的闭环，实现工程管理智能化：

1. 高保真数字建模：基于 BIM 技术构建坝体、地下厂房、机组的 1:1 三维模型，模型包含几何信息（如坝体混凝土浇筑分区）、物理属性（如混凝土弹性模量 34.5GPa）、施工信息（如每仓浇筑时间），模型精度达毫米级；

2. 实时仿真与预测：将监测数据（如坝体温度、水位）实时输入孪生模型，采用 ABAQUS 有限元软件仿真坝体应力与变形，可预测未来 30 天内坝体状态（如水位升至 825 米正常蓄水位时的应力分布），预测误差 $\leq 5\%$ ；

3. 高效巡检与运维：通过孪生系统实现“3 分钟全测点巡测”，替代传统 20 人班组 1 周的人工巡检工作量，每年节约运行成本约 400 万元；同时支持运维方案虚拟推演，如仿真泄洪洞闸门开启时的水流态，优化泄洪调度方案，减少水流对坝体的冲击。

（三）智能建造与运维技术：推动工程全流程数字化

1. 百万千瓦机组智能安装：

采用“地面整体组装＋整体吊装”工艺，将水轮机转轮（直径 8.6 米、重量 450 吨）在地面完成组装后，用国产 1200 吨桥式起重机一次性吊装就位，较传统分件吊装工期缩短 50%，安装精度达 0.1mm；

研发“机组状态监测系统”，在转轮、定子等关键部位布置 100 余组振动传感器（测量范围 0~50mm/s）、温度传感器（测量范围 -50~200℃），实时监测机组运行状态，通过 AI 算法预测设备故障（如轴承磨损预警准确率 95%），2023 年机组运行故障率为 0，优于“精品工程”标准。

2. “两票”智能管控系统：

2024 年上线自主研发的“工作票、操作票”智能管控系统，集成 9 大功能模块（工作票办理、操作票生成、钥匙管理等），实现全流程无纸化流转；

系统具备智能预警功能，可识别操作中的跳项、漏项（如倒闸操作漏拉隔离开关），实时触发预警并形成闭环管理，工作票平均办理时长从传统 30 分钟缩短至 5 分钟，业务效率提升 50%，每年节约纸张超 10 万张，2025 年获“水利电力行业质量技术创新一等奖”。

3. 智能通水与温控数字化：

基于 BIM 模型构建“智能通水管控平台”，关联坝体每仓混凝土与对应的冷却水管（总长超 1000 公里），平台根据混凝土温度自动调节通水参数（如某仓温度超 25℃时，通水流量从 30m³/h 增至 50m³/h）；

运维人员通过手机 APP 远程查看通水状态与温度曲线，无需现场巡检，温控管理效率提升 70%，2024 年实现全坝混凝土温控合格率 100%。

三、技术创新成果与行业价值

关键技术突破：白鹤滩实现 6 项“世界第一”，包括全球首台百万千瓦水轮发电机组、首座 300 米级全坝无裂缝拱坝、规模最大的地下洞室群等，研发的 800 兆帕高强钢、低热水泥等新材料，带动全产业链升级；

科研与专利成果：截至 2025 年，累计开展科研项目近 300 项，提交专利申请 1100 件（获国内授权 742 件、国际专利 2 件），“两票”智能管控系统、数字孪生大坝等技术被鉴定为“国际领先水平”；

行业示范意义：其设计理论与数字化技术已推广至乌东德、溪洛渡等水电站，为全球特高拱坝建设提供“中国方案”，2023 年成为“国家能源局智慧水电示范工程”，推动中国水电从“规模领先”向“技术引领”转型。

第九章 智慧运维与管理创新

新一代信息技术同水利水电行业深度融合的时候，正在对传统的工程运维管理模式造成深刻的影响。本章主要研究智慧运维与管理创新的前沿实践，探究怎样借助数字化、智能化的方法改善水利工程的管理水平，从而达成安全、高效、绿色发展的目的，给现代水利体系的创建赋予关键技术支撑。

第一节 智慧水库管理系统

智慧水库管理系统是智慧水利建设的重要部分，它把先进的传感、通信、计算技术融合起来，创建起一个可以全方位感知、智能分析、做出精准决策的综合性平台。该系统意在很好地解决传统水库管理中存在的诸多问题，全面提高水库的综合效益和安全保障能力。

一、水库运行智能调度

水库运行调度对于发挥水库功能起决定性的作用。随着复杂多变的内外部环境的出现，传统的调度方式已经落后了。智能调度系统依靠大数据分析、人工智能算法以及优化模型，达成从依靠经验到依靠数据的根本转变，目的在于探寻在多目标约束之下，最佳的水库调度方案。

（一）防洪、兴利、生态多目标优化调度

水库调度本质上属于复杂的多目标决策过程，防洪、供水、发电、航运、生态等目标之间存在着互相制约、此消彼长的关系。为了保证防洪安全，在汛前水库需要提前降水位腾出库容，但这必然会减少其兴利发电和供水的能力；同时，为了满足下游的生态基流要求，又需要保留一定的下泄流量，这又会与蓄水保供的目标产生冲突。传统调度主要依靠调度规程和人工经验，在瞬息万变的条件下很难找到全局最优解，经常顾此失彼。

智慧调度系统首先要建立水库水动力学模型和流域产汇流模型，将不同的目

标进行量化,进而建立多目标优化调度数学模型。该模型充分考虑了来水预报、需水过程、设备工况、政策法规等各方面的约束条件。使用遗传算法、粒子群算法、多目标差分进化算法等智能优化算法,对庞大的解空间进行搜索。计算结果不再只是单一的推荐方案,而是一个由一系列帕累托最优解所构成的集合,也就是调度方案簇。决策者依据自身不同的风险偏好以及重点,从该集合当中选取适当当下的方案,从而完成了从单方案决策到多方案选择的转变,最大程度上发挥出水库的综合效益。

（二）基于预报的预泄预蓄调度

基于预报的调度是提高水库主动管理能力、充分发挥水库潜力的重要技术。它把调度决策的时点从“事中响应”提前到“事前预判”,核心就是充分利用中长期和短临降雨、洪水预报信息,为水库调度争取宝贵的响应时间,从而实现对洪水过程的精细化调控。

该项技术的实现要依靠高精度的气象水文预报系统。通过卫星云图、多普勒雷达、地面雨量站和先进的数值天气预报模型,可以获取流域未来一段时间的降雨量、时空分布等预报产品。产品再输入到分布式水文模型中,进行滚动演算,得到未来水库的入库流量过程。

智慧调度系统在收到预报信息之后,就会对预报的确定性与不确定性做出评估。根据预报洪水,系统会计算出为安全应对洪水而需要的预泄库容,并制定详细的预泄方案,保证洪水到达之前水库水位降到安全线以下。预报干旱期时系统会提前制定蓄水计划,在保证防洪安全的前提下尽可能多地拦蓄水资源。预泄预蓄机制把不确定洪水、干旱风险转化成确定水库调度效益,极大地提高了水库在洪旱交替条件下的应对能力。

（三）应急调度方案的智能生成

面对超出预期的洪水、上游水库溃决、重要设施故障等突发极端事件时,应急调度决策时间短、信息量少,给决策者造成很大的心理和技术上的压力。智能生成应急调度方案,就是依靠计算机强大的算力和模型分析能力,在很短的时间内给出科学可靠的决策支持,以期最大限度地减少灾害损失。

应急调度方案的智能生成通常遵循以下流程:

1. 快速情景识别和推演,系统对实时数据流进行持续监测,当发现指标出现异常的时候,就会触发应急响应模块。它可以在瞬间辨识出突发事件类型、地点、

强度，并立刻启动多个洪水演进模型或者水库群联合调度模型。在数字孪生环境下，对所提出的应对措施（以及不做任何措施）所造成的影响，在数小时内乃至数天里所产生的最大淹没面积、最高水位、受影响人口等进行推演。

2. 方案生成与评价，系统内嵌的专家知识库以及预案库被激活。通过推演得出几十甚至上百个基本符合安全约束的应急调度方案，在数分钟内生成。这些方案所涉及的泄洪流量、闸门开启组合、非常溢洪道启用时机等都会不同。系统会使用综合评价模型，从大坝安全、下游防洪、人员转移窗口期、次生灾害风险等各方面对所有的备选方案进行快速的量化评估和排序。

3. 最佳方案推荐及可视化展示，系统会从所得分最高的几个方案中选择最好的一个或几个，并以二维、三维地理信息系统地图、动态图表等形式直接展示出来。可视化界面可以清楚地展示出各种方案的差别及其可能产生的结果，使决策人在巨大的压力下很快理解利弊并作出明智的选择。

二、库区安全管理

水库的安全不单是大坝本身的保护，还牵涉到广阔的库区。智慧化库区安全管理依靠创建空天地一体化监测网络 and 智能分析模型，可以实现各类风险隐患早发现、准判断、及时预警，从而构筑起一道坚固的安全屏障。

（一）库区地灾、水质监测与预警

库区地质灾害，主要是指库岸滑坡、崩塌等，属于威胁水库安全运行、危及周边居民生命财产安全的隐患。水库蓄水之后，水位的周期性涨落会使库岸岩土体的应力状态以及饱和度发生变化，极易发生失稳。传统的监测手段大多依靠人工巡查以及少量的监测点，存在覆盖范围小、反应迟缓等缺点。

智慧监测系统把多种技术手段融合起来，创建起无死角、全覆盖的监测网络。空间上合成孔径雷达干涉测量卫星遥感技术可以对整个库区实施毫米级的地表面形变扫描，从宏观层面找到可能出现变形区域的分布。地面上对已经识别出来的重点隐患区布置高精度全球导航卫星系统位移监测站、裂缝计、深层位移计、孔隙水压力计等自动化传感器进行全天候不间断的实时监测。

水质安全属于库区管理方面内容的一个重要组成部分。在库区重要断面、敏感水域设置在线水质监测站，对 pH 值、溶解氧、浊度、叶绿素、氨氮等主要指标进行实时监测。所有的地质灾害、水质监测数据都经由无线网络传送到管理

中心。

后台智能预警平台就是整个系统的“大脑”。它不但是数据的汇集点，而且是风险的分析器。平台使用时间序列分析、机器学习等算法给每一个监测点建立动态阈值模型。监测数据一旦出现加速变化，突破阈值或者表现出和历史失稳模式相同的特征时，系统就会自动触发分级预警机制，用短信、手机应用程序推送、声光报警等方式，第一时间向有关管理人员发送详细的数据报告和初步的风险评价，以获得应急处置的时间。

（二）库岸稳定性的智能评估

传统库岸稳定性评价多用极限平衡法、有限元法等确定性方法，地质模型是简化的，岩土力学参数是固定的，不能真实反映库岸在复杂环境因素作用下动态变化的过程。智能评价的方法打破了上面的限制，由静态变为动态。

智能评价的第一步就是创建精确的三维地质模型。采用综合地质勘察、钻孔数据、物探成果、无人机倾斜摄影技术等手段，建立可以反映库岸地形地貌、岩土层分布、断裂构造等信息的数字化三维模型。该模型为之后所有的分析打下了基础。接着把实时观测数据，即库水位，降雨量，地下水位，地表位移等，当作动态边界条件以及驱动力输入到这个三维模型里。系统集成先进的数值计算软件，可以对这些因素的作用下库岸内部应力场、渗流场、位移场的实时变化进行模拟。核心就是使用机器学习方法，尤其是神经网络来训练海损数值模拟和以往监测数据，使模型能自动地学会库岸稳定性复杂非线性规律。数据驱动与物理模型相结合的方式，使系统可以随时计算库岸各个点的安全系数，并预知在不同的库水位升降方案或者极端降雨的情况下，库岸稳定性会呈现出怎样的趋势，从而为防灾减灾措施的制定以及水库调度方案的优化提供定量的依据。

（三）无人机巡查与智能识别

无人机技术的出现，给水库库区的巡查工作带来了革命。与传统的徒步、乘船巡查相比，无人机具有机动灵活、覆盖面广、不受地形限制、巡查效率高、数据采集精度高等明显的优势，能够有效解决巡查盲区的问题，也大大降低了巡查人员的安全风险。

现代无人机巡查已经形成了一套完整的作业体系。无人机根据不同的任务需要可以携带多种传感器：高清可见光相机获取的正射影像、倾斜摄影数据可以生成库区的实景三维模型，直观展示地物地貌；激光雷达能够穿透部分植被，得到

高精度的数字高程模型，用来做微地貌分析、滑坡方量估算；多光谱、高光谱相机可以监测库岸植被生长状况，异常变化就是浅层地质灾害的前兆；红外热成像相机可以有效检测大坝或者岸坡的异常渗漏点。无人机可以预先设定航线，从而实现自动化、周期性的巡查作业，保证数据具有较好的可比性、一致性。

无人机巡查的智能化核心就是后端的数据处理与分析。只靠人工判读大量的影像、点云数据将耗费大量的人力物力。智能识别技术随之产生，它使用计算机视觉、深度学习算法对采集到的数据做自动分析。经过大量样本数据的训练，算法模型就可以自动识别出图像中大坝坝体表面裂缝、库岸危岩体、水面漂浮物、库区周边违章建筑、非法排污口、植被异常区等。系统自动识别的疑似隐患点在地图上会标注出来，并形成巡查报告，大大减轻了人工解译的负担，实现了从人眼看到现在机器看的转变，让巡查工作更加准确高效。

三、水资源高效利用

水库的一项主要任务就是作为水资源战略调控节点，实现水资源的时空优化配置。智慧管理系统用精准预测、精细调度、科学评价，提高每一滴水的利用效率及其社会、经济、生态效益，是解决水资源短缺问题的重要措施。

（一）灌区需水预测与精准配水

传统的灌溉方式大多是大水漫灌或者根据经验来制定轮灌制度，造成水资源浪费严重。实现节水增效的核心就是将“按经验供水”变为“按需供水”。智慧水库管理系统延伸到灌区，创建“天-空-地”一体化的灌区信息感知网络，从而可以对作物需水量进行准确的预测。天基遥感卫星可以宏观监测作物长势、覆盖度、土壤墒情，无人机搭载多光谱相机做低空精细观测，得到更高分辨率的数据，地面田间气象站、土壤湿度传感器等可以提供实时点位验证信息。

多源数据输入作物需水预测模型，根据作物生理学、土壤学、气象学原理，对灌区每一块地未来一段时间所需灌溉水量做动态计算。预测的结果不再是单一的数字，而是每一个灌溉区分的需水地图。根据这张地图，配水系统制定出最优的输配水方案，利用远程自动控制系统精确控制干、支、斗渠各级闸门的开启时间及开度，将适量的水在最合适的时候送到最需要的地方。精确的配水方式大大减少输水过程中渗漏、蒸发损失、田间深层渗漏、地表径流，提高灌溉水利用率，实现农业生产节水、增产、增效。

（二）水量调度与水权交易管理

在水资源日趋紧张的情况下，把水资源看成可量化、可配置、可交易的资产，成为推动水资源高效利用的市场化手段。智慧管理系统给水量调度、水权交易提供强有力的技术平台和管理工具。系统首先对流域或者区域内的可用水资源总量进行准确的核算，然后根据相关法规和用水定额，将水权以“初始水权”的形式分配给不同的用水户，即农业灌区、工业企业、城镇生活等。

系统主要的功能是对用水过程进行精准的监督管理。在各级取水口安装智能水表或流量计，可实现每个水权用户取水量的实时、自动计量。所有的计量数据都会实时上传到云平台，从而形成一个公开、透明、不可更改的用水台账。该台账是水量调度、水权交易的基础。当用水户实际用水量接近其水权配额的时候，系统会及时发出预警。

更重要的是该平台可以实现水权交易的线上操作。当某个用户用节水措施节约了部分水权配额之后，他可以在交易平台上挂牌出售所节余的水量。而另外一个因为发展需要或者遇到特殊干旱而用水紧张的用户，就可以在平台上购买水权来满足自己的临时性或者永久性的用水需求。系统平台可以保证交易的合法、安全、可追溯，有时会用区块链技术提高交易的信用度。系统内部的水资源模型会对每一笔交易进行验证，并评价它对下游、环境等造成的影响，保证交易活动不会侵害第三方利益或者公共利益，依靠市场上的“无形之手”使水资源流向效率更高、经济效益更大的领域。

（三）节水效益评估与考核

建立科学的节水效益评价与考核体系，是保证节水成果、促进节水工作不断深入发展的根本保证。智慧管理系统给它提供一个以数据为基础的评判和考核系统。它改变了以往依靠统计上报、抽样调查的评估方式，转而实行对全部数据的实时、动态、细密的评价。

系统先创建起科学合理的节水效益评价指标体系，这个体系既有宏观层面的区域万元国内生产总值用水量、万元工业增加值用水量、亩均灌溉用水量等，又有微观层面的管网漏损率、灌溉水有效利用系数、再生水回用率等。每一个指标所需要的基础数据都会自动从传感器网络、计量设备、业务管理系统中采集汇总。系统依靠内置的计算模型，可以定时或者实时生成各种节水效益评价报告，采用仪表盘、趋势图、对比分析等方式进行展示，清楚地反映出节水工作推进情况及

取得的成果。这些客观、准确的评价结果，给政府部门对下级单位或者用水户实施绩效考核赋予了可信的参照，可以将节水成效同水价调整、财政奖励、项目审批等政策工具挂钩，形成强有力的激励与约束机制，进而创建起闭环管理体系，持续推动全社会节水意识和行动的提升。

表 9-1 智能水库管理系统主要功能及效益对比表

功能模块	传统管理模式	智能管理模式	显著效益
水库调度	经验主导，规程导向，多目标协调难	数据驱动，智能算法，多方案择优，洪旱应对精准	提高水资源配置效率，增强防洪抗旱能力，降低决策风险
库区安全	人工巡查，少量监测点，响应滞后，盲区多	空天地一体化监测，智能识别预警，动态评估	早期发现隐患，提升预警精度，保障工程与人员安全
水资源利用	粗放灌溉，经验配水，水权管理弱化	需水预测，精准配水，水权交易平台，效益评估科学	节约用水，提高用水效率，优化水资源配置，促进可持续发展
应急响应	依靠人工判断，信息滞后，决策仓促	情景推演，智能生成方案，可视化辅助决策	缩短响应时间，减少灾害损失，提升应对极端事件能力
评估考核	统计上报，抽样调查，评估滞后且不全面	实时数据驱动，动态精细化评价，客观公正	建立有效激励约束机制，推动节水工作持续深化

从上表可知，智能水库管理系统在水库调度、库区安全、水资源利用、应急响应、评估考核等各个主要功能模块上比传统管理模式有明显的优势。它依靠技术创新和模式革新，达成管理精细化、决策科学化、运行智能化，给现代水利工程高效、安全、可持续发展赋予强大助力。

第二节 水电站智能运维技术

一、设备状态监测与预测性维护

设备状态监测以及预测性维护属于智能运维的基础。依靠先进的传感技术以及数据分析模型，运维模式由以前传统的计划性检修转为预测性检修，显著提升了设备的可靠性以及运维资源的利用率，对于保证机组长久安全稳定的运行有着重要的意义。

（一）机组振动、摆度、温度在线监测

水轮发电机组是水电站的心脏，它的工作好坏直接影响到电站的安全和效益。

振动、摆度、温度是反映机组运行状况最重要的三个物理量。在机组的导轴承、推力轴承、机架、顶盖等关键部位布置高精度电涡流传感器、加速度传感器、光纤光栅温度传感器等，对这些参数进行 24 小时不间断的在线监测。传感器采集的数据经过高速数据采集系统汇聚，就形成了机组运行姿态的“心电图”。

后台智能分析系统对大量的监测数据做实时的处理和深度挖掘。利用傅里叶变换、小波分析等信号处理方法，可以对复杂的振动信号进行处理，从中提取转频、倍频、谐波等特征频率，从而对转子不平衡、转子不对中、基础松动、动静碰磨等常见的故障作出早期诊断。温度数据的时序分析可以预警出轴承过热、冷却系统故障、绕组绝缘老化的状况。系统创建机组全生命周期健康档案，把当前状况同历史数据、正常模型展开对比。只要发现任何一个偏离正常范围的小异常，就会立刻向运维人员发出警报，为故障处理争取最佳时机，防止故障扩散、非计划停机，保证电力生产连续。

（二）基于油液分析的设备磨损监测

如果说振动和温度是设备的外在表现，那么油液就是设备的血液，其中包含着设备健康状况的丰富信息。水轮发电机组的推力轴承、导轴承、主变压器等设备所用润滑油、绝缘油的理化性能变化，是判断这些设备内部有无磨损、老化或潜在故障的重要依据。传统的离线取样化验耗时较长、时效性差，不能满足精细化运维的要求。

智能运维技术使用了油液在线监测系统，该系统由多种微型传感器组成，能实时监测油液中的各项指标。系统可以对润滑油的黏度、水分含量、介电常数、金属磨粒数量、尺寸、形貌进行实时检测。金属磨粒的数量增多，特别是某类特定尺寸或者材质颗粒的增多，可以指向轴瓦、齿轮等零件正在发生异常磨损。对于变压器绝缘油，可以采用在线溶解气体分析技术，实时检测氢气、甲烷、乙烷、乙炔等特征气体的浓度和产气速率，用“三比值法”等诊断规则判断变压器是否存在过热、电晕放电或电弧放电等潜在故障。实时数据同机组运行工况数据进行关联分析，能更精准的找到故障源头，给精准维护提供直接的证据支持。

表 9-2 智能运维常用监测技术与分析方法

监测对象 / 技术	监测内容 / 传感器类型	关键分析方法	典型故障预警
振动	电涡流传感器、加速度传感器	傅里叶变换、小波分析	转子不平衡、不对中、动静碰磨
摆度	电涡流传感器、激光传感器	时域、频域分析	轴承间隙过大、不对中
温度	光纤光栅温度传感器、红外热像仪	时序分析、趋势预测	轴承过热、绕组绝缘老化、冷却异常
润滑油	微型黏度传感器、水分传感器、介电常数传感器	油液理化指标变化、磨粒计数与形貌分析	轴承磨损、齿轮磨损、油品劣化
绝缘油	在线溶解气体分析系统	溶解气体浓度及产气速率、“三比值法”	变压器过热、电晕放电、局部放电

从上表可知，智能运维系统利用多方面、高精度的监测技术以及专业的分析手段，可以对水电站设备运行状况进行全面的了解，并且能够发出早期预警。

（三）设备剩余寿命预测与维护决策

设备状态监测的目的并不仅仅是找出故障，更重要的是对未来情况做出科学预测，即准确估计设备的剩余寿命，找到最合适的维护方式。这是预测性维护，最大化设备资产价值最后的目标，也是智能运维技术最高级。传统的定期维修方式容易造成过度维修或者维修不足，造成资源浪费或者安全隐患。

设备剩余寿命预测属于一个复杂的多物理场、多尺度耦合问题。现代智能运维系统一般会综合多种模型来解决。首先就是基于物理的退化模型，用疲劳累积损伤理论建立关键部件的寿命模型。其次是利用数据的统计模型、人工智能模型，通过对大量的历史监测数据和运维记录进行分析，用支持向量机、神经网络、长短期记忆网络等机器学习算法，建立从监测数据到剩余寿命的非线性映射关系。这些模型可以学习到设备老化规律，根据最新的运行数据对预测结果进行实时的调整。预测结果不再只是确定的时刻，而是带有置信度的概率分布，给维护决策提供更多的风险信息。根据 RUL 预测结果，运维决策支持系统可以使用运筹学和优化算法，综合考虑维修成本、备件库存、停机损失、安全风险等各方面因素，给出最合理的维护建议，使经济性与安全性达到最佳。

二、智能巡检与操作

在对设备状态进行准确的感知与预测之后，智能运维的又一重要环节就是怎

样高效、准确地完成现场巡检和操作任务。传统的手工巡检、手工操作等办法效率低、劳动强度大、受人为因素影响大。智能巡检和操作技术依靠机器人、增强现实等前沿科技,正在慢慢改变水电站现场作业的方式。

(一) 机器人替代人工巡检

水电站厂房、大坝廊道、开关站等地方环境复杂、空间大、设备多,部分区域存在高电压、强噪声等安全风险。完全依靠人工定时定点巡检,不但耗时耗力,而且不能保证巡检质量的一致性和全面性。智能巡检机器人出现之后,给这些问题提供了一条可行的途径。

这些机器人一般都装有激光雷达、惯性导航等设备,可以完成厘米级的定位、自动规划路线,可以在复杂的环境里自如地行走并避开障碍物。它们像移动的“感官中枢”,装有各种检测仪器

1. 高清可见光摄像机:能自动识别仪表盘读数、开关位置、油位计液位,并用图像识别算法判断其是否正常。

2. 红外热像仪:对开关柜、电缆接头、变压器等设备进行非接触测温,迅速找到由于接触不良或者过载造成的异常发热点,有效防止火灾事故的发生。

3. 声音采集与分析系统:拾取设备运行时产生的声音,将其与正常声纹库比对,从而找到轴承异响、气体泄漏等听觉上的异常。

4. 气体传感器:检测特定区域的 SF₆ 等有害气体浓度,保障环境安全。

巡检机器人可以按照事先设定的任务、路径实现 7x24 小时不间断的自主巡检,将采集到的海量数据及时传送到集控中心。后台系统对数据进行自动分析、比对、诊断之后,就会产生详细的巡检报告,把发现的缺陷分类、告警,并且自动派发工单,从而形成从“智能巡检”到“智能派单”的闭环管理。运维人员就可以从低价值的重复性劳动中解放出来,从事高价值的分析决策工作。

(二) 增强现实 / 虚拟现实辅助远程操作与检修

水电站设备检修及复杂操作需要有经验的专家现场指导,但是专家数量较少,往返现场耗时较长。增强现实和虚拟现实技术使得专家的知识可以突破时空限制,用新的方式远程赋能。该技术的关键就是创建起一个把现场和远端联系起来,把物理世界和数字世界融合起来的协同工作环境。

现场初级工程师或者技术人员佩戴 AR 智能眼镜,眼镜的摄像头把现场第一视角的画面实时传输给千里之外的专家。专家身临其境地可以在电脑或者平板上

查看设备的细节。现场人员遇到问题的时候,专家可以口头指导也可以动手操作,在共享的视频画面上进行三维标注、圈点划线、发送图纸或者三维模型。这些数字信息会实时、准确地叠加在在现场人员的 AR 眼镜视窗中,也会精确地显示在物理设备上。手把手式远程指导大大提高复杂故障处理的效率和准确性,减少设备停机时间。用 AR 技术,设备的操作规程、历史维修记录等可以直接投射在设备旁边,给现场工作人员提供即时的信息帮助,从而降低错误操作的可能性。

(三) 一键顺控与智能开票

水电站机组的开停机、工况转换等过程,牵涉到断路器、隔离开关、阀门等成百上千个设备对象的一系列严格有序的操作。传统的操作模式依靠运行人员按规程逐项唱票、手工执行,过程繁琐,时间长,而且完全依赖人的熟练程度以及精神状态,有误操作的危险。一键顺控技术就是预先编写并固化标准操作流程,把复杂的序列操作简化成一个按钮,达到高度自动化。

操作人员在确认启动条件满足后只需在监控系统上点击“启动”按钮,顺控系统就会按照预设的逻辑和安全联锁条件自动、依次向各个设备发送操作指令,实时检测每个步骤的反馈信号,确认操作成功之后再进行下一步。整个过程不需要人工干预,机组启动时间从原来的几十分钟缩短到几分钟,从根本上杜绝了人为因素造成的操作顺序错误或者遗漏。与之相配套的智能开票系统,把传统的手工填写的操作票、工作票流程电子化、智能化。系统根据任务类型生成符合安全规程的标准票据,用流程引擎完成在线流转、审批、执行,工作效率高,流程更规范。

三、运维知识管理与专家系统

水电站长期安全稳定的正常运行,单靠先进的设备、完善的自动化系统是远远不够的,更离不开经验丰富有技术的专业技术人员。智能运维体系依靠创建系统化的知识管理平台以及智能化的专家系统,把隐性、零散的个人经验变成显性、可复用的组织财富,给运维决策赋予智慧支撑。

(一) 设备故障知识库与案例库

水电站几十年来积累了大量的设备技术档案、运行日志、检修记录、故障报告以及师傅们口传心授的宝贵经验。这些知识是解决问题的“金钥匙”,但是它们分散地存放在不同的文档、系统甚至个人的记忆里,不能被高效地检索和利用。

由于资深专家退休而造成的知识流失风险也越来越大。

创建设备故障知识库、案例库，是解决此问题的一种方法。本工作首先要对历史数据、文档进行整理并数字化。使用自然语言处理等技术可以从非结构化的文本中提取出设备、故障现象、原因、处理方法等信息。然后利用知识图谱等技术把零散的知识点结构化关联起来，得到一个描述“设备、故障、原因、机理、对策”之间复杂关系的知识网络。该知识库不单单是静态的数据库，更是一个动态演化着的生态系统，每一次新的故障处理经验都会及时地补充进去，使它不断丰富和完善。内容充实、结构清晰的知识库和案例库，为后面实现故障智能诊断、运维人员培训提供基础。

（二）故障诊断专家系统

故障诊断专家系统属于运维知识库的智能化运用，其目的在于模拟人的领域专家思维过程，为运行人员在处理复杂故障的时候给予决策上的帮助。当监控系统发出告警或者运行人员发现异常现象的时候，它就开始工作，融合多种人工智能技术实现精准高效的诊断。

系统先引导用户输入或者自动采集告警类型、监测数据异常曲线、现场观察等有关故障现象信息。之后的推理过程就是基于规则的推理，即对于因果关系明确的逻辑清晰的故障可以使用专家规则，从知识库中找出和结论的形式相同的、条件形式也存在的专家规则来完成推理。对更复杂的、多因素耦合的故障，系统采用案例推理的方式，在案例库中找到与当前问题最相似的以前发生的故障案例，给出参考的解决办法。近些年来，随着机器学习技术的发展，专家系统也越来越多地包含了数据驱动的模式。经过对历史故障数据的深度学习之后，系统就形成了一个从“数据特征”到“故障类型”的分类模型，即便没有明确的规则，也能依靠数据模式来判定可能的故障原因。

最终专家系统会给出一个或者几个概率最高的故障诊断结论，并且给出推理过程和置信度评价。同时还会根据诊断结果从知识库中找到相关推荐检查步骤、修复方案和安全注意事项等。大大减少了个人经验对运维人员的影响，使年轻运维人员也能像资深专家那样去思考问题、解决问题，从而大幅度地缩短了故障排查时间，提高了故障排查的科学性以及准确性。

（三）运维人员的虚拟现实 / 增强现实培训

传统的运维人员培训模式大多采用课堂授课、师傅带徒弟的方式，理论与实

践的结合不紧密。特别是对高风险、不常见的应急操作、设备解体检修等很难给以足够的实操机会。虚拟现实、增强现实技术给运维培训带来沉浸式、交互式、安全高效的新体验。

VR 培训系统通过高保真的三维数字孪生模型来模拟物理电站，为学员构建一个虚拟操作环境。学员戴上 VR 头盔，在虚拟的厂房中随意游览、学习设备布置、工艺流程等，在虚拟化的设备上面拆装、装配、反复训练修理技巧，熟悉机体的构造。最核心的一点就是学员可以模拟处理设备突发故障、火灾、洪水等极端应急事件，在绝对安全的环境下锻炼应急处置能力及心理素质。演练即实战的培训方式，使学员掌握技能的速度大大加快，处理复杂问题的信心也明显增强。AR 培训更侧重数字信息和物理世界的结合。学员在现场实际操作时，AR 眼镜镜片上会显示设备内部结构图、重要参数、操作步骤动态演示等内容，引导学员按部就班地完成操作，实现了情景化在职学习，减少了理论知识到实际技能转化的距离。

第三节 设备状态监测与诊断

水利水电工程设备状态监测与诊断，对保证工程安全稳定运行、提高运维效率、实现智能化管理起着非常重要的作用。依靠先进的传感技术、数据采集系统、智能分析算法等可以实现重要设备的全天候全方位健康状态监测，从而将传统的被动检修转变为预测性维护，给工程的全生命周期管理提供强有力的数据支持。

一、旋转机械状态监测

旋转机械是水利水电工程中能量转换和输送的主要设备，它的运行状态直接影响到整个系统是否可靠、经济。对其做精细化的状态监测，可以及时发现潜在故障，有效避免非计划停机，对于保证电力生产的连续性、安全性具有举足轻重的作用。

（一）水轮发电机组状态监测

水轮发电机组是水电站的“心脏”，结构复杂、价值高、运行工况变化多。对机组进行状态监测是一项综合性系统工程，目的就是实时采集机组运行参数的细微变化，提前发出异常预警。监测的内容涉及机械、电气、水力等多方面，主

要的监测对象为机组振动、摆度、温度、压力、定子绕组局部放电等。在导轴承、推力轴承、机架、顶盖等重要部位安装高精度振动和位移传感器，可以实时得到机组振动烈度及轴心轨迹。使用频谱分析技术可以准确的找到不平衡、不对中、基础松动等机械故障。

数字化技术的使用大大加深并拓宽了监测能力。现代监测系统不再只是一个单一的数据采集单元，它是一个集数据采集、信号处理、特征提取、状态评价、故障诊断为一体的综合性平台。该系统可以对大量的监测数据进行实时处理，用快速傅里叶变换、小波分析等先进的算法，从复杂的振动信号中准确地提取出与某种故障有关的特征频率。转轮叶片出口处涡带或者卡门涡街会引起某一个水力振动频率的出现，发电机转子绕组匝间短路会在电磁振动信号中出现一定的谐波分量。

根据历史数据和实时数据，用机器学习或者深度学习的方法建立机组健康状态评价模型。这些模型可以自行学习机组正常运行状态下的规律，当实时运行参数偏离正常基线的时候，系统就会自动识别出异常，并根据故障特征库进行智能诊断，从而给出可能的故障原因、位置和严重程度。依靠数据驱动的预测性维护手段，运维人员可以事先安排检修任务，大幅度削减运维开销，最大程度地提高机组的可用率。

（二）电动机、泵类设备状态监测

水利水电工程中的各种电动机、泵组等辅助设备，完成排水、供水、冷却、润滑等工作，辅助设备可靠运行是主设备正常运转的前提。由于辅机数量多、分布广，对它们进行有效的状态监测，是保证电站整体安全运行不可缺少的一环。本类设备常见故障有轴承磨损、转子不平衡、绕组绝缘老化、基础松动、泵的气蚀、泄漏等。

对这些设备进行监测，一般采用振动、温度监测。在电动机、泵的关键轴承处装设加速度传感器和温度传感器，可对振动幅值、温升进行实时监测。振动信号的频谱分析可以很好地诊断出轴承内外圈、滚动体故障以及转子的动静不平衡问题。电动机电流特征分析属于一种非侵入式的电气状态监测技术，对电动机定子电流频谱进行分析，可诊断出转子断条、气隙不均、绕组短路等电气和机械故障，具有成本低、易于实现的优势。泵类设备除了振动检测外还要观测进出口压力、流量、效率等水力参数，根据水力参数的变化来判断泵是否发生气蚀、堵塞、

内部磨损等情况。

（三）齿轮箱、轴承状态监测

齿轮箱、轴承是旋转机械传递动力、支撑转动部件的重要部件，也是最容易发生磨损、疲劳失效的薄弱环节。由于它们长期处于高速、重载的恶劣工况中，因此对它们的运行状态进行监测就显得尤为重要，对于预防灾难性事故的发生也具有十分重要的意义。目前对于这两类部件的监测技术已经比较成熟，形成了以振动分析、油液分析和声发射技术为主的综合监测体系。

齿轮箱和轴承状态监测技术对比表中，数字化监测系统把多种技术手段融合起来，对齿轮箱和轴承的健康状况做了全方位的评定。

表 9-3 齿轮箱与轴承状态监测技术对比表

监测技术	监测对象	主要诊断信息	优势 / 特点
振动分析	齿轮、轴承	断齿、点蚀、磨损，滚道 / 滚动体缺陷，不平衡	定位故障精准，应用广泛
油液分析	润滑油、内部机件	金属磨屑、油品理化指标，磨损程度及部位	直接反映磨损状态，评估润滑性能
声发射技术	材料内部	微裂纹产生与扩展	极早期预警，灵敏度高

1. 振动分析已经成为齿轮、轴承故障诊断的主要方法。当齿轮出现断齿、点蚀或磨损时，其振动信号里会有转频、啮合频率的调制现象。当轴承滚道或者滚动体出现缺陷的时候，就会产生一定的冲击脉冲。采用包络解调、倒频谱分析等高阶信号处理手段，可以从杂乱的噪声当中提取出微小的故障特征信号。

2. 油液分析可以提供另一种重要的诊断信息。对润滑油中的金属磨屑浓度、尺寸、成分进行在线或者离线检测，可以直接反映内部机件的磨损情况以及磨损的具体部位。检测油液的黏度、水分含量、酸值等理化指标，可以对润滑油自身的性能状况进行评价，保证润滑系统正常工作。

3. 声发射技术属于一种有效的补充手段，它对于材料内部微裂纹的出现和发展有着极高的灵敏度，可以比振动分析更早地找到正在萌芽阶段的疲劳裂纹，给早期预警赋予了强有力的手段。

将这些监测数据融合分析，并将设备实际运行状况（转速、负载等）融合进来，就可以得到更加准确的故障诊断模型和剩余使用寿命预估模型。磨屑浓度增长速率、振动特征频率幅值变化趋势等可以用来判断轴承何时进入失效阶段，给制定科学的维修更换计划提供决策依据。

二、电气设备状态监测

电气设备是水电站及输变电系统的神经中枢和血管,担负着电能产生、转换、传输、分配的任务。因为设备长时间在高电压、大电流的条件下工作,它的绝缘和机械性能就会逐渐变坏。因此,对这些设备做有效的状态监测,可以防止大面积停电事故的发生,保证电网安全稳定运行。

(一) 变压器、气体绝缘组合电器等设备状态监测

主变压器和气体绝缘组合电器都属于电网中十分重要的设备,一旦出现故障,维修的费用会比较高,而且会造成大范围的停电。对其监测的重点就是检测绝缘状态,找出放电性缺陷。变压器状态监测的主要技术就是油中溶解气体分析。变压器发生过热或者放电故障的时候,绝缘油、绝缘纸分解会生成氢气、甲烷、乙炔等特征气体。利用在线色谱分析仪测气体成分和浓度,用三比值法等诊断方法来判定故障的性质和严重性。变压器绕组变形一般用在线频率响应分析法或者振动分析法监测;套管一般通过在线测量介质损耗角、电容量来判断套管绝缘是否有受潮老化。

由于气体绝缘组合电器的全封闭、结构紧凑的特点,内部状态不能直接观察,因此,对其状态监测就显得十分重要。其主要检测技术为特高频法局部放电检测。当气体绝缘组合电器的内部存在自由金属颗粒、绝缘子表面污秽或者连接不良等缺陷时,在高电场的作用下就会发生局部放电的现象,并且产生频率在几百兆赫兹到几吉赫兹之间的电磁波。在气体绝缘组合电器的壳体上安装特高频传感器,可以很好地获取上述信号,并据此根据信号的幅值、相位和时间域特征对放电缺陷进行定位以及故障种类进行判定。同时对气体绝缘组合电器内部 SF₆ 气体的压力、微水含量、纯度进行在线监测也是非常重要的,这些参数会直接影响到气体绝缘组合电器的绝缘和灭弧性能。

(二) 电缆、开关设备状态监测

高压电缆、开关设备在电力系统中数量最多、分布最广,运行环境恶劣,故障频发。电缆状态监测主要是针对电缆绝缘介质的。电缆长期埋设在地下或者敷设在电缆沟里,会受到潮湿腐蚀和外力破坏的影响,使绝缘性能降低。在线局部放电监测是判断电缆绝缘状况最有效的方法之一,把传感器装在电缆的终端或者接头处,可以检测出绝缘体中微小缺陷产生的放电信号,实现早期预警。分布式

光纤测温系统可以对电缆全长进行实时的温度分布监测，及时发现由接头接触不良或者负载不均造成的局部过热点，防止热击穿事故的发生。

开关设备如断路器、隔离开关的可靠性是由机械操作机构、电气灭弧系统两方面来共同决定的。对其状态监测主要是机械特性和电气特性的在线监测。通过测量断路器分合闸线圈电流波形、储能电机工作时间、操作机构行程和速度等来判断机械系统有无卡涩、磨损、储能不足等故障。同时在线监测断路器真空灭弧室的真空度，间接检测触头接触电阻、燃弧时间，可以评价其电气开断性能，保证故障发生时能可靠地切断电流。

（三）绝缘状态在线监测与评估

绝缘性能对高压电气设备极为重要，绝缘状态在线监测和评价已经成为电气设备状态监测技术体系的基础。它被广泛地应用在变压器、气体绝缘组合电器、电缆、电机等各种设备上，目的是对绝缘材料的健康状况进行实时掌握，对绝缘老化程度进行量化，并预测其剩余寿命。目前该项技术由单参数检测向多信息融合综合评价。

传统的绝缘监测方法，定时的介质损耗角测量或者绝缘电阻检测，存在着检测周期长、不能实时反映实际运行状态下绝缘状况的缺点。在线监测技术依靠各种传感器可以实现绝缘重要参数的连续检测。局部放电监测就是给电气设备做个听诊的工作，可以发现绝缘体内早期出现的小故障产生的微弱信号。介质损耗角、泄漏电流的在线监测可以反映绝缘整体受潮、老化的情况。

由于数字化技术的深入发展，绝缘状态评价越来越智能化、准确化。采用先进的信号处理技术从强电磁干扰中提取出微弱的局部放电信号，用模式识别算法对 PRPD 图谱进行分析，可以区分出内部气隙放电、沿面放电、电晕放电等不同的类型，为故障诊断提供有力的依据。

多物理量融合评价模型现在已经成为研究的热点方向。绝缘老化是电、热、机械等各方面应力共同作用的结果。对局部放电量、设备温度、负载电流、环境湿度等各个方面的在线监测数据进行综合分析，采用模糊逻辑、神经网络或者专家系统等人工智能的方法，就可以得到一个更加全面的绝缘健康状态指数。该指数能体现目前的绝缘状况，根据设备设计寿命和历史运行数据，用老化动力学模型预测绝缘退化的发展趋向和剩余寿命，从而给设备的大修、技改或者退役赋予科学依据。

三、结构设备状态监测

水利水电工程中的大坝、压力钢管、闸门等结构设备是担负挡水、泄洪、输水功能的重要基础设施。它们长久以来要经受水压力、温度变化、材料老化等种种考验，结构完整性直接关系到整个工程的安全。因此对这些大型结构设备进行长期、系统的状态监测就显得格外重要。

（一）压力钢管、闸门状态监测

压力钢管、大型闸门是水电站主要的过流金属构件，承受较大的动、静水压力和复杂的应力状况。对它的状态监测重点是应力应变、结构变形、材料疲劳、腐蚀。在压力钢管的关键焊缝、应力集中部位、闸门门叶的重要受力杆件上粘贴或者焊接应变计，可以实时监测结构在各种运行工况下应力分布的情况，并与设计计算值进行比较，检验结构的安全性。利用全站仪、GPS、激光扫描或者分布式光纤传感技术，可以对钢管、闸门的宏观变形和位移做高精度的测量，从而能够及时地发现过度变形或者不均匀沉降等异常状况。

声发射监测技术对大型金属结构的健康监测有独特之处。当结构内部微小的裂纹受到应力的作用而扩展时，就会发出高频的弹性波。在结构表面布置声发射传感器阵列，采集信号，根据信号到达各个传感器的时间差来确定裂纹源的位置。该技术可以对裂纹发展的早期发出预警，给采取补救措施留出宝贵的时间。把定期超声波或射线探伤技术相结合，就形成了一个完整的裂纹检测评价体系。

数字孪生体等代表的各种数字化技术，可以对压力钢管、闸门的状态进行评价。通过将设计模型、制造信息、实时监测数据以及数值仿真模型整合在一起，就可以得到一个和物理实体同步映射的虚拟模型。在该数字孪生体中可以直观的展示各个监测点的实时数据、结构应力云图，也可以模拟出地震、洪水等极端工况下结构的响应，评估结构的极限承载能力，预测疲劳损伤的累积过程，从而达到对结构健康状态全面掌控、前瞻性管理的目的。

（二）启闭机状态监测

启闭机是专门用来操作闸门的机械设备，启闭机的安全可靠直接影响水工建筑物的正常运行。启闭机监测主要是对启闭机的动力系统、传动系统、承载系统进行监测。对电动启闭机进行主机电流、电压、温度、振动的监测，来评估其电气和机械健康情况。液压启闭机还要检测油压、油位、油温、油质、油缸的

位移、密封等状况，及时发现泄漏、油质变坏等问题。

传动系统即减速箱、开式齿轮、钢丝绳或者螺杆等，为检测的重点难点。减速箱的检测可以采用上述振动分析、油液分析等技术。钢丝绳可用漏磁探伤、视觉检测等手段做在线检测，评判剩余承载能力，判定有无断丝，锈蚀，磨损等状况。启闭过程中的荷载、行程、同步性是评价启闭机工作性能的指标。在承重部件上安装力传感器，在卷筒或者活塞杆上安装位移传感器，记录启闭过程中载荷-位移曲线，并与正常曲线对比来判断有无卡阻、超载、两侧不同步等故障。

（三）金属结构腐蚀与疲劳监测

腐蚀、疲劳是造成水工金属结构长久使用寿命的两个主要因素。水下或者干湿交替区的金属结构，比如拦污栅、闸门埋件、钢衬里等，很容易发生严重的电化学腐蚀。传统的腐蚀监测方法，挂片法等，存在着检测周期长、不能实时反映腐蚀速率变化的缺点。现代在线腐蚀监测技术有电阻探针法、电感探针法、基于电化学原理的线性极化电阻法、电化学噪声法等，在结构上安装专用传感器后，可以实时测量金属的腐蚀速率，也可以评价腐蚀防护措施（如涂层、阴极保护）的效果。

疲劳损伤具有累积性，是结构在变动载荷下，由于循环应力的作用而产生的。疲劳检测一般采用间接评价的方法，挑战很大。其基本思想就是记录结构实际所受的应力历史，从而得到累计疲劳损伤。在结构关键热点处即应力集中最大的地方装上应变计，连续采集应力随时间的变化情况。再利用雨流计数法等算法对随机应力历程进行统计处理，得到不同应力幅值下的循环次数。根据材料的 S-N 曲线和 Palmgren-Miner 线性累积损伤准则来计算结构点的疲劳损伤度，进而预测该点的剩余疲劳寿命。

无人机、水下机器人等智能巡检设备的应用给腐蚀、疲劳监测提供了新的角度。装配了高清相机、红外热像仪或无损检测设备的机器人，可以代替人手进入危险或难以到达的地方，对表面进行细致的检查，找到涂层破损、锈迹、裂纹等宏观缺陷。视觉信息和传感器监测数据相结合，就形成了宏观到微观、表象到机理的立体化监测网络，给水工金属结构的健康管理、寿命评估赋予了前所未有的数据深度和广度。

第四节 运维决策支持系统

水利水电工程进入长期运行阶段以后，运维决策支持系统依靠整合现代信息技术和数据智能分析，给工程管理赋予科学支撑，促使工程管理由经验驱动向数据驱动发生根本性改变，这就是实现工程智慧化运维的关键所在。

一、基于大数据的决策支持

大数据技术给水利水电工程运维带来了革命性的变化。它可以把工程全生命周期内产生的大量信息汇集起来，依靠先进的算法来认识设备的状态，预估设备的运行趋向，改善资源调配情况，进而大大加强决策的科学性与前瞻性，是智慧运维不可缺少的重要部分。

（一）运维数据融合与关联分析

水利水电工程运维数据来源多样，有结构安全监测数据、机电设备运行数据、人工巡检记录数据、气象水文信息数据等。这些数据具有典型的多源异构性，不同来源、不同格式、不同标准、不同采集频率、不同存储方式，常常会造成数据孤岛。有效融合分散的数据，是发挥数据综合价值、支持智能决策的前提，也是大数据分析的主要技术难题。

数据融合的核心就是创建起统一的数据治理体系和技术架构。实践当中经常用到数据湖或者主题数据库技术，借助 ETL 工具（数据抽取，转换，加载），对原始数据实施清洗，去噪，格式统一以及标准化处理，从而消除数据之间的壁垒。在此基础上，建立工程全局统一的数据模型，把各个业务系统、各个设备部件的数据整合到一起形成一个平台，得到完整、一致、准确的数据资产，为后面深度分析打下坚实的基础。

数据融合之后，关联分析就是发现数据之间存在的隐含的、有价值的关系。系统使用关联规则挖掘、相关性分析、时序分析等算法，可以发现过去只有凭借经验才能察觉到的模式。可以找到某一水文条件下，机组振动异常的内在联系，也可以分析上游来沙量变化对水轮机磨损率的影响。量化关系给故障原因诊断、风险提前预警和运行策略改进赋予了新的、依靠数据的深刻认识。

（二）运维成本分析与优化

传统的运维成本管理依靠事后统计、财务报表，时效性差、颗粒度粗，不能

精准地指导成本控制。基于大数据的成本分析，可以采集运维活动中涉及到的各种成本数据，比如备品备件消耗、维修人工工时、设备能耗、外委服务费用等等，创建出动态的、细致的成本核算和剖析模型，进而达到对成本构成的即时认识并实施全方位的透视。

通过历史成本数据同设备运行状态数据的关联分析，可以正确找出影响运维成本的主要因素，并且可以衡量出影响的程度。在此基础上决策支持系统给出具体的改进意见，在保证安全的基础上达到最佳的成本效益。具体的优化方向有：

1. 按设备故障率估算及历史备件消耗情况得出比较适合的库存量、采购计划，从而减少资金占用、仓储费。

2. 维修人力资源调度优化，根据历史工单数据以及人员技能矩阵，智能调度维修任务，提高工作效率，降低人工成本。

3. 能耗成本动态监控和节约，对各个用能单元的能耗情况进行实时监测，发现异常及时分析原因，提出节能改造或者运行方式优化的建议。

（三）检修策略优化（从计划性到状态修）

传统的水利水电工程检修多为计划性检修，即按照固定的检修时间周期或者累计运行小时数来对设备进行检修。该模式的弊端越来越明显，一方面对状态良好的设备进行不必要的“过度维修”，造成资源浪费和停机损失；另一方面，也可能不能及时发现潜在的早期故障，导致非计划停机甚至设备损坏，即“维修不足”。

大数据分析技术成了促使计划性维护向状态检修和预测性维修转变的主力军。在关键设备上安装各种传感器，能实时采集到反映设备健康状态的振动、温度、压力、油液理化指标等大量的数据。利用机器学习、深度学习等智能算法对时序数据进行建模分析，可以准确地判断出设备当前的健康状况，也可以对设备未来性能衰退的趋势做出准确的预测。

运维决策支持系统依据设备状态评价以及趋势预估的结果，就每一台设备制订出专属的检修方案。当系统预测到某个部件剩余使用寿命快达到安全阈值时，就会自动产生一个预警信息以及一份修理的工单，将修理需要进行的内容、最佳的处理时间段和所需要的资源等全部说明清楚。“因病施治”的智能化检修模式可以在最恰当的时候进行维修工作，可以减少非计划停机事件的发生，可以延长设备的使用寿命，可以提高维修资源的利用效率，从根本上提高了运维效益。

二、数字孪生驱动的决策支持

数字孪生技术是用于创建物理实体精准对应的虚拟模型，给水利水电工程运维提供高保真的数字化实验平台。它既可以反映物理世界当前的状态，也可以模拟、预测未来的发展，使决策支持的能力达到了前所未有的高度。

（一）工程实体与数字孪生体的实时映射

数字孪生体的价值就在于它和物理实体之间存在着高保真、实时动态的映射关系。它不是静止的三维模型，而是集多维信息于一身的动态数字生命体。这一映射的实现要依靠建筑信息模型给出的精确几何框架，以及物联网、传感器网络实时采集到的物理世界数据，即设备运行参数、结构应力应变、环境温湿度、库区水位流量等。依靠高速数据传输和融合技术，现实世界中各种数据不断被输送到数字孪生模型上，从而使数字孪生模型一直处于更新之中，从而保证虚拟空间同物理空间的高度同步。

映射关系是双向的。一方面，物理实体的任何变化都会立刻反映到数字孪生体上，从而达到对工程状态的“数字透视”。当大坝某处渗流监测值出现异常的时候，数字孪生体中对应位置的传感器模型就会高亮告警，并且会显示相关的历史数据曲线。另一方面，数字孪生体中进行优化计算或者仿真推演得到的最优控制策略，可以下发到物理设备上，从而实现对现实世界的智能控制。虚实结合、以虚控实的方式，是数字孪生和传统仿真的本质区别，也是数字孪生强大的决策支持能力的基础。

（二）运维方案的仿真推演与评估

数字孪生给复杂的运维决策提供一个零成本、零风险的虚拟试验田。管理者在执行重大的操作或者维修方案之前，可以在数字孪生环境里对方案的全过程进行充分的仿真推演，预演可能产生的影响和风险，从而避免在现实中犯错。该种“沙盘演习”的能力对于大型水利水电工程的安全稳定运行有重大意义。

以泄洪调度方案制定为例，在数字孪生环境下输入不同的上游来水过程，模拟采用不同的闸门开启组合和开启时序的调度方案。数字孪生体将水动力学模型融合在一起，可以迅速计算并以三维的方式展示出来，不同方案所导致的水库水位变动情况、下游河道的演变过程以及对重要的防护对象产生的影响。用仿真结果比较不同的方案，可以直接看出各个方案在防洪效益、发电效益、生态影响等

各方面的好坏。

对设备大修方案也可以做精细化的仿真。模拟不同的检修工艺流程、资源配置、工期安排等来预测停机时间、维修成本以及给电网供电造成的影响。仿真结果以量化指标和可视化图表的形式展示出来,使管理者在相互制约的诸多目标之间做出权衡,选择综合效益最好的方案。依靠仿真的前瞻性评价,运维决策由依靠个人经验转变为依靠科学计算,运维决策的可靠性、准确性得到了极大的提高。

（三）极端工况下的应急决策支持

水利水电工程在洪水、地震、恐怖袭击等极端工况下会存在潜在的威胁,一旦发生会造成无法挽回的损失。突发事件中时间窗口很短,信息高度不确定,给应急决策者造成了极大的困难。数字孪生技术具有很强的模拟预测的能力,给在极端工况下进行应急指挥的人前所未有的帮助。事先建立各种灾害模型,可以反复推演预案,进行人员的虚拟演练,检验预案的有效性,提高团队的应急响应能力。

当发生真实险情的时候,数字孪生系统可以马上接入传回的实时灾情数据,动态地更新模型状态,复现灾害的发展过程。当发生超标准洪水时,系统根据实时雨量、上游来水监测数据,可以对洪水过程、水库水位变化做连续滚动预测。指挥人员可以利用它模拟执行不同的应急措施(紧急泄洪、人员疏散等)所造成的结果,对各种决策选择进行对比分析。系统可以预测不同的泄洪流量下游淹没范围和影响人口,为制定科学的人员转移方案、抢险资源部署提供重要的依据,从而在千钧一发之际做出最有利于保障人民生命财产安全的决策。

三、可视化决策平台

信息可视化,是把数据分析与人类决策之间架起的一座桥梁。优秀的可视化决策平台把复杂的运维数据、分析结果和仿真过程以最直接的形式表达出来,可以大幅度提高信息传递效率与决策质量,使智慧运维真正成为可能。

（一）运维信息的三维可视化展示

三维可视化比传统的二维图表、数据报表更直观、沉浸感更强,适合于水利水电工程这种空间结构复杂的大型基础设施。可视化决策平台以高精度的建筑信息模型或倾斜摄影实景三维模型为依托,创建出工程的数字化虚拟场景。该场景不但是几何外观的再现,也是信息的载体,可以将海量运维数据和三维空间位置进行精准的融合和关联。

用户可以在三维虚拟环境中自由漫游、缩放、剖切，从任何角度观察工程的每一个细节。大坝的变形、渗流以及厂房内机组的温度、振动等各种实时监测数据不再孤立存在，而是以热力图、动态流场、数据标签等形式直接叠加在对应的三维模型构件上。需要查询某个设备的具体信息时只需在模型上轻轻一点，该设备的静态资产信息、动态运行参数、历史维修记录就能一目了然地呈现出来。

由此带来的最大好处是信息的认知负担减少了很多，不同技术背景、不同管理层次的人都可以通过同一个直观的操作界面进行交流和协作。空间化的数据表现形式有利于及时发现“病灶”，也能探究出其间的空间联系，当上游某个监测点出现问题的时候，在很短的时间内就能察觉到下游某个结构的响应情况，大大简化了故障诊断与协同决策的过程。

（二）基于 GIS 的运维资源管理

水利水电工程一般分布广，资产设备分散在几十到几百平方公里的范围内，涉及大坝、厂房、输电线路、水库淹没区等。地理信息系统是管理具有强烈空间属性的运维对象和资源的有效手段。可视化决策平台把 GIS 技术同地理空间信息以及微观工程实体信息完美地融合起来，创建起从宏观流域到微观部件的全部空间信息视图。

平台所有的运维资源，即固定设备、人员、车辆等可以被准确的定位和管理。

表 9-4 运维资源管理功能总览

功能类别	具体描述	优势体现
资产定位与查询	在 GIS 地图上清晰显示所有工程建筑物、机电设备、监测仪器的空间分布，支持按名称、类型、状态等多种方式快速检索和定位。	提升资产管理效率，快速定位问题点。
巡检路径规划与导航	根据设定的巡检任务和实时路况信息，生成最佳巡检路线；在移动端实施导航，并记录巡检轨迹，实现全流程管控。	优化巡检效率，降低人工成本，确保巡检到位。
应急资源动态调度	在应急抢险时，指挥人员通过 GIS 地图查看所有可用应急资源（抢险队伍、物资仓库、车辆设备）的位置及状态，通过圈选、路径分析等功能实现快速、精准、可视化调度。	提高应急响应速度，精准配置资源，最大程度减少损失。

基于地理信息系统的运维资源管理功能总览中所示，可以明显提高运维资源的利用率以及应急响应能力。

（三）移动端决策支持应用

为了使运维决策能力冲破控制中心的物理束缚，到达工程现场的“最后一公里”，开发并应用移动端决策支持系统成了必然趋势。移动应用把运维信息以及决策支持功能封装到智能手机、工业平板电脑里，使得一线管理者和现场作业人员可以随时随地接入系统，获取需要的信息，完成所负责的工作。现场巡检人员通过移动端接收工单、查阅设备图纸、历史维修记录等资料，利用设备的摄像头、麦克风等功能把现场的情况用图片、视频、语音等富媒体的方式实时上传到后方，从而完成现场和后方信息的无缝对接。

移动端应用不但是信息的接收器和采集器，也是现场决策的赋能工具。管理者即使在外地也能利用手机应用程序随时了解工程运行主要指标、重要警报信息，在线参加应急会商并进行在线审批。现场技术人员使用集成增强现实技术的移动应用，可以把虚拟设备信息、操作指导、仪表读数叠加到现实设备上，给复杂设备的操作、维修提供沉浸式的指导，有效提高操作的准确性、效率、缩短响应时间，进而提高运维团队的敏捷性、协同作战能力。

第十章 水利水电工程数字化发展展望

第一节 数字孪生技术应用前景

数字孪生技术依靠创建物理世界的一个虚拟镜像，达成物理空间同数字空间的实时交互和映射，给水利水电工程的智能化管理赋予了革新性的工具。它把工程实践从信息化推进到智慧化，进而达成工程全生命周期的可观测、可控制、可预估。

一、工程全生命周期数字孪生体构建

建立高保真的数字孪生体是发挥数字孪生体价值的前提。这就需要将工程从规划到退役的全周期数据融合起来，创建准确的多维模型，保证虚拟和现实世界之间实时互动，创建一个有机、统一、不断演进的数字生命体。

（一）设计、施工、运维数据的一体化融合

水利水电工程项目的建设周期长、牵涉到多方人员、各阶段数据孤立存在，设计、施工、运维等各阶段的数据标准不一致、格式不统一，极大地降低信息流通和综合使用的程度。数据一体化融合就是打破各方的壁垒，构建统一的数据底座。该平台要有较好的异构数据整合能力，可以对建筑信息模型、地理信息系统、物联网传感数据、视频监控数据、各种业务管理系统数据进行整合。

统一数据标准、接口规范，是保证信息在各个阶段各个系统之间无障碍的传递和共享的重要因素。融合不是简单的数据叠加，而应该按照工程逻辑关系来融合，构造出一张能反映工程全貌的“数据网”。这就为创建覆盖工程全周期的数字主线打下了基础，使数字孪生体可以全面、准确地反映物理实体的真实情况，为之后的分析、模拟、决策提供高质量的数据源。

（二）多尺度、多物理孪生模型构建

水利水电工程属于复杂的巨系统，它的数字孪生体的创建要涉及宏观与微观的不同层次，并且要耦合诸多物理场效应。完整的工程孪生模型体系要能体现整

个工程的宏观运行状况，也要能观察到关键部件的小变化。多尺度模型体系有如表格所示，包含宏观流域到微观关键部件各方面的内容。

表 10-1 多尺度模型体系概览

模型尺度	关注重点 / 作用	典型应用示例
流域尺度模型	宏观水文、气象及水资源调度	模拟区域水文循环、气象变化，提供工程宏观运行背景
工程枢纽尺度模型	整体结构稳定性与部件相互作用分析	集成大坝、厂房、泄洪建筑物三维几何及物理行为模型
关键部件尺度模型	精细化力学、流体、热学仿真建模	水轮发电机组、闸门、升船机等核心设备性能分析

上面所述的多尺度模型体系能够将水力学、结构力学、温度场和渗流场等物理过程在一个数字模型里同时进行仿真。对大坝在高水头工况下应力应变和渗流场耦合效应进行模拟分析，或者分析机组运行时振动和流体动力学之间的相互影响。建立如此复杂的多尺度、多物理孪生模型，对建模理论、算法效率以及计算资源都有很高的要求，这也是目前数字孪生技术应用面临的一个重大挑战。

（三）物理实体与虚拟模型的实时双向映射

实时双向映射使虚拟模型有了生命，它不再是静态的数字档案，而是和物理实体一起发展、相互影响的动态镜像，是数字孪生的生命线。该过程需要先进的物联网感知技术以及高速稳定的通信网络。部署在工程实体各个部位的传感器（应变计、渗压计、温度计、振动监测仪等）是孪生体的“神经系统”，对物理世界的状况实施实时的数据采集。

数据经由通信网络不断地传送至数字孪生平台，促使虚拟模型实施状态更新、行为模拟以及性能分析，这就形成了物理世界到虚拟世界的单向映射。而更有战略意义的则是反向映射与控制，虚拟模型经过仿真计算、分析预测之后，所形成的优化策略或者预警信息可以转化为具体的控制指令，通过执行机构作用于物理实体，从而实现对工程运行的智能调控和优化。因此形成了感知、分析、决策、控制的闭环系统，工程管理从以前的“事后响应”变成了现在“事前预测、主动干预”大大提高了工程的安全性以及运行效率。

二、数字孪生在工程中的应用深化

数字孪生体创建技术发展日趋成熟的时候，其应用也会从最初的可视性迈向

更加深入的分析、预测、优化等方向。它将作为工程设计的一个工具，安全管理的演练平台以及运维决策的智慧大脑，从各方面优化工程项目品质以及工程项目的管理工作。

（一）基于孪生体的反向设计与优化

传统的水利水电工程设计流程一般为单向的，设计完成后交付施工，后期运维阶段发现的问题不能反馈到设计环节进行根本性的改进。数字孪生技术的使用，冲破了这种传统的模式，达成了一种依靠实际运行数据展开反向设计并不断改进的状况。工程运行时间越长，数字孪生所积累的数据就越多，它就越真实地反映出了工程在各种工况下实际运行的状态。

设计人员可以利用这些数据同原始设计模型进行对比分析，准确找到设计参数与实际表现之间的差异，发现设计时考虑不周或者过于保守的地方。对大坝实际变形数据进行分析，可以检验和修正结构计算模型中的材料参数、边界条件，给未来同类工程的设计提供更加可靠的依据。

在数字孪生的环境下可以对已有工程进行虚拟的改造、优化实验。工程师可以按照自己的需要，自由地改变结构尺寸、更换设备型号或者改变运行策略，利用仿真来评价不同的方案，找到成本最低、安全性最高的一种改进方案，从而指导工程实际改造升级，使工程全生命周期的最大价值得到实现。

（二）极端情况的模拟与应急预案演练

水利水电工程属于关系国计民生的重大基础设施，安全性十分重要。超标准洪水、强震、恐怖袭击等极端灾害事件发生后，怎样快速反应、科学决策，是工程安全管理面临的一个严峻考验。数字孪生体给低频高影响事件应对提供前所未有的虚拟试验场。

利用数字孪生平台可以创建各种极端灾害场景，模拟千年一遇洪水对大坝的冲击过程，也可以模拟地震作用下厂房结构的动力响应。利用高精度仿真可以形象地表现工程遭遇灾害时的破坏过程、薄弱环节、潜在的次生灾害链，从而对工程的抗灾能力做出科学的评判。在此基础上管理者根据实际情况制订应急预案，在虚拟环境中进行反复演练。参演人员可以在逼真的场景中进行决策推演、操作协同，检验预案的科学性、可行性、完备性，发现指挥体系、通信联络、资源调配等各方面的不足，从而在真实灾害发生之前完善应急体系，全面提升团队的应急处置能力。

（三）工程服役性能的精准预测与评估

水利水电工程结构很复杂，在水力、压力、温度等荷载的长期作用下服役，材料的疲劳，结构的损伤在所难免。数字孪生技术把物理模型、传感器数据和人工智能算法结合起来，可以对工程结构、设备健康状况做出准确的评价，对未来性能进行科学的预测，促使运维方式由“被动维修”转变为“预测性维护”。

孪生模型中可以加入材料疲劳损伤累积模型、裂缝扩展模型等机理模型，用实时监测数据对模型进行校准来实时评价大坝、厂房等重要的结构的安全状态以及预测剩余寿命。系统通过水轮机叶片振动、温度等信息，用流体动力学仿真来预测叶片裂纹的风险并提前发出预警。

基于模型的预测性评价可以提前发现安全隐患，避免灾难性事故的发生，也可以给运维决策提供量化的依据。管理者根据预测结果来制订最优的检修计划，在最需要的时候修理或者更换即将发生故障的部件，避免不必要的停机损失的同时减少不必要预防性维修，在保证安全的基础上，可以大大降低运维成本。

三、数字孪生技术与产业发展

数字孪生技术的广泛应用和深入发展，依靠强大的产业生态支持。这牵涉到核心技术的自主可控、顶层标准的规划引领、专业人才的系统培养。三者齐头并进才能形成健康可持续的数字孪生发展的新局面。

（一）数字孪生平台软件国产化

目前高端工业软件领域中数字孪生底层核心技术，几何建模、物理仿真、数据可视化等各方面，国产软件与国际先进水平相比还存在差距。创建自主可控的数字孪生平台，这是我国重大基础设施数据安全和技术主权的战略需要，也是推进水利水电行业数字化转型行稳致远的根本保证。

推进平台软件的国产化需要政产学研用等各方面的力量共同协作。一方面加大基础软件研发投入，使国内企业同科研院所在核心算法、数据处理引擎、可视化渲染引擎等关键技术上实现突破。另一方面利用重大水利水电工程给国产软件提供应用场景、迭代升级的机会，经过实践检验、不断改善，逐渐提高软件的性能、可靠性，从而打造可以与国际主流软件相抗衡的国产化数字孪生方案。

（二）数字孪生标准体系构建

数字孪生技术涉及诸多领域、各个环节、多学科，如果没有统一标准体系就

会产生数据格式不相容、模型接口不统一、系统平台难以整合等新的数字孤岛，影响技术的普及和产业的发展。

构建完善的数字孪生标准体系是一项紧迫而复杂的系统工程，应涵盖以下层面：

1. 数据与模型标准，规定基本的数据格式（建筑信息模型、地理信息系统、物联网数据等）、编码、语义等标准，规范各种物理仿真模型接口，保证数据和模型的互联互通。

2. 平台和技术标准规定数字孪生平台的体系架构、功能要求、性能指标、安全规范，从而促进技术、产品的发展。

3. 根据不同的应用场景来制定设计、施工、运维等各方面的孪生应用指南以及评价标准，以实现孪生应用的规范化和标准化。

创建科学的、开放的、协同的标准体系，有利于降低技术应用的门槛和成本，推动产业链上下游企业之间的合作与创新，为形成互利共赢的产业生态打下基础。

（三）数字孪生人才培养与生态建设

数字孪生技术的应用要依靠复合型知识结构的人才。该类人才应该具备水利水电工程专业知识，并能融合计算机科学、数据分析、人工智能、控制理论等各方面的知识。但是目前此种人才的供给存在较大的缺口。因此必须把人才培养作为产业发展的战略基础，推动高等院校、职业院校调整学科设置，开设交叉课程，积极创建校企联合培养基地，从而构建多层次、多类型的数字孪生人才培养体系。

与此同时应该积极创建开放、合作、共赢的产业生态。促进工程业主单位、设计院、施工企业、设备制造商、软件公司、科研院所等产业链各个环节主体之间的交流与合作，从而形成强大的创新合力。通过建立产业联盟、举办技术论坛、创建开源社区等途径来达到知识共享、技术扩散和商业模式创新的目的。充满活力的产业生态系统会不断产生新的技术、新产品、新服务，给水利水电工程数字化发展提供源源不断的内生动力，从而推动整个行业的转型升级。

第二节 人工智能在工程设计中的发展

伴随着信息技术的迅猛发展，人工智能正用它独有的方式给传统水利水电工程设计、施工领域带来前所未有的机遇和变革。它所具有的强大的学习、推理、优化能力，正在对工程设计的流程、方法、结果产生着深刻的影响。

一、AI 驱动的智能设计

人工智能技术最大的优势就是它具有强大的计算、学习和优化能力，可以部分甚至完全取代人类进行复杂的探索性设计。从而产生了以 AI 为驱动的智能设计新模式，使工程设计由原来的依靠经验转变为数据驱动的智能创造。

（一）生成式设计在结构创新中的应用

生成式设计是一种颠覆性的设计方法，它不是对已有方案的简单优化，而是设计师设定目标和约束条件之后，算法在广阔的创作空间里自主探索，产生成百上千种符合要求的创新方案。水利水电工程中设计师输入结构所受水压力、地震荷载、材料性能、制造成本、空间边界等参数，生成式设计算法就会用拓扑优化、形态演化等方式迭代生成各种结构形式。

该方法对于复杂水工结构形态的创新有巨大的潜力。大坝、水电站厂房、输水隧洞等重要结构如果使用生成式设计，可以突破传统设计范式的局限，找到材料分布更合理、受力性能更好、重量更轻的仿生或者非直观结构形态。这些由算法生成的复杂的几何构型，往往是人类设计师不能凭借直觉想象出来的，在保证安全的前提下，可以大幅度减少工程材料的使用，从而达到经济效益和结构性能的统一。

但是生成式设计的应用也存在挑战，即如何评价生成方案的可建造性、复杂曲面结构的施工工艺、算法生成的结果与现行设计规范的衔接。这就需要设计、计算、施工技术三者共同进步、融合发展，才能真正发挥结构创新的优势。

（二）基于强化学习的优化设计

强化学习属于机器学习的一个重要分支，它的核心思想是智能体在与环境进行交互的时候，经过不断的尝试和错误学习，根据得到的奖励或者惩罚来改变自身的行动策略，从而学会在特定的环境中获取最大的长期累积奖励。该机制同工程设计中寻找最优解的目标非常吻合，给解决高维、非线性复杂的优化问题提供

了一种新思路。

强化学习被用在水利水电工程的设计优化问题当中。可以将水库调度系统看成智能体,水库来水、下游需水、电网负荷等是动态变化的环境,智能体的行动就是决定泄洪量或者发电水量。奖励函数可以设为发电效益、供水保证率以及防洪安全系数的综合函数。经过和长序列水文模拟环境的反复交互学习,强化学习模型可以自动地学习出兼顾兴利和防洪的调度规则,其性能一般要好于传统的静态调度规则。智能体可以学习到大坝剖面尺寸、钢筋布置等参数的调整方法,在满足所有安全要求的基础上使大坝的工程造价最小。强化学习的探索机制可以摆脱局部最优解,找到更好的全局设计方案。

(三) AI 辅助的方案比选与决策

水利水电工程项目一般规模宏大、影响深远,在方案比选时会牵涉技术、经济、社会、环境等诸多繁杂因素,属于典型的多目标、多属性决策问题。传统的比选方法大多依靠专家经验、定性评价,不能对各个方案做全面、客观的评价。如今,机器学习、数据分析等人工智能的方法正在给这一过程注入科学性、高效性。

AI 系统可以对地质勘察报告、水文气象资料、工程投资估算、移民安置规划、生态环境评估等各方面大量的数据进行整合处理。原来难以对比分析的异构数据,在经过 AI 系统量化、关联之后,可以用于创建综合评价模型,对多个备选方案的全生命周期性能做出预测,并对其进行风险评价,进而给决策者赋予更加全面、透明的决策依据。

具体应用可以体现在以下几个方面:

1. 整合各方面数据,提取重要特征,构建起一个能够评判方案优劣的 AI 平台标准体系。
2. 采用回归分析、时间序列预测等机器学习方法对各个方案的发电量、运行成本、环境影响等各项指标进行预测。
3. 使用遗传算法、粒子群优化等智能算法对大量的评价指标进行权衡,得出帕累托最优解集,即不存在其他方案在所有指标上都更优的一组备选方案。
4. 决策支持可视化,将复杂的比选分析结果用仪表盘、雷达图、敏感性分析图等形式直观地展示出来,清楚地显示出各个方案的优势、短板、风险,使决策团队对方案之间的权衡关系有更深刻的认识,从而做出更加科学合理的最终决策。

二、自然语言处理与知识图谱

水利水电工程设计属于知识密集型领域，设计成果质量很大程度上取决于对大量的设计规范、技术标准、研究成果和历史工程经验等正确理解与运用。自然语言处理、知识图谱技术给此类工程知识的自动化管理、智能检索、深入运用提供了一种新的途径。

（一）工程规范与文献的智能检索与理解

工程设计人员在日常工作中要花费大量的时间去查阅设计规范、标准图集和有关的学术论文。传统的关键词检索方式效率低，容易产生大量的无关结果，也不能理解条文的深层含义以及上下文限制。自然语言处理技术，尤其是预训练语言模型的出现已经完全打破了上面的壁垒。

基于自然语言处理的智能检索系统可以理解用户的自然语言查询意图，而不仅仅做字面的关键词匹配。工程师输入“高寒地区碾压混凝土坝温控防裂措施”，系统就能理解查询的核心概念，从上千份规范、文献中找到相关的章节、条文、图表，并关联到具体的工程案例研究报告。自然语言处理技术还可以实现跨文档知识提取和总结，可以对某一技术主题（高流速水流下泄洪洞抗冲耐磨材料研究进展）的发展脉络、主要技术参数、最新研究成果进行自动组织，给设计人员提供丰富的知识情报，大大提高知识获取的效率和深度。

（二）工程领域知识图谱的构建与应用

知识图谱用图形化的形式来组织、表示知识，形成语义网络。它把现实世界中的实体（工程对象、结构形式、地质条件、技术规范等）当作节点，把实体之间所存在的各种语义关系（属于、包含、影响、依据等）当作边，从而形成一个庞大的知识网络。建立水利水电工程领域专业知识图谱，是把分散异构的知识进行体系化、结构化的有效途径。

建构知识图谱的过程就是对知识工程进行重塑。使用命名实体识别、关系抽取等自然语言处理技术，可以从大量的设计报告、技术规范、地勘资料、竣工图纸、运维记录等非结构化或者半结构化的文本中自动抽取知识元，并将它们加入到图谱中。系统可以自动识别工程报告中提到的“XX大坝”为“混凝土重力坝”，其“坝基”为“微风化花岗岩”，根据规范建立“混凝土重力坝”与“抗滑稳定计算”的执行关系。

建立好的知识图谱有很强的应用价值。除了可以实现智能问答系统外，还可以做知识推理。当输入新的项目地质条件的时候，如果存在软弱夹层的话，图谱推理出失稳的风险，并给出相应的地基处理方式以及设计规范条款的推荐。由此得到的关联和推理能力，使知识不再孤立存在，而是在机器能够理解并加以利用的网络中存在，为设计方案智能推荐、风险预警、知识传承打下了坚实的基础。

表 10-2 水利水电工程领域知识图谱应用示例

知识图谱功能	应用场景示例	价值体现
智能检索	根据自然语言查询快速定位相关规范、案例	提高信息查找效率，减少人工筛选时间
知识推理	基于地质条件自动预警结构失稳风险并推荐处理方案	辅助决策，提前预判和规避潜在风险
辅助设计	推荐符合特定条件的结构类型或材料选择	优化设计方案，确保合规性与安全性
风险评估	分析工程参数与历史事故的关联，评估潜在风险	强化风险管理，提升项目可靠性
经验传承	结构化存储专家经验和历史项目数据	促进知识共享与传承，避免重复犯错

根据以上知识图谱的应用案例可知，采用知识图谱的方式能够对水利水电工程中各个步骤起到增强的作用，并且大大提高智能程度。

（三）AI 辅助的设计审查与校核

设计审查、校核是保证工程质量、安全的重要环节。传统的人工审查方式耗时费力，而且由于规范条文很多、逻辑关系很复杂，容易产生遗漏或者理解上的偏差。AI 辅助审查系统将资深专家的经验同设计规范的刚性要求结合起来，可以对设计成果开展自动化、高效、精确的合规性检验。

这类系统首先要对大量的设计规范、强制性条文进行深层次的分析并结构化，形成机器可读并且可以执行的规则库或者知识图谱。系统通过 API 接口获取 BIM 模型、计算书、设计图纸等数字化设计成果，从中自动提取结构的几何尺寸、材料强度等级、钢筋配筋率、荷载组合工况、安全系数计算结果等主要设计参数。AI 审查引擎接着会把提取出来的参数同规则库一一比对，找出所有不符合规范要求、逻辑上存在矛盾、违反标准做法的点，以高亮、批注等形式生成审查报告，供设计人员复核修改。智能化的审查方式把设计人员从繁杂的重复性校核工作里解放出来，让他们可以把精力集中到创新性的设计上，大大提高审查的覆盖面和

准确性，成为保证工程设计质量的重要屏障。

三、计算机视觉与 AI 应用

计算机视觉技术给机器赋予了看和理解世界的能力。水利水电工程领域当中，这项技术同人工智能相融合之后，在勘测设计以及施工管理等各个环节均对传统作业方式造成改变，并且提升了数据采集的效率并加强了数据分析的智能化程度。

（一）基于遥感与无人机影像的智能勘测

传统的水利水电工程勘测工作严重依靠人工现场踏勘和测绘，存在周期长、成本高、劳动强度大，在复杂的山区作业安全风险高等诸多问题。利用高分辨率遥感影像和无人机倾斜摄影技术，配合计算机视觉算法，给工程勘测带来了革命性的变化。海量的影像数据给人工智能分析提供了丰富的信息源。

采用深度学习模型可以实现遥感、无人机影像像素级别的语义分割和目标检测，从而达到自动识别地形地貌、植被覆盖、水体边界、土地利用类型等要素的目的。AI 模型可以很快地识别出潜在的滑坡体、泥石流沟道、断裂构造等地质灾害隐患区，并给工程选址和线路选择提供重要的风险预警。对多期影像做时序分析，还可以动态观测坝址区岸坡变形和水库淹没区植被变化。

无人机搭载激光雷达或多光谱相机获取的数据经过 AI 算法处理后，可以快速生成高精度的三维数字高程模型、数字表面模型，为之后土石方计算、淹没分析、总布置设计等提供准确的数字化地形基础。智能勘测方法大大提高了外业工作效率和安全性，用前所未有的数据精度和广度加深了设计人员对外业现场环境的认识。

（二）施工质量与安全的智能识别

施工阶段是把设计蓝图变为现实的重要过程，施工质量和安全关系到工程成败。以计算机视觉为依托的智能监控系统可以对施工现场实施全天候、全方位地实时监控与分析，从而将以往的人工巡检变为主动智能预警。在施工现场设置高清摄像头，用 AI 算法对视频流进行实时分析，从而达到对施工过程中重要环节质量控制的目的。钢筋工程中 AI 可以识别钢筋间距、直径、数量是否符合设计图纸要求；混凝土浇筑过程中可以监测平整度、有无裂缝等表面缺陷；土石方填筑时可以识别碾压设备的运行轨迹和遍数，保证压实质量。

计算机视觉在安全管理中应用更广。AI 系统能够自动检测现场作业人员是

否按要求佩戴安全帽、穿反光衣等个人防护装备，发现违章行为就立即拍照上报给管理人员。系统可设置虚拟电子围栏，当人员或者车辆误入高风险作业区（边坡开挖区、吊装作业区等）时，就会发出声光报警。对吊车超载、挖掘机作业范围内有人员等大型机械危险行为进行 AI 实时监测，发出预警并及时处理，可明显减少施工现场安全事故的发生，达到施工现场精细化、智能化管理水平。

（三）工程图纸的智能识别与三维重建

数字化转型的大潮之下，大量的二维工程图纸（纸质扫描件或者 CAD 文件）成为历史的财富。但是由于它们是非结构化的，不能被现代的设计和管理软件直接使用。手工将二维图纸重新绘制成立体 BIM 模型的过程是枯燥的、低效的。计算机视觉和 AI 技术给它提供了一个很好的解决办法。

对扫描的蓝图或者图纸，使用图像处理技术进行去噪、二值化、倾斜校正等预处理。然后利用深度学习中目标检测和图像分割的模型，对图纸上各种图形符号（阀门、水泵、不同种类的构件剖面线）、文字注释（尺寸标注、材料说明等）、表格等进行识别与分类。可以准确识别出平面图中墙、柱、门、窗等，系统图中管道、线路、设备符号等。该步骤就是图纸的语义理解。二维信息结构化提取完成后，按照识别出的几何信息、尺寸标注以及符号之间的拓扑关系，在三维空间里做逻辑重建，得到参数化的 BIM 三维模型。这项技术可以激活沉睡的数据资产，加快老旧工程的数字化进程，为后面改造设计、运维管理、数字孪生应用打下了坚实的数据基础。

第三节 智慧水利建设路径

智慧水利是新阶段水利高质量发展的重要标志，也是推动水利现代化的核心动力，代表水利现代化演进的新方向。本节主要对智慧水利的建设途径进行阐述，提出智慧水利的总体架构、主要业务应用、保障措施，从而给形成完整的、规范的、高效的现代化水利基础设施体系提供蓝图和实践指导。

一、智慧水利体系架构

建立全面、协调、高效的智慧水利体系，必须要有科学合理的顶层设计。该体系架构是智慧水利建设的骨架、脉络，给各个功能的实现提供基本支撑，使信

息流、业务流、管理流顺畅结合、有效运转，从而达到水利治理能力现代化的技术框架。

（一）感知层、网络层、平台层、应用层

智慧水利体系的创建采用的是经典的物联网分层架构，一般分为感知层、网络层、平台层、应用层，四者互相联系，互相配合，构成一个有机的整体。

感知层是体系的“五官”，可以对水利要素信息进行全方位、动态的采集。它依靠在江河湖库、水利工程、取水户等关键节点上部署的各种传感器，即水位计、流量计、雨量站、水质监测仪、视频监控摄像头、土壤墒情传感器等，对水文、工情、雨情、水环境等进行实时采集。前端设备的覆盖范围、精度、可靠性都会影响到上层应用决策的好坏。

网络层：被称作体系的“神经网络”，它主要完成感知层采集到的数据可以可靠、高效、安全地传输的任务。综合使用光纤通信、移动通信、卫星通信、窄带物联网等各类通信技术，构成天地一体、有线和无线相结合的立体式传输网络。该网络要有高带宽、低时延、广覆盖等特点，才能使大量、多种数据可以快速地各个分散的监测点汇集到数据中心，为之后的数据分析和处理打下及时的数据基础。

平台层是智慧水利体系的大脑，也是数据价值转化的中枢。该层次是由数据资源平台、模型平台、业务支撑平台所组成。数据资源平台就是将来自各方面的异构数据进行清洗、整合、存储、管理，形成水利主题的标准化数据库和数据仓库。模型平台集成了水文、水力、水环境和水资源调度等专业领域内的模型，同时又融合了人工智能以及机器学习算法，对于数据进行了深度的挖掘以及智能的分析工作，把原本的各类数据转化为了有价值的知识。业务支撑平台提供地理信息服务、 workflow引擎、统一身份认证等共性技术服务，给上层应用开发提供模块化、可复用的能力支撑。

应用层：是智慧水利体系价值实现的最终出口，也是直接面向用户的窗口。它依靠平台层给予的强大数据与模型支撑，创建出契合各类水利业务场景的智慧化应用系统。其应用领域包含水旱灾害防御、水资源管理调配、水利工程建设及运行管理、河湖生态保护、农村供水保障等。通过可视化界面、智能化的分析预警与辅助决策的方式把复杂抽象的数据、模型变成简单直观的信息、具体的操作指令，为管理人员提供准确的、合理的决策支持，从而大大提高水利业务管理的效率和服务质量。

表 10-3 智慧水利体系架构分层功能概述

层级	核心功能	主要构成 / 作用
感知层	数据采集与获取	传感器、监测站、视频监控等，提供原始数据
网络层	数据传输与连接	光纤、5G、卫星通信、窄带物联网等，构建传输通道
平台层	数据处理与智能分析	数据资源平台、模型平台、业务支撑平台，实现数据价值转化
应用层	业务支撑与价值实现	各类智慧水利应用系统，直接面向用户，辅助决策

从上表可以看出，智慧水利体系架构是层层递进、协同联动的，实现了从数据感知到智能应用的闭环。

（二）天空地一体化水利感知网

天空地一体化水利感知网是传统感知层的深化和拓展，是全方位、多尺度、高时效的立体监测系统。综合使用天基、空基、地基多种监测手段，进行水利要素宏观、中观和微观联合观测，极大地提高了水利信息获取能力。

天：主要是指卫星遥感技术，利用气象卫星、水文卫星、环境监测卫星、商业遥感卫星星座等，可以对降雨分布、云图、地表水体范围、土壤湿度、植被覆盖等进行大范围、周期性地获取宏观信息。这对于掌握大流域水情变化、评价区域性旱情、监测洪水淹没范围等具有不可替代的作用。

空以无人机为代表，可以对某个区域进行高分辨率的快速、灵活的观测。在水利工程巡检、险情勘察、河道地形测绘、水污染溯源等场景中，无人机可以近距离侦察，获得高分辨率影像和三维数据，很好地弥补了卫星遥感分辨率低、地面监测点稀疏的不足。

地包含地面传统和新型监测站点，即各种自动化遥测站网、视频监控网络、物联网传感器节点等，提供连续、高频、精准的定点观测数据，是整个感知网的基础。

天空、地面上的三者互相补充、互相配合，共同组成了一个全方位、点面结合、动态更新的智慧水利“天网”，给水利管理带来了前所未有的数据洞察力。

（三）水利大数据中心与云平台

水利大数据中心和云平台是智慧水利体系架构的重要基础设施，是智慧应用得以运行的支撑性基础。它是数据的物理存储库，又是数据治理、数据共享、数据分析、数据服务的一体化平台，为打破信息孤岛、实现数据驱动决策提供根本保证。

水利大数据中心的主要任务就是对水利内外部数据进行汇聚、融合与治理。它把水文、水资源、水利工程、水土保持等传统业务系统的数据，天空地一体化

感知网产生的实时监测数据,气象、自然资源、生态环境、社会经济等行业的外部数据整合在一起。创建统一的数据标准和数据模型,对各种异构数据进行清洗、转换、关联,最后形成逻辑上统一、物理上可以分布式存储的水利大数据资源池。数据治理贯穿于数据的全生命周期,保证数据的准确性、完整性、一致性、时效性,给上层应用提供高质量的“数据燃料”。

云平台给大数据中心提供弹性的计算能力、丰富的分析工具和敏捷的服务模式。依靠云计算技术,平台可以依照业务负载的变化,自动、智能地安排计算、存储和网络资源,保证资源处于最佳的配置状态。平台之上集成了大数据处理框架、人工智能算法库、专业模型库、地理信息系统引擎等主要的能力组件。这使得开发者和业务人员可以像使用水电煤一样,按需调用平台提供的各种服务,快速开发各种智能应用,而无需关心底层复杂的硬件和软件环境。平台化服务模式大大降低了技术门槛,加快了智慧水利应用的创新速度。

水利大数据中心和云平台创建的根本目的就是实现数据共享、业务协同。平台建立起来数据共享机制、开放的服务接口之后,就可以安全、可控地为各个部门、各个层次的用户提供数据服务和分析服务。不但可以促进水利系统内部各方面的协调,还可以为跨部门、跨区域流域的综合治理、防汛抗旱联合作战等复杂的决策提供统一的数据基础和协作平台,促使水利治理模式由分散管理向协同共治发生深层次的转变。

二、核心业务智慧化

体系架构最终目的就是为水利核心业务服务。依靠数字技术,水利业务流程被重新构建起来,从依靠经验决策变成依靠数据决策、智能决策。核心业务的智慧化是评价智慧水利建设成效的标准,也是智慧水利建设创造价值的主要表现。

(一) 智慧流域与水资源管理

智慧流域是水资源管理与调配智慧化的集中体现,用系统思维和数字手段,把流域作为一个整体进行统一规划、治理和调度。建立流域数字孪生体,在虚拟空间中模拟、推演物理流域水文过程、水资源变化以及各种治理调度方案的效果,从而达到对流域水资源精细化管理、优化配置的目的。

1. 水资源监测和评价的智慧化。依靠一体化感知网实时掌握流域内降水、径流、蓄水、取用水等各环节的水量水质情况。利用水资源模型来动态评价水资源的承载能力,给制定科学的水资源分配方案提供依据。

2. 水资源调度智慧化,按照长、中、短期需水预测以及来水预报,利用优化调度模型制订跨区域、跨行业的流域水资源调度方案。在枯水期、突发水污染等事件发生的时候,可以迅速生成应急调度预案,以丰补枯、优水优用,最大限度地发挥水资源的综合效益,保障供水安全和生态健康。

（二）智慧防汛抗旱与应急指挥

防汛抗旱是水利工作的重中之重,防汛抗旱的智慧化水平直接影响到人民群众生命财产安全。智慧防汛抗旱体系的核心就是打造预报、预警、预演、预案(四预)能力,从而提高灾害防御的主动性、精确性。

预报、预警,采用高精度的气象、洪水预报模型,可以提前预测暴雨洪水的发展过程,并及时发布预警信息,给人员转移、应急准备争取宝贵的时间。

预演:用数字孪生或者仿真模型对重点区域(水库、蓄滞洪区)进行模拟预演,分析各种洪水情景以及调度方案所带来的结果,从而选择最佳的应急处置方案。因此决策者可以在灾害发生之前就对各种可能性了如指掌。

预案即把各种标准化、结构化的应急预案数字化。当触发预警条件的时候,系统可以自动或者半自动地触发相应的预案,把任务精准地推送给对应的负责人,从而实现应急响应的快速、有序。

智慧化的指挥平台对于应急指挥来说是“战时大脑”。它把雨情、工程工情、灾情、应急资源分布、抢险队伍位置等重要信息整合到一张图上,给指挥决策提供全方位的态势感知。并使用视频会商、融合通信等方法,达到前后方协同联动,扁平化指挥的效果。该种智慧化的应急指挥模式大大地提高了决策的科学性、响应速度,最大限度地减少了灾害损失。

（三）智慧农村水利与城乡供水

智慧水利建设同样高度重视提高农村水利和城乡供水服务水平,确保每一滴水的安全、高效利用。

农村水利重点发展智慧灌溉。田间部署土壤墒情、作物长势传感器,结合气象预报、作物需水模型来判定灌溉的需求,进而实现根据需求自控阀门、水泵,按需进行灌溉。该模式可以节约宝贵的水资源,又能有效地提高作物的产量和品质,有利于现代农业的发展。

城乡供水保障:智慧水务的建设十分重要。创建从水源地到水龙头整个流程智慧化管控系统。水源地做水质在线监测预警,水厂采用智能加药、优化控制等

技术改进制水工艺,保证出厂水质合格,输配水管网利用水力模型、压力传感器、智能水表等实时监控管网运行情况,及时发现并修复漏损点,减小产销差。对用户来说,提供在线查询缴费服务,公开透明水质信息,提高居民用水满意度和安全感。智慧化的城乡供水系统可以保证供水全过程的安全、稳定、高效、便民。

三、智慧水利保障体系

技术应用和业务融合的深入发展,不能缺少完备的保障体系。该体系从制度、安全、创新等角度为智慧水利的持续健康发展保驾护航,是智慧水利建设行稳致远、发挥长效价值的基础。

(一) 标准规范与政策法规

标准规范给智慧水利系统间的互联互通、数据共享、业务协同打下了基础。缺少统一标准的话,各地、各部门建立起来的系统就会变成新的信息烟囱,从而造成智慧化的整体效能大打折扣。因此必须加快建立全面、科学、协调的智慧水利标准规范体系。该体系应该覆盖数据采集、传输、存储、处理、服务等各个环节,包含数据资源目录、数据交换格式、传感器接口协议、模型算法评价、应用系统功能等各方面标准。标准的制定要广泛吸收行业专家、科研院所和技术企业等各方面的意见,保证标准的科学性和适用性。

政策法规对智慧水利健康的发展起到方向盘、安全阀的作用。各级政府以及水利部门要出台支持性政策,把智慧水利建设纳入国民经济和社会发展规划之中,并设立专项资金,通过政府和社会资本合作的形式吸引社会资金参与。从法律层面来讲,需要明确数据的所有权、使用权、管理权以及收益权,给数据要素的市场化流通以及价值释放提供法律基础。同时还要建立数据共享开放机制,确定数据共享的责任主体、范围、流程、安全要求,用立法来打破部门间的数据壁垒。

完善的政策法规体系还要重视人才培养、激励机制。要设立相关专业,开展职业培训,培养出一批既懂水利业务又懂信息技术的复合型人才。健全评价、激励机制,调动水利工作者在数字化转型中敢于担当、勇于创新的积极性。只有把标准规范的硬约束同政策法规的软引导结合起来,智慧水利建设才会有规可循、有章可依地向前发展。

(二) 网络安全与数据安全

随着智慧水利建设的不断深入,水利基础设施网络化、智能化程度越来越高,

网络攻击风险也随之增大。水利系统关系到国家经济与人民生活，如果重要的信息系统（大坝监控系统、供水调度系统）受到攻击或者被破坏，后果将非常严重。因此网络安全和数据安全是智慧水利的生命线，要和主体工程同步规划、同步建设、同步运行。

网络安全保障要创建纵深防御体系。从物理上说，要保证机房、数据中心等重点地方的安全。网络上要部署防火墙、入侵检测和防御系统、网络隔离等设备，划分安全域来防止外侵内泄。在应用和主机上要进行漏洞扫描、安全加固、部署防护软件。还要创建网络安全常规监测预警及应急响应制度，定时开展攻防演练，改善应对网络攻击的能力。

数据安全属于安全保障的一个重要部分。依据水利数据保密性等级的不同，对水利数据进行分类分级，使用加密、脱敏、访问控制等技术对国家机密信息、商业机密信息、个人隐私信息进行严格保密。创建数据全生命周期的安全管控流程，在数据的采集、传输、存储、使用、销毁等各个阶段都应该有具体的安全策略和技术手段。加强数据访问行为审计和追溯，保证数据操作有迹可查、有责可究。数据安全体系的建立，目的在于保证数据的保密性、完整性、可用性，在安全可控的环境下充分发挥数据的应用价值。

（三）技术创新与产业发展

智慧水利是一个不断发展的动态过程，它的发展需要技术的持续创新以及产业的有力支持。必须坚持创新驱动，加大对物联网、大数据、人工智能、数字孪生、区块链等新一代信息技术的创新应用基础研究和攻关力度，争取获得一批重要技术上的突破。开发更小、更准的智能传感器，设计更高效、更强大的水利大模型，建设更真实、计算速度更快的水利数字孪生平台。

创建开放协同的创新生态系统很有必要。要强化“政产学研用”的深度融合，促使水利管理部门、科研机构、高等院校、科技型企业组成创新联合体，进行技术研发、成果转化和应用示范。通过设立水利科技创新基金、举办技术竞赛等形式来激发全社会的创新活力，推动技术不断更新换代，应用不断深入。

技术创新的最终目的就是促进产业的发展，形成有核心竞争力的智慧水利产业集群。推广已有的技术和产品，培育一批“专精特新”的智慧水利企业。政府可以采用首台（套）政策、优先采购等方式，给国产化、自主可控的技术和产品开拓市场空间。繁荣的智慧水利产业，既可以给水利现代化建设提供高质量的产

品和服务，也可以成为新的经济增长点，为整个社会的高质量发展做出贡献。技术创新同产业发展互相推动，给智慧水利的持续发展赋予不断涌现的新动力。

第四节 未来水利水电工程数字化发展趋势

一、技术融合趋势

未来突飞猛进会来自跨界融合的化学反应。单一技术已经发展到其极限，5G、6G 通信技术、物联网、区块链、元宇宙等前沿技术正在与传统的工程技术深度融合，产生新的技术群落，孕育颠覆性的应用场景，从根本上改变工程项目建设和管理的基本逻辑。

（一）5G/6G、物联网、边缘计算的深度融合

新一代通信技术、泛在感知网络、分布式计算三者相结合，正在共同构建水利水电工程的数字神经系统。5G 以及以后 6G 技术以超高速率、极低时延、海量连接能力为工程现场海量数据实时传输提供了可靠的通信保障。物联网技术依靠亿万级传感器在工程结构、机电设备、周边环境等重要部位进行布置，给工程赋予感知能力，可以全天候、全方位地采集到振动、渗流、位移、温度等各种异构数据，实现对工程状态的全方位感知。边缘计算把部分计算能力下沉到靠近数据源的工程现场，对采集到的数据进行预处理、分析并迅速作出反应，既可以减轻云端计算的压力，又能满足闸门紧急控制、边坡失稳预警等对实时性要求较高的业务需求。重要技术及水利水电工程的应用见下表。

表 10-4 水利水电工程数字化关键技术融合表

技术名称	核心特征	在水利水电中的应用
5G/6G 通信	超高速率、极低时延、海量连接	实时数据传输保障，支撑远程控制与高清监控
物联网	泛在感知、数据采集	工程结构、机电设备、环境参数的全天候感知与数据采集
边缘计算	分布式计算、靠近数据源	数据预处理、实时分析与决策，满足紧急业务需求
区块链	去中心化、不可篡改、可追溯	工程数据确权与共享，提升多方协作信任度
元宇宙	沉浸式交互、虚实融合	虚拟培训、协同设计、项目展示与公众参与

三者深度融合就形成了云边端协同智能体系。在该体系下，前端传感器（端）

采集到的原始数据通过 5G 或者 6G 网络(网)被迅速地传送到边缘计算节点(边),在这里会进行实时的分析和作出决定。当监测到大坝关键部位的应力数据出现异常的时候,边缘节点会立刻发出警报,并且联动相关的设备,不需要把数据上传到云端再返回指令,决策延迟可以由分钟级缩短到毫秒级。只有处理过的结构化数据、异常事件信息或者需要长期保存的价值数据才会上传到云平台(云)进行宏观态势分析、趋势预测以及模型训练。

这样的融合架构彻底改变了传统水利水电工程的运维模式,使水利水电工程的运维从以前的靠人工巡检、事后处理被动的管理方式,转变为依靠实时数据的预测性维护和主动干预。无人值守的智慧电站、远程自主操作的施工机械、精准高效的流域洪水预报调度系统都有了扎实的技术基础,大大提高了工程的安全性、智能化、精细化。

(二) 区块链在工程数据共享与确权中的应用

水利水电工程项目牵涉到设计、施工、监理、运维等诸多参与方,数据在各个主体之间流转、共享的过程中,长期以来一直存在着数据孤岛、信息不透明、信任成本高等问题。传统的中心化数据库管理模式不能保证数据的原始性以及不可篡改性,给项目协同以及责任追溯带来很大的挑战。区块链技术依靠去中心化、公开透明、数据不可篡改、可追溯等特点,给行业痛点提供了一种新的解决办法。

利用区块链技术可以创建工程管理领域大家一起维护的分布式账本。工程勘察设计、招投标、物资采购、施工进度、竣工验收到运营维护的全生命周期内,所有重要数据都可以被当作“交易”记录到链上。每条记录带有时间戳,用密码学算法与前一个区块相连形成不可逆的链式结构。任何一方都无权单方面更改数据,每次改动都会留下痕迹,保证了工程数据的真实性、完整性和一致性。智能合约部署之后就可以实现工程款支付、质量验收等业务流程的自动化。当监理按照事先约定的内容认定某项分项工程合格的时候,智能合约就会自动启动支付程序,可以大大减少人工干预的过程,提高合同执行的效率以及透明度。这项技术为多方信任的协同环境打下了基础,在明确工程数据责任、提高项目管理水平、规避风险、解决纠纷方面具有里程碑式的意义。

二、模式创新趋势

技术融合发展必然会引起商业模式以及管理范式发生深刻的变化。水利水电

工程行业正在由原来以交付物理产品为主的模式，向注重长期价值和服务的创新模式转变。数据成了决策的要素，产业组织形态也朝着更加开放、协同的平台化、生态化方向发展。

（一）从工程产品向服务模式转变

在传统的工程模式下，工程单位的主要工作就是按照合同规定的设计、建造、交付符合标准的物理资产，比如一座大坝或者一座水电站。项目竣工交付之后，工程单位与业主之间关系就会大大减弱。一锤子买卖式的产品交付方式，工程单位的价值创造只局限于建设期，没有考虑工程长期运营效益。

伴随着数字技术的大规模应用，数字孪生、物联网被广泛地部署，可以对工程资产的全生命周期进行实时的监测，并且可以进行性能分析。这就促使企业由“交付产品”转变为“提供服务”。未来的工程企业不再只是建设方，而会成为长期的服务提供者。它们所给出的不是静态的工程实体，而是一整套动态的、不断改进的方案，比如“水资源智慧管理服务”、“清洁能源发电效率优化服务”等。工程企业把物理工程上的传感器网络当作支撑，创建高保真度的数字孪生体，不断对工程的健康状况、运行效率以及外部环境变化展开监测。

工程企业依靠数字孪生体的模拟分析与预估来给业主提供增值服务，预测性维护提议、发电计划改良、水库联合调度方案等等，帮助业主实现更高的经济收益并缩减全生命周期开支。该种服务模式把工程企业收入同工程长期运营表现联系起来，使工程企业在设计、建造阶段就考虑工程的长期可靠性、耐久性、运营效率，从而促使整个行业向更高质量、更可持续方向发展。

（二）数据驱动的工程全生命周期管理

数据已经成为水利水电工程领域中除土地、劳动力、资本和技术之后的第五大生产要素。未来的工程管理将逐渐地从依靠经验的模式中走出来，转而从数据来做出科学的决策。形成包含工程规划、设计、施工、运维直至最后报废拆除整个过程的数据链，使数据流动无缝连接，集成共享并且可以智能分析，这是此模式创新的核心。

数字主线把各个阶段所产生出来的数据孤岛联成一个有机的整体。规划与设计阶段用历史水文、地质勘察、环境评价的数据来优化工程选址和总布局。设计阶段所创建的 BIM 模型，具有丰富的几何和非几何信息，可以无损传递给施工阶段，指导预制构件的生产和现场自动化施工，也可以实时记录施工过程数据。

进入运营期以后,把之前的数据和物联网实时监测数据注入数字孪生平台中,给工程健康诊断、风险预警、调度决策等提供有力的支持。运营期产生的大量数据,反过来又可以给新建工程提供宝贵的经验教训,供设计人员不断改进,形成一个不断学习、持续改善的闭环管理。依靠数据驱动的决策模式来保证决策有据可依,大大提高了工程管理的精细化、智能化水平,最大限度地发掘了工程资产的潜在价值。

(三) 平台化、生态化产业发展

未来水利水电行业之间的竞争,已经不是企业与企业之间的竞争,而是平台与平台、生态系统与生态系统之间的竞争。传统的链条式、封闭式的产业组织方式将会被打破,取而代之的是开放的、共享的、协同的平台型生态体系。核心就是创建数字化的行业基础平台,汇集产业链上下游的各种资源,使知识、技术、数据、能力等各方面的共享与配置。

该行业级平台将成为类似操作系统的存在,集中了设计院、施工企业、设备制造商、软件开发商、金融机构、科研院所等各种不同的参与者。平台给出标准数据接口,模块化的设计组件库,云化的专业软件服务,共享的计算资源,智能化的项目管理工具。不但给大型总包商提供寻找、管理分包商的便捷途径,也为小型技术公司提供将创新算法、硬件产品以服务模块的形式接入平台,为整个生态提供专业能力的机会。

平台化发展将会催生活力十足的产业生态。打破了企业的界限,促进了跨领域合作以及集体创新。无人机巡检公司与图像识别算法公司可以合作,在平台上一起给水电站提供大坝裂缝智能检测服务。生态化的企业发展模式,可以增加全行业的资源配置效率 and 创新能力,降低中小企业参与成本,激发生产的活力,面对越来越复杂的问题,促使产业转型升级。

三、价值创造趋势

数字化转型的根本目的就是产生新的价值。水利水电工程价值创造主要从三个方面体现出来,直接提高工程自身安全等级和经济效益,通过智慧化手段促进水资源的可持续利用和生态环境保护,服务于更广泛的国家战略和社会可持续发展目标。

（一）提升工程安全与效益

数字化技术是保证水利水电工程安全和效益的倍增器。在安全上，用覆盖大坝、厂房、边坡等重要部位的智能传感网络，结合北斗、InSAR 等空天地一体化监测技术，可以实现工程结构健康毫米级、全天候、自动化监测。后台的 AI 分析系统可以对海量的监测数据进行自动化识别，把安全防范工作做到预防阶段，给工程装备上装上了千里眼、智慧脑，在最大程度上保障了人民生命财产的安全。

就经济效益来说，数字化技术也起到非常大的作用。利用大数据分析以及机器学习，可以创建起精准的来水预测、发电功率预测模型，从而指导水电站制定出最佳的发电计划，在保证防洪、供水的基础上，实现最大的发电收益。数字孪生技术可以模拟虚拟空间各种运行工况，找到设备参数的最佳组合来提高机组效率，降低能耗。预测性维护系统可以预先知道机器会在什么时刻出现故障，从而可以合理地安排好修护工作的安排时间，避免由于非计划停机而造成的经济损失。运用上述管理模式之后，可以最大限度发挥工程潜在的经济价值，提升存量资产的价值，获得最大限度的投资收益。

（二）促进水资源可持续利用

水资源是生命、生产、生态的基础性战略资源，它的可持续利用正遭遇越来越严峻的考验。数字化、智能化技术给水资源精细化管理、高效利用和系统化保护提供强有力的工具。创建起覆盖整个流域的“数字流域”或者“智慧水网”，可以对降雨、径流、水质、取用水等信息实施全方位感知，并且能够开展动态模拟。

这种全局性的数字洞察力，使得水资源管理迈向了新的高度。

1. 根据实时的数据及需水预测模型，智慧调度系统可以调节水库、闸坝运行达到跨区域、跨流域的科学调水目的，保证生活用水和生产用水需求的同时，维持河流生态基流，保护水生态系统的健康，并有效的防范干旱等极端天气。

2. 提高水资源利用效率。在农业灌溉上，用物联网传感器监测土壤墒情、作物生长状况并与气象预报相配合，可以实行根据需要灌溉、准确施水的方法，大幅度地减少农业用水浪费。在工业以及城市供水管网当中，智能传感器可以对漏损状况实施实时监测，及时发现并修复漏损点，从而大大削减产销差，节约宝贵的水资源。

参考文献

- [1] 王卓甫,陶小平,丁继勇,等.重大水利水电工程EPC项目交易治理结构优化[J].中国农村水利水电,2023(7):268-271.DOI:10.12396/znsd.221708.
- [2] 刘昆鹏.数字化模拟技术在水利水电工程设计与施工过程中的信息化应用效果评估[J].数码设计(电子版),2024(4):0721-0723.
- [3] 黄利民.水利水电工程规划设计对生态环境影响与策略分析[J].中国科技期刊数据库工业A,2024(002):000.
- [4] 欣孟.论水利水电工程基础处理施工技术探析[J].水电科技,2024,7(10):61. DOI:10.33142/hst.v7i10.13881.
- [5] 孙贺.水利水电工程施工管理存在的问题与完善措施[J].中国科学与管理,2025,8(4).DOI:10.12721/ccn.2025.157039.
- [6] 赵杨.水利水电工程施工技术水平提升措施[J].数字农业与智能农机,2023(3):46-48.
- [7] 程涛.水利水电工程基础处理施工技术分析[J].水上安全,2024(15):191-193.
- [8] 李凯,胡兆全,蔡雷,等.水利水电工程施工期间周边水污染防治技术研究[J].环境科学与管理,2025,50(1):100-104.
- [9] 敖翔,杨明桃,李湓.水利水电工程建设项目BIM技术应用取费研究[J].建筑经济,2023,44(10):74-81.
- [10] 张金龙.水利水电工程基础处理施工技术浅析[J].治淮,2023(12):58-59.
- [11] 赵宏杰.探究水利水电工程对生态环境的影响与保护策略[J].区域治理,2024(6):0158-0160.
- [12] 逢希星,朱海龙,张明亮.基于人工神经网络的水利水电工程风险管控实践[J].人民黄河,2025,47(S1):195-196.
- [13] 姚泽宇,王小康.基于水利水电工程安全生产运行的问题与监督管理研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2024(003):000.
- [14] 刘永强,李俊成.水利水电工程中施工技术及质量管理措施[J].工程建设与设

- 计,2024(12):239-241.
- [15] 贾洪伟.水利水电工程施工管理相关问题探讨[J].中国科技期刊数据库工业A,2024(002):000.
- [16] 梓皓徐.水利水电工程监理与工程管理的相关性[J].水电科技,2024,7(11):66.
DOI:10.33142/hst.v7i11.14315.
- [17] 朱华燕.水利水电工程施工中常见技术问题的研究[J].建筑技术学报,2025,8(4).DOI:10.12721/ccn.2025.157040.
- [18] 郝相永.机械自动化技术在水利水电工程管理中的应用[J].人民黄河,2024(3).
DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2024.03.031.
- [19] 于文蓬,梅泽本,孙梦婕.谈水利水电工程设计概(估)算及预算定额的编制[J].山东水利,2023(11):11-13.
- [20] 上官林建,孙中一.绿色发展视域下水利水电工程建设对生态环境的影响探究[J].环境工程,2023,41(5):285-285.
- [21] 王甜,张鹏.地震作用下水利水电工程边坡稳定性分析研究[J].中国设备工程,2024(16):237-239.
- [22] 孙中良,王艺霏,张华忠,等.水利水电工程移民社会融合全生命周期支持体系建构[J].水力发电,2024(9).
- [23] 王雨君,李志红.农村水利水电工程建设管理与发展研究[J].农机市场,2024(5):72-74.