

内容简介

在全球水资源日益紧张、城市化进程不断加速、极端气候事件频发的背景下，水务工程作为保障水安全、支撑经济社会可持续发展的关键基础设施，其重要性愈发凸显。然而，长期以来，水务工程领域普遍存在“规划”与“实施”两张皮的顽疾，导致大量项目在落地过程中遭遇目标偏移、效率低下、资源浪费乃至功能失效等困境。为系统性破解这一核心难题，本书《水务工程规划与工程实施协同手册：问题解决与优化策略》应运而生。

本书是一部集理论深度、实践广度与战略高度于一体的综合性专业著作。全书以“协同”为核心理念，构建了一个从宏观战略到微观操作、从发现问题到闭环优化的完整知识体系。首先，著作奠定了坚实的理论根基，深入阐述了水资源可持续利用、流域综合管理等前沿理念，为读者提供了高屋建瓴的战略视野，并将这些理论精准地转化为指导实践的思想武器。在此基础上，本书采用鲜明的问题导向逻辑，聚焦于规划前瞻性不足、多部门目标冲突、技术标准与实际脱节、公众参与缺位等典型协同失配问题，通过深入剖析其在管理体制、技术瓶颈、经济制约及社会文化等层面的根源，进而系统性地提出了涵盖技术创新、政策完善、流程重塑与投融资模式创新在内的多元化解决方案。

尤为突出的是，本书的视野超越了单一工程项目，将水务系统置于流域、区域乃至城市水循环的大背景中进行考察，强调从“单项”到“系统”的全面协同。书中专门探讨了多水源联合智能调度、城乡水务一体化发展、以及“蓝绿灰”基础设施融合等系统性议题，旨在引导读者建立全局观和系统思维，避免局部优化引发的整体失衡。此外，著作还通过南水北调等大型工程的协同优化案例，生动展示了全链条协同实践的成功经验，并对智慧水务、数字孪生等新技术在促进技术协同中的应用进行了前瞻性展望。

本书不仅是水务领域从业者、规划师、工程师和管理者的实用工作手册，也为政策制定者、研究人员及高校师生提供了宝贵的理论参考与实践指南。它致力于打通水务工程从“美好蓝图”到“卓越现实”的最后一公里，为推动我国乃至全球水务事业的高质量、可持续发展贡献智慧与力量。

Collaborative Manual for Water Engineering Planning and Implementation: Problem Solving and Optimization Strategies

水务工程规划与工程实施协同手册： 问题解决与优化策略

张小兵 著

张小兵 著

水务工程规划与工程实施协同手册：问题解决与优化策略
Collaborative Manual for Water Engineering Planning and Implementation: Problem Solving and Optimization Strategies



PRICE: \$60.00



International
Union of Scientific and
Technological Scholars

作者简介



张小兵，2008年毕业于天津农学院水文与水资源工程专业，高级工程师，现任职于天津市水务规划勘测设计有限公司规划设计院，主要从事水务工程规划、设计和咨询工作，主持、参与了多项省市级规划和重要水利工程项目的设计工作。在省级刊物发表独著论文2篇，拥有2项实用新型专利。

Collaborative Manual for Water Engineering Planning and Implementation: Problem Solving and Optimization Strategies

水务工程规划与工程实施协同手册： 问题解决与优化策略

张小兵 著



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

CIP INFORMATION

Title: Collaborative Manual for Water Engineering Planning and Implementation:

Problem Solving and Optimization Strategies

题目：水务工程规划与工程实施协同手册：问题解决与优化策略

Author: Xiaobing Zhang

作者：张小兵

ISBN: 979-8-90040-155-3

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND
TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

**Collaborative Manual for Water Engineering Planning and Implementation:
Problem Solving and Optimization Strategies**

水务工程规划与工程实施协同手册：问题解决与优化策略

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: 16.25

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.

前言

PREFACE

水是生命之源、生产之要、生态之基。进入 21 世纪，人类社会面临着前所未有的水挑战：一方面，人口增长、经济发展与城市扩张持续推高用水需求；另一方面，气候变化加剧了水资源时空分布的不均，水污染、水生态退化等问题交织叠加，使得水安全已成为关乎国家长治久安、人民幸福安康和全球生态平衡的核心议题。在此宏大背景下，科学、高效地规划与建设水务工程，已不再是单纯的技术问题，而是一项复杂的系统工程，亟需打破传统壁垒，实现跨领域、跨阶段、跨主体的深度融合与协同。

然而，审视当前水务工程的实践现状，我们不难发现一个普遍而深刻的矛盾：精美的规划图纸与不尽如人意的工程现实之间，往往横亘着一条名为“协同失灵”的鸿沟。规划阶段雄心勃勃的生态目标，在实施阶段可能因技术难度或成本压力而被悄然搁置；设计图纸上理想化的方案，在施工现场却因地质条件复杂或协调不畅而频频变更；各部门各自为政的规划，最终导致设施重复建设或功能冲突。这种“规而不建、建非所规”的现象，不仅造成了巨大的资源浪费，更严重削弱了水务基础设施应有的韧性、效率与综合效益。因此，如何构建一套行之有效的协同机制，确保规划意图在工程实施中得到忠实、高效且富有创造力的贯彻，已成为摆在所有水务人面前的时代课题。

正是基于这一强烈的现实关切与使命感，我们撰写了这本《水务工程规划与工程实施协同手册：问题解决与优化策略》。我们的初衷并非简单地罗列知识点，而是希望打造一本能够真正“解决问题”的行动指南。为此，本书确立了三大核心特色：

其一，坚持理论与实践的递进统一。我们深知，脱离理论的实践是盲目的，而脱离实践的理论是空洞的。因此，本书开篇即从水资源可持续利用、流域综合管理等宏观理论入手，为读者构筑坚实的认知框架。这些理论并非空中楼阁，而是如同“解剖图纸”，旨在为后续剖析实践中的复杂难题提供

深刻的洞见与决策依据。随后，内容逐层深入，覆盖工程项目从前期、设计、施工到竣工验收的全生命周期，用大量真实案例揭示规划理念如何精准转化为设计方案，设计方案又如何的高度保真的情况下变为现实工程，有效防止理论与实践脱节。

其二，构建“问题-策略”的闭环逻辑。本书以问题为驱动，围绕水务工程协同过程中的各类痛点、堵点，构建了“发现问题—分析原因—提出对策—评价优化”的完整闭环。无论是规划的前瞻性缺失，还是实施中的“设计理想化、施工难满足”，我们都力求追根溯源，并给出兼具技术革新、政策法规、管理流程和投融资模式等多维度的系统性解决方案。更重要的是，我们强调策略实施后的效果评估与反馈，形成一种自我完善的动态管理机制，确保每一次改进都能落到实处。

其三，倡导从“单项”到“系统”的全面覆盖。水务工程绝非孤立的“点”，而是嵌入在更大系统中的“网”。本书将视野从单个项目（如水库、水厂）拓展至不同项目间的协同、工程与非工程措施的协同，最终上升到水务系统与社会经济、生态环境的协同发展。通过对多水源联合调度、城乡水务一体化、“蓝绿灰”基础设施融合等前沿议题的探讨，我们力图培养读者的系统思维，使其在面对具体问题时，能兼顾局部与整体，实现真正的综合最优。

我们期望，这本手册能成为您案头的良师益友，在您规划宏伟蓝图或攻坚克难建设难题时，提供清晰的思路、实用的工具和深刻的启发。让我们携手并进，共同致力于将每一滴水的价值发挥到极致，为建设一个更加安全、韧性、绿色和美好的水未来而不懈努力。

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

目录 CONTENTS

第一章 水务工程规划与工程实施协同概述	1
第一节 水务工程规划与实施协同的基本概念	1
第二节 协同管理在水务工程中的重要性	7
第三节 国内外水务工程协同实践案例分析	14
第四节 本书结构与内容安排	20
第二章 水务工程规划阶段的关键问题与对策	27
第一节 规划目标与需求分析中的常见问题	27
第二节 水资源配置与供需平衡优化策略	33
第三节 环境影响评价与可持续发展协调	39
第四节 规划方案的多目标决策方法	45
第三章 工程实施阶段的协同管理机制	53
第一节 项目实施组织与责任分工优化	53
第二节 进度、成本与质量协同控制	58
第三节 风险管理与应急预案制定	65
第四节 利益相关方沟通与协调机制	71
第四章 水务工程技术选型与创新应用	79
第一节 传统技术与新兴技术对比分析	79
第二节 智能化技术在水务工程中的应用	84
第三节 节水与水资源循环利用技术	90
第四节 技术经济评价与选型决策	96
第五章 政策法规与标准规范协同	103
第一节 水务工程相关法律法规解读	103
第二节 国家标准与行业规范应用指南	109

第三节 政策支持与资金保障机制	115
第四节 合规性审查与风险防范	120
第六章 水务工程经济评价与资金管理	127
第一节 投资估算与成本效益分析	127
第二节 资金筹措与融资模式优化	133
第三节 全生命周期成本管理	138
第四节 水务工程经济风险分析与应对策略	144
第七章 水务工程环境影响与社会效益评估	151
第一节 生态环境影响评价方法	151
第二节 社会接受度与公众参与机制	156
第三节 生态补偿与可持续发展策略	163
第四节 综合效益评估指标体系	169
第八章 智慧水务系统架构与功能	177
第一节 智慧水务系统架构与功能	177
第二节 大数据与物联网技术应用	183
第三节 信息化平台建设与运维	189
第四节 数字化协同管理案例研究	195
第九章 水务工程信息化与数字化协同	203
第一节 运维管理体系构建	203
第二节 设备维护与更新策略	208
第三节 绩效评价与持续改进	213
第四节 应急响应与故障处理	219
第十章 水务工程协同优化案例与未来展望	227
第一节 典型工程协同优化案例分析	227
第二节 问题解决经验总结与启示	232
第三节 未来水务工程发展趋势	239
第四节 协同优化策略的实施建议	244
参考文献	251

第一章 水务工程规划与工程实施协同概述

第一节 水务工程规划与实施协同的基本概念

一、水务工程规划的定义与内涵

水务工程规划给水务事业的发展给予顶层设计、长远战略。它根据对某一地区水资源、水环境、水灾害等现状的科学评估，结合社会经济的发展需求和生态环境保护的要求，对水务系统今后一段时期的发展目标、总体布局、工程规模和建设时序做出系统性、前瞻性的安排。

（一）规划的阶段划分与核心任务

水务工程规划一般是由宏观到微观、由战略到战术逐步展开的，分为几个重要的阶段。初始阶段为规划前期研究，主要任务是对基础资料进行全面收集，现场踏勘，区域自然地理、水文气象、社会经济、用水现状、环境污染等各方面信息综合分析。这一步是保证规划科学性的基础，一定要控制好数据的真实、完整。

在前期研究的基础上，进入流域或者区域水务发展总体规划（简称“总体规划”）的编制阶段。本阶段的主要任务是对区域内主要的水问题进行诊断，预测各种情况下用水量和环境容量，提出水务发展的总体战略、目标和指标体系。并进行水资源供需平衡分析，确定水功能区，提出重大工程的布局和非工程措施体系，形成区域水务长远发展纲领性文件。

最后就是专业规划，专项规划和详细规划阶段。本阶段以某个领域或者具体的工程为对象，防洪排涝规划、供水安全保障规划、水生态修复规划等。其主要任务就是将总体的规划原则和布局具体化，利用多方案技术经济比较来确定出具体的工程规模、技术参数、工程形态、投资估算，确定项目库以及建设时序，给后续的项目立项和工程设计提供直接的依据。各个阶段互相联系、互相衔接，共同组成了水务工程规划完整的工序链。

（二）规划的技术原则与指导方针

水务工程规划编制要遵守一系列科学技术原则，保证其前瞻性，可行性，

可持续性。这些都是规划工作应遵循的原则，也是衡量轻重缓急、做出取舍的准绳。

1. 系统性、综合性原则：将水务系统看成由水源、供水、用水、排水、水环境、水生态等子系统组成的复杂巨系统，统筹考虑生活、生产、生态用水需求，综合治理水资源、水环境、水灾害，追求系统整体效益最大化。

2. 可持续发展原则：规划决策要以水资源承载能力和水环境容量为刚性约束，坚持节水优先、注重水生态环境保护与修复，保证当代人的用水需求，不损害后代人满足自身水事需求的能力，促进水资源的可持续利用。

3. 以人为本、安全可靠原则，即把保障城乡居民饮水安全、防洪安全、生态环境安全作为首要任务，提高水务基础设施的韧性、可靠性，满足人民群众对美好生活的追求，充分体现水务工程的社会服务功能。

4. 因地制宜、技术经济可行原则，根据项目的自然条件、经济水平、社会文化背景等，选择的规划方案应符合项目所在地的实际，采用的技术路线应先进、实用、经济、易管理，不应盲目追求高标准，照搬别人的先进经验模式。

根据这些原则，规划工作要在国家及地方有关法律法规、政策方针的指导下进行。它要合乎《中华人民共和国水法》等法律的规定，落实最严格的水资源管理制度，对接国民经济和社会发展规划、国土空间规划等上位规划，保证规划的合法和协调。

（三）规划的成果形式与审批流程

水务工程规划成果是水务工程规划思想、分析过程及决策结论的集中反映，是以不同形式向不同层次的管理者、技术人员和公众传达信息。最大的成果就是规划报告书，把规划的背景、依据、过程、结论和建议全部表述出来，内容最齐全。报告书一般会包含大量的现状分析、需求预测、方案比选、环境影响评价、投资效益分析等内容，逻辑性、专业性都很强。

与规划报告书相配套的是规划图纸集。图纸是规划成果空间化直观的表达，利用地理信息系统等技术手段，把规划的布局、范围、工程位置等信息画在地形图上。规划图纸有规划范围图、水系现状图、工程布局方案图、水功能区划图等，给空间决策提供直观的依据。

规划成果还有规划说明书（报告书的简本）、专题研究报告、基础资料汇编、投资估算和经济评价附件等。它们一起组成一个整体，表现规划的全部内容。

规划审批程序是严格的、多方参与的法定程序，也是保证规划质量与权威性的有效途径。编制单位完成规划草案后，先进行内部审查、修改完善。规划组织单位再请专家组成的评审委员会召开专家评审会，对规划的科学性、合理性、可行性进行技术审查。专家评审意见对于规划的修订完善起着很大的指导作用。吸收专家意见后，规划草案会分别发给发展改革、自然资源、生态环境、住房和城乡建设等部门征求意见，以保证规划与各部门的工作相协调。重要的水务工程规划要经过公示、听证会等方式，征求社会各界的意见。最终，经多轮修改完善的规划成果，将按程序报同级人民政府或者授权的水行政主管部门审批。经过审批后，规划就具有法律效力，成为指导以后工程施工的刚性约束。

二、工程实施的定义与内涵

工程实施是把水务工程规划蓝图变为现实的过程，它牵涉到多方参与、诸多环节，是技术、管理、经济、法律等多方面综合的复杂系统活动。其要义在于依靠科学的管理、先进的技术手段，在既定的投资、工期、质量目标约束下，完成工程实体的建造，最终交付使用，发挥预期的社会、经济、生态效益。

（一）实施的阶段划分与核心任务

水务工程实施过程也具有阶段性，各个阶段的工作重点和主要任务也不同。项目前期工作以及设计阶段直接承接已经批准的规划。核心任务就是编制项目建议书和可行性研究报告，并在其基础上进行初步设计及施工图设计。此阶段应把规划的宏观要求细化、具体化，正确算出工程量和投资，决定着工程技术是否可行，经济是否合理。

项目得到审批、设计确定之后，就进入招标和建设准备工作阶段。这一阶段的主要工作就是通过公开、公平、公正的招标方式，选择出合适的勘察、设计、施工、监理单位，并签订具有法律效力的合同。项目法人单位还要完成征地拆迁、施工许可办理、现场“三通一平”（水通、电通、路通、场地平整）等准备工作，为工程顺利开工创造必要条件。合同管理、合规性，这是这一阶段最重要的工作。施工阶段是工程实施的核心，核心任务就是按照设计图纸和技术规范，由施工单位在项目法人组织下、监理单位监督下完成实体建造。该阶段的管理重点是“三大控制”，即质量控制、进度控制、投资控制；安全生产、环境保护必须贯穿始终，保证工程建设过程安全、有序、高效。

（二）实施的管理原则与控制要点

水务工程实施的管理是项系统工程，必须遵循一些原则才能实现项目目标。目标控制原则是所有管理活动的核心，在项目开始时就确定质量、进度、成本、安全等主要目标，整个过程的所有活动都指向这些目标的实现，当出现偏差时及时采取纠偏措施。

动态控制原则体现出了管理的前瞻性以及适应性。工程的实施环境具有不确定性，比如地质情况的变化、材料价格的起伏、政策的改变等等。管理者不能一成不变，要建立信息收集反馈机制，对项目实际进展与计划的差距进行跟踪比较分析，根据分析结果调整计划、优化资源配置，采取主动控制措施而不是被动应对。

全过程管理原则就是将管理活动渗透到项目的决策、竣工验收、后期运维的全过程之中。每一个阶段的管理为下一个阶段打下基础，前一个阶段的工作对后一个阶段起着制约作用。设计阶段质量的好坏直接影响施工阶段质量控制的难易程度和成本。因此需要打破阶段壁垒，从项目整体和长远的角度统筹管理，以达到综合效益最大化。控制的重点是对关键环节、重点部位进行精细化管理，隐蔽工程实行旁站监理、关键工序的质量进行验收、重大危险源进行识别和监控、工程变更进行严格审批等，抓住这些“牛鼻子”，从而有效控制项目全局。

（三）实施的成果交付与验收标准

工程实施的最后一个步骤就是成果交付、竣工验收，这是检验工程是否符合设计要求、合同约定的法定程序，也是正式交接使用的法定程序。交付成果不只是工程实体的物理形态。

1. 工程实体是指按照设计图纸建造的大坝、堤防、泵站、管道、水处理厂等建筑物和构筑物，是最重要的成果。

2. 技术文件资料：完整的、正确的、系统的技术图纸和技术档案，全部设计变更、洽商记录、材料质保书、试验报告、施工记录、监理报告等，是今后工程运行、维护、改造的依据。

3. 财务决算报告：对项目建设全部费用进行全面反映的文件，是确定新增固定资产价值的依据。

竣工验收是按照一系列严格的标准来进行的，这些标准就是评判工程是否合格的尺度。首先是国家以及行业现行的法律法规、强制性标准和技术规程，这是不能突破的红线。审批后通过的设计文件（施工图纸、设计说明等）为验收提供

主要依据，工程实体要与设计要求一致。项目法人同各参建单位签订的工程合同也是重要的验收依据，合同中约定的各项技术指标、质量等级、商务条款等都必须得到满足。验收分为单位工程验收、分部工程验收、最后竣工验收，逐级进行，每一级都必须合格。只有竣工验收合格之后，工程才算正式完工并可以合法使用。

水务工程实施阶段核心任务对比表

阶段名称	核心任务	关键输出 / 成果
项目前期与设计	编制项目建议书、可行性研究报告；开展初步设计和施工图设计。	可研报告、初步设计、施工图纸
招投标与准备	选定勘察、设计、施工、监理单位；完成征地拆迁、“三通一平”。	合同签订、施工许可证、场地准备就绪
施工阶段	按照设计图纸和规范进行实体建造；质量、进度、投资控制。	工程实体、施工记录、监理报告
成果交付与验收	移交工程实体、技术档案、财务决算报告；进行竣工验收。	竣工报告、验收证书、资产移交

上表所示，水务工程实施过程层层递进、环环相扣，各个阶段都有不同的任务以及产出。

三、规划与实施协同的定义与价值

规划与实施协同不是简单的线性衔接或单向传递，在水务工程项目整个生命周期内，规划编制方、工程实施方及其他相关方之间，经由持续的、动态的、双向的信息交流、目标对接、资源整合、风险分担等，所形成的一种集成化的工作过程。深层联动就是打破“规划一张图、实施一本账”的壁垒，消除蓝图到现实的断层。

（一）协同的基本内涵与特征

协同最基本的意思就是打破以往各自为政、孤岛效应、机构壁垒。传统上规划单位做好规划就把成果交出去，工作就告一段落。实施单位在遇到问题的时候，往往无法得到规划层面的决策背景，这就容易造成对规划意图理解的偏差或者机械执行。协同模式致力于创建共享信息平台，让实施阶段出现的情况与问题可以即时反馈给规划部门，给后续规划的编制或者现有规划的动态调整提供现实依据。

协同关系的形成，就是共同目标团队的创建。各参与方不再只关注自己阶段的任务完成，而会共同致力于项目全过程的目标，也就是工程最终的综合效益。这就意味着在规划阶段就应当充分考虑到施工工艺、技术可行性、造价控制等各

方面因素；而在实施阶段也必须充分理解规划中所设定的生态目标和社会目标，不能为了追求短期利益而牺牲长远价值。

协同有三大特点。第一，交互性，即规划与实施双方要建立常态化的沟通渠道，实现高频次、高质量的信息交流。其次就是动态性，协同不是一次性行为，而是一个贯穿整个项目过程的过程，规划在科学评估的基础上也可以作出适当的调整。再者是全员性，协同不只是高层管理者之间的协调，还需要渗透到各个专业的技术人员中去，形成跨部门、跨单位的协作文化。

最终它表现出来的工作模式就是价值导向的伙伴关系。此种模式把传统模式中可能产生的对立或者博弈关系，转变为依靠互信形成的合作关系。各方相互配合，在项目中遇到不确定的因素或者风险的时候，一起面对，共同承担成功带来的成果，从而创造项目整体的最大价值。

（二）协同的目标导向与核心价值

规划与实施协同的根本目的就是提高水务工程项目的整体绩效，保证规划意图得到最准确、最高效的实现。就目标导向来说，体现在很多方面。从技术上来讲，可以减少由于规划脱离实际造成的工程变更和设计返工，提高设计的可施工性和经济性。从管理的角度来讲，前后台联动可以缩短项目建设的时间，更准确的控制工程投资，防止出现超概算的情况。从功能上看，协同保证建成的工程物理上符合设计要求，并且能很好地完成规划所规定的防洪、供水、生态等功能。

它的价值是产生“ $1+1 > 2$ ”的系统效果。协同明显改善了决策的科学性以及前瞻性。实施阶段的实际经验与数据可以给规划提供重要的反馈信息，从而使得后续的规划更有针对性、可操作性更强。规划的前瞻性思考可以指引实施过程避免短视行为，给工程长远发展留出空间。第二，协同可以达到资源最优配置的目的。充分的信息共享可避免重复性的资料收集、勘探工作，从而使各个项目的工程进度得到科学的安排，平衡各项目之间对资源的调配，从整体上节约社会资源，提高投资效益。第三，也是最重要的，就是最大化项目的综合效益。协同良好的项目可以更好的协调经济、社会、生态三者的关系，最终交付一个经济适用、安全可靠、环境友好的精品工程，实现项目全生命周期价值最大化。

（三）协同的驱动力与实现基础

推动水务工程规划与实施走向深度协同，有诸多强大的动力。现代水务工程日趋增长的复杂性是第一推动力。工程项目的功能不再仅仅是单一的结构物，而

是包含多元目标、多重约束的复杂系统，所以各个参与方在项目开始时就必须要做高度集成的工作。可持续发展以及高质量发展全面落实的要求，使行业不得不放弃粗放式建设方式，转而采取全生命周期的精细化管理以及价值创造，协同因此成为实现这种转变的必然选择。

信息技术飞速发展，以数字建筑信息模型、地理信息系统、物联网、大数据等数字技术为代表，给协同提供了前所未有的技术驱动力。它们能创建起可视度高，信息整合程度高，用户体验好的数字孪生平台，冲破时空限制，让规划阶段，设计阶段，施工阶段，运维阶段等各个时期的实时互动与合作变得可行，从而大幅削减协调的成本和难度。

要实现规划与实施的协同，必须要有一个坚实的基础做保障。首先就是统一高效的信息平台，它是信息实时共享和无缝传递的载体，也是协同工作数字底盘。其次就是标准化的流程框架和制度保障，即需要形成一套完善的协同工作规则、沟通机制、决策程序、激励办法，把协同从自发状态变成规范化的行为。另外就是有协同能力的组织结构，例如设立跨部门的项目协调组或使用集成项目交付等新的组织形式，来打破部门间存在的壁垒。培养开放、互信、共享的协同文化是极其重要的，所有参与者都必须意识到协同的价值并且愿意积极参与，这样才能使协同真正发挥作用，得到良好的发展。

第二节 协同管理在水务工程中的重要性

一、提升工程整体效益的内在要求

水务工程的价值并不只是它物理功能实现所能创造的，而应是它全生命周期内产生的综合效益。协同管理冲破了各个阶段、各个环的壁垒，凭借改进资源调配和流程接洽，变成改善工程总体效益，达成投资价值最大化的重要保证。

（一）避免规划实施脱节导致的资源浪费

水务工程的规划与施工是两个重要的阶段，如果二者衔接不好，很容易造成严重的资源错配和浪费。规划阶段重宏观布局、长远目标，实施阶段重技术细节、现场条件。缺少有效的协调机制，很容易导致设计方案反复修改，甚至工程建成后功能不能满足规划要求、运行效率低下的情况。造成前期沉没成本的同时还会带来后期大量的返工、重建费用，造成资金、土地、建材等宝贵资源的浪费。

协同管理就是创建起规划、设计、施工、运维全过程的沟通反馈闭环，保证信息畅通无阻。规划阶段的宏观构想被实施团队理解并转换成可行技术方案，在施工过程中遇到的问题能立即反馈到规划和设计部门上进行改良。双向互动机制从根本上保证工程建设按规划目标进行，避免因理解不同或者信息壁垒造成边建边改、建后闲置等现象，保证每一份资源都用在最需要的地方，实现资源利用效率最大化。

利用系统化的协同工作平台可以各方都能共享到所有信息，数据、模型、进度等，保证规划的战略意图和执行的技术细节一一对应。管网规划中协同平台共享地质勘测数据、社会经济发展预测数据，设计、施工单位就可以在早期发现可能的冲突点和技术难题，在方案设计阶段就予以解决，从而避免后期昂贵的现场变更。该种前瞻性的管理方法把问题解决的关口提前，大大减少了返工和物料的损失，是实现水务工程精益化建设和资源节约的必然选择。

（二）缩短工程周期降低全生命周期成本

水务工程周期长、环节繁杂，时间成本是其全生命周期成本中的重要部分。传统的线性、串联式管理，造成各阶段存在着大量的等待时间和交接障碍，信息传递慢，决策效率低，工程进度受影响。一个环节的延误，就会引起后面一系列环节的连锁反应，造成工期无限期拉长，进而产生高昂的管理费用、资金利息和机会成本。

采用协同管理方式、并行工程和集成工作流程等方法大大缩减了工程时间。在信息共享的基础上，不同的专业、不同的环节就可以进行交叉作业、协同推进。例如，在设计阶段还没有完全结束的时候，施工单位就可以依据已经确定的某些方案，提前开始场地准备、材料采购等施工前的工作，从而达到设计与施工相互衔接的目的。打破了上一环节不结束下一环节不开始的僵化流程，把串行的任务尽量并行化处理，从而大大缩短了项目的总时长。协同管理有利于问题的早发现、快解决。各方方案在同一平台上一同审核可以很快发现潜在的矛盾和风险，及时提出解决办法，防止问题累积到后期集中爆发造成工期延误，保证项目能按照计划高效推进，最终实现缩短建设周期、降低财务成本、降低管理成本的目的。

（三）保障工程功能与规划目标的一致性

水务工程的最终目的就是服务于区域水资源管理、防洪排涝、供水安全等长期规划目标。工程功能实现程度与规划初衷相契合，才是判定工程是否算成功的

根本尺度。在复杂的工程实践中，参与方多、技术路线杂、外部环境变，实施中偏离最初规划蓝图容易，建成后的工程“形似神不似”，不能充分发挥其应有社会经济效益。

协同管理以最终规划目标为向导，塑造起一个不断校准并且动态对接的管理架构。它要求项目从一开始就要让所有重要的参与方，包括政府部门、规划单位、设计单位、施工单位、运营单位等，清楚地知道项目的目的和功能。在工程推进的每一个重要节点，用协同会议、联合审查等手段反复审视当前进展同最初目标的差距，保证每一个决策、每一次变动都服务于最终的功能实现。

由此防止了本位主义破坏工程目标。施工单位为赶工而简化某些工序，设计单位为突出技术而超前设计，这些行为如果不加控制，都会对工程的长期功能和效益造成负面影响。协同管理把所有参与方的行动引导到一个共同的价值体系之中，促使各方从项目整体利益的角度来考虑问题，依靠透明沟通渠道和责任共担机制，保证工程从蓝图变为现实的过程中，核心功能、规划目标始终保持高度一致性，从而保证工程真正可用、好用，并且能够长期稳定地发挥应有的价值。

二、应对复杂系统工程挑战的必然选择

现代水务工程已演变为一个融合多学科技术、涉及多元利益主体、并受动态外部环境影响的复杂系统。系统内部各要素高度耦合，外部环境又充满不确定性，传统单一、线性的管理模式已难以有效应对由此带来的治理难题。在此背景下，协同管理作为一种系统性思维和整合性管理工具，强调跨部门、跨专业、跨层级的协调与合作，成为提升水务工程整体效能、实现可持续发展的必然选择其内部高度相关联，外部动态不确定，给传统的管理模式提出严峻的考验。协同管理是一种思想也是一种工具，是驾驭复杂性的必然选择。

（一）协调多专业多主体交叉作业的需要

水务工程建设牵涉水利、土木、环境、电气、自动化、信息技术等诸多专业，涉及政府、投资方、设计院、承包商、供应商、社会公众等各类利益主体。专业之间、主体之间存在紧密的技术耦合和复杂的关系，交叉作业协调难度很大。传统的垂直、部门化管理模式面对如此复杂的协作网络时，极易出现信息孤岛、责任推卸、工作冲突等问题。

协同管理给破解这一难题赋予了有效的架构。它经由搭建起统一的协作平台，

并塑造起标准化的交流协议，于是冲破了专业领域的壁垒和组织的边界，使得各个领域、部门之间可以做到高效的配合。

1. 从技术角度来讲，协同管理就是将各个专业所知的知识以及数据进行整合。采用建筑信息模型等数字化手段，把水工、结构、机电等各方面的设计成果整合到一个模型里，进行碰撞检测和虚拟施工，能够在实际操作之前找到并解决各专业之间存在的设计矛盾，从而改进整体方案。

2. 就组织而言，协同管理明确划分了各个主体各自所承担的角色、应承担的责任以及合作的形式。通过建立联合工作组、定期召开协同会议等形式，保证各方面的利益诉求得到充分的表达和协调，达成决策共识，防止由于主体间利益冲突造成工程延误或者标准降低。网络化协作的管理方式把分散的专业力量和各方面的诉求，汇聚成推动工程建设强大的合力。

（二）动态应对外部环境变化的不确定性

水务工程的建设周期很长，在漫长的建设过程中，不可避免地会遇到各种外部环境的变化。政策法规调整、市场材料价格波动、极端天气事件频发、新的环保标准出台、项目所在地社会经济发展规划调整，都会给工程的设计、施工、成本带来冲击。传统的静态计划管理方式对于突发的不确定性问题，常常会表现出僵化被动、缺乏韧性适应能力的一面。

协同管理的一大优点就是它具有的天然灵活性以及动态适应性。它重视创建敏感的环境监测与风险预警体系，依靠各方面的共同努力，持续地收集、分析可能对项目产生影响的外部环境信息。当发现潜在变化或者风险的时候，协同机制就会马上启动应急响应程序，召集各方面一起评估影响，并且尽快制定出应对策略。在这样的管理之下，计划不再是固定不变的指令，而是随实际情况不断改变的动态标准。

新环保法规提高了出水水质标准，协同管理平台会快速召开规划、设计、施工、运营各方面的会议来讨论技术升级方案，评价成本增加情况并与业主方商议预算是否调整。这样一种快速又多方参与的决策方式，是传统逐级上报审批程序无法与之相比的。它让工程项目像一个有机的生命体，可以主动去适应外面世界的改变，灵活地调整自己的策略和路线，在不确定性中稳步地朝目标迈进，从而避免因为反应太慢而造成的大额损失或者失败。

建立起共享信息、共担风险和协商解决的合作机制以后，就会大幅度地增强

水利工程抗击外部干扰的能力。既可以保证项目顺利进行，也可以使工程更好地适应未来社会的经济发展要求，体现基础设施的长期价值和生命力。这种主动去迎接变化，在变化中找最佳解的管理哲学，是现代复杂工程项目的成功保证。

（三）系统性化解工程技术与管理风险

水务工程本身具有技术复杂性、管理多样性的特点，天然就存在地质条件的不确定性、新技术应用的失败、供应链中断、合同纠纷、安全事故等各种风险。这些风险一般不是孤立存在的，它们之间互相联系、传导，一个环节的风险会引发其它环节的连锁反应，形成风险链。传统的风险处理方式一般采用分专业、分部门的方法，缺少全局观念，不能发现并应对跨专业的系统性风险。

协同管理给风险化解赋予了一种系统的、全局的解决办法。它认为项目开始时就应组建起一个由所有关键参与方组成的项目团队。该团队在统一的识别风险框架下，从自身专业出发，对项目生命周期内所有的技术、管理风险做了全过程的辨识。这样就可以把分散在各个专业、各个主体脑中的隐性风险显性化、结构化，形成一份覆盖整个项目的综合风险清单。在此基础上，对每一个风险发生的可能性以及可能产生的后果进行评估，尤其是对于相关性较高的风险进行评估，从而准确的找到项目的重大风险点。协同性风险应对策略的制定，可以集思广益，汇聚众力，使预案更具有可行性、有效性，并确定风险责任人，一旦发生风险情况，就可以立即进行联动响应，将损失降到最低。

水务工程项目主要风险类型及应对方式

风险类型	风险描述	协同管理应对方式
技术风险	地质条件复杂、新技术应用失败、设计错误、施工质量问题	联合审查设计方案，BIM 协同建模进行碰撞检查；专家组评估新技术可行性；建立全生命周期质量追溯体系；
管理风险	沟通不畅、进度延误、成本超支、合同纠纷、安全事故	统一协同平台共享信息；建立动态进度管理和预警机制；定期成本核算与偏差分析；明确责任，建立纠纷解决机制；
外部环境风险	政策法规变化、市场价格波动、自然灾害、社会舆论	建立外部环境监测预警机制；多方协商调整项目计划；制定应急预案并定期演练；加强与公众沟通，透明化信息；
财务风险	资金链断裂、融资困难、投资回报不达预期	联合编制财务计划和预算；多方评估融资方案；定期财务审计和风险评估；

上表列出了水务工程项目的风险种类和协同管理下应对措施。由表可知，协

同管理就是利用跨部门、跨专业的合作来形成完整的风险识别、评价、处置体系，提高项目整体的抗风险能力。

三、推动水务行业高质量发展的关键路径

在水资源约束越来越紧、生态文明建设的要求不断提高的时代背景下，水务行业正在发生从规模扩张到量质齐升的深刻转型。推进高质量发展要把水务工程引向更高的效率、更强的智能以及更干净的方向。协同管理就成了实现以上改变的主要途径和关键的方法论。

（一）促进新技术新理念的快速落地应用

数字化、智能化、绿色化是水务行业的必然走向，智慧水务、海绵城市、数字孪生、再生水循环利用等新技术、新理念不断涌现。这方面创新取得的成果被应用后，从根本上能提高水务工程生产的效率、可持续性。但推广应用过程中常会遇到传统专业壁垒的阻碍、部门之间协调难的问题以及技术与管理相脱节的问题。

协同管理给新技术、新理念的集成和落地提供了一片肥沃的土壤。它打破了设计、施工、运维等各个阶段的界限，创建起一个跨专业、跨阶段的知识共享和技术融合的平台。应用数字孪生技术的项目中要融合规划、设计、施工阶段产生的大量数据和建成之后的实时运行数据。因此所有的参与者从项目开始就要使用同样的数据标准，在协同平台上交换数据和迭代模型。协同管理机制是跨阶段数据整合的可行保证，数字孪生体的出现，最终会为工程的全生命周期智慧化管理提供服务。

对于海绵城市这种需要规划、园林、市政、水利等各方面的部门配合协调的复杂理念，协同管理是海绵城市成功实施的根本保障。它可以将各个部门组织起来进行联合规划、设计，协调不同设施（透水铺装、下沉式绿地、调蓄池等）的空间位置与功能衔接，使渗、滞、蓄、净、用、排等多种功能在一个系统里和谐共存，而不是各自为政、相互牵制。协同管理使各专业领域的创新思维相互碰撞，产生出新的技术并依靠流畅的协作快速被应用实践之中，把从理念转变为现实的过程时间缩短了，使整个水务行业的科技水平得以持续地更新提高。

（二）提升水务工程的现代化管理水平

我国的水务工程管理长期以来在某种程度上存在着经验管理、粗放型管理的

情况，其管理流程缺乏标准化、决策缺乏科学性、管理不够精细化。迈向高质量发展，就要用现代化、科学、高效、精细的管理方法。协同管理是推动模式变革的一种方式，它依靠先进的管理理念加上数字化技术，全方位提升水务工程的管理模式。

协同管理使水务工程由传统的、部门分割的线性管理转变为现代的、项目集成的网络化管理。它用协同工作平台、大数据分析、物联网等数字化手段，实现项目信息的实时共享、过程的可视化监控，使决策建立在数据的基础上。管理者不再需要填表、开会，而是靠统一仪表盘来观察项目的进度、成本、质量、安全等主要数据，及时发现问题、控制风险。透明化、即时化的管理方式大大提高了决策的效率和科学性，精细化管控成为可能。它促使工程管理走向标准化、流程化，在协同平台上将最佳实践、标准流程固定下来，削减人为因素的影响，保证管理动作的统一规范，为工程高品质交付筑牢根基。

（三）实现水资源可持续利用与社会效益最大化

新时代的水务工程已经不再只承担工程建设任务，它的使命已经扩展到了保障水安全、修复水生态、改善水环境、服务社会经济发展等各个方面。因此工程的评价标准已经不再只看技术经济指标，还要看资源节约、环境保护、社会公平等可持续发展指标。实现工程经济效益、社会效益和生态效益三者统一，才是水务行业高质量发展的最终目的。

协同管理成为实现这一伟大理想的关键途径。它把可持续发展思想融入工程建设的全过程，依靠不同领域间的合作来实现多种价值目标。规划设计阶段的协同管理机制可以引入生态学家、社会学家、公众代表等各种意见，共同论证工程方案的长期生态影响和社区居民的利弊，使工程方案既能满足功能需求，又能最大限度地保护生态系统、尊重公众利益。水库工程规划在协同管理之下，可兼顾防洪、供水、发电、航运等经济收益功能，同时兼顾下游河流生态流量维持、生物多样性保护、区域旅游业带动等社会、生态收益，实现两者的最佳平衡。

在建设与运营期间，通过协同管理把节水、节能、环保技术融合起来，推动水资源循环利用、再生利用。它把供水、排水、污水处理、雨水收集等各个系统的数据和运行策略综合起来，从而达到区域水资源优化调度和梯级利用的目的，把传统意义上的废水变成宝贵的资源。这样全局的、一体化的管理资源，打破了“九龙治水”的局面，使得水资源在社会经济系统中被利用到最大化。

协同管理依靠开放、共享、共治的平台把政府、企业、公众等各方面力量汇聚在一起，共同致力于水资源的可持续利用。它不只是交付了一座物理上的水务工程，更创建了一个健康、有韧性、可持续发展的水务治理生态系统，为社会长期发展提供可靠的水安全保障，使工程的社会效益和公众福祉得到最大化的发挥。

第三节 国内外水务工程协同实践案例分析

一、国外先进协同实践案例

世界各国为应对水资源挑战，探索出并且实践了诸多行之有效的协同模式。这些先行举措不仅有效缓解了当地的水安全、水污染和水资源短缺等紧迫问题又在城市发展，环境保护，民生改善等诸多方面形成了综合效益，给跨部门，跨领域合作树立了榜样。

（一）新加坡 ABC 水计划协同管理

新加坡的“活跃、美丽、干净”全民共享水源计划，简称 ABC 水计划，是城市水资源管理与城市规划、景观设计无缝对接的典范。其核心理念就是把功能性的蓄水池、沟渠、水道变成有生机、风景优美的溪流、河流、湖泊，使其深度融入市民生活。这一宏伟愿景的实现，依靠的是公用事业局、国家公园局、市区重建局等各个部门通力合作。公用事业局作为水资源管理的主要部门，在项目构思的初期就同负责城市总体规划和绿地系统建设的部门合作，保证水务基础设施的设计可以同时实现生态、景观、社区游憩等多重目标。

协同管理机制冲破了传统水务工程的功能壁垒，用一体化规划与设计把雨水管理，生态修复以及公共空间营造融合起来。碧山宏茂桥公园改造项目，把一条笔直的混凝土排水渠改造成了蜿蜒的自然河流，不但大大提高了区域防洪能力，创造了多样化的生物多样性栖息地，也成了市民喜爱的滨水休闲场所。ABC 水计划的协同实践表明，跨部门目标融合、资源整合可以将水务工程由传统的灰色基础设施转变为具有蓝色、绿色特征的资产，实现社会、经济、环境效益共赢，提高城市的宜居性、可持续发展水平。

（二）东京地下排水系统一体化实施

为了应对台风、暴雨造成的城市内涝问题，日本东京建造了世界级的防洪工

程首都圈外郭放水路。这个巨大的地下排水系统被称为“地下神殿”，建造和实施全部体现大型基础设施建设一体化协作精神。工程成功是国土交通省、东京都政府、埼玉县等周边地方政府长期、复杂、高效协调的结果。在一个人口、建筑高度集中的成熟城区地下进行如此规模的建设，土地征用、管线迁改、交通组织等无数个巨大的难题接踵而至，任何一个环节的脱节都会导致工程停工。

协同的关键就是建立起一个强有力的跨区域、跨部门的协调机构，对各个关联工作进行统一规划、同步推进。工程建设过程中，施工管理部门同交通、市政、电力等相关部门保持持续沟通与联动，把工程推进给城市日常运转带来的影响降到最低。在运营阶段就形成了高效的协调机制。放水路的开启要依靠准确的气象预报以及实时的河流水位监测数据。为此，工程运营机构同气象厅、河川管理机构形成数据共享、会商制度，创建起一套“监测—预警—决策—调度”为一体的应急体系。东京的案例说明，跨区域的大规模水力工程要想成功，就必须有一套打破行政区划的一体化规划、建设和运营协同机制。

（三）荷兰三角洲工程协同决策机制

荷兰三角洲工程是为了应对1953年特大洪水灾害而启动的一系列水利工程，经过半个多世纪的发展，已经从单纯的防洪工程发展成为集防洪安全、淡水供应、生态保护、空间规划为一体的综合性水资源管理体系。其成功转型的核心是有一套成熟的、动态的、包容的协同决策机制，保证国家长期水战略可以应对气候变化等未来挑战，得到社会各界的认可。

该协同决策机制具有鲜明的多层次、跨领域特征，具体体现在以下几个方面：

1. 多层次治理协同：荷兰设立三角洲计划专员，该专员独立于内阁之外，直接向内阁负责，主要职责就是协调中央政府、省政府、市政府和有悠久历史的水务委员会之间的关系，保证从国家战略到地方执行的垂直协调和政策连续性。

2. 知识与政策相辅相成，决策过程中大量依赖科学研究成果。代尔塔研究院等顶级科研机构同政策制定者密切配合，为三角洲计划不断给予科学评估和前瞻分析，保证所有的决定都依靠对将来风险和不确定因素最完备的认知。

3. 广泛的社会协同，荷兰著名的“圩田模式”被用于水务决策上，以制度化的程序把企业、非政府组织、农民、普通公民等利益相关者纳入到规划和决策过程中。社会公众的广泛参与汇集了各方面的智慧，为整个系统顺利运行打下了良好的社会基础，使系统具有强大的韧性与适应能力。

二、国内典型协同实践案例

随着我国经济社会发展对水资源、水安全、水生态提出更高要求，国内也出现了一批在水务工程规划与实施协同方面的典型案例。这些做法立足于中国国情，在超大规模工程统筹、城市发展理念更新、智慧化转型等方面做了不少尝试，对形成具有中国特色的水务协同治理模式积累了经验。

（一）南水北调工程规划实施统筹

南水北调工程是世界上规模最大的跨流域调水工程，目的在于解决我国北方地区严重缺水的问题。工程宏大、技术复杂、影响深远，因此其规划实施必须要有高层级的强有力统筹协调才能完成。国务院成立专门的领导小组和办公室，对工程建设中出现的重大问题进行统一领导、协调解决，从顶层设计上给工程的顺利进行提供最高级别的政治保障和组织保障。

规划阶段的协同就是各个相关方的紧密配合。水利部负责工程的技术方案，同生态环境部共同管理水源地保护及沿岸生态保护；同自然资源部共同管理工程占地和移民安置；同国家发展和改革委员会共同管理投资和效益。跨部门协同规划使工程方案具备了综合性、可行性。几十年来，中央和地方的联系一直很密切。中央管总体协调和制定标准，沿线十几个省市各自负责本辖区范围内的征地拆迁、配套工程建设和地方协调工作。工程建成后，在运行调度上，水利部下属管理机构建立了东、中线水情、雨情、工情、水质一体化监测和调度系统，同沿线省市水利、环保部门信息共享、协同调度，共同保障“一泓清水永续北上”。南水北调成功实施，体现我国在超级水务工程上集中统筹、跨区域、跨层级协同能力强大。

（二）深圳海绵城市建设多部门协同

作为我国首批海绵城市建设试点，深圳的实践给高密度建成区怎样系统解决城市水问题提供了一个范本。其成功经验就是将海绵城市理念融入到整个规划、建设、管理的全过程，把单一的水务部门治理水问题转变为各部门协同治理。深圳市政府并没有把海绵城市建设当作水务局的专有工作，而是把它提升为城市发展模式转型，动员所有部门共同参与。

协同机制主要是靠制度创新、流程再造来实现的。深圳市出台地方性法规，强制性地将海绵城市建设要求纳入新建、改建、扩建项目规划、设计、施工、验

收等各个环节。规划和自然资源局在编制城市规划、出让土地时要明确海绵设施的布局和指标要求，住房和城乡建设局在审查施工图、监督工程建设时必须检查海绵设施是否按标准实施，城市管理综合执法局将已建成海绵设施的日常维护纳入其工作范围。全链条、跨部门工作模式依靠法规与标准的“硬杠杠”，把水务管理目标拆解成城市建设的每一个细胞，使绿色屋顶、透水铺装、下沉式绿地等海绵体设施能够在城市中成系统地推广开来，达到“源头减排、过程控制、系统治理”的效果。

（三）雄安新区智慧水务系统一体化

雄安新区建设是从零开始规划的面向未来之城，其水务系统建设从一开始就秉持了“数字孪生、智能协同”的理念，是水务工程与信息化、智能化技术深度融合的典范。雄安的协同模式已经不是简单的部门之间的协同了，而是物理世界和数字世界的协同。目的就是构建覆盖白洋淀流域生态治理、城市防洪排涝、供水安全、水环境质量改善的全域智慧水务体系。

一体化协同是在同一个开放型的数字平台之上完成的。该平台汇集了水文、气象、环保、市政等各方面大量的数据，包含白洋淀水质传感器数据、城市供水排水管网的流量压力数据、气象雷达降雨预报数据、无人机巡查影像数据等。利用大数据分析、人工智能算法等技术可以模拟和预测水系统运行状态，为跨部门协同决策提供科学依据。比如暴雨预警，平台可以联气象、水利、城管等部门提前预警，智能调度闸门泵站，优化城市排水路径，告知公众。雄安实践表明，以数字平台为主导的智慧化协同可以打破信息孤岛，实现用数据说话、用数据决策、用数据管理，把水务工程规划与实施推向一个前所未有的高效、精确、智能的新高度。

三、案例经验总结与启示

对国内外典型的水务工程协同案例进行分析，可以总结出很多有普遍指导意义的经验与教训。这些共性规律可以反映出成功协同所需要的必要的条件，对于我国的水务工程规划与实施的协同机制有着重要的借鉴意义。通过对以上案例的比较可以看出不同协同策略侧重点以及成效，如下表所示。

水务工程协同实践案例对比表

特征 / 案例	新加坡 ABC 水计划	东京地下排水系统	荷兰三角洲工程	南水北调工程	深圳海绵城市	雄安智慧水务
协同核心	城市水系与景观融合	大规模基础设施建设与运营	国家水战略与综合管理	跨流域资源调配	城市发展模式转型	物理世界与数字世界一体化
主要参与方	公用事业局、国家公园局、市区重建局	国土交通省、都政府、地方政府、气象部门	中央政府、省市、水务委员会、科研机构、社会各界	国务院、水利部、生态环境部、地方政府	市政府、规划自然资源局、住建局、城管执法局	水文、气象、环保、市政等数据平台多部门
协同机制	一体化规划设计、目标融合	跨区域 / 部门协调机构、数据共享	多层级治理、科研支撑、广泛公众参与	高层级统筹协调、部门分工协作、中央地方联动	制度创新、法规强制、流程再造、全链条管理	数字平台赋能、大数据分析、AI 智能调度
关键驱动力	高层愿景、综合效益追求	重大灾害应对、长期安全需求	历史灾害教训、可持续发展理念	国家战略需求、最高级别政治保障	城市转型升级、法规强制推行	未来城市定位、科技创新引领
主要成果	城市宜居性、生态景观提升	城市防洪能力、应急响应效率	防洪、淡水供应、生态多目标平衡	北方水资源保障、生态环境改善	城市水安全、生态韧性增强	水务管理高效、精准、智能化

（一）顶层设计与政策法规保障

所有成功的协同案例，没有一个不是依靠强有力的顶层设计和完备的政策法规保障。新加坡高层推动的城市战略发展，荷兰通过立法《三角洲法案》等形式设定的国家水务目标，南水北调工程国务院层面的统筹协调等都表明高层级的战略引领、政治意志是打破部门壁垒、整合各方资源、解决重大矛盾的前提。有清晰的、稳定的、有权威的顶层设计，才能对长期、繁杂的协同工作起到方向引领和根本动力作用。

政策法规的保障作用就是把协同的软要求变为硬约束。它通过确定各个协同主体的职责、权利、义务来给协同行为提供可以依据的规范和可以考核的标准。深圳把海绵城市建设的要求写入地方法规，强制所有的建设项目必须遵守，这就是法规保障协同落地生效的生动体现。若没有法律、政策的强制力，跨部门协同就会停留在表面，在部门利益或短期困难面前就会被放弃。因而，创建科学合理

的顶层设计以及刚性政策法规制度，就是保证水务工程规划、实施的协同工作持续、有效推进的根本。

（二）信息化平台对协同效率支撑

信息化平台在现代水务工程中起到重要的技术支持作用。它就像协同工作的“中枢神经系统”，信息共享、沟通协调、集体决策的效率得到了极大的提高。雄安新区智慧水务一体化平台把多源数据汇集起来，给所有参与者呈现一张共同的、实时的“战场态势图”，使跨部门联动由过去的定期会议、公文来往变成依靠同一个数据平台的即时响应和动态协作。东京地下排水系统的高效运转，也与气象、水文等部门的实时共享数据平台有关。

信息化平台核心的价值就在于它可以克服组织边界造成的信息壁垒、认知偏差。所有的协同方如果依据相同的客观、透明的数据来进行分析和判断，那么沟通的成本就会大幅下降，决策的科学性也会大幅提升。不仅可以提高日常工作的合作效率，也可以在处理突发事件的时候快速、准确地完成集体合作。因此大力投资并建设开放共享的数字信息平台，把其作为水务工程规划与实施协同的基础设施，是推进水务治理现代化，提高协同效能的重要措施。

（三）公众参与在协同过程的作用

成功的协同不只是政府部门之间的协同，将公众、各类社会组织也包括进去也很重要。公众参与可以给水务工程赋予多种不同的视角，地方性的知识，以及更广泛的社会认同。荷兰的圩田模式把利益相关方的协商共识当作决策的前提，使得工程方案在最大程度上兼顾各方利益，减少实施过程中出现的社会阻力，因其广泛的认同度而具有更强的生命力。新加坡 ABC 水计划在设计之初就考虑到社区的参与，让居民参与到滨水空间的设计与维护中来，使项目成果更符合使用者的需求，同时培养了公众爱护水资源的意识和主人翁精神。软协同成为工程取得长期成功的重要因素，使水务工程由单纯的技术项目变成了凝聚社会共识、增加社区福祉的共同事业。忽略公众参与的话，再好的技术方案、再紧密的部门配合，项目也会因为缺少社会根基而出现可持续性问题。

第四节 本书结构与内容安排

一、本书的整体框架与逻辑脉络

本书编排严格按照一定的逻辑构建出一个从宏观到微观、从理论到应用、从问题发现到策略产生的完整知识体系。该框架不仅可以反映出水务工程管理的内在规律，也可以给读者解决实际问题提供一种系统化的方法论指导。

（一）理论到实践的递进结构

本书论述建立在坚实的理论基础上，从水务工程规划与建设的重要意义、基本原则等开始论述。从水资源可持续利用、流域综合管理等宏观理论入手，使读者形成高屋建瓴的战略认知。这些理论章节不是无病呻吟，它们犹如“解剖图纸”，给后面实践环节里可能遇到的困惑与难题给予洞见，给读者赋予思想武器和决策依据，是全书的知识根基。

在此基础上本书开始重视工程实践中出现的实际问题，并对工程项目前期、设计、施工及竣工验收各个阶段协同的关键点以及常出现的问题进行了论述。书中用大量的真实工程案例，分析了规划理念怎样转化为可实施的设计方案，设计图纸又怎样在高度保真的情况下变为现实工程。从理论认识走向操作实践，逐层深入地把抽象的协同观念转变为具体的行动指南，从而防止出现理论同实际相脱节的情况。

（二）问题到策略的闭环逻辑

本书的核心价值就在于问题导向。它并不是罗列知识点，而是以水务工程规划、实施过程中出现的、急需解决各类协同失配问题为驱动，构建出了发现问题、分析原因、提出对策、评价优化的循环逻辑。每一个章节都会对某一类或者几类典型问题展开论述，比如规划前瞻性缺乏，多部门目标互相冲突，技术标准与实际情况不匹配，公众参与程度不高等等。

本书从管理体制、技术瓶颈、经济制约、社会文化等角度对这些问题进行了深入的分析，试图找到问题产生的根源。基于对问题的根源进行了深刻的分析之后，书里系统地给出了多种解决策略和改进途径。这些策略有技术革新应用的方面，也有政策法规完善的建议，还有管理流程重塑的方法，也有投融资模式创新的设想。

书中还提出了策略实施之后效果的评估和反馈机制,让读者思考怎样依据执行的结果来调整原有的策略,持续地改善它,从而形成一种自我完善的闭环管理。这样的逻辑结构使本书不仅仅是一本书的知识手册,更像一本可以指导实践、解决顽疾、提高水务管理水平的实用指南,有很强的现实针对性和可操作性。

（三）单项到系统的全面覆盖

内容上力求全面、系统,视野不局限于单一项目,而是把水务工程放在流域、区域、城市水循环系统的大背景之下进行考察。内容编排从单个具体的项目(水库、水厂、管网)之间的协同起步,进而发展到不同项目之间的协同、工程与非工程措施之间的协同,最后达到水务系统与社会经济生态系统之间的协同。此种视角保证读者在碰到具体问题的时候,能具备全局观和系统思维,防止由于局部优化引发整体失衡。

本书通过专门的章节,探讨了系统层面的协同规划与管理,其内容涵盖了:

1. 多水源联合调度:地表水、地下水、再生水等不同的水源怎样通过优化调度与智能控制达到水量、水质动态平衡的目的,提高供水系统弹性、可靠性。
2. 城乡水务一体化:分析城市与乡村供水、排水、防洪等方面内在联系及协同方式,提出打破城乡分割,实现设施共享、服务均等的思路。
3. 融合“蓝绿灰”基础设施,解释了怎样把绿色基础设施、蓝色生态空间、传统的灰色基础设施有机结合起来,共同构成健康、高效、可持续的城市水系统。

二、各章节核心内容导读

为了使读者能迅速把握全书的主要内容,本文对各主要章节的主要内容作了导览。内容被有机地划分成不同的模块,一起形成了规划实施协同的完整知识图谱,引导读者按照图示去学习。

（一）规划实施阶段的问题对策

本书前半部分主要研究规划、实施这两个核心阶段以及它们之间衔接过程中出现的问题及解决方法。规划阶段书中对水资源评价和需求预测的科学性问题作了深入分析,指出了数据缺失、模型选择不当等造成规划偏差的原因,并提出用多情景分析和大数据等办法进行改进。并探讨规划环评协同问题,论述怎样把生态目标更好地纳入水务规划决策,达成发展与保护的协调统一。

实施阶段主要解决的是设计到施工的转化问题,对“设计理想化、施工技术

难满足”“图纸变更多、管理缺位”等现象的原因进行了分析，并提出标准化设计、模块化施工、建立现场协调机制等解决办法。书中对工程建设期质量、安全、进度、成本协同控制进行了分析，重在全过程的风险识别与动态控制。

衔接环节就是协同的关键。本书专门设一章来分析规而不建、建非所规问题，从项目审批、资金保障、绩效考核等方面分析了规划到实现过程中体制障碍。

书中提出了建立规划实施联动平台、提高规划的法律地位和刚性约束、引入第三方评价等新的方法来打通规划到实施的最后一公里。剖析问题、提出对策，使读者认识蓝图到现实存在的潜在陷阱，掌握规避问题的实用方法，提高项目成功率和效益。

（二）技术政策经济等协同要素

水务工程是否能协同，是很多技术、政策、经济等因素共同影响的结果。本著作中部阐述主要的协同要素以及它们相互影响的方式，给高层次协作指明了方向。关于技术协同，本书对智慧水务、数字孪生等新技术的数据整合应用做了介绍，也研究了怎样优化组合并集成不同的工程技术（节水、水处理、生态修复等），从而达到系统功能整体最优的目的。

本章对现行法规中可能会出现部门划分、目标矛盾等问题做了分析，并以国际经验作为参考提出建立一个协调的水法规体系、制定部门间的协调机制以及用激励性政策来进行改革。书中认为，好的政策设计可以给协同行为给予足够的激励和刚性的约束，就可以破解“九龙治水”困局。

经济因素配合是使项目能够继续向前发展的一个基础。本书专门针对水务工程投融资模式做了一项专题研究，对政府主导、社会资本参与、绿色金融等模式的优缺点、适用条件做了比较分析。主要内容就是怎样通过科学的水价机制以及成本效益分析，既保证项目的经济可行性、社会公平性又考虑到环境的外部性，使得工程的全生命周期内财务上可持续。

常见水务工程投融资模式比较

模式名称	主要特点	优势	挑战	适用场景
政府主导	由政府直接投资并运营管理	掌控力强，易于实现公共目标	财政压力大，效率可能不高	大型公益性项目，战略性基础设施
PPP (公私合营)	政府与私营部门合作，共担风险、共享收益	减轻政府财政负担，引入私营部门效率	谈判复杂，风险分配需合理，监管成本高	收益稳定、现金流可预测的项目，如污水处理、供水
绿色金融	以环境效益为导向的金融产品和服务	引导资金流向环保项目，促进可持续发展	绿色项目认定标准，初期成本较高	节水改造、生态修复、可再生能源项目
市场化运作	完全由市场主体投资运营	效率高，创新性强	公益性保障不足，可能引发外部性问题	竞争性较强的服务领域，如部分水务服务外包

从上表可以看出，不同的投融资方式在水务工程推进方面各有利弊，应视具体的工程建设情况和环境而定。从宏观的治理层面出发来理解并推进水务工程的协调工作，本书主要分析了以上三个方面内容。

（三）信息化运维等全周期环节

传统的工程管理重建设、轻运维。为了解此难题，本书后半部分以全生命周期管理为视角，主要论述了信息化建设和智慧化运维长期协同效益的取得。书中介绍了在规划设计阶段就前瞻性地植入信息化基因，统一数据标准，为以后的智慧运维打下坚实的基础。建立覆盖水源、水厂、管网到用户的全流程感知网络，并搭建起数据融合、模型运算、决策支持的智慧水务平台。

运维协同采用的是以状态监测、预测性维护、资产全生命周期管理为主的现代模式。研究内容是如何通过大数据和人工智能对管道泄漏、设备故障等问题进行早期预警、智能诊断，实现从被动抢修到主动预防。书中专门有一章论述应急管理协同，详细说明怎样整合各个部门的应急资源和信息，制定应对突发事件的联合预案，依靠数字化演练提高系统应急能力和韧性。对全周期环节进行分析，本书目的在于引导行业形成“全周期成本和效益”的理念，将协同理念扩展到长期运营中，最终实现水务工程安全、高效、可持续的目标。

三、本书的读者对象与使用建议

为了使本书的知识价值能够最大限度地得到发挥，并且能够服务于水务行业

的各个参与者，在本节中确定出了核心读者群体，并提出了具体的阅读建议，以便于读者将书中的理论、策略与自身的工作实践紧密结合。

（一）水务工程规划设计管理人员

本书对奋战在水务工程第一线的规划、设计以及项目管理的人员来说，是一本专业工具书、实战手册。该类读者一般专注于本专业领域细节，缺少项目整体以及跨专业协作的系统认识。本书所建立的从规划到实施、从单项到协同的框架，将会使他们跳出专业的壁垒，站在更高的角度来审视自己的工作。

规划人员可以从书中学习到如何提高规划的前瞻性以及可操作性，使规划成果能够顺利地转变为具体的工程。设计人员可以通过本书了解规划意图、施工条件和运维需求，制订出更好的经济合理、富有生命力的工程方案。

项目管理人员可以把本书当作协作管理的操作指南，学习怎样协调设计、施工、监理等各方，怎样利用信息化手段提高管理效率，怎样处理项目变更和风险。建议这类读者在使用本书时，可以先重点阅读和自己的工作阶段有关的章节，然后通读全书以获得全局观念，并将书中的协同策略积极地应用到实际工作中。

（二）政府相关主管部门监管人员

本书对于政府水行政、发改、自然资源、生态环境等相关部门从事监管工作的公职人员也有着重要的参考价值。监管人员属于水务工程协同治理体系的一部分，他们的决策以及监管行为会直接决定水务事业的发展走向及其成果。梳理水务工程协同的内部逻辑和外部约束条件，会为他们提供认识水务工程复杂性的更多角度。

阅读本书，监管人员可以得到一个科学的框架，用以审查水务工程规划是否合理，评价项目实施方案是否可行，对项目全过程实施监督。书中有关政策协同、投融资模式、法规体系建设等章节，可以为他们制定或者完善地方性水务政策提供理论依据和实践参照。跨部门协调方面本书提出的建立联动平台、信息共享机制等建议，也可以给他们在开展跨部门协调、形成治理合力时提供具体思路。建议该类读者把本书当作政策研究的案头资料和工作决策的参考依据，并运用书中的知识来不断提升水务管理的科学化、现代化水平。

（三）高等院校相关专业师生研究人员

给排水、水利、环境、市政、工程管理等专业高校师生可将其作为内容前沿的专业教材，也能获得科研灵感。目前的专业教育侧重单科深度，但是对跨学科

协同问题的研究有所欠缺。本书正好填补了这个空缺，给学生搭建起多学科知识融会贯通、解决复杂工程问题的桥梁。

教师可以将本书的内容融入到课程的教学当中，引导学生用系统的观点来认识现代水务的难题，培养学生的综合能力。学生在获取专业知识的时候，也会形成重要的协同思维和全局观念。对研究人员而言，本书有双重价值，

1. 系统梳理了当前水务工程协同领域内的核心问题、研究现状及实践进展，可作为研究的起点。
2. 书中提到的不确定性决策、多主体协同博弈、智慧水务数据融合等一连串待解决的问题，也给将来探寻给予了方向。

本书能够帮助研究人员快速定位领域前沿，发现具有重要理论与实践价值的研究课题。

第二章 水务工程规划阶段的关键问题与对策

水务工程的规划阶段是决定工程成败的基础，其意义不言而喻。本阶段决策质量的好坏直接关系到工程能否满足社会经济发展的需要，能否保证水资源的可持续利用，能否有效应对未来各种风险和挑战。科学、全面、有前瞻性的规划是实现水务工程综合效益最大化的前提。本章会详细分析水务工程规划阶段所遭遇的一系列重要问题，系统地给出对应的改良对策与解决办法，进而给规划工作赋予理论引领和实际参照。

第一节 规划目标与需求分析中的常见问题

水务工程在规划阶段目标确定、需求分析是否准确，对于项目的顺利进行十分重要。偏差会产生连锁反应，造成后面的设计、施工、运营管理等一系列问题。准确把握发展脉络，科学确定工程目标，是保证规划有效性的首要任务。

一、需求识别不准确、不全面

需求识别为水务规划打下基础，需求的准确性、全面性对规划成功来说有着决定性的作用。但是由于方法、视角、深度等方面的不足，需求识别容易产生偏差，造成规划方案与实际需求有差距，最终使工程竣工后达不到预期的效果。

（一）社会经济发展趋势预判不足

区域社会经济发展趋势预测不准确是造成需水预测失真的主要原因。规划工作一般依靠以往的数据和现状分析，而缺少对于未来产业结构调整、城镇化进程、人口空间迁移规律等动态变化的深刻认识和科学的量化预测。某地规划建设一大块新的产业园区，其中产业有特殊的水量、水质要求。如果水务规划中没有充分考虑和预见，将来一定会出现供水能力不足或者水处理工艺不匹配的情况。

同样人口的增长和迁移模式也是决定水务需求的重要因素。随着城市群、都市圈发展战略的推进，人口会向中心城市、优势地区集中，一些中小城镇或者乡

村地区就会出现人口流失的现象。如果规划继续用传统的自然增长率来预测的话，就会出现一部分地区水资源设施建设过多造成浪费，另一部分地区由于人口快速流入而出现供水不足，影响居民生活和经济活动。

因此水务工程规划要摆脱单一行业思维，和国土空间规划、产业发展规划、人口规划等深度协调。建立不同的情景模型，模拟出各种发展路径下用水量的变化，进而制定出具有弹性和适应性的供水保障方案。只有动态预测发展趋势，才能避免由于静态分析而造成的决策滞后以及投资风险，使水务基础设施建设与区域发展步伐保持一致。

（二）公众实际用水诉求调研不深

水务工程规划历来有“重宏观、轻微观”之弊，即重在区域总水量平衡、工程规模等宏观指标上，而轻视终端用户实际用水需求的微观调研。规划报告的需求分析主要依靠统计年鉴上的人均用水量这些宏观数据，没有真正反映出各个社群、不同收入层次、不同生活习惯的居民对于水质、水压、缴费、服务响应速度等方面的个别诉求。这种“平均化”的需求认识，造成工程方案很难适应民众不断增长的个性化、高品质用水需求。

随着生活水平的提高，人们对饮用水的口感、纯净度要求也越来越高，并愿意为更好的供水服务付出相应的费用。但是大多数规划方案还停留在满足基本供水安全的层面上，缺少分质供水、直饮水入户等前瞻性的规划。老旧小区高层用户水压不稳定问题、特殊困难群体用水便利性、智能化水表、线上缴费服务等，由于调研不够深入而被忽视。规划与民意之间存在温差，就会造成水务工程的民生效益和公众满意度受到影响。要解决上述问题，就必须把公众参与融入到规划全过程之中，采用问卷调查、社区座谈会、线上听证会等多种方式，全面、真实地收集民声、反映民意，让水务工程成为顺应民心、符合民意的民生工程。

（三）生态与环境需求考虑不周

传统的水文工程规划常常把河流、湖泊、湿地等自然水体当作供水水源或纳污水体，而水体本身的生态需水量被严重低估甚至完全忽略。规划所关心的焦点是如何从自然界中取走更多的水，或者如何将处理过的废水排入其中，却忘记了水生态系统本身也是一个需要“喝水”的生命体。重人用水、轻环境用水的思维使得许多工程在满足人类社会的用水需求的同时，也给区域生态环境造成了不可逆的伤害。

河流要维持一定的生态基流，也就是最小下泄流量，这样才能保证水生生物能够存活、洄游和繁殖，河流也能保持自净能力与廊道功能。湖泊、湿地需要定期的水量补给，才能维持应有的水面面积、水体质量、生物多样性。如果水务工程调水或者拦蓄过多，就会导致下游河流断流，湖泊干涸，湿地消失，水生生态系统结构崩溃，珍稀物种减少，生态服务功能衰退。

水务工程对环境的影响还包括水文情势改变。大坝改变了河流天然的径流过程，减弱了洪水脉冲，这对依靠洪水泛滥繁殖生长的泛滥平原生态系统来说是毁灭性的。工程建设还会阻断鱼类洄游通道、改变水体的温度、泥沙含量等，从而对整个水生食物链造成影响。

一个负责任的水务工程规划，应该把生态和环境需水放在与社会经济用水同等重要的位置上。在规划之初，就应该开展详尽的生态环境影响评价，科学核算区域内各种生态系统的健康需水量，把其作为不能突破的刚性约束条件。工程方案设计中应以最小生态影响的技术方案为主，并配以修建鱼道、生态调度设施等补偿措施，实现人水和谐共处，确保水资源开发利用不大于水生态环境的承载力。

二、规划目标设定不科学、不合理

规划目标对于水务工程建设来说就像灯塔一样，它的科学性与合理性直接决定了水务工程建设的效果。不科学的目标会造成资源配置错位、投资浪费，还会引起一系列社会、环境问题，使工程偏离为可持续发展服务的宗旨。

（一）目标指标与地方实际脱节

规划目标设定中的普遍问题是盲目套用上级或者发达地区标准，造成目标指标和地方自然禀赋、经济发展水平和社会发展阶段严重脱节。一刀切式的目标设定方式没有考虑区域差异性，不仅不能实现，还会造成不良影响。

又如，水资源本底条件较差的干旱、半干旱地区，在制定节水目标时，不切实际地追求达到水资源丰富地区先进水平，对工业、农业采取过严的用水限制，可能会对地方经济正常发展和粮食安全造成影响。相反，水资源较为丰富的地区，如果设定的水资源开发利用率过低，就会限制该地区的发展潜力。因此目标的指标要因地制宜，在充分考虑当地水资源的承载力、产业特点、财政能力、公众接受度之后才能确定。见表所示：

规划目标与地方实际脱节的表现

方面	具体表现
标准套用僵化	直接将国家或行业推荐的通用标准作为地方强制性目标，未根据本地水文地质、水质背景值、经济发展水平等进行必要修正和本地化。如出水标准，部分地区不计财政与技术可行性，盲目追求“准Ⅳ类”等过高标准，加重地方财政负担，造成不必要浪费。
目标设定超越阶段	提出的目标过高，脱离了地方目前所处的发展阶段。在工业化初期的城市，强行要求万元工业增加值用水量达到国际领先水平，可能扼杀企业生存空间。科学目标应循序渐进、分阶段实施，与地方社会经济发展总体步伐相协调。

（二）短期利益与长期发展冲突

在水务工程规划当中，短期利益和长期发展的矛盾时常会出现。地方政府为追求经济快速增长，更多地支持能够快速创造税收、就业机会的短期工程，例如大规模房地产开发，高耗水工业项目等等。决策方式以牺牲流域长期水安全、水环境、水生态为代价，给未来发展埋下隐患。

从具体表现上看，为了满足某一大型工业园区的用水需求，规划上可能会批准建设容量大于水资源承载能力的水库或者引水工程，造成区域内水资源过度开发，农业和生态用水被挤占，进而导致下游地区水事纠纷。又或者，为了降低眼前治污成本，规划会降低污水处理厂的建设标准或者推迟建设时序，造成区域水环境质量持续恶化，最后需要用数十倍甚至更多资金来修复，得不偿失。

造成短视行为的原因，就是决策机制中没有对长远效益、潜在风险等进行有效评价和权衡。政绩考核体系主要依靠短期内的经济指标，决策者就会更偏向于选择能立竿见影的项目。要解决这个难题，就要在规划决策时加入全生命周期成本效益分析和严格的风险评估，把水浪费、环境变坏、生态遭破坏这些外部成本算进来，用数据来衡量短期行为的长期代价。同时还要改革政绩考核体系，把水资源节约、水环境改善、水生态健康等体现可持续发展水平的指标纳入到考核的指标体系当中，引导决策者树立正确的政绩观，真正实现功在当代、利在千秋。

（三）单一目标与多目标统筹失衡

水务工程是一个包含防洪、供水、发电、航运、灌溉、生态、景观等诸多方面在内的多目标复杂系统。好的规划要科学地平衡这些目标，力求总效益最大。但由于部门间的分割、认知上的局限或者利益的驱动，规划往往会陷入单一目标的误区，造成目标之间不能协调，顾此失彼。

最突出的矛盾就是防洪与供水（或生态）。某些水库的调度运行，过于强调汛期防洪安全，会在主汛期到来之前把库水位降到过低，造成汛后蓄水不足，影响当年供水、灌溉。反之，若过于强调蓄水兴利，汛期预留的防洪库容就会偏少，一遇超标准洪水，就会对下游造成严重威胁。单一目标的调度模式没有充分利用现代洪水预报技术、优化调度模型来达到防洪与兴利的动态平衡。

另外常见的失衡就是供水和生态之间的矛盾。一个流域规划了大量的引水、调水工程来满足城市和工业用水的需求时，就会忽略维持下游河道健康生态系统的最低流量。只顾抽水，不管养河的做法使得许多河流的生态功能退化，生物多样性减少。解决这些问题，就要在流域范围内建立起强有力的综合协调机构，冲破部门壁垒，制定出统筹上下游、左右岸以及各行业用水需求的统一规划和调度方案。利用多目标决策分析工具，对各个方案在不同的目标上得失进行量化，找到能够最大程度兼顾各方面利益的帕累托最优解，达到水资源的可持续开发和综合利用。

三、规划方案弹性不足、适应性差

充满不确定性的未来，水务工程规划方案的弹性和适应性就显得格外重要。僵化的规划无法应对意外挑战，也无法适应环境变化，会造成巨大的沉没成本和安全风险，缺乏韧性的规划就是脆弱而不可持续的。

（一）气候变化等不确定性考虑不足

传统水务工程规划沿袭着用历史水文数据来设计的惯性，其基本思维就是“往日如何，将来亦将如何”。静态的思维方式在气候变化日益严重的当下，正受到严峻的挑战。全球变暖使得水循环过程发生明显变化，极端天气事件发生的频次、强度都在增加，历史数据已经不能完全反映未来的水文状况了。如果没有规划，设计的工程就无法应对以后可能出现的风险。

规划设计防洪工程的时候，如果仍然用过去几十年的暴雨、洪水数据来确定防护标准，那么可能就无法抵御更强的极端降雨事件，导致防洪体系失效。同样，规划供水水源时若不考虑未来出现的连续长时间干旱的情况，则水源地可靠性大打折扣，城市将面临严重缺水的问题。气候变化还会改变蒸发量、积雪融水时间等，从而改变区域水资源可利用量。

因此，现代的水务规划必须要把气候变化当作一个主要的、重要的不确定性

因素来考虑。这就需要规划人员采用新的技术手段，利用全球气候模型和区域气候模型的预测结果，加上水文模型，得到未来各种气候情景下的水文序列。根据这些情景实施压力测试和风险评价，找到系统的脆弱之处。在此基础上，首先要挑选出在未来各种情况下都稳健的“适应性”方案，或者创建包含监测、评价、调整的“适应性管理”框架，从而使得规划可以随着未来实际情况的变化而动态调整。

（二）缺乏应对突发情况的预案机制

水务工程规划方案一般只重视工程实体的设计建设，对于非工程措施，尤其是应对突发事件的应急预案的重视程度不高。规划阶段的蓝图勾勒出理想状态下最好的画面，却很少对遇到重大自然灾害、水污染事件、设施故障、人为破坏等突发情况时，整个水务系统如何应对并维持基本功能进行系统思考与设计。没有这样的预案，城市在面对危机的时候就会非常脆弱。

当一个水源地由于突发污染事件而被迫关闭时，如果没有备用水源或者区域性的应急调水预案，整个城市的供水将会陷入瘫痪。当重要的输水管线因为地质灾害或者第三方施工被破坏而爆裂时，如果没有预先制定好管网连通方案和应急抢修队伍、物资储备计划，恢复供水将耗费很长时间，造成极大的社会影响。对于长时间停电造成水厂、泵站不能运转，网络攻击造成调度系统失效的“黑天鹅”事件，大多数规划方案都没有周密的应对措施。因此，水务规划应该从单一的工程建设规划，转变为综合的韧性城市水安全保障规划。这就需要在规划阶段就对各种潜在的风险进行系统的识别，并制定出详细的应急预案。预案内容应包含应急水源规划与保护、应急管网连通与调度、应急物资设备储备布局、跨部门应急协调指挥机制等，依靠建立多重保障、快速恢复的能力，保证城市水务系统在任何冲击下都能不断供、保底线。

（三）技术路线选择僵化缺乏替代方案

水务工程规划时很容易产生技术路径依赖问题，即偏爱采用传统的、大规模的、集中化的工程方案，对新的分布式、生态化、智慧化技术理念的接受度不高。技术路线选择僵化，规划方案缺少灵活性、经济性，在多元化需求、不确定性环境中，其缺点越发突出。一旦选定的主流技术路线在未来被证明存在问题或者不再最优，而没有替代方案的储备，规划就会陷入非常被动的局面。

拿解决城市缺水问题来说，规划方案也许过度依靠修建大型水库、长距离调

水这些“开源”工程，这些工程投入大、历时久、生态影响大。与此同时，对于再生水回用、雨水收集利用、海水淡化、需求侧管理等多元化的替代技术路线，规划中只是简单提到，没有做深入的技术经济比较和系统性布局。当社会发展对生态保护的要求越来越高，气候变化造成传统的水源不稳定的时候，单一的集中式供水系统就会变得十分脆弱。

智慧水务技术的发展给规划提供了更多的可能，比如通过大数据分析来进行管网调度、精确找到漏损等等，可以很大程度上提升现有设施的运作效率，这也算是一种“虚拟水源”。但很多规划只对物理设施进行了规划，并没有把智能化的解决方案作为核心来考虑。一个弹性规划就是一个技术方案的“工具箱”，里面不只是方案 A，还有方案 B、方案 C。在规划阶段就要开展多种技术路线的无偏比较，确定各条技术路线的适用情况、经济性及风险。在此基础上，构建一个不同技术优势互补、集中与分散相结合的复合型水务系统，给未来的新技术接入留有空间和接口，这才是提高水务系统长期适应性和可持续性的明智之举。

第二节 水资源配置与供需平衡优化策略

水务工程规划的主要问题就是水资源的配置、供需平衡。其主要目的就是采用科学的方法和手段，在时间上、空间上合理地分配水资源，协调好生活用水、生产用水、生态用水之间的矛盾。本节从供给潜力评估、需求预测管理、供需平衡优化三个方面对以上问题提出具体的解决措施，为区域水资源可持续利用提供理论依据和实践指导。

一、水资源供给潜力评估问题

对水资源的供给潜力做出准确评价，是制定合理配置方案的前提。目前水资源配置评估工作存在三个主要不足：常规水源潜力分析不够精确，非常规水源潜力挖掘不充分，跨区域调水工程论证深度不足，这些都造成水资源配置工作缺乏应有的科学性和前瞻性。

（一）常规水资源开发利用潜力分析不准

常规水资源，地表水、地下水等，开发利用潜力评价精度直接关系到水资源规划可靠度。当前分析不准的问题主要是由于数据基础薄弱、分析方法落后造成

的。一方面，很多地方水文监测站点少，观测数据序列短，数据质量好坏不一，造成地表径流和地下水补给量的计算误差较大。地下水可开采量的评价由于补给、径流、排泄条件认识不清，常造成超采或者利用不足。

另一方面，传统的潜力分析方法大多基于历史平均值，没有很好地考虑到气候变化背景下，降雨时空分布格局的改变以及极端水文事件的增多。生态需水计算标准不统一、考虑不周全，容易造成对可利用水量的估计过于乐观，占用维持河流健康、生态系统稳定所必需的水量，使制定的开发方案实施过程中出现生态风险，难以持续。

（二）非常规水源利用潜力挖掘不足

非常规水源有再生水、雨水、海水淡化水、矿坑水等，它们是解决水资源供需矛盾、保证供水安全的有益补充。虽然非常规水源利用前景广阔，但其潜力还没有被充分挖掘，主要存在规划、技术、经济、观念等方面的问题。水资源规划中非常规水源往往只是应急或补充，没有真正纳入到区域水资源统一配置中。这造成相关设施建设缺少前瞻性和系统性，再生水管网布局滞后于城市发展，使很多处理达标的再生水不能被输送到用户端，出现“有水难用”的困境。

尽管有些技术已经比较成熟，但在分质利用、成本控制、能源消耗等各方面还有待改进，在海水淡化以及高含盐矿井水处理方面，由于成本过高所以不能被大范围使用。经济激励政策的不到位又成了另外一个重要的制约因素，非常规水源的生产成本和市场水价倒挂现象比较普遍，缺少有效的财政补贴、税收优惠、市场化交易等措施，造成企业和社会资本参与的积极性不高。

最后就是社会认知及公众接受度的障碍。民众对于再生水用作城市绿化、工业冷却、市政杂用等仍有疑虑，对于雨水集蓄利用等分布式方案的价值认识不够。因此，要充分挖掘非常规水源的潜力，就要在顶层设计、技术创新、市场培育、公众教育等各方面同时发力，形成系统、安全、高效的利用新格局。

（三）跨区域调水工程的可行性论证不充分

跨区域调水是解决水资源空间分布不均的重要工程手段，其可行性论证是一项极为复杂的系统工程。论证不足会造成严重经济、社会和生态后果。目前存在的主要问题就是论证的广度和深度不够。

论证过程一般更重视受水区的短期效益，对水源输出地的远期影响评价不足。没有对当地水循环、生态系统、产业发展和社会结构等潜在影响进行深入分析，

就会造成水源地水资源输出之后出现发展困境。工程经济成本效益分析也有局限性，不能将生态环境成本、移民安置和稳定成本等外部性因素全部内部化，从而造成对工程真实投资效益评价出现偏差。工程运行中存在的水源地水质保障风险、输水过程中水质变化的风险、工程结构安全风险、未来受水区需水量变化的不确定性等，缺少全面的风险评价以及相应的应对预案。因此，今后可行性论证要重视以下几个方面：

1. 全方位的影响评价，建立水源地—沿线地区—受水区的综合评价指标体系，定量评价工程对生态、社会、经济的长期、累积影响。

2. 全生命周期的成本核算：用生命周期理论、价值工程法把环境成本、社会成本、运行维护成本等全包含在经济评价范围中进行公正的成本效益分析。

3. 从建设、运行、经营等多方面入手，对工程全生命周期中会遇到的各种风险进行分析与评价，提出相应的防范措施与应对策略，保证工程的长久安全、持续运行。

二、水资源需求预测与管理问题

科学预测并做好水资源需求的管理，也是实现供需平衡的重要环节。当下，由于选择错误的需水量预测模型、没有做好节水潜力的评估工作、产业结构调整与用水需求不匹配等缘故，造成水资源管理的准确性和主动性严重受挫。

（一）需水量预测模型与方法选择不当

需水量预测的准确性是水资源规划的前提。选择错误的模型和方法进行预测，会造成预测结果与实际状况相差很大，从而影响决策。在许多规划实践当中依然使用定额法或者简单的趋势外推法。这些方法方便快捷，但是不能体现用水需求背后复杂的驱动机制。定额法以现有用水定额统计为依据，没有考虑未来技术进步、产业升级带来的用水效率变化；趋势外推法则假定未来的发展模式是历史的简单延续，无法应对经济社会结构转型或者突发事件所造成的用水需求拐点。

更为科学的预测要依靠复杂的系统模型，例如可以反映宏观经济、人口、技术进步、水资源需求之间相互影响的系统动力学模型，也可以分析不同行业间相互联系的投入产出模型。可以模拟不同的政策情景（水价改革情景、产业结构调整情景）对未来需水量的影响，给出更多的决策信息。

选定模型之后，参数的准确标定又成了一个大问题。很多模型参数都需要大

量的、长时间的社会经济、用水数据来支撑，但是数据的可得性以及质量常常会限制模型的精度。因此，提高需水量预测的科学性不能靠单一的方法，应该转向多种模型组合预测，加强对基础数据的监测和积累，结合专家判断来校核预测结果，从而提高预测的可靠性和实用性。

（二）节水潜力评估与措施制定不到位

节水是解决水资源短缺问题最根本、最有效的办法，但是节水潜力的评价和节水措施的制定常常出现“纸上谈兵”的现象。在评价节水潜力的时候，常常把先进地区用水效率标准同当地现状对比，得出很大的潜力数值，但没有考虑到要实现这种潜力所应具备的技术条件、经济代价和社会认可程度，因而使评估脱离实际。科学的潜力评价要区分理论的潜力、技术的潜力、经济的可行潜力，还要考虑各个地区、各个行业的技术水平、投资能力、管理水平。

节水措施的制定缺少针对性，一刀切。以农业节水为例，笼统地推广喷灌、滴灌等高效节水技术，没有考虑到具体地区的水土条件、作物种类、农民经济承受能力等因素，导致事倍功半。在工业方面，节水措施没有和企业工艺改进和技术升级有效结合，只是简单的更换了节水器具。精准的节水措施要以对用水单元进行细致的分析为前提，找到各个行业、各个环节的用水短板，制定出一套技术上可行、经济上合理、管理上可操作的综合解决方案，从技术改造、管理创新、政策激励等各方面协同推进。

（三）产业结构调整与用水需求关联分析缺失

水资源规划同区域产业发展规划长久以来存在着“两张皮”状况，即水资源管理部门被动应对产业发展引发的用水需求增长，而未能主动借助影响产业结构来引领用水需求朝着合理化、可持续化方向转变。没有关联分析，水资源管理就陷入了被动跟随的境地。区域产业结构直接决定了区域用水结构和用水总量，发展高耗水产业必然会对水资源造成巨大的压力。

有效的协同规划要以水资源的承载能力作为区域产业布局、结构优化的刚性约束。这就需要建立可以量度产业结构变动同用水需求量、用水效率、废水排放量之间动态联系的耦合模型。通过模型模拟，可以清楚地知道在水资源总量控制的目标下，优先发展哪些低耗水高产出的战略性新兴产业和服务业，或者淘汰、转移哪些高耗水低效益的落后产能，实现经济增长与水资源消耗的“脱钩”。将水资源要素纳入产业政策制定的考虑范畴，依靠水价、水权、排污权等经济手

段，引导资本和技术向节水型产业流动，这才是由被动应对需求到主动掌控需求的所在。

三、供需平衡分析与优化策略

供需平衡分析是水资源配置的最终归宿，其目的是在复杂、不确定的环境下，找到一种在经济、社会、生态效益上综合考虑的水资源利用方案。这就需要我们冲破传统静态平衡分析的思维，转而采取以多种情景为载体的动态分析，采取多目标优化决策办法，创建完备的应急调度预案。

（一）基于多情景的供需平衡动态分析

传统的水资源供需平衡分析大都是单一情景下的静态计算，即假定一个最可能的未来发展路径，再进行水量平衡计算。此方法的缺点是结果具有脆弱性，一旦未来实际的发展与预设路线有偏差，整个规划方案就会失效。现实世界是不确定的，气候变化带来的来水不确定性、经济社会发展路径的不确定性、技术进步速度的不确定性等，都要求供需平衡分析必须是动态的、弹性的。

基于多情景的动态分析方法给出了解决办法。核心是设定出几种可能的未来发展图景，比如可以设置高增长高耗水、绿色发展节水优先、气候干旱供给受限等不同的组合情景。在每种情景下对水资源供给量和需求量进行预测，并做动态供需平衡模拟。

水资源供需平衡情景分析示例

情景类型	气候条件	经济发展模式	用水效率	供给特点	需求特点	潜在风险
高增长高耗水	正常	传统高耗水	较低	稳定	快速增长	资源枯竭、环境恶化
绿色发展节水优先	正常	绿色低耗水	较高	稳定	缓慢增长或下降	投资高、转型难
气候干旱供给受限	持续干旱	绿色低耗水	较高	严重波动或下降	缓慢增长或下降	严重缺水、社会不稳定

决策者可以清楚地从上表中看出不同的未来可能性下，区域水安全会遇到怎样的风险点以及风险的程度，例如缺水发生的概率和规模。单一方案的潜在脆弱性也暴露出来。更重要的是可以找出各种情况下都稳健的鲁棒性策略，或者促使决策者制定出更具适应性的管理策略，将规划由原来的“预测 - 执行”的线性模式改变为现在的“监测 - 评价 - 调整”的循环适应性管理模式。

（二）水资源配置方案的多目标优化决策

水资源配置实质上是一个多方利益、多个目标交织在一起的复杂决策过程。只顾追求经济效益的最大化已经不符合可持续发展的要求。现代水资源配置需要同时兼顾经济、社会、生态这三大目标，而这些目标之间经常存在矛盾或者需要权衡。将更多的水资源分配给工业可能会带来更高的经济效益，但是会减少农业用水或者生态环境用水，从而影响粮食安全和社会公平。

多目标优化决策给解决这类问题提供了一种科学方法。此方法用数学模型把互相矛盾的目标纳入统一的决策框架里，而不是简单地把它简化为一个目标。其主要步骤为：

1. 目标函数的确定，即量化的各个优化目标。经济目标可以是区域总产值最大化，社会目标可以是供水保证率最高或缺水风险最小，生态目标可以是关键断面生态流量满足度最高或污染物排放总量最小。

2. 约束条件的设定：确定水资源配置必须遵守的各种物理、工程、政策和社会约束，比如总可用水量约束、输水能力约束、各行业最小需水保证约束等。

3. 模型求解和方案生成：使用遗传算法、粒子群算法等智能优化算法求解模型，得到一组被称为帕累托最优解集的备选方案。集合中的每一个方案都是一个不同的目标权衡策略，没有哪个方案可以在不牺牲至少一个目标的前提下，使得另一个目标变得更好。

最终决策者会依照各个发展阶段的战略重点，结合专家和公众的意见，从以上最优解集中挑选出最接近区域发展理想状态的配置方案，使决策更加透明，更加科学。

（三）建立应急状态下的水资源调度预案

常规的水资源配置方案只针对一般情况，不能很好地应对特大干旱、水源地突发污染、供水设施重大故障等极端事件。一旦发生这样的事故，就会导致大范围、长时间的供水中断，给社会经济和人民生活造成极大的影响。因此，制定出一套完整的、可行的应急水资源调度预案是供水安全底线的必然选择。

应急预案的制定应该遵守“预防为主、常备不懈”的原则，其内容主要包括启动条件、响应程序和应对措施三个方面。预案要按照事件的严重程度和影响范围来确定预警级别，一般分为蓝色、黄色、橙色、红色四个等级，每个预警等级对应不同的应急响应行动。响应行动应当是层层递进的序列，由加强监测、发布

预警信息起始,然后启用备用水源、开展跨区域紧急调水,接着分行业、分区域实行刚性用水限制,最后保证最基本的居民生活用水。

预案中还要有应急指挥体系,规定政府部门、供水公司、用水户在应急时应承担的责任和义务,保证命令能顺利下达,行动统一。应急预案不是固定不变的静态文件,要定时通过演练来考察其科学性和可操作性,依照演练的结果和实际情况的改变加以动态修正和完善,从而保证在真正的危机发生时能迅速、有条理、高效地启动应急预案,将突发事件造成的损失降到最低。

第三节 环境影响评价与可持续发展协调

一、环境影响评价的深度与广度不足

环境影响评价可以预防水务工程造成环境污染和生态破坏。但是目前的环境影响评价工作在识别长期性、累积性影响及关键生态环境要素变化方面还存在不足,评价体系的科学性、全面性还有待提高。

(一) 累积性与长期性环境影响评价有待加强

目前的水务工程环境影响评价大多只考虑工程建设和运营期间直接、短期的效应,很少考虑到同一河流或者区域内多个项目可能带来的累积环境影响,以及项目运行数十年甚至更长一段时间后才出现的迟发性环境变化。例如一个流域内梯级水库开发对水文情势、水质、泥沙输运、水生生物多样性等的综合影响远远不能被单个工程环评所完全预见。因为评价方式不当,决策者就会小视工程群给生态系统造成的压力,有些缓慢发生、影响严重的情况就没办法被及时察觉并加以防范。

评价视角的缺失,在部分上是由于评价方法和技术手段的限制造成的,目前还没有能够对长时间、大空间范围内的累积效应进行模拟和预测的成熟的模型。同时评价的范围以及责任主体也未作出界定,跨区域、跨项目的累积影响评价缺少一个明确的组织者与资金来源。因此,建立和完善流域或者区域生态系统整体性的累积影响评价体系,发展可以耦合水文、生态、社会经济等多要素的长期演变预测模型,并将制度化地纳入规划环评、项目环评体系之中,是提高环境影响评价科学性、前瞻性的需要。

（二）水文情势改变的影响分析不深入

水利工程，特别是水库枢纽、跨流域调水工程的主要作用就是改变和调节天然水文状况。但是，当前环境影响评价对由此产生的深层次、链条式的生态环境效应还没有分析到位。评价一般只关注下游河道流量减少、水位下降等直接的水文参数变化，而忽略了这些水文条件变化对河湖湿地生态功能、水生生物栖息地质量、生物地球化学循环过程和沿岸地区地下水系统的影响。气候变化对降水和蒸发的影响已经十分明显，加上水务工程叠加了气候变化，未来的水文情势变化更加不确定，这给影响分析的深度提出了更高的要求。

水库运行会使得下游非汛期流量增大、汛期洪峰流量减小，这样的人工调节过程会直接影响到依靠特定的水流条件繁殖的鱼类，改变河滩湿地的淹没规律，进而影响植被演替和鸟类觅食。水流减缓、水体富营养化、水华风险增加、水体温度分层结构改变等都是水流减缓、水体滞留时间延长所引起的间接、衍生的影响。目前环评对于这些方面大多只是笼统的描述，缺少利用生态水力学模型和长期生态监测数据进行详细的预测与评价，因此提出的生态保护措施针对性不强，无法从根本上有效减缓工程对生态系统复杂的负面影响。加强水文情势变化以及生态响应的过程、格局和功能耦合关系研究，属于环评工作的重要部分。

（三）公众参与环评的机制不健全

公众参与是提高环境影响评价科学性、民主性、有效性的重要途径，也是保障民众环境权益的表现。虽然我国已经初步形成了环评公众参与的法律框架，但是水务工程实践中还存在着许多不足，需要进一步扩大公众参与的范围和加深公众参与的深度。目前公众参与大多在环评阶段后期进行，形式上以问卷调查、信息公开为主，参与节点较晚，公众意见难以对工程重大决策如选址、规模等产生实质影响，从而出现参与走过场现象。

当前机制存在以下突出问题：

1. 参与的有效性不足。公众往往在项目方案基本确定之后才被通知，参与成了被通知。其提出的意见、建议，因为牵涉到重大的利益调整，所以难以被接受。
2. 参与代表性不广。主要参与的是项目直接影响范围内居民，忽略了非政府组织、相关领域专家学者、下游受影响的公众等其他广泛利益相关者的参与渠道。
3. 信息公开质量低，环评报告书简本内容过于专业化，使用专业术语多，深奥难懂，公众无法理解，不能有效发表意见，造成信息不对称。

这些问题削弱了公众参与制度本来应具有的功能，有时还会引发社会矛盾。健全公众参与机制，就要把参与时机往前挪，移到规划、选址阶段，革新参与方式，借助听证会、协商座谈会等途径开展深入交流，搭建起透明且有效的意见采纳和反馈体系，保障公众的合理诉求能切实发挥作用。

二、规划方案与生态保护红线冲突

生态保护红线是国家生态安全底线和生命线的保证，也是生态文明建设的一种制度创新。水务工程属于重要的基础设施，在规划、布局、建设实施等过程中必须严格依照生态保护红线管控的要求。但是工程方案和红线保护要求之间出现的矛盾仍然存在，协调起来比较困难。

（一）工程布局与敏感保护区冲突

由于水务工程的选址、布局受到地形、地质、水文等自然条件的严格限制，部分工程如水源地、引调水线路、水库等，很难完全避开生态保护红线划定的各类法定保护地、生态功能重要区。工程布局同自然保护区、饮用水水源保护区、重要湿地、珍稀水生生物栖息地等生态敏感区之间的矛盾，成了规划阶段的主要问题。冲突不单是空间上的重叠或者临近，更在于工程建设和运行会对保护对象的生态功能、保护目标造成潜在的威胁。

例如引调水渠道会阻断野生动物的迁徙通道，破坏生态系统连通性；水库淹没区里会包含珍稀植物的原生地或者重要的森林生态系统；施工活动也会对周围水源保护区的水质安全构成威胁。规划方案论证中会进行比选，但优先考虑经济效益、技术可行性或供水目标等因素，生态保护的权重不能完全体现出来，最终推荐出来的方案与生态保护红线管控要求不协调。

解决这类冲突，就得依靠国土空间规划来统一区域发展与生态保护。在水务工程规划之初就要把生态保护红线作为刚性约束条件，严格开展生态适宜性评价和禁建区、限建区划分。对于确实不能避让的重大工程，必须经过充分、科学的论证，证明该工程建设的必要性及对生态环境影响的可控性，并提出功能置换、生态补偿等一系列超常规的保护和恢复措施，以保证区域整体生态功能不降低、性质不改变。

（二）施工运营期生态修复措施落实不力

水务工程兴建和运行过程中，必然会对项目区及其周边生态环境造成扰动或

者破坏，比如地表开挖、植被破坏、水土流失、土地占用等。环境影响报告书以及水土保持方案一般都会列出相应的生态修复措施，但是这些措施在实际落实的时候常常不到位，造成生态修复效果不佳，而且缺乏长期的管理。施工单位“重主体、轻环保”，建设单位“重建设、轻管理”的现象依然存在，导致生态修复是工程建设的薄弱环节。

施工期间临时占地、取土场、弃渣场等区域的生态修复常被延误或简化处理，植被恢复所选物种不适应当地环境，或者只是简单的绿化，没有真正重建具有生物多样性和稳定性生态系统的恢复。运营期结束之后，部分须要长久维持的生态修复工程，比如鱼类增殖放流站，过鱼设施，生态护岸等，因为缺少运行经费，管理责任不明等原因，没能起到预期的生态效果。过鱼设施的工作效果受来水条件、鱼类习性等众多因素影响，应该持续进行监测、评价和改进，但实际上建成后往往就被废弃不用，缺少完善的后期评价和优化体系。

要解决这个问题，就必须强化建设单位在生态修复中的主体责任，保证生态修复费用足额进入工程总投资。对生态修复工程的全过程实施监理，保证修复措施的设计、施工、质量满足要求。形成依靠长时间观测成果的生态修复效果后期评价体系，对没有达成预期目的的工程，强制执行补救行动。并探索第三方专业机构进行生态修复项目长期管护的制度，使修复措施可以持久有效地发挥作用，真正实现谁破坏谁修复的原则。

（三）生态流量保障目标落实困难

生态流量是河流生命健康最基本的保证。近些年来，我国在确定河湖生态流量保障目标方面取得明显进步，不过怎样把这类目标在水务工程日常调度运行中切实落实到位，还存在着重大难题。生态流量和发电、供水、灌溉等兴利目标之间存在着天然的矛盾，在水资源紧张的年份和地区，这种矛盾就更为明显。调度决策一般先考虑经济社会用水，造成生态流量在执行过程中被挤占、打折的现象时有发生。

生态流量保障存在诸多难题，已建水库在设计时没有充分考虑生态用水需求，泄水设施不能满足分层取水、小流量精确控制等生态调度要求。生态流量的监控体系不健全，很多重要的控制断面没有安装实时在线流量监测设备，监管部门不能对生态流量泄放情况做到及时有效的监督和考核。跨行政区域河流上下游、左右岸在生态流量保障责任分摊、利益补偿方面没有协调机制，不能形成全流域共管合力。

保障生态流量目标的实现，需从硬约束和软激励两方面入手。从制度层面来说，应当把生态流量保障目标作为具有法律效力的调度红线，列入水资源统一调度方案以及年度调度计划之中，并对未按要求泄放生态流量的责任单位予以严肃追责。在技术方面加快对老旧水库生态化的改造，增加生态泄放设施，全方位建设生态流量在线监控预警平台，把监管推向数字化、智能化。流域上搭建横向生态服务补偿体系，对保障下游生态流量而牺牲部分兴利效益的上游地区给予适当的补偿，用经济杠杆推动生态共识的达成。

三、可持续发展理念融入不足

可持续发展要求水务工程的规划、建设和管理各项活动都必须兼顾经济、社会、环境三大效益，实现代际之间、代内公平合理。虽然现在可持续发展的理念已经成为了行业的共识，但是在水务工程中可持续发展理念的全面、深入的融入还存在不足，传统的发展模式和工程思维惯性仍然存在。

（一）资源节约与环境友好理念贯彻不彻底

资源节约、环境友好属于可持续发展的具体内容，也是其在工程领域中的体现。水务工程是配置和利用水资源的重要方式，其规划建设应该成为节约水资源、保护水环境的范例。然而，工程实践中仍然存在着“工程万能”的思想，即用修建新的调水、蓄水工程来满足不断增长的用水需求，而忽略了节水技术、再生水利用、产业结构调整等需求侧管理手段挖掘节水潜力的可能性。重开源、轻节流的做法不符合资源节约的根本原则。

从环保角度来讲，工程设计虽然会考虑到环保措施，但是更多是被动地满足环评要求，是工程负面影响的“补丁”，而不是将生态元素主动、系统性地融入工程设计中。河道治理工程为了追求渠化、硬化的效果而破坏了河流的自然形态和生态功能；工程设计中很少考虑本土材料、节能设备、可再生能源的使用。要真正落实资源节约、环境友好的理念，就必须使水务工程规划思路发生根本性的变化，

1. 节水优先，将需求侧管理、节水潜力评价作为区域水资源规划的前提条件，按照“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”的原则。

2. 工程设计由灰色向绿色、蓝色相结合的发展，积极采用基于自然的解决办法，创建生态湿地净化水源，利用植草沟、下凹式绿地等开展雨洪管理，使工程

设施和生态系统互相配合，达到工程效益和生态效益的统一。

（二）工程全生命周期环境影响考量不足

可持续发展是指对于长期产生的影响。水务工程的服务年限长、影响范围广，其环境影响要考虑从规划、设计、施工、运行到报废的全过程。目前的环境影响评价大多集中在施工期和运营期的影响上，对于工程材料生产、设备制造等阶段的资源能源消耗和环境排放，以及工程使用寿命到期后的退役、拆除、生态恢复等问题很少涉及。这样的评价片段化，使工程的真正、完整的生态足迹不能够被清楚地呈现出来。

建设一座大型水坝要消耗大量的钢材、水泥，而这些建材的生产过程是高能耗、高排放的。工程运行期间，机电设备的更新和修理、水库清淤等都会产生资源消耗和环境影响。工程报废时，坝体拆除以及淹没区生态重建的技术难度大、费用高。如果缺少全生命周期的系统考虑，就会把一部分环境成本转嫁给后代，违背代际公平的原则。

因此在水务工程上急需应用生命周期评价。通过盘点工程各个阶段的输入（能源、原材料等）和输出（产品、污染物等），并加以分析，进而对生态系统的影响进行定量评价。把全生命周期环境成本内部化到工程的经济决策分析当中，可以更全面地衡量项目综合效益，促使设计者和决策者选择环境负荷小、长期效益好的方案，比如选用耐久性更好、可循环的材料或者设计容易维护和拆解的结构等。

（三）绿色低碳技术在规划阶段应用滞后

在全球应对气候变化、实现碳达峰、碳中和目标的情况下，作为能源消耗和温室气体间接排放的重要领域的水务部门，必然要向绿色低碳方向转型。绿色低碳技术，水力发电、光伏发电、高效节能水泵、智慧水务管理系统、污泥能源化利用等，给水务工程的可持续发展提供技术支持。但是这些技术在水务工程规划阶段的应用与部署还比较晚。

很多规划方案在对能源消耗和碳排放进行评价的时候，仍旧采用传统的技术参数，没有充分发挥工程自身蕴含的节能减碳潜力。调水工程可以利用地形高差，优化线路设计来减小泵站扬程，部分管段实现自流；水库、输水渠道、污水处理厂的广阔水面或占地可建水上光伏、地面光伏电站，实现能源就地补偿。污水处理厂也可以通过改进工艺来回收污水中的热能和生物质能，从而将自身由耗能大

户转变为能源工厂。

绿色技术应用滞后的原因之一就是部分绿色技术的成本仍然比较高，在以投资成本为主要控制指标的传统决策模式下缺乏竞争力；另外也与规划设计人员对新技术的认识不够，相关标准规范和激励政策不完善有关。要实现绿色低碳技术在规划阶段深度融合，就需要加强顶层设计，把碳排放强度作为水务工程规划的约束性指标。同时要完善绿色技术经济性评价方法，把整个生命周期内的环境收益、政策红利综合考虑进去，推出专项补贴、绿色信贷等扶持政策，促使水务工程从规划之初就朝着绿色低碳的方向发展。

水务工程可持续发展主要挑战与对策表

类别	主要挑战	核心对策	实施要点
环评不足	累积性、长期性影响识别难；水文情势改变分析不深；公众参与机制不健全。	完善评价体系；深化分析广度；健全参与机制。	建立流域/区域累积影响评估体系；发展生态水力学模型；公众参与前置、多样化、透明化。
规划冲突	工程布局与生态保护红线冲突；施工运营期生态修复不力；生态流量保障难落实。	国土空间统筹；强化修复责任；多维度保障生态流量。	严格生态适宜性评价；生态修复费用足额纳入、全过程监管；生态流量纳入法律效力调度红线。
理念融入	资源节约与环境友好贯彻不彻底；全生命周期环境考量不足；绿色低碳技术应用滞后。	根本性转变规划思路；推行LCA；加强绿色低碳技术应用。	“以水定产”；推广“蓝色、绿色”基础设施；将碳排放强度作为规划约束性指标。

第四节 规划方案的多目标决策方法

一、决策指标体系构建问题

建立科学合理的决策指标体系是多目标决策成功的基础，它是衡量方案好坏的标准，也是指引规划方向的指南。但是目前水务工程规划在构建该体系时经常遇到指标选取、融合处理、权重确定等困难，这些问题最终会影响决策的科学性。

（一）指标选取的全面性与代表性不足

建立一套完备的指标体系是水务工程方案决策的核心。目前实践中存在的一个突出问题就是指标选择缺乏全面性、代表性。许多规划过于重视技术和经济指

标，即工程投资、供水能力、发电效益等容易量化的传统评价指标，把经济效益和社会发展目标放在优先位置。这就造成了对于生态环境、水文情势、社会公平等的评价缺失。

以水库工程方案为例，规划中对防洪、供水效益会进行详细的论述，但是对下游河流生态基流、水生生物栖息地保护、移民安置后的长期社会融合等议题的重视程度不高。这样选择出来的指标体系会使得决策重短期、显性的经济效益，轻长期、隐性的生态社会成本。

代表性也不强，为了追求“全面”，往往会出现很多相关或者信息重复的指标，这不仅增加了数据采集和计算的工作量，也无法很好地反映方案之间的区别。理想的指标体系应该简明扼要，每个指标都应反映出重要的决策方面，而且尽量保持各指标之间相互独立。评价水环境质量的时候，与其罗列化学需氧量、生化需氧量、氨氮、总磷等多个水质参数，不如选取一个或几个能够反映区域主要水污染特征的指标，再加上一个反映水生态健康状况的生物多样性指数，这样更能体现方案对水环境的综合影响。

解决这个问题就要成立跨学科专家团队，从规划开始就把所有重要的利益相关者和他们的主要诉求都识别出来。可以利用德尔菲法、层次分析法等方法，根据区域水资源、水环境、水生态及社会经济系统的特点，对指标进行梳理和筛选。最终形成的指标体系应该包括经济、社会、环境、技术和风险这五个方面，这样既能够对水务工程的综合影响有全面的反映，又能够准确的反映出各个方案的优劣差别，为科学决策提供可靠的依据。

（二）定性指标与定量指标的融合处理不当

水务工程规划方案评价所用的指标，性质不同。定量指标，投资额、供水量等，数据明确，便于比较；定性指标，景观协调性、公众接受度、政策符合性等，模糊、主观，难于量化。决策实践中的一个难题就是怎样科学地处理这两类指标。常见的做法有，第一种是直接将定性指标排除在决策模型之外，造成信息不完整；第二种是采用专家打分进行强制量化，但是评分标准不明确、随意性大，量化结果不能真实反映定性本质。这样就出现了严重损害决策模型可靠性、结果合理性的情形。

为了有效地将定性与定量指标结合起来，就需要更细地进行。定性指标不能简单粗暴的评分，应该使用模糊数学理论建立模糊评价矩阵。定义清楚的评价等

级、语言标度，邀请多领域专家独立评判，用模糊集理论对专家评判信息进行汇集，转化为可以供模型计算的模糊数或区间数。既保留了定性评价中含糊不清的信息，又可以在统一框架下和定量指标一起运算。多方案比选时，所有指标的量化值或者转化后的模糊数值都应当进行无量纲化处理，消除不同指标之间由于量纲、数量级造成的差异，保证公平比较，保证决策模型的输入客观、一致。

（三）指标权重确定的主观性过强

指标权重反映各个决策目标在评价体系中所占的比重，是多目标决策的重要参数。权重的微小变化都会引起最终方案排序的较大变化。目前水务工程决策指标权重的确定方法，比如专家调查法、环比评分法等，虽然简单易行，但是都存在着主观性过强的问题。权重的确定在很大程度上依靠少数专家的知识背景、个人喜好和价值取向。当专家意见出现较大分歧的时候，权重确定的过程就会变成一种权力斗争，而不再是科学的论证，权重的结果就会缺乏稳定性与公信力，为以后的决策争议埋下祸根。

为了减少主观性，应该采用主客观相结合的赋权方法。客观赋权法，如熵权法、主成分分析法，根据各个指标数据的变异程度或者信息量来确定权重，完全依靠原始数据，没有人为干扰。熵权法认为指标信息熵越小，说明该指标包含的信息量越大，应该给予较高的权重。主观赋权法，比如层次分析法，可以很好地体现决策者战略意图和政策导向。理想情况就是两者结合，即组合赋权模型。可以先用层次分析法等方法得到初步的主观权重，再利用熵权法等客观方法对数据进行分析得到客观权重，最后通过乘法集成或加法集成的方式得出更加科学合理的组合权重。既考虑专家经验判断的因素，又充分使用数据本身所包含的客观信息，从而让权重的分配更科学合理。

二、决策模型与方法应用问题

在建立相对科学的指标体系之后，选择适合的决策模型和方法，把指标转化为具体的方案排序。但是传统方法的固有缺陷、复杂模型应用的门槛、方法选择的盲目性，共同构成了制约决策质量的瓶颈。

（一）传统决策方法的局限性

传统的水务工程规划决策方法由于简单直观而被广泛使用，但是它们固有的局限性也越来越明显。加权求和法是常用方法之一，它把各个指标的评价值乘以

相应的权重再求和，得到各个方案的综合得分。此法计算方便，易于理解，但是它最大的不足就在于假定各个目标之间可以相互完全线性补偿，即一个指标表现不佳可以通过另一个指标表现好来完全弥补。在许多情况下是不成立的。比如一个方案即使经济效益（经济指标得分）再高再显著，如果它给区域珍稀物种栖息地造成了不可逆的破坏（生态指标得分很低），那也不能把这个方案当成是可以接受的。

传统方法的局限性主要体现在以下几个方面：

- 1. 信息丢失问题：优劣解距离法虽然考虑了与正负理想解的距离，但是在计算综合距离的时候，各个指标维度上的具体优劣信息被压缩成了一个数值，方案在某一方面存在的极端风险就可能因此被掩盖。决策者不能直接看到方案在各个目标上表现怎样以及权衡的关系。
- 2. 阈值设定难，一些方法需要事先设定最低要求或者满意水平，但是这些阈值的确定带有很强的主观性，缺乏科学依据，设定过高或者过低都会影响最终的决策结果。
- 3. 权重敏感性，加权求和法等方法对于权重很敏感，权重稍有变化就会使方案排序发生变化，从而造成决策结果不稳定性。

传统决策方法局限性对比表

特征 / 方法	加权求和法	优劣解距离法	共同问题
主要缺陷	目标间线性补偿假设不合理	信息压缩，极端风险易隐藏	权重敏感，结果不稳定
评价机制	综合得分，易受单一高分影响	距离理想解，易忽略细节优劣	阈值设定主观性强
适用场景	目标简单，可线性权衡	目标简单，可量化比较	复杂、非线性、高风险场景不适用

由上表可知，传统方法在解决水务工程这样复杂的非线性、目标不能通约、且存在极端风险规避的决策问题上力不从心。它们一般都会简化问题的复杂性，使决策者忽略重要的风险，做出次优或者错误的决定。因此探索并使用能更好处理复杂性问题的现代决策方法，是提高水务规划科学性的必然要求。

（二）复杂模型的应用门槛高

为了克服传统决策方法的缺点，学术界提出了很多更加复杂的决策支持模型，例如多目标进化算法、数据包络分析、系统动力学与多目标决策的耦合模型等等。

能处理好非线性关系、不确定关系和大量的决策变量，提供寻找“帕累托最优解集”的有效手段。以多目标进化算法为例，它可以同时对互相矛盾的目标进行优化，得到一组非优解，并且可以直观地向决策者展示出各种不同目标间需要进行权衡取舍，而不是只给出一个最优解，极大的拓展了决策者选择的空间，根据自身的偏好和情境选择最合适的方案。

但是这些先进的模型虽然能力很强，但是应用门槛也很高，所以不能在水务工程规划中得到广泛的应用。需要很强的数学功底和计算机编程知识，使用者也必须要有较高的数据处理水平和模型构建水平。基层规划单位的技术人员如果没有经过系统算法理论的学习，就容易出现“看不懂、学不会、用不上”的尴尬。模型需要大量的高质量基础数据作为输入，但是水务规划中很多数据（特别是生态和社会数据）获取困难且精度不高，数据不足又进一步限制了复杂模型的应用。模型的运行过程也有“黑箱”的特性，其决策过程无法被非专业人士以及公众所理解，因此决策结果也就没有公信力了，公众也不容易接受。

（三）缺乏对不同决策方法适用性的比较分析

目前水务工程规划决策领域存在着这样一种现象，即决策方法的选择具有较强的随意性以及路径依赖。规划人员一般会选择自己熟悉或者文献中常见的方法，缺少一个系统的框架来指导根据问题的特性选择最合适的决策模型。不同的决策方法有不同的理论假设以及适用范围。层次分析法适用于有明确层次结构的决策问题，但当指标过多时，判断矩阵的一致性检验就会变得非常困难。模糊综合评价法适合于评价标准不清晰、以定性指标为主的决策问题。

缺少对不同决策方法的适用性进行比较分析，增加方法误用的风险。把解线性确定性问题的简单模型用在水系统规划中高度非线性、存在不确定性的复杂问题上，结果必定大打折扣。相反，在数据稀疏、目标简单的决策场景下，强行使用复杂的数据驱动模型，会造成资源浪费，并且由于数据不足，容易造成过拟合现象，使结果不科学。造成“方法与问题不匹配”的情况，是许多决策分析流于形式、不能真正起到辅助决策作用的原因之一。

因此需要建立一套决策方法选择的方法论和流程。此流程要引导使用者细致剖析决策问题的特征，也就是目标数量，性质（定性与定量），目标间的关系（线性或非线性，冲突或协同），数据信息是否完整，不确定性程度，决策参与者范围，偏好。在此基础上，可以搭建起一个以问题特征为行，方法性能为列的匹配

矩阵，把各种主流决策方法的优劣、适用条件、数据需求整理出来。规划者根据所面对的实际问题，按照图索骥的方法选择一种或者几种最合适的办法组合起来使用，从而达到决策工具的最佳配置和决策效率的最高水平。

三、决策过程的科学性与透明度问题

决策结果的好坏，不在于指标体系与模型方法，而在于决策过程的组织方式与程序正义。封闭、主观的决策过程，再好的模型也难以得到社会大众的认同。因此保证决策的科学性、透明性就显得十分重要。

（一）专家评审与公众意见结合不够

水务工程规划决策关系到广大人民群众的利益，专家评审和公众参与是保证决策科学化、民主化的两大支柱。专家评审主要是从技术、经济、环境等几个方面对方案的可行性及好坏作出专业判断，以保证决策的科学性。公众参与是吸收受工程影响的民众、社会团体等利益相关者的要求和价值观，保证决策公平、社会接受。理想的决策过程应该就是两者有机结合和良性互动的过程，但在实践中常常会存在脱节，甚至是矛盾。

专家决策就是决策过程中过分依靠少数专家的意见，公众意见、建议被当作参考，甚至在规划后期才象征性地征求，不能对重大决策起到决定作用。另一方面是公众参与的形式比较单一，主要采取公示、听证会等形式，信息传递是单向的，缺乏沟通，公众很难在充分了解规划方案复杂性的情况下，提出具有建设性的意见。结合度不够的情况出现以后，规划方案就有可能在技术上是最佳解，但在社会上会遭遇极大的执行阻力。要改善现状，就要革新参与机制，采用参与式评价、协商会议等深入交流的方式，使专家和公众在规划初期就进行对话，共同确定问题、建立指标、评价方案，从而把专家的科学理性与公众的价值理性有机地结合起来。

（二）决策过程的信息公开与透明度不足

信息公开是保证决策透明的手段、推进公众参与的手段、加强社会监督的手段。水务工程规划方案多目标决策的过程，包含着复杂的指标体系、模型算法和权重的确定，本身就是信息量较大的过程。如果这个过程不透明，外界的人就无法知道最后的结果是怎么形成的，那么它的合理性也就无从谈起。目前决策过程透明度不高问题仍然存在，规划方案背景资料、基础数据、备选方案详细信息、

评价指标及权重、决策模型和方法等重要信息公开不及时、不充分、不完整。

公众只能看到最后被选中的方案结果公示，而看不到为什么选择这个方案、这个方案比其他方案好在哪里、决策过程中如何权衡取舍等关键信息。“黑箱式”的决策过程容易造成公众的不信任，也会使人们对决策结果产生质疑。即使决策本身是科学公正的，也会因为过程的不透明而失去公信力。在信息不对称的情况下，公众的怀疑和猜测很容易被放大、误导，从而产生对项目的负面舆论，加大规划实施的社会风险。透明的决策过程本身就是一种有效的社会沟通方式，可以向公众展示决策的复杂性以及困难之处，从而加深公众对决策的理解。

提高决策过程的透明度，就要健全全过程信息公开的制度。在规划开始阶段就应当确定信息公开的内容、方式和时间节点。应利用现代信息技术创建专门的规划项目网站或信息平台，把所有的非密的背景研究报告、基础数据、多套备选方案的详细内容以及优缺点分析、决策所采用的指标体系、权重来源、模型原理和计算过程等以大众能理解的方式向社会全面公开。对于比较专业的方面可以制作图文并茂的科普材料以及可视化成果，便于公众理解。只有将决策过程公开于世，置于公众及社会的监督之下，才能最大限度取得社会共识，给规划的顺利执行创设良好的社会氛围。

（三）缺乏对决策方案的后评价与反馈机制

决策不是终点，是不断管理循环的起点。完整的决策体系必须包含对已实施方案的后评价和反馈。水务工程规划决策是在对未来需水量预测、径流变化预测等一系列预测、假设的基础上进行的。在漫长的工程建设与运行过程中，这些外部条件很可能会发生改变，从而使得工程的实际影响和最初评价结果存在差异。后评价机制的主要作用，是对决策方案执行后所产生的实际效果进行系统的跟踪评价，将评价的结果与决策阶段的预期目标进行比较，以判断决策是否正确。

目前的水务工程管理存在着“重决策、轻后评”的现象。很多项目在作出决策之后、开工建设的时候，相应的决策档案就被束之高阁，没有系统的跟踪监测和评价。这就产生了两个严重的后果：

1. 不能及时纠正偏差：工程实际运行效果（生态影响、社会效益等）与预期产生差异的时候，因为缺少有效的监测评价手段，管理者不能及时发现偏差并调整管理方式加以改进，从而导致负面影响不断扩大。

2. 决策的经验不能继承，每一次的决策都是学习。不进行复盘总结就无法知

道原先的指标体系是否合理、权重是否得当、模型预测是否准确。成功经验不能提炼成知识，失败的教训也不能吸取。这就使规划部门在面对新的决策问题时，有可能重犯以前的错误。

建立健全后评价和反馈机制，应该把后评价作为项目全生命周期管理的法定环节。依靠已建立的监测网络，对工程运行后经济、社会、环境等各方面的数据进行长期的采集，按照一定的周期（5-10 年一次）开展系统的后评价工作。评价结果要成为现有工程适应性管理的指导，也要作为决策知识库里的信息，用于改进指标体系搭建、模型参数校正和权重决定这些方法。于是就形成了一个决策—实施—评价—反馈—再决策的不断前进的循环系统。

第三章 工程实施阶段的协同管理机制

第一节 项目实施组织与责任分工优化

一、组织架构设置不合理

组织架构是项目运作的骨架，其是否合理会影响到信息流、决策链甚至整个项目。不合理的架构设计常常是造成管理混乱、沟通不畅、决策迟缓的根源，它会对项目实施的各个方面产生影响，必须引起重视，并从源头上加以解决。

（一）矩阵式管理导致多头领导问题

水务工程项目中矩阵式管理结构有利于资源共享，但也会陷入多头领导的困境。项目成员既要向项目经理汇报，又要听从职能部门经理的指示，一旦出现两者的命令相冲突的情况，就会陷入无所适从的“忠诚困境”。又如水工结构工程师一方面被项目经理催着快点完成现场图纸的优化，另一方面又接到职能部门负责人的电话，让他先去完成另一个项目的标准化图集编制。权责不明会降低决策和执行的效率，由于指令矛盾而造成工作返工又加重了项目的内耗。

双重领导模式给责任推诿留下了空间。当项目出现问题的时候，项目经理与职能经理之间常常将资源调配不足、人员能力不够的问题互相推卸责任，从而无法及时地追溯出具体责任人。团队成员在指令冲突、权责不明的情况下长时间工作，其工作积极性、归属感受到严重影响，从而影响到整个项目团队的战斗力以及协作能力。要解决这个问题，在组织层面必须确定项目经理的最终决策权，同时组建跨部门协调小组来平衡各方面的资源需求。

（二）部门壁垒导致信息沟通不畅

传统的水务工程项目的职能型组织结构很容易造成部门之间的壁垒，各部门就如同是孤立的信息孤岛，不能有效的进行数据和知识的交流。设计、采购、施工、监理、预算等各个环节分别属于不同的部门，每个部门都希望维护自身的信息和利益，缺少主动共享的动力。由此而产生的信息分割现象比比皆是，设计部门掌握的施工工艺最新优化没有及时传递给施工单位，致使现场仍按旧图纸施工，造成不必要的返工和材料浪费。

统一数据标准缺乏以及信息传递不及时，加剧了问题。各个部门所使用的软件、文件格式、数据标准不一样，信息在部门之间流转的时候需要大量的人工转录和格式转换，容易出错，效率也低。重要的设计变更出现的时候，信息要经过层层审批、传递才能到达一线施工人员手中，任何一个环节的延误都会造成决策滞后，错过最佳处理时机，从而产生连锁性进度延误和成本超支。

部门壁垒思维不单切断信息的横向交流，而且还使得项目统筹管理水平受到影响。项目管理层不能得到全面、及时的项目数据，不能作出正确的判断和决定。当成本控制部门发现某项材料费用异常时，由于无法得到采购部门签订的合同详情和施工部门的现场使用量数据，很难准确分析超支原因并采取有效的应对措施，只能被动地、滞后地进行管理。打破部门之间的壁垒，建立一个统一的共享平台来达到高效协作的目的就成为必然要求。

（三）缺乏高效协同决策机构

复杂的水务工程项目里，跨部门、跨专业的综合性问题接二连三地出现，但很多单位没有成立专门的、能迅速应对并高效解决这些问题的常设协调决策机构。常规项目例会一般都会出现议而不决或者决策层级太深，流程复杂等的情况，使得问题从发现到解决的周期无限延长。施工现场实际的地质情况与勘察报告存在较大出入，进而对坝体结构设计及下游围堰施工方案产生影响的时候，就会涉及到设计、施工、安全、成本等诸多部门。

如果没有一个拥有足够授权、由各方关键人物组成的集成决策小组，那么相关方案的修改只能在各个部门内部反复地研究、审批，然后再进行多轮次的跨部门协商，效率极低。高效的协同决策机构，项目总控委员会、集成项目交付领导小组等，把所有重要的决策者集中起来，根据最新的、最全面的信息做出快速的、集体的决定，在突发事件发生时迅速调整方向，保证整个项目的顺利进行。该类机构的产生，就是化解部门利益冲突、实现项目整体目标最优化的重要保证。

二、责任分工不明确、不清晰

如果说组织架构是骨架，那么责任分工就是使骨架运动的神经系统。分工不明、界面不清会直接造成执行环节的推诿、遗漏、冲突，严重影响项目的协同效能。明确每一个角色、每一个团队的职责范围是保证项目机器平稳运转的前提。

（一）岗位职责模糊存在管理盲区

在很多水务工程项目当中，虽然存在大量的管理岗位，但是岗位职责说明书往往很模糊，和实际工作不相符，造成责任界限不清，产生大量的“管理盲区”。盲区一般出现在任务交叉或者流程衔接的地方。施工临时用水用电的设计、报批、维护等工作，设计单位认为是施工单位技术方案的内容，而施工单位认为应该由建设单位在前期协调解决，最终造成无人负责，影响工程开工及正常进行。

另一个表现就是因为职责重叠而产生的管理冲突。如新材料进场验收时，材料部门、质量监督部门、施工技术部门都认为自己有最终决定权，三方标准不一，使供应商无处安放，材料不能及时入库使用。造成岗位职责不清，一旦出现问题就找不到具体的责任人，久而久之就形成了“人人有责就是人人无责”的局面，严重破坏了项目管理的严肃性，使得很多本可以避免的工程问题因为没有人接手而变成了现实。

（二）参建各方责任界面不清

水务工程项目牵扯建设单位、勘察设计、施工总包、专业分包、监理、设备材料供应商等众多主体，如果各方责任界面不清晰，就会成为项目协同的“雷区”，极易引发合同纠纷和工期拖延。界面问题无处不在，在项目实施中是很难解决的问题，属于项目协同管理中的难题。

1. 设计与施工的界面问题更加明显。设计图纸中的错、漏、碰、缺由谁来深化、修正？由于设计变更引起的工程量增减、费用调整等事项，若没有明确的约定，很容易在施工过程中产生争议，造成变更指令无法落实、施工停滞。

2. 甲供材料、乙供设备责任交接有真空地带。以建设单位供应的泵为例，从设备到港、陆路运输、现场开箱检验、入库保管、与施工单位交接进行安装等一系列过程中，各方的责任主体、风险承担和保险覆盖范围等必须予以明确。如果界面不清，一旦设备在安装前出现损坏或者缺陷，就会使建设、供应、运输、保管、安装等各方互相推卸责任。

3. 总包与分包之间管理界面也常常发生矛盾。总包单位对于分包单位的安全、质量、进度负责任，但是管理范围的深浅和宽窄应当明确。脚手架搭设、大型机械使用等，只有方案审批和最终验收，还是过程监督？这些界面的模糊性会导致管理资源的浪费或者管理的真空，并且给安全事故的发生埋下隐患。明确各个参建方的责任矩阵，是项目顺利进行的保证。

（三）责任追究与激励机制不健全

缺少健全的责任追究与激励机制，是造成责任分工形式主义的根源。责任分工明确以后，还要配合相应的奖惩制度，才能使各项责任落到实处。在很多水务工程项目里，问责制不健全，一旦发生重大质量问题或者进度滞后的情况，由于问题链条过长，牵扯的部门太多，很难把责任精确地追究到个人身上，最后往往是集体担责或者不了了之。这就产生了一种“法不责众”的心理，严重地降低了责任制的严肃性。

激励也存在问题。目前大部分的激励措施只注重最终的项目结果，如项目是否按时完成、是否超支等，而忽略了对协同行为本身的激励。像主动分享信息、乐意帮别的部门解决技术难题、跨团队合作得很好的个人或者小组，就常常得不到及时有效的精神或者物质奖励。于是各个参建方、内部各部门就更倾向于固守着各自的“一亩三分地”，只完成合同内规定、与自身利益直接相关的任务，缺少实现项目整体目标的主动协同的内在动力。有效的机制要做到奖惩分明、及时反馈，对失职行为要严肃追究，对优秀的协作行为也要给予充分的肯定，从而在项目团队中形成“勇于担当、乐于协作”的文化氛围。

三、协同组织与分工优化策略

针对前面提到的组织及责任分工上存在的一些弊端，需要采取积极主动的改善措施。组织形态一变、权责明确、数字化工具一靠，从根本上搭建起高效的协同管理架构、透明的协同管理环境、敏捷的协同管理机制，全面提升水务工程整体交付水平。

（一）建立项目目标导向的扁平化组织

为了克服传统层级制组织僵化、沟通效率低下的缺点，水务工程项目应该积极探索以项目最终目标为向导的扁平化组织结构。该组织模式的关键点就是打破原有部门之间的壁垒，将来自设计、施工、采购、预算、运营等各个专业领域内的核心人员整合到集成项目团队里，直接对项目总负责人负责。大大减少管理层次之后，团队内部信息流通会更快，决策链条变短，使团队能更快的应对各种变化。

扁平化结构下，团队成员的考核不再只看所处职能部门绩效指标，而更多地和项目的整体成功，即项目的成本、工期、质量、安全、运营效果等联系起来。这使得团队成员由原来的以部门利益最大化为目标，转变为以项目整体效益最大

化为目标，形成了共享、共同解决难题的文化。设计工程师会更加注重项目的可施工性和经济性，施工经理也可以在方案讨论中提前介入，对项目提出建设性的意见，从而在项目初期就规避掉许多后期可能出现的问题，真正实现共同建设。

（二）运用责任分配矩阵明确角色责任

为了彻底解决责任不清、界面不明的问题，引入并严格执行责任分配矩阵是一个非常好的办法。责任分配矩阵是一种任务与角色相匹配的结构化方法，对每一个具体任务来说，它把参与者分为四类不同的角色：负责执行、批准担责、咨询参谋、知会告知。运用责任分配矩阵，给项目的关键活动一一确定责任，就可以把原来模糊的责任界限清楚地固定下来。

责任分配矩阵角色说明表

角色简称	角色名称	角色职责描述
R	Responsible (负责执行者)	负责具体执行任务，确保任务按时完成并达到要求。
A	Accountable (批准担责者)	对任务结果负最终责任，拥有批准或否决执行者工作的权力，每项任务只能有一个 A。
C	Consulted (咨询参谋者)	在任务执行前或执行中提供专业意见、建议或信息，需与其双向沟通。
I	Informed (知会告知者)	需要及时了解任务的进展和结果，只需单向告知。

将责任分配矩阵运用到水务工程项目的实践中，首先要对整个工程流程进行分解，将其拆解成一系列具体的任务单元，比如“深基坑支护方案的制定”、“主泵房阀门选型”、“征地拆迁协调会组织”等等。项目管理团队要召集所有相关利益方开会讨论，在每项任务中确定具体执行人、对结果负唯一最终批准责任的人、需要咨询的专家或者有关方、必须及时通知进展和结果的人。

设计变更申请处理任务中施工单位技术员为执行者，负责编写变更申请；项目总工程师为批准担责者，对变更是否批准负最终责任；设计单位、造价咨询单位为咨询参谋者，需要就技术可行性和成本影响给出专业意见；项目业主、监理单位为知会告知者，需要被告知变更的最终结果。像责任分配矩阵角色说明表这样东西，本身就是一个非常强大的沟通与协同工具，它逼迫所有参与方在项目一开始就要就“谁负责”达成一致，并且把这个达成的一致意见以文件的形式固化下来，成为后面工作的基本遵循。

公布责任分配矩阵的结果给所有项目成员，可以有效防止推卸责任、和稀泥的现象。当任务出现延误或者问题的时候，可以迅速找到对应的责任人和批准担

责者。它把抽象的“责任”变成了具体、可执行、可追查的行动指南，为建立有效的问责和激励机制打下了坚实的基础，成为做好精细化协同管理的利器。

（三）构建基于建筑信息模型的协同工作平台

技术成了组织变革和协同改善的主要推动力。现代水务工程以 BIM 为基础创建协同工作平台，是消除信息孤岛、提高多方工作效率的一种方法。建筑信息模型不是简单的三维可视化模型，它是包含项目全生命周期数据、数字化平台、工作流程的综合平台。建立所有参建方（业主、设计、施工、监理、运维等）共享的通用数据环境，使所有人员都用同一套最新的最准确的信息来开展工作，从源头上消除由于信息不一致造成的错误和返工。

设计团队在平台中创建的建筑信息模型可以供施工队进行深化设计、碰撞检测、施工模拟。泵站管道安装前，可以用虚拟环境模拟安装，提前发现管道与结构梁的碰撞点，在设计阶段就解决掉，避免现场修改带来的高昂代价。施工阶段的进度、成本、品质等数据可以和建筑信息模型构件关联，实现工程进展的可视化控制。监理人员、业主可以在线查阅工程进度资料，审核重要的工序质量验收资料。

建筑信息模型协同平台沟通效率得到很大程度的提升。任一方发现瑕疵都可以在对应的地方生成问题标识，并将问题指派给相关人员。所有的对话记录，解决方案，处理过程都会保存到系统中，形成可追溯的协同历史。彻底结束了过去依靠会议纪要、邮件沟通的低效方式。最后这个包含各类信息的竣工建筑信息模型可以直接交付给运维单位，作为智慧水务运营管理的基础，实现规划、设计、施工、运维全生命周期的数据链深度协同。

第二节 进度、成本与质量协同控制

一、三大目标控制相互割裂

传统的水务工程项目管理中，进度、成本、质量这三个控制目标常常被当作独立的管理模块，由不同的职能部门来负责，从而造成管理目标和行为上的割裂。由于割裂的管理方式使得决策者不能从整体上权衡利弊，经常顾此失彼，造成一系列的连锁反应，最终影响项目的价值。

（一）赶进度牺牲质量增加成本

水工建设项目的工期压力一般都比较大大。不管是因为防汛、供水等季节性要求，还是因为响应号召、争取工程早日发挥效益，管理者都会遭遇缩减工期的强大压力。在进度优先的原则下，项目组往往会使用一些非常规的赶工办法，比如加班、同时进行多个工序的作业、简化非关键工序等来加快进度。但是对进度的过度追求会伴随着风险和代价，它直接威胁工程质量。夜间施工光线不足、人员疲劳，容易造成操作失误、质量监控疏忽；工序简化或者交叉作业会使技术规范要求的合理施工顺序、必要的固化养护时间无法保证，给工程埋下无法弥补的质量隐患。混凝土未达到规定强度时就进行下一道工序，结构就会开裂或者变形。

赶工会致使成本大幅上升。为了赶工，只能增加投入，雇佣更多的人力花高价加班费，租用更多的机械设备，增加设备租赁和运转费用，为了保证材料能够及时供应，可能会支付更高的采购价格或者承担紧急运输的费用。更严重的是，由于赶工造成质量不合格所引发的后期返工、修复、加固等费用，远远超过前期为赶工节省的时间价值，甚至会造成安全事故，给国家和社会造成难以估量的损失。牺牲质量，用增加成本来换进度，说白了就是短视行为，破坏了项目管理内部的平衡，最后导致项目整体目标无法实现。

项目管理实践中的问题出现是因为三大目标被分开了考核、管理所造成的。进度控制部门只关心时间节点，不用过多考虑成本、质量的连带影响，其决策行为就会倾向于不择手段地保证工期。由于管理上的条块分割，项目团队不能形成合力，不能从项目整个生命周期的角度进行综合考虑和决策。因此项目管理者必须认识到进度、成本、质量是不可分割的整体，不能片面追求某一个目标的极端。那种为了实现某一个目标而牺牲其他目标的做法，最终会受到项目内在规律的惩罚，使项目陷入“赶工—返工—再赶工”的怪圈，造成成本和工期的双重失控，工程质量也无法得到保证。

（二）降成本影响进度与质量

成本控制对于水务工程项目的管理而言是非常重要的。预算有限的时候，降低项目成本的压力就更大。管理者常常想方设法地削减开支，在预算内完成项目。但是不合理、过度的成本削减会严重地影响工程进度和质量。

材料采购时为了降低成本选择价格低、质量标准低的供应商或者材料，其直接后果就是工程质量存在很大风险。使用强度或者抗渗等级不符合要求的混凝土、

管材、防渗材料等，会对大坝、堤防、输水管道等主要结构的安全性、耐久性造成影响，容易造成渗漏、破裂等严重问题。后期的维修修复费用可能会比初期节约下来的采购费用多出几倍。设备和技术的选择上，采用陈旧、低效的施工机械或落后的施工工艺，虽然前期投入少，但是施工效率低，工期会因此而延误。施工周期延长一方面会增加人工、管理、设备租赁费用，另一方面也会使项目不能在最佳施工季节施工，从而加剧进度延误。

在人力资源方面，为压缩人工成本而使用技能水平低下的施工队伍，或减少质量、安全管理人员的配置，都会造成施工质量无法保证，安全事故风险增加。工人技能不熟练、操作不规范，容易造成返工，增加材料损耗和人工工时，进而耽误进度。由于压缩成本而出现的质量不合格、进度滞后等类似问题，又会产生一些额外的费用，从而形成一个恶性循环。无论是由于质量问题所引起的返工修复费用，还是由于进度延误所导致的间接成本增加，都会轻易地抹平甚至超过前期所节省的成本，最终造成项目总成本不降反增，陷入了为降低成本而增加成本的困境。

（三）质量标准过高致进度滞后

创建高标准、高质量的精品工程是全部水利工程建设最终目的。适度质量冗余、高标准质量要求可以保证工程的安全、耐久、长效。但是脱离实际需要和工程条件，一味追求过高的、不必要的质量标准，同样会给项目进度和成本带来沉重的负担，甚至会影响项目的顺利进行。

在项目实践中就会出现过度设计、过度建设的情况。在非承重或辅助结构上使用远超实际需要材料等级或者工艺标准，或者对外观指标提出过高的要求，都会使工程变得复杂，施工难度增大。不但会加大材料费和人工费，更严重的是会拉长施工及检验时间。每一个工序都要花更多的时间去检查，任何一个小小的失误都会导致返工，从而影响整个项目的进度。对质量的无限追求，如果忽略项目的经济性、时效性，就会使质量目标和进度、成本两个目标产生尖锐矛盾。

项目管理者应该明白，质量并不是越高越好，在满足设计规范、安全要求、使用功能的基础上达到的“适度”质量才是最好的质量。任何质量标准的确定都要经过充分的技术经济论证，考虑质量标准提高带来的效益和提高标准所增加的成本、消耗的工期的关系。一个好的项目，应该是核心功能与安全底线得到保障的前提下，追求质量、进度、成本三者的最优状态，而不是将其中一个目标推向

极致。盲目追求不需要的“高精尖”，最终会造成项目进度严重滞后或成本严重超支，不能按时发挥效益，机会成本损失将远远大于质量过度提高所获得的微小益处。

二、缺乏一体化的控制工具与手段

水务工程项目管理的复杂性，需要管理者有系统的眼光以及先进的控制手段。但是很多项目依旧沿用传统的条块分割式管理方式，造成进度、成本、质量这三个目标不能很好的协同控制。信息孤岛、反馈滞后、方法局限这三种因素一起形成了技术壁垒，使项目管理水平无法得到提高。

（一）进度成本质量数据分离

在很多水务工程中，进度管理、成本核算、质量检测分别由不同的部门或者团队来完成，使用不同的软件或者表格来进行数据的收集、存储和分析。进度部门关注关键路径、工期节点，成本部门在意资金支付、预算执行，质量部门着眼于技术规范、合格率。这就造成了职能划分所带来数据割裂、信息孤岛的问题。当质量问题出现以后，它对进度与成本的潜在影响很难马上、精确地加以衡量，并且很难及时地将这种影响传达给有关的决策者。

例如，某批混凝土强度不合格需要返工，质量部门会记录不合格项，但是这个信息需要多长时间才能转化为进度计划的调整、成本预算的追加？在数据分离模式下，该过程比较缓慢而且不准确。信息传递主要依靠部门之间的会议、报告等传统方式，存在明显的时滞。决策者面对的是相互矛盾、口径不一的数据，无法根据统一、完整的数据作出判断。进度报告中显示的项目进展顺利，却可能隐藏着成本超支的信号，质量报告也可能会给返工风险提供预警。零散、片面的数据不能反映出项目真实的、完整的健康状况，管理者就如同盲人摸象，不能认识三大目标之间存在的内在联系以及相互影响，更不能做出统筹全局的优化决策。

分离的状态也使得项目复盘、知识沉淀变得困难。项目结束后很难明确某个成本超支问题是由进度延误造成的，还是由质量返工引起的。历史项目经验教训不能以结构化、关联化的数据形式保存和利用，造成同样的管理问题在新的项目中重复出现。打破数据壁垒，把进度、成本、质量这三个主要数据融合起来，这才是协同控制的前提。统一的数据平台为信息实时共享、联动分析打下了基础，是科学决策的必要条件。

（二）缺乏动态预警与纠偏机制

传统的水务工程项目管理仍然依靠定期报告、会议等方式来监控项目的状态，这种方式的弊端是十分明显的，即过于滞后。当管理者从月度或者季度的报告中发现进度滞后、成本超支的时候，偏差已经相当严重，最好的纠正时机已经过去，纠正成本会急剧增加。更重要的是滞后反馈只能事后补救，不能实现事前预警。它不能根据现在的微小偏差和发展趋势，预估以后可能出现的大规模风险。系统不能对连续几天工作量减少、材料耗费异常等情形进行预警，也就无法预判后面重要节点延误和成本超支的风险。管理者只能被动地应对已经发生的问题，而不能主动地管理尚未发生的风险。

有效的项目控制系统应该像雷达一样，对项目各个关键指标进行实时的监控，并且利用预设的阈值以及算法模型，在偏差刚发生的时候就能发出预警信号。当某项工作的实际成本比预算多出 5% 或者进度比计划滞后 3 天的时候，系统就会自动给责任人发出警告。这种动态的预警机制可以防微杜渐，使问题能够在萌芽状态就被人发现，给管理者留出宝贵的应对时间，及时采取预防措施，防止小问题变成大危机。完善的纠偏机制不仅要具备预警功能，还要能够给决策提供支持。预警被触发的时候，系统就能模拟各种纠偏方案，比如增多资源，更新工艺，对进度，成本，质量的综合影响进行模拟，让决策者快速评价并选取最好的应对办法，“闭环”完成“监测 - 预警 - 分析 - 决策 - 纠偏”。

（三）传统方法难适应复杂项目

关键路径法、传统成本核算等经典项目管理方法，在几十年来对项目计划和控制起到了非常重要的作用，提供了基本的框架。关键路径法重在时间的优化，成本核算重资金的记录 and 对比。这些方法在处理简单、确定性高的项目上效果很好，但是面对现代大型水务工程越来越复杂的特性、动态性、不确定性，其缺陷也逐渐暴露出来。

大型水务工程常常会遇到复杂的地质水文情况、众多的参建单位、漫长的建设时间以及频繁的设计修改，这些都会给项目带来很大的不确定性。传统的方法是静态的，在项目开始时确定一个基准计划，然后定期地将实际情况与计划进行比较，发现差异。此种模式不能很好地适应项目过程中不断出现的变化。这些方法大部分把进度和成本割裂开进行分析。进度偏差和成本偏差两个指标是相互独立的，不能直观体现花了多少钱、做了多少价值的工作这样的问题。一个项目可

能会进度提前，但成本超支的情况会更加严重，传统的偏差分析无法对绩效好坏做出全面的判断。

这些方法的预测能力较弱。它们可以告诉你项目现在在哪里，但是很难科学地预测项目的最终完工时间和总成本。因此缺乏该能力会使得管理决策没有前瞻性，只能依据以往的数据来作出判断，而不能面向未来进行主动控制。对巨大的、动态的、复杂的水务工程来说，需要运用先进的管理方法来综合考虑和预测进度、成本等各方面的因素，以提高项目管理的科学性、预见性。

三、三大目标协同控制策略

进度、成本、质量三者之间存在着固有的矛盾，传统的管理手段也存在局限性。因此，水务工程项目要从系统论的角度出发，创建一体化的协同控制方法。这就要求管理者改变观念，把追求单一目标的局部最优转为追求项目整体价值的最大化，依靠建立集成化的控制体系、使用先进的技术、科学地设定平衡点来实现三大目标的动态协同、和谐统一。

（一）建立集成化项目控制体系

进度、成本、质量三者协同控制的第一步就是打破组织壁垒、信息壁垒，建立一个集成的项目控制体系。这不仅是一种技术工具的融合，也是管理理念、组织流程以及数据标准全方位的整合。

1. 从组织上讲要建立跨职能合作机制。可设置项目管理办公室或者集成控制小组，统一调度进度、成本、质量、安全等各个管理职能部门。改变以往各部门只对自己的绩效考核指标负责的状况，转而对项目的总体目标负责。利用定期召开联席会议、协同工作平台等途径使各部门之间实现信息共享、业务联动，从而保证决策是在考虑了所有相关因素之后作出。

2. 流程上要重新设计、优化工作流程，把三大目标的控制要求嵌入到项目的每一个环节中。设计变更流程也要考虑它对技术功能的影响，同时还要强制同步考虑它对成本、进度的冲击，产出量化报告供决策层审批。在采购时选择供应商不能只看价格，还要考虑质量、供货时间、信誉等方面。

3. 数据上就是集成体系的核心。要建立统一的项目数据库作为唯一的一步。利用建筑信息模型、物联网等技术，对施工现场的进度、物耗、质量检测等第一手数据实行自动采集，防止由于人为录入所引发的延迟与错误。把这些数据同成

本预算，合同支付这类财务数据关联起来，于是就形成了一个多维的，相互联系的数据立方体。只有统一数据之后，才能实现信息共享，给后续的综合分析、预警、决策提供良好的“燃料”。

经由搭建这般组织、流程、数据三者一体的集成化控制体系，从根本上冲破信息孤岛，保证全部项目参予方处在同一透明度平台之上运作，进而为达成三大目标的协同控制创建起坚固根基。

（二）应用赢得值法等先进技术

集成化数据平台之上，还要用先进的管理技术与分析手段，对数据加以深入挖掘和利用，从而对项目状态做到准确量化，科学预判，主动控制。赢得值法，就是一项被广泛认可的有效核心技术。赢得值法的特点是用一个统一的货币价值来衡量，把项目进度和成本这两个方面合在一起进行综合衡量。它有三个重要的参数，见赢得值法关键参数表：

赢得值法关键参数表

参数名称	英文缩写	描述	计算方式
计划工作预算成本	BCWS	截至某一时刻，计划完成工作的预算成本（即计划值 PV）	Σ 计划完成工作的预算成本
已完工作预算成本	BCWP	截至某一时刻，实际完成工作的预算成本（即赢得值 EV）	Σ 实际完成工作的预算成本
已完工作实际成本	ACWP	截至某一时刻，实际完成工作的实际成本（即实际成本 AC）	Σ 实际完成工作的实际成本

根据这三个值可以得出：进度偏差 $SV=BCWP-BCWS$ ，成本偏差 $CV=BCWP-ACWP$ 。进一步分析可以得到两个有洞察力的绩效指标：进度绩效指数 $SPI=BCWP/BCWS$ 、成本绩效指数 $CPI=BCWP/ACWP$ 。这些指标可以反映项目当前是否落后于计划，也可以反映项目目前的超支情况。将 SPI 和 CPI 结合起来就可以判断项目的整体绩效是否健康。例如一个项目的 SPI 大于 1（进度提前），但是 CPI 远远小于 1（严重超支），这就意味着这个项目是用非常高的成本代价换来的进度，项目的管理效率低劣。更重要的是，赢得值法有很强的预测能力。根据现在的绩效指数可以预测项目的完工总成本 EAC 和完工总工期。具有前瞻性的分析能力，可以及时发现超支、延期的风险，在项目出现偏差之前就采取纠偏措施，使项目回到正确的轨道上，从而由原来的事后补救变成事前控制。

（三）设定合理优先级与平衡点

即便拥有最好的系统、最先进的工具，项目管理本质上也还是权衡的艺术。现实资源有限，不可能有绝对的“三全其美”。管理者要根据不同的阶段，不同的约束条件，来确定合理的优先次序和动态平衡点，从而确定进度、成本、质量这三个目标。项目一开始就要同业主和主要利益相关方充分交流，确定项目的成功标准。必须确定不可逾越的底线，哪些目标可以有弹性。

以防洪为主的堤防加固工程，进度、结构安全是硬性要求，而成本可以有一定的浮动。对于一个以盈利为目的的水景开发项目而言，控制成本可能就是最要紧的，质量与进度只要能够达到基本的需求和合理的预期就可。项目的优先级排序不是固定不变的。遇到突发情况的时候，根据事先设定的优先级来作出判断。如果出现不可预见的地质问题造成成本超支，对成本优先的项目，会牺牲一些非核心功能或者延长工期来消化成本压力；对进度优先的项目，会增加投资，采用更先进的技术来克服困难，保证工期。

设定优先级，说白了，就是在两难选择时有一个明确的判断标准，不至于左右为难、举棋不定，不至于做出有损于项目大目标的小牺牲。因此项目经理不能只做技术专家，而应当成为理解项目的战略意图和商业价值、做出正确决策的管理者，在不断变化的环境中找到实现项目整体价值最大化的最佳平衡点。

第三节 风险管理与应急预案制定

一、风险识别与评估不全面

风险管理最重要的环节就是全面准确地识别、评估。在这一阶段出现的任何疏忽，都可能引起后面一系列的被动和失控，给工程顺利推进埋下巨大隐患。目前，许多水务工程在这一环节上还存在明显不足，影响了水务工程风险管理的效果。

（一）社会风险识别不足

在水务工程的风险清单上，技术风险、财务风险、自然风险一般都会引起高度的注意，但是公共利益和社会影响风险常常被忽略或者简化处理。社会风险有征地拆迁、移民安置、公众舆论、生态补偿、文化遗产保护等。风险关联主体众多，影响深远，一旦爆发，处理起来的难度和造成的后果不会逊色于任何技术问

题。前期若对征地补偿标准是否合理、移民安置方案是否可行的研究不够充分，或与民众的沟通不力，很容易造成社会矛盾激化，进而引发民众抵制、项目停工、工期拖延、成本大幅增加。

很多项目在规划阶段，对施工期间可能出现的噪音、粉尘、交通拥堵等短期负面影响，以及工程建成后对区域水资源分配格局的改变、上下游利益的再平衡等长期社会效应，都没有进行系统的分析，也没有做出前瞻性的预判。对于社会风险存在选择性忽视，既是因为“重技术、轻协调”的管理习惯造成的，也是由于对风险认知的局限性所导致的。随着社会公众权利意识、环保意识的提高，由于社会风险导致的冲突也越来越多，其结果不仅是项目受挫，还会导致政府公信力下降，社会动荡。

因此把社会风险的识别和评价放在与技术、经济风险同等重要的位置，是现代水务工程风险管理体系必须完成的关键转变。这就意味着要项目管理者扩大风险的视野，在项目的开始阶段就加入社会学、经济学、法学等领域的专家，对项目的社会影响展开调查，听取各方面的意见，把可能产生的社会矛盾和冲突消灭在萌芽状态。

（二）风险评估方法单一

当前水务工程风险评估中存在一个普遍性的问题就是方法的单一化，定性评估方法被过度使用。此种方式大多数依靠专家经验、历史数据、检查表等来主观判断，把风险等级分为高、中、低等模糊的层次。定性方法操作简单、快速高效，在风险初步筛选阶段可以发挥一定的作用，但是其主观性强、精度不高等缺点也很突出。它不能反映出风险发生的概率以及可能造成的损失金额，所以无法对不同的风险进行科学的量化对比。

单一的评价方式造成风险画像失真，不能正确区分各个风险的优先次序。一个发生概率很小，但一旦发生就会造成毁灭性打击的“黑天鹅”事件，在定性评估中因为可能性小而被低估。相反，一些发生频繁但是影响较小的小风险，由于其发生频率高会占用管理者大量的精力和资源，进而使得管理者忽视了对真正危险的风险防范。这会牵涉到风险应对策略是否合理，资源分配是否恰当，会出现两种极端情况，“高射炮打蚊子”，“低配应对重大风险”。

（三）风险动态跟踪机制缺失

风险不是一成不变的，而是在项目全生命周期中不断变化的变量。在漫长的

工程规划、设计、施工、运营过程中，政策法规、市场环境、技术条件、社会舆论、自然气候等都会发生变化，这些变化会产生新的风险，也会导致原有风险的性质、概率、影响程度发生变化。项目初期做完风险评价之后就将其束之高阁，缺少动态跟踪、持续性的再评价机制。

静态风险模式下项目管理人对于风险环境的变化不能做出及时反应。项目刚开始的时候被认定为低风险的因素，随着时间的推移可能会变成巨大的威胁，但由于没有跟踪机制，管理层对此毫无所知，原来的风险应对措施早已失效。新的建筑材料出现带来的技术风险，区域经济发展引起的水需求预测变化，都会造成新的供需风险。缺少动态跟踪的项目就如黑暗中航行的船只，不能及时调整航向避开新出现的冰山。设立风险追踪机制，定时或者按照项目阶段或者环境的变化情况，重新审视风险清单，修正风险评定结果，进而调整风险应对措施，才能使所采取的风险控制措施一直保持时效性。

二、应急预案可操作性不强

应急预案是突发事件的应对方案，是风险管理从“防”到“救”的重要环节。没有可行预案在危机时刻起不了作用，不能对救援工作起到指导作用，反而会因为指挥不力造成二次伤害。

（一）预案内容空泛缺乏针对性

许多水务工程应急预案存在着严重的模板化、形式化问题，内容充斥着许多原则性的口号以及含糊其辞的表述，比如加强组织领导、保证信息畅通、尽最大努力组织抢险等等。表面上看内容很全面，实际上是空洞的。这类预案脱离了工程本身的特性，没有针对项目发生某类突发事件的类型开展具体分析。

一份好的水利工程应急预案，应该结合工程所在地域、水文地质情况、工程结构特点、上下游敏感目标、施工阶段特殊危险源等因素。拿一座高土石坝工程来说，应急预案要对超标准洪水、坝体渗流异常、地震破坏等各类灾害情景下的监测预警指标、应对流程和处置办法作出具体规定。

但是现实中很多预案并没有这样做，它们更像是通用的行政文件，而不是能够在紧急情况下指导现场人员快速、准确行动的技术操作手册。预案不能回答在具体情境中谁去做、做什么、如何做的问题。

危机真正来临时，现场人员根本无法从这份文件里找到明确的指引，只能靠

个人经验来进行临场判断，很容易导致指挥混乱、措施失当，错过最佳处置时机。没有针对性预案不仅浪费资源，而且是对工程安全及公众生命财产安全不负责任的行为，存在的意义仅仅是为了应付检查而失去了应急工具应有的作用。

（二）应急资源调配方案不明

应急资源能否得到保障是应急预案能否成功实施的重要条件。这里的资源有抢险物资、应急队伍、设备、专家、资金、避难场所等。目前很多预案都存在一个问题，即列出了需要的资源清单，但是缺少具体的、清晰的、可操作的调配方案。方案中对于应急资源在哪里、有多少、谁负责、怎样取得等重要信息要么含糊不清，要么完全无从得知。

一个健全的应急资源调配方案应当具备以下要素：

1. 资源动态清单，明确自有的和可以协商调用的外部应急资源种类、数量、技术指标、储存地点、保管单位、联系人等，并定期更新，保证信息的准确性。
2. 明确调配程序，根据不同的应急响应级别来规定各类资源的调用权限归属、审批程序、运输方式保障等，保证资源可以被迅速、有序地调动。

在没有明确方案的时候，突发事件一出现，组织者就会陷入找米下锅的境地。有关人员临时查看物资库存、寻找设备供应商、协调运输车辆，过程中有许多不确定性，严重影响救援的黄金时间。特别是在跨部门、跨区域调动社会资源的时候，如果事先没有签订正式的协议，也没有明确的协调机制，临时沟通的效率就会很低，甚至会被拒绝，从而造成应急响应行动因资源无法到位而瘫痪。

（三）应急演练与培训不到位

应急预案的生命力在于实践，而应急演练、人员培训就成了检验预案、提高整个团队应急能力的最好的方法。目前普遍存在的问题就是演练和培训工作只做表面功夫，没有取得预期效果。很多单位把应急演练当成一项必须完成的“任务”，为了演练而演练，过程往往是“演一遍、说一遍”的表演，缺乏真实感、缺乏对抗性。参演人员提前知道全部流程，演练变成走过场，不能真正发现预案中存在问题以及人员能力不足。

同时应急培训严重不足，很多员工甚至不知道自己岗位在应急状态下应承担什么职责、按照怎样的程序操作，对于应急设备如何使用、自救互救技能等一无所知。培训内容大多停留在理论学习的层面，缺少同实际工作相联系的模拟操作和技能训练。这就会造成即使有最好的预案，执行者在实际情况下也会因为紧张、

不熟练而慌乱，无法把预案要求变成实际行动。没有经过充分的演练和培训的应急队伍，在真实的灾害面前，在混乱和压力下，其反应能力、协作效率都会大打折扣，预案的有效性也就无从谈起。

三、风险管理与应急优化策略

面对水务工程风险管理以及应急预案制定方面的诸多不足，必须要从文化、方法以及实践这三方面对水务工程实施系统的改良与革新。这既是技术也是管理流程上的改进，更是深层次的观念转变，其目的就是创建一个更加稳固、更加前瞻性的综合防灾减灾体系。

（一）构建全员全过程风险管理文化

风险管理不能只看作某个部门或者少数专家的职责，而是应该成为组织内部的一种文化基因和每个员工自觉的行为。构建全员、全过程的风险管理文化，就是要把风险意识从管理层延伸到一线作业人员，项目规划、设计、施工到运行维护每一个环节都要包含在内。核心思想就是使人人都是风险官的观念深入人心。

要形成这样的文化，首先要有一线高层的强力推动，制定风险管理战略和政策，使全体员工意识到风险管理对组织生存和发展的重大意义。第二是创建常态化风险管理培训和沟通制度，让不同岗位员工知道自身工作中存在什么风险、怎样识别并报告。一线施工人员最容易发现现场的安全隐患，设计人员最了解方案的薄弱之处，他们的风险感知能力也是一种重要的信息来源。

还应该建立科学的激励和问责机制。对主动发现、规避风险并取得成效的团队或个人予以奖励，对忽视风险、造成损失的予以追责。通过将风险管理绩效同个人业绩考核挂钩，可以将风险责任落实到人，使员工将风险防范作为日常工作的习惯。当风险管理不再成为一种额外的负担，而成为一种本能的思维方式和工作流程的时候，整个组织对于不确定性所具有的能力就会从根本上得到提高。

（二）采用定性定量结合评估模型

由于单一的评价方式存在着缺点，因此必须要使用定性、定量相结合的风险评价模型来达到全方位、深层次和精确地对风险进行刻画的目的。结合不是简单的将两种方法相加，而是互相补充、互相验证的过程。实践中一般先用定性方法做大量的风险识别和初步筛选。利用头脑风暴法、德尔菲法、专家访谈等方式，可以迅速找出项目存在的各种风险，并根据风险给项目带来的影响程度以及发生

的可能性来进行初步排序，找出要重点关注的风险领域。

在定性分析的基础上，对识别出的重要风险使用定量分析的方法进行分析。可以采用蒙特卡洛模拟来估计工期延误、成本超支的概率分布；用事件树分析、故障树分析来计算某类事故（溃坝、水污染）发生的概率；也可以利用敏感性分析来确定影响项目目标最大的风险因素。定量方法可以将风险用具体数字（概率、损失金额、延误天数）来表现出来，给管理者提供更加客观科学的决策依据，使风险应对资源的分配更加精确、高效，达到风险管理投入产出比最大化的目的。

风险评估方法对比表

特征 / 方法	定性评估	定量评估
主要依据	专家经验、历史数据、检查表	数学模型、统计分析、概率论
评估结果	模糊等级（高、中、低）、描述性	具体数值（概率、损失金额、延误天数）
操作简便性	简便、快速	复杂、耗时
精度与客观性	主观性强、精度不高	客观性强、精度高
适用阶段	初步筛选、风险识别	重点风险深度分析、决策支持
优势	快速识别、成本低	提供精确数据、辅助资源优化
局限性	缺乏量化依据、易受主观影响	需大量数据、模型假设复杂

从表中可知，定性评价和定量评价各有侧重，结合起来使用才能互相弥补不足，为水利工程风险管理提供全面的支持。

（三）制定情景化流程化应急预案

为使应急预案从书本上的文件变成战场上的地图，应急预案的编制应该向情景化、流程化的方向发展。这就意味着要把应对所有风险转变为应对特定的场景。预案制定者不能只依靠通用原则的指导，而应该根据前期风险评估的结果，设想出一些最可能发生、后果最严重、一旦发生就会造成严重后果的突发事件情景。

对于各种具体的状况，预案要制订出详细的进程方案，保证每一个环节清楚明白，环环相扣。一份合格的情景化流程化预案应该包含以下要素：

- 1. 明确启动条件：规定某个监测指标（水位、流量、裂缝宽度等）达到什么样的阈值时情景的应急响应才开始，避免响应时间的延误或者误判。
- 2. 行为流程清晰：用流程图或者清单的形式，将预警发布、信息上报、人员疏散、现场抢险、资源调配、善后处理等所有的操作过程一一列举。流程中要确定各个环节的责任人、完成时限、工作标准。

3. 处置卡，对关键岗位人员（现场指挥官、设备操作员、疏散引导员）制作简单的应急处置卡，卡片上只写有该岗位在某种情况下必须立即做的关键动作和联系方式，以便在紧张混乱的环境中快速查看并执行。

这样应急预案就不再是厚重的理论著作，而是一系列可以直接使用的行动剧本。当发生某一起具体的危机事件时，就可以找到对应的剧本按照事先规定的步骤有条不紊地进行应对，从而降低现场决策的压力，减少混乱的程度，提高应急响应的及时性、准确性、有效性。

第四节 利益相关方沟通与协调机制

一、沟通渠道不畅、效率低下

水务工程项目的规模大、周期长，沟通渠道是否畅通直接关系到项目管理的好坏。沟通不畅会造成工期延误、成本增加，还会激化矛盾、影响项目的声誉。信息传递链条过长，信息共享平台缺乏，非正式沟通利用不充分的问题非常普遍，很大程度上抑制了项目协同效率的提升。

（一）信息传递层级多、易失真

水务工程项目的管理体系一般呈金字塔式分层结构，中央到地方各级政府、项目业主、设计单位、监理单位、施工单位以及下游分包商等都参与其中。信息在庞大的网络里传递，每一个层次都会因为传递者的理解偏差、利益考量或者信息的筛选而发生改变。一项关键技术变更指令，从顶层设计院传达到基层施工队伍的时候，其原本的精确性、完整性就已经大打折扣，造成施工失误、资源浪费、返工。

由此产生的一种层层转递的方式，不但降低了信息传递的效率，而且存在很大的不确定性和风险。经过层层翻译、筛选之后，重要的内容被弱化，关键的数据被忽略，有意或者无意地被篡改。信息失真的现象在项目规划和工程实施的交接处尤其明显。规划阶段的宏观目标和战略考虑，在传递中变成纯粹的技术指标，造成实施过程中偏离了最初规划的意图，不能很好地体现工程的社会价值和经济价值。

复杂繁琐的审批流程、汇报制度等都会造成信息传递的不畅，从而导致信息

失真。文件在各个部门之间转来转去花费的时间非常多，各部门的侧重点不一样，容易导致信息在流转过程中被加上各种非核心的意见，造成主要信息不清晰。决策者如果只依靠经过多级筛选的二手资料，就无法做出正确的判断。当项目出现紧急情况需要快速应对的时候，冗长低效的信息传递途径就显得无能为力，常常会错过解决问题的最佳时机，把小问题拖成大问题，给工程的安全、质量、进度造成严重的威胁。

（二）缺乏统一信息共享平台

目前，在水务工程建设项目管理中，各参与方普遍存在着各自独立的办公系统和信息管理工具，由此造成的结果就是所谓的信息孤岛。设计单位 BIM 模型、施工单位进度管理软件、监理单位质量巡检记录和政府部门的审批文件等各种重要的信息，通常分散在各个系统之中，很难达到整合共享的目的。分散的信息管理方式造成严重的协同障碍。

跨部门、跨阶段合作工作时信息获取非常困难，效率低，项目人员不得不花费大量时间去线下开会、发邮件、打电话进行重复沟通和数据查询，造成人力物力的极大浪费。信息碎片化、不一致，都是因为没有统一平台造成的。因为没有权威、统一的数据源，各方获取的信息版本不一样，造成决策依据有偏差。施工单位仍旧按照旧版的设计图纸进行施工，而设计单位已经发布了新的变更，但是信息未能及时同步，从而导致施工错误。由于信息不对称所造成的返工、浪费等问题，在水利工程领域中屡见不鲜，既加重了工程成本又延误了工期。创建集中式信息门户或者项目管理信息系统，可以保证所有利益相关方随时可以得到最新的、最准确的项目信息，从而做到基于相同事实的沟通和决策。

建设统一信息共享平台，不只是技术整合，还是管理理念更新。它要冲破部门壁垒、本位主义，建立开放共享的合作文化。经由平台可以达成项目文档的集中保管，任务的协同开展，进度的即时跟踪以及风险的同步预估。把地理信息系统、建筑信息模型、物联网这些技术整合到一起，就可以实现对水务工程从规划、设计、施工到运维全过程的可视化管理，给各方面的参与者提供一个直观透明的“数字孪生”工作台，从而提升沟通效率和决策的科学性。

（三）非正式沟通渠道利用不足

水务工程组织环境复杂，正式会议、报告、公文为主要沟通方式，但是流程固定，不能满足项目瞬息万变的要求。非正式沟通渠道不同于正式沟通渠道，它

包括团队成员日常的交流、茶水间里的互动、跨部门人员私下里的请教等等，具有灵活、迅速、信息量大等特点。这些渠道可以传递正式沟通中不容易表达出来的“软信息”，即情绪、潜在的团队矛盾、对某些方案的真实想法等等，这些信息对于管理者把握项目动态、及时化解潜在的风险十分重要。

忽略或者压制非正式沟通，就会造成组织内部信息流通不畅，形成信息的“堰塞湖”。很多宝贵的意见以及潜在的问题由于缺少合适的上行渠道而被埋没。员工害怕承担责任或者觉得自己人微言轻，不会通过正式的渠道提出颠覆性的创新想法或者预警项目风险。非正式沟通正好可以弥补它的缺陷。管理者深入一线，与员工建立良好的个人关系，在轻松的氛围下了解最真实的情况，得到最鲜活的创意。良好的沟通可以建立信任，凝聚力以及开放包容的文化氛围，使得每一个人的意见都能自由表达。

二、利益诉求协调难度大

水务工程属于典型的公共工程，本身就具有明显社会属性以及利益多元化特征。项目的发展必然牵涉到各个群体的利益关系，所以协调各方利益诉求就成为贯穿整个项目周期的核心问题。政府宏观战略、企业经济效益、公众切身利益等各种诉求相互碰撞交织，处理不好很容易激化社会矛盾，耽误项目进度。

（一）政府、企业、公众间利益冲突

水务工程项目的核心利益博弈三角就是政府、企业和公众。政府部门代表公共利益，同时也是项目的主导者，其主要目的是保障水安全、改善水环境、推进区域发展战略、维护社会稳定。政府的决策一般从宏观效益和长远发展来考虑，修建大中型水库解决地区性缺水，开展跨流域调水工程优化水资源配置等。

企业作为项目的投资方、建设方或者运营方，其主要目的就是追求经济效益最大化，获得投资回报。不论是国有企业还是社会资本，都会在保证工程质量、安全、符合合同要求的基础上，努力控制成本、缩短工期以获取利润。企业的逐利性有时会与政府的公益性目标或公众的环保要求产生矛盾。为降低成本企业会选择技术成熟但是环保标准低的工艺，或者施工中对生态环境保护的投入不够。

项目所在地居民和农民是直接受益者或者受影响者。他们的利益诉求是具体的、直接的，主要集中在土地征用、房屋拆迁补偿是否公允、是否会给他们的生产生活环境带来噪音、粉尘污染，工程建设完成后是否真的能给他们带来可靠的

供水、优美的环境等。当他们的切身利益受到损害或者没有得到充分保障的时候，就会产生抵触情绪，甚至采取群体性事件的方式进行抗议，从而成为项目推进的阻力。

（二）征地拆迁等敏感问题协调难

征地拆迁是水务工程建设中最为敏感、棘手的环节之一，它关乎到被征地农民、拆迁居民最根本的财产权益，是各种利益冲突的集中爆发点。协调工作难度大，由于诸多问题共存、交织，极易使矛盾激化。

1. 补偿标准存在较大争议，现行补偿标准虽有法律法规作为依据，但是实际操作中很难满足所有的拆迁户的要求。土地、房屋价值评估不只是市场价值，居民对故土的情感、对将来生活的憧憬、拆迁带来的各种机会成本也包含在内。当官方评定的市场价格和居民的心理价位差距很大时，矛盾就会产生。部分居民认为补偿款不能维持原有的生活水平，或者无法在同等地段购买到满意的房屋，于是拒绝签订协议。

2. 安置方式难统一，安置方式主要有两种，货币补偿和实物安置（回迁房）。由于各家人口结构、经济条件、未来规划不同，对安置方式的需求也不同。年轻人会偏向于货币补偿，以便获得更多的选择自由；老年人则更希望得到实物安置，来保证自己的稳定。在统一规划的安置方案下，要满足所有人的个性化需求是不可能的，所以会有一些居民对安置方式不满意。

3. 信息不对称、不信任，政府及项目方掌握着规划、政策、补偿标准等大部分的信息，拆迁户处于信息劣势。信息不对等很容易造成猜疑、不信任。因为沟通渠道不畅或者政策解释不清楚，公众就会怀疑存在暗箱操作，或者认为不同的拆迁户补偿标准不一样。一旦信任基础被破坏，之后任何的协调工作都会变得十分困难。

4. 特殊群体诉求繁杂，在拆迁户里就存在着生活拮据、身患重病、家庭处境特殊的人员。他们不但要经济补偿，还要医疗、就业、养老等其他一些要求。这些个性化的、超出常规补偿范围的需求，不能用标准化的政策来满足，需要投入大量人力物力来进行“一户一策”的协商，协调难度非常大。

（三）缺乏有效冲突解决机制

水务工程复杂实践当中，尽管各方努力通过协商来避免冲突，但是由于利益的根本性差异，矛盾的产生是不可避免的。目前项目管理普遍存在的困境是，当

常规的沟通协商无果之后，缺少了一套清晰、高效并且得到各方信任的冲突解决办法。一旦发生争执就很容易陷入长时间且昂贵的司法诉讼，或者激化矛盾的行政干预之中，而介于两者之间的多元化纠纷解决渠道却十分稀缺。因此由于缺少这样的机制，许多本可以在早期阶段解决的争议被拖延、扩大，最终成为影响整个项目进程的“硬骨头”。

完善的冲突解决机制应该是多层次的、系统的，包含项目内部的申诉处理程序、中立的行业专家组成的调解委员会和与司法程序相衔接的仲裁机制等。但是许多项目中的这些机制或形同虚设或者根本不存在。项目现场一般只有临时组成的协调小组，其权威性、中立性不能得到所有利益相关方的认可。当公众或者承包商的权利受到侵害时，找不到正式、便捷的申诉途径，只能上访或者诉讼。不但增大了维权成本，还会使得项目方长时间受到纠纷的困扰，不能集中精力做工程。

沟通协调机制问题与优化策略对比表

问题类别	具体问题	产生的影响	优化策略
沟通渠道	信息传递层级多、易失真	施工失误、资源浪费、决策偏差、项目延误	建立常态化沟通会议制度；引入扁平化沟通
	缺乏统一信息共享平台	信息孤岛、协同障碍、返工、成本增加、工期延误	构建面向各方的信息公开平台；集成化项目管理系统
	非正式沟通利用不足	信息“堰塞湖”、宝贵建议流失、潜在风险无法及时发现	鼓励非正式沟通；管理者深入一线，建立信任
利益协调	政府、企业、公众利益冲突	项目阻力、社会矛盾、进度受阻	多方协商，平衡公益性与经济性；强调社会责任
	征地拆迁等敏感问题协调难	补偿争议、安置困难、信息不对称导致不信任、群体性事件	引入第三方机构评估与协调；“一户一策”精细化处理
	缺乏有效冲突解决机制	争议升级、司法诉讼、项目停滞、维权成本高昂	设立多层次纠纷解决机制；发挥调解、仲裁作用

从上表可见，水务工程在沟通协调方面存在多重挑战，但亦有明确的优化路径可循。

三、沟通协调机制优化策略

（一）建立常态化沟通会议制度

打破信息壁垒，保证各方面的利益相关者可以定时有效地交流信息、发表意见，这是第一步，也就是建立常态化的沟通会议。制度化的安排把沟通从一种随机的、临时的活动转变成了有规律的、可以预期的一种常态化的工作。明确了会议层级、频率、参加方和议题之后，就形成了项目全生命周期的沟通网。可以设立一个由地方政府主管领导、项目业主、主要参建单位负责人组成的高层级项目指导委员会联席会议，每季度召开一次，主要解决战略性、全局性的重大问题。同时建立项目执行层面的每周工作例会，由项目经理召集，各参建单位现场负责人参加，主要解决施工过程中具体的技、协调问题。

常态化的会议不能仅仅是信息的发布场所，还应该成为问题解决的阵地、形成决策共识的场所。会议要有议事规则和议题提出制度，保证每个参加者有均等的发言时间。对会上提出的问题要确定责任人、限定解决时限、建立跟踪督办制度，做到“会上有议、会后有决、决后有行”。会议纪要应详细记载讨论过程和决议事项，并及时发给所有有关方作为后续工作依据及备查。这样可以避免议而不决、决而不行的现象发生，提高沟通效率和执行力。

（二）构建面向各方的信息公开平台

技术对于信息时代提高沟通效率、增加透明度起决定性的作用。创建面向全部利益相关方的统一集成化项目信息公开平台，这是化解信息不对等，重新塑造信任的关键手段。该平台应该是唯一官方的权威信息来源，集中发布项目有关的所有非密信息，即项目概况、规划方案、环境影响评价报告、审批文件、工程进度、资金使用情况、征地拆迁补偿政策及标准等。平台应该提供友好、易于使用且能够被不同的用户查询所需信息的界面。

信息平台不能只是单向的信息发布窗口，还应该具备双向互动的功能。可以设置公众意见箱、在线听证、专家答疑等形式，给公众提供一种方便、理性的表达诉求、反映意见的途径。平台后台需要建立完整的受理、转办、答复和反馈程序，保证件件有回应、事事有着落。这样就能把大量的潜在矛盾和误解消灭在萌芽状态。平台可以使用无人机航拍、虚拟现实或者增强现实的技术，把项目实施过程中发生的变化用“实景直播”的方式公之于众。

（三）引入第三方机构协调评估

在处理重大事项或者敏感问题的时候，采用独立的第三方机构去执行协调和评价任务，这是行之有效的办法。第三方机构可以是工程咨询公司、律师事务所、社会工作服务机构，也可以是专家学者组成的工作委员会。由于它们独立于项目的各个利益主体之外，没有直接的利益牵扯，因此其出具的意见、评价报告更加客观、公正，更易于被政府、企业、公众所接受。

征地拆迁时，可请第三方评估机构对被征收房屋、土地价值展开测算，再举行公开听证会，社区代表、法律专家、政府官员等组成听证委员会对测算结果予以评议，从而保证补偿标准的公正性。对于环境影响，可委托有资质的环保监测机构对施工期、运营期的环境状况实施连续监测与评价，并定期向社会公开，从而回应公众对于环境问题的关切。当出现复杂的利益冲突和纠纷时，可以请专业的商事调解机构或者社会矛盾调解中心来斡旋，帮助冲突的各方找到一个可以接受的解决办法。第三方介入可以给复杂的难题提供专业的解决办法，并起到缓冲、润滑作用，减缓利益主体之间的对立和紧张关系，促使理性的、建设性的沟通交流。

第四章 水务工程技术选型与创新应用

第一节 传统技术与新兴技术对比分析

一、传统水务技术的特点与局限

传统水务技术是城市供水及污水处理的根基，它的工艺流程以及设计思路在长时间的应用中渐渐趋于完备。这些技术组成了现代水务系统的基础设施，但是随着社会的发展以及环保要求的不断提高，其存在的固有缺陷也越来越明显，成为行业发展的瓶颈。

（一）技术成熟，但创新空间有限

传统的污水处理技术，如混凝、沉淀、过滤、活性污泥法等，在经过长时间的工程实践之后，已经形成了一套成熟的设计规范、运行经验、管理体系。这些技术可靠、成本较低，处理一般的水质效果较好，是大多数水处理厂、污水处理厂采用的基本工艺。工程师可以依据详尽的设计手册以及大量的案例数据，很快地搭建起一套科学实用的处理系统，而且运行维护人员对于这些技术的操作和管理都很熟练，技术推广和人员培训的门槛低。

但是高度的成熟在一定程度上也阻碍了技术的发展，使得其发展缓慢。传统技术的核心原理近几十年并没有发生根本性的变化，性能提高主要表现在设备材质的改进、局部结构的优化或者药剂效能的微调，很难实现处理效率或者处理效果的跨越式突破。面对日趋复杂的复合型污染水源、越来越严格的排放标准、急迫的资源能源回收需求，传统的处理技术已无法应对，传统的体系也不能将最新的技术成果整合进来，造成水务工程无法应对新的挑战。

（二）能耗高、占地大、环境影响大

传统的污水处理厂是能源消耗大户和土地占用大户。供水系统多级泵站的提水、输配要耗用大量的电能；污水处理厂中，曝气风机、回流泵等设备的运行成为主要的能耗来源，使用传统活性污泥法工艺时，曝气系统的电耗可占全厂总电耗的一半以上。高耗能运行模式导致运营成本上升，同时带来了大量间接碳排放，同社会上目前追求的碳中和目标背道而驰。

占地面积大是传统技术又一明显的特点。传统沉淀池、砂滤池等需要很大的平面面积来保证足够的水力停留时间和过滤面积,在土地越来越金贵的城市场域,这是项目规划和扩建时的主要限制。很多老旧城区管网设施受空间所限无法进行提标改造,从而影响了城市水环境质量的进一步改善。

传统工艺给环境造成的直接污染也不能小觑。处理时会产生大量的剩余污泥,剩余污泥中含有病原体、重金属等有害物质。剩余污泥后续的浓缩、脱水、转运、最终处理是一个复杂的环节,如果处置不当会造成二次污染。加氯消毒等传统的处理工艺还会产生有潜在致癌风险的消毒副产物,会对生态系统以及人的健康造成潜在的危害。

（三）自动化程度低，过度依赖人工

传统的水务工程运行管理很大程度上依靠人工经验。尽管一些大型水厂已经具备基本的监控系统,但是化学药剂投加量、曝气强度、排泥周期这些重要环节的控制仍然要依靠运行人员的现场调整。此种操作方式具有明显的滞后性,不能对进水水质的快速变化作出及时反应,造成处理效果不稳定以及资源的浪费。

人工的依赖度高,随之产生的就是昂贵的人力成本和较高的管理风险。一个水厂正常运转要依靠一批经验丰富的技术工人轮班值守,工人的技术水平直接决定出水质量及运行费用。突发性污染事件或者设备故障发生的时候,人工响应速度以及准确性都会受到影响,可能会错失最佳处理时间,造成安全事故。人工巡检和现场操作的工作环境通常比较艰苦,存在一定的职业健康风险,也造成该行业吸引、留住优秀人才方面的困难。低自动化水平制约了精细化管理,使水务运营更多地成了一种手艺活,而并非是由科学驱动的精确工业过程。

二、新兴水务技术的特点与优势

面对传统技术的瓶颈以及水资源、水环境、水生态的新挑战,物联网、人工智能、新材料等新兴科技与水务领域深度融合,产生了许多新的技术。它们以智能化、绿色化、集成化为主要特征,正在改变水务工程的规划、建设、运营方式,具有很大的发展潜能。

（一）智能化、精准化、高效化

新兴的水务技术的重要推动力之一就是数字化与智能化。高精度在线传感器的部署下,水务系统各个环节(水量、水压、水质等)的关键参数可以实现连续、

实时的监测，从而形成覆盖全流程的“数字神经网络”。海量数据经由物联网技术汇聚于中央控制平台之上，为后面的进一步剖析以及智能决策打下了坚实的基础。用大数据分析和人工智能算法建立水处理过程的数字孪生模型，预测不同工况下系统的响应。

这种智能化的管理模式带来了前所未有的精准性和高效性：

1. 运营控制更加精准，AI 算法根据进水水质、水量的变化实时调节曝气量、药剂投加量、泵组运行参数，在出水稳定达标的同时把能耗、药耗降到最低。
2. 预测性维护智能系统可以对设备运行数据进行持续的学习，在发现设备的潜在故障之前先做出防患于未然的维护建议。这样系统从以前的被动的修理转为主动的维护，大大提高了系统可靠程度。
3. 智能网络管理，给排水管网智能漏损检测和压力控制技术可以找到漏损点，减少水资源的浪费，排水管网的智能调度系统可以应对城市内涝等各种恶劣天气。

（二）节能降耗，环境友好

新兴水务技术从一开始就把节能降耗、环境友好作为主要目标。膜生物反应器技术把高效的膜分离与生物处理单元结合起来，取代了传统工艺中二沉池的作用，大大缩小了占地面积，能获得更好的出水水质，可以直接应用于多种场合，实现了水资源的循环利用，污泥产量也较低。

新兴技术另一大特点就是资源、能源的回收。厌氧氨氧化等新型脱氮工艺比传统的硝化反硝化工艺可以节约 60% 的曝气耗能，减少 90% 以上的污泥产生。厌氧消化技术可以去除高浓度有机废水中污染物，还能产生可以利用的沼气。前沿技术还在污水中回收磷这样的宝贵资源，把污水处理厂变成“城市资源工厂”，彻底改变了传统污水处理的含义，使污水处理厂成为循环经济的重要支撑。这些技术靠内源循环和物质转化，从根子上削减了水务系统对外部能源、资源的依靠，也就减小了对环境的总体影响。

（三）集成度高，可远程监控

新兴水处理技术大都具有高模块化、集成化的特点，可以适应各种规模、不同需求的项目，既可以用于新建工程，也可以对现有设施进行升级改造。一体化集成式净水设备、分散式污水处理装置，把多个处理单元紧凑地集成在一个或少数几个模块里，极大地简化了现场施工和安装的复杂程度，缩短了建设周期。

高度集成加上先进的自动化控制系统，从而达到远程监控、无人值守的目的。基于云计算、物联网的智慧水务平台可以将地理上分散的各个水务设施（泵站、水厂、管网监测点等）接入到一个中心管理平台。管理人员通过电脑或手机可以随时查看任意站点的运行情况、重要数据、视频监控画面，并可以进行远程操作。大大提高管理效率，减少对现场运维人员的依赖，在分布较散的农村供水或小型污水处理站点上更明显。既改善了人力资源的分配状况，又提升了整个水务系统应对突发事件的能力以及协同管理程度。

三、技术选型的综合比较框架

水务工程的技术选择不是非新即旧，而是一个选择过程。科学合理的选型框架不能只考虑单个技术性能指标，应该结合项目的具体情况、经济承受能力、社会环境效益来综合考虑，其目的是为某一个项目找到最合适、最有综合价值的解决方案。

水务工程技术选型考量要素对比表

考量要素	传统水务技术	新兴水务技术	选型影响
技术成熟度	高，经验丰富，风险可控	相对较低，部分技术仍在发展中	影响项目风险、可靠性、推广性
初期投资成本	较低，设备购置和土建成本相对可控	较高，精密设备和知识产权费用	影响项目启动资金和融资压力
运行维护成本	能耗高、药耗大，人工依赖性强	能耗低、药耗少，自动化程度高，预测性维护	影响项目长期运营费用和经济效益
占地面积	大，需要较多土地资源	小，模块化集成，节省土地	影响城市空间利用和项目选址灵活性
环境影响	污泥产量大，处理不当易二次污染，碳排放较高	污泥减量化，资源回收，碳排放较低	影响生态系统健康和社会环境效益
自动化程度	低，高度依赖人工经验操作	高，智能控制，远程监控，无人值守	影响运营效率、人员成本和风险响应速度
应对复杂水质能力	较弱，处理能力受限	较强，适应性广，处理效果优异	影响处理水质达标率和系统稳定性
资源回收利用	较少，主要以污染物削减为主	强调资源化，能源回收，循环经济	影响水务系统可持续发展和附加值

从上表可以看出，水务工程技术选型需综合考虑多方面因素。

（一）基于技术成熟度与适用性

技术选型首要任务就是对备选技术展开客观成熟度评定。成熟度不只是技术原理的可靠程度，而且是类似规模、类似水质的工程应用案例的成熟度，长期运行的稳定性数据积累，设备供应链的成熟度，设计与运维标准的完备性。在实验室表现很好的技术，如果没有经过大规模商业化应用的检验，在实际工程中就会存在很多不确定性风险。

适用性评价就是要把技术同项目的具体要求精准对接起来。需要对项目所在区域的环境条件有详细的认识，比如原水水质、气候条件、地质状况等。同时还要考虑到项目所在地的社会经济背景，即经济发展水平、可用于项目运营的财政能力、运维人员整体技术素质。偏远地区、技术人员较少的小型乡镇污水处理项目中，采用简单可靠、操作方便的改良传统工艺，比使用先进复杂、维护要求高、技术含量高的工艺更符合实际，也更容易持续运营。

因此决策者要找到技术的先进可靠性和普适特异性之间的平衡点。对于影响到民生的重要基础设施一般应优先选择已经经过充分验证、风险可控的技术，对有特殊处理要求或者具有示范意义的项目谨慎采用创新技术、制定出相应措施，以利于技术创新与发展。

（二）基于经济性与全周期成本

经济性评价属于技术选型当中极其关键的一环，必须用全生命周期成本的角度来进行分析。单独比较不同方案的初期投资是不全面的，因为一项工程的经济性应从整个生命周期的总支出来看。一个科学的经济性比较框架至少应该包含以下几个方面：

1. 初始投资成本：指设备购置费、土建工程费、安装调试费、设计咨询费等所有前期费用总和。由于新兴技术设备精密，有可能需要进口的部件或者知识产权费用等，因此它的初期投资一般会大于传统技术。

2. 运营维护费用：项目建成以后长期产生的费用，主要包括能耗费、药剂费、备件更换费、污泥处理费、人员工资等。新兴的智能化、节能型技术虽然前期投资较大，但是它通过减少电费、药剂费、人工费来弥补甚至超过初投资差额的可能性很大。

全周期成本分析，就是将未来所有可预知的成本，按照一定的折现率换算成现在的价值，从而对不同的技术方案进行公平比较。这种分析方法可以得出最便

宜的方法不一定是最好的经济方案。它使规划者在项目开始阶段就考虑到以后的运营效率和可持续性，做出更加长远的决策，避免因短期低价而造成以后沉重的运营负担。

（三）基于环境影响与社会效益

现代水务工程的技术选型不能只考虑技术和经济因素，必须将技术选型置于可持续发展的大框架里，从环境影响、社会效益等多方面进行综合评价。这是综合性的评价，用来衡量项目对生态福祉、公众利益的贡献度，是体现工程项目公共属性和社会责任的重要方式。

环境影响评价要对全生命周期内各种技术方案的环境影响做定量分析，包括用水量、温室气体排放总量（碳足迹）、处理过程中产生的废弃物（污泥、废气）数量和毒性、项目所在区域生物多样性和生态系统的影响。选择一项技术，即选择了一种能源消耗方式、物质代谢途径，其长期的生态后果必须加以慎重考虑。可以回收氮磷资源的技术，其环境效益比仅仅作为污染物去除的传统技术要大得多。

社会效益的衡量主要从改善公众的生活质量、推进社会公正、加强社区韧性这三个方面去考察项目的影响。这包含改善公共卫生设施条件，保证优质安全的饮用水，清除城市黑臭水体，改善人居环境质量，利用再生水提高城市水资源保障能力等内容。一些技术方案还能产生额外的社会效益，例如将污水处理厂建成开放的生态公园、科普基地或者利用分布式再生水系统支持区域绿化、景观用水等，从而大大提高社区的宜居性及居民的幸福感。在技术选型时把这些“看不见”的社会效益考虑进去，可以促进水务工程由单一功能的邻避设施向多功能、与城市和谐共融的复合生态基础设施转变。

第二节 智能化技术在水务工程中的应用

一、智能感知与监测技术应用

智能感知与监测相当于智慧水务的“感官系统”，依靠各种前端智能设备，达到对水务系统中的各种要素进行全面、动态、实时的信息采集的目的。精准的底层数据对之后的智能决策和服务起到了基础的作用，也为水务工程精细化管理提供了数据支撑，彻底摒弃了以前依靠人工和经验的管理方式。

（一）物联网传感器布设与数据采集

物联网技术在水源地、水厂、供水管网、泵站、用户终端等关键节点上布设了大量的智能传感器，构建起整个水务流程的“神经网络”。这些传感器种类繁多，有检测管网压力的压力传感器、监测水流变化的流量传感器、分析水体成分的水质传感器和检测管道异常声音的声学传感器等。传感器布设策略要结合管网拓扑结构、设施重要程度和漏损风险等级来考虑，高风险、人口密集区域可以采取网格化加密布设，其它区域采取线性稀疏布设。

数据采集为智能化的实现打下了基础。传感器得到的压力、流量、浊度、余氯、酸碱度等原始数据，采用低功耗广域网技术 (NB-IoT、LoRa) 或者光纤等稳定的通信方式，实时发送到数据中心。实现了全天候自动监控水务系统运行状况，消除了传统人工巡检定时定点采集数据的方法，大幅度提高了数据实时性、覆盖面。

大量的高频的实时数据给水务管理的精细化带来了无限的可能。管理人员可以随时的、随时都能得到任意监测点的各种工作情况的信息，能及时的发现压力的变化、流量的突变等状况。精确到秒的数据流一方面给后面的大数据分析、人工智能应用提供高质量的原料，另一方面也为供水系统的可视化监控、科学调度、应急响应打下基础，是智慧水务体系里不可缺少的感知基石。

（二）无人机遥感技术在巡检中的应用

无人机遥感技术由于具有高效、灵活、高分辨率、低成本等特点，已经成为水务工程巡检领域的一项革命性技术。传统的巡检方式在大型水库、绵长河道、复杂地形的输水管线上效率低、劳动强度大、安全风险高、巡检盲区多。无人机载高清摄像头、红外热像仪、激光雷达等传感器能到达人工无法到达的地方，进行全方位的、无死角的检查。

无人机按照事先设置好的航线对水库大坝、堤防、输水渠道以及沿线的边坡等进行自主巡检，并把采集到的高清影像和视频实时回传到后方的控制中心。通过对各个时期的影像进行比较分析，运维人员可以发现坝体表面的微小裂缝、渗漏点、植被异常生长、护坡损坏、滑坡体变化等隐患，并可以精确定位。无人机上加装红外热像仪，还可以根据地表温度异常来发现隐藏在供水管网中的漏水点，特别适合大范围区域的筛查。与传统的人工巡检相比，无人机巡检可以把原来的数天缩短为数小时甚至几十分钟，在提高效率的同时更重要的是保证巡检人员的安全。

（三）水质水量在线实时监测系统

建立从水源地到用户水龙头全过程水质水量实时在线监测系统,是供水安全、精细化管理的保证。在水源地、水厂关键处理单元（进水口、沉淀池、滤后、出水）、出厂水、管网关键节点、二次供水设施等处安装在线分析仪表和流量计,对水质指标、水量进行连续自动监测。

一个完整的水质水量在线实时监测系统通常由以下几个部分构成:

1. 感知分析层,主要是对水中的各种指标进行检测的仪器,如浊度、余氯、pH、电导率、溶解氧等常规指标传感器,高锰酸盐指数、氨氮等复杂组分的在线分析仪。这些设备可以自动采集水样并进行分析,得到数据。

2. 数据传输层:利用无线或有线网络,将监测数据实时、稳定地传输至中心控制平台。

3. 平台与应用层,即中心平台对数据进行接收、存储、处理、可视化展示。系统具有很强的数据分析功能,可以自动生成水质日报、月报,绘制出各个指标的变化趋势曲线,根据预先设定的国家标准或者地方标准限值,对超标数据自动发出预警。报警信息可以经过平台界面、短信、手机应用推送等方式第一时间将报警信息通知到相关的人员,从而及时采取应对措施。

该系统的使用彻底改变了以前人工取样、实验室化验的滞后模式,把水质监管从事后分析转变为事中控制和事前预警。不但可以及时发现水源污染、处理工艺异常、管网二次污染等问题,为应急处置争取了宝贵时间,而且长期积累的连续数据还可以作为水质变化规律研究、处理工艺改进、供水调度决策的科学依据。

二、智能决策与控制技术应用

在获取海量感知数据之后,用大数据分析、人工智能算法和自动化控制模型来实现水务系统的智能预测、诊断和控制,这就是智慧水务的“大脑”和“神经中枢”。这一层的技术应用是为了让决策更加科学,反应更加敏捷,使水务由被动应对变为主动干预,从而达到最优配置的目的。

（一）基于大数据的水量预测调度

城市供水调度工作就是准确地实现供水的供需平衡,即满足用户的用水需求,又保证管网水压的稳定,还要减少系统的能源消耗。传统的调度模式依靠调度员的个人经验,有主观性强、响应滞后等问题。利用大数据思想,将历史用水量数

据、气象数据（温度、降雨量）、社会活动信息（节假日、大型活动）、实时管网运行数据等整合在一起，可以建立科学的用水量预测模型。

这些建预测模型大多是通过时间序列分析法、回归分析法或者是比较高级的机器学习算法（神经网络、支持向量机等）来建立。模型在经过大量历史数据的训练之后，可以预测出未来某个时间段（比如未来 24 小时）城市总的用水量以及各个分区的用水需求变化趋势，预测的精度也逐渐提高。预测结果直接给供水调度计划的制定提供可靠的数据支撑。

在精准预测的基础上配合使用在线水力模型和优化算法，可以实现供水系统的智能调度。调度系统按照用水预测，可以自动产生水厂产量分配方案、泵站启停计划及阀门控制方案。例如，在用水高峰期来临之前开启水泵、加大水厂出水量，在用水低谷期降低泵站频率或者停运部分机组，利用夜间低电价蓄水，实现削峰填谷、节能降耗。智能调度模式把依赖人的经验来做的决策转变成数据驱动的科学决策，使供水系统运行效率、安全、经济性等得到极大的提高。

（二）基于人工智能的管网漏损诊断

供水管网漏损在全世界范围内都存在着，一方面会造成水资源的浪费，另一方面还会引发地面塌陷、水质污染等次生灾害。传统的方法，如听音法、相关分析法等，都是依靠人的经验来进行漏损检测的，效率低，而且定位精度不高。人工智能技术的产生给管网漏损的快速、准确诊断赋予了新的方法。

基于人工智能的漏损诊断系统最先会搜集管网里的流量，压力，声波这些多组实时数据。然后用深度学习、模式识别这些算法来创建漏损诊断模型。通过学习正常工况的数据模式可以找到泄漏造成的微弱异常信号。例如可以分析夜间最小流量变化趋势，如果发现持续升高则可初步判定存在漏损；也可以分析多个压力监测点数据时空相关性，识别由爆管造成的压力波传播特性，快速发出预警。

人工智能模型可以综合各种数据源进行漏损定位。以漏损噪声信号在各个传感器之间传播的时间差为依据，结合管网的地理信息系统数据，可以确定漏损点的大致位置，把搜索范围缩小到几十米甚至几米以内。一些先进的模型甚至可以与水力模型进行模拟反演，把实际观测数据同不同渗漏情景下的模拟结果加以比较，从而进一步提高定位精度。智能化诊断方式将以前被动的查找漏损变成了主动预警，大大缩短了漏损发现与修复的时间，有效降低了产销差率。

（三）泵站水厂的自动化智能控制

泵站、水厂是水务系统中的核心生产单元，它们运行是否稳定、经济，直接影响到整个供水服务质量与成本。传统的控制方式大多都是就地手动控制或者简单的逻辑自动控制，不能满足复杂多变的工况要求。智能化升级要达成泵站水厂的“无人值守”或者“少人值守”，并且运行效能最佳。

泵站智能控制的关键在于把变频控制技术和智能算法融合起来。根据管网压力或者流量的设定值，使用 PID 控制或者更先进的预测控制算法自动调节水泵电机的转速，使水泵的输出和实际需求相匹配，避免了传统工频泵大马拉小车的能源浪费。系统还会根据多台水泵的效率曲线，在不同的负荷下自动寻优，选出最优的泵组组合运行，以达到泵站总体能耗最小化的目的。智能控制系统有设备状态检测，故障预预警以及自动切换等特点，从而明显提高泵站的运行可靠性。

水厂智能控制的应用范围很广。在加药环节，系统会依据原水水质和流量的实时在线监测数据，使用人工智能算法建立的加药模型，自动、精准地控制加药泵的投加量，既保证出水水质稳定达标，又避免药剂浪费。根据滤池的运行时间、水头损失、出水浊度等参数来确定最佳的反冲洗时间，并自动执行以保证过滤效果、节约反冲洗用水。智能控制的应用使水厂生产过程更精细、更稳定、更高效。

三、智能服务平台构建与应用

智能服务平台是智慧水务的交互界面和数据中枢，把底层感知监测的数据和上层决策控制的模型集成、整合后，以可视化的形式提供给管理者、运维人员和公众用户。平台化构建理念，就是冲破信息孤岛，达成业务协同、资源共享，进而优化水务管理的总体效能与公众服务品质。

（一）智慧水务综合管理信息平台

智慧水务综合管理信息平台是集生产、运营、管网、客服、应急指挥等业务子系统为一体的总驾驶舱。平台通过数字孪生等技术，把分散在各个部门、各个区域的水务信息资源进行整合，用一张图的形式，形象、动态的展示整个水务系统运行的全貌。

平台的功能模块通常十分丰富，能够满足不同层级管理者的需求，见下方智慧水务平台功能模块表。

智慧水务平台功能模块表

生产运营监控	实时显示各水厂进出水流量、水质、主要设备运行状态、药耗、电耗等数据，便于管理者全面掌握生产情况，进行能效及成本控制。
管网调度管理	利用地图展示管网的压力流量分布，集成水力模型进行爆管分析、关阀分析，为日常调度与应急抢修提供决策支持。
资产全生命周期管理	建立从水表到大型泵机等各类资产的电子档案，对台账、维护、检修计划等实行数字化管理，以提高资产管理水平。
客服与投诉处理	整合用户服务渠道，提供在线咨询、故障报修、账单查询等功能，并对投诉进行统一管理和跟踪。
应急指挥与预警	集成气象、水文、地质等外部数据，结合内部监测数据，对可能发生的洪涝、干旱、管网事故等进行预警，并辅助制定应急预案和指挥调度。
数据分析与决策支持	利用大数据和人工智能技术，对历史数据进行深度分析，挖掘规律，为水务规划、投资决策、运行优化提供科学依据。

通过这样一个统一平台，企业领导者可以掌握全局，做出决策，调度员可以准确控制，保证系统正常运转，维护人员可以迅速应对，处理各种突发事件。平台建立以后，数据共享、业务协同得以实现，打破了以前各个系统各自为政、信息割裂的局面，水务企业的综合管理效率、应急处置水平得到了极大的提高。

（二）面向公众的移动端服务应用

移动互联网的普及使得以智能手机应用、微信公众号、小程序等移动端渠道来给公众提供便捷透明的水务服务，已经成为了改善用户体验、提升满意度的重要方式。这不但是服务模式的革新，也是水务公司同用户创建直接交流渠道的好办法。

面向公众的移动端服务应用功能越来越多样化，从最初的水费在线查询发展到现在的业务办理、信息浏览、服务互动等各个方面。用户不出门，就在网络里完成缴费、查账单、领电子发票、办过户、办装表等原来必须去营业厅才能办的业务。该种“指尖上”的服务方式大大减少了用户的时间成本，也减轻了水务企业线下营业厅的工作压力。

应用平台同时具有信息发布以及互动交流的功能。水务企业通过移动终端给用户发送计划停水通知、水质公告、用水知识科普等各种信息，极大提高了信息的到达率和时效性。用户可以利用应用中的一键报漏、服务报修、意见建议等来将问题反馈给水务公司。企业后台接到信息之后可以立即创建工单，并指派人员处理，处理过程和结果也会及时反馈给用户，形成高效的闭环服务。双向互动提高了服务透明度，用户有了参与感，有利于形成和谐的供用水关系。

（三）基于云计算的数据存储服务

水务工程智能化转型时期会产生大量的多源异构数据，传感器的实时采集数据、视频监控数据、业务管理系统产生的结构化数据等等都属于此类。传统水务企业的 IT 基础设施在数据的存储、管理、计算等各方面都存在着巨大难题。云计算技术由于具有弹性伸缩、按需付费、高可靠、强大计算能力等特点，对上面的难题给出了较好的解决办法。

把水务数据搬到云上，好处很多。云计算平台有着近乎无限的存储空间以及强大的计算能力，可以很好地应对智慧水务系统数据量的爆炸性增长，也能满足复杂的大数据以及人工智能模型的计算需求。水务企业不再需要大笔投入建设、运营自己的数据中心，可以将更多资源用在核心业务的创新上，由原来以购买硬件、软件为主转向以购买服务为主，大大降低了信息化建设的前期投资、后期运维成本。

云平台还有完善的数据备份、容灾和安全防护机制，可以保证水务数据的安全性以及业务的连续性，单个企业是无法达到的。依靠云计算，各个地区、各个部门的水务数据可以方便地汇聚到同一个平台上，为实现区域水资源统一调度、跨部门数据共享和业务协同打下了技术基础。水务企业按照自身需求，可以挑选软件即服务，平台即服务等不同的云服务形式，灵活创建并部署各种智慧应用，加快数字化转型的速度。

第三节 节水与水资源循环利用技术

一、供水系统节水技术

供水系统是城市水资源调配的动脉，供水系统的运行效率关系到水资源利用的起点效益。采用技术创新、精细管理的方式，把物理损失与能源耗费在输配水环节降到最低限度，这是达成源头节水目的、创建高能效率水务系统的主要任务和重要部分。

（一）管网分区计量与漏损控制技术

管网分区计量和漏损控制技术是现代城市供水管理的重要手段，其主要思想就是把庞大的复杂的供水管网划分为若干个独立的、可计量的区域，从而达到对

管网系统精细化的网格化管理的目的。安装各分区的入口、出口处高精度流量计可实时测量进水、出水量，并据此计算出各个分区的水量平衡和产销差。改变以往被动查找漏点的方式，转为主动、实时的监测和预警。

当某一分区流量数据出现异常，尤其是夜间最小流量值一直偏高的时候，系统就可以迅速地定位出高漏损区，给之后的检漏工作指明方向，大幅度地缩小排查范围，提高检漏效率。该项技术把物联网、大数据分析、水力模型等先进技术融合起来，对海量数据加以分析，可以评判漏损状况，而且能够大致确定漏损地点，给维修决策给予科学依据。

实践证明，DMA 分区法是目前控制管网漏损较为行之有效的方法。可以大幅度降低物理漏损率，节约宝贵的水资源，对各个分区的水压进行监测和调节，可以改善管网的运行状况，延长管道的使用寿命，降低爆管的风险。全面推行此项技术是供水企业降本增效、提高管理水平、保证供水安全的保证。

（二）高效节能泵组与变频调速技术

供水系统是耗能大户，水泵的能耗占绝大部分。高效节能泵组和变频调速技术的应用，是实现供水环节节能降耗的主要方法。主要目的就是使水泵的运行工况随管网实际用水需求的变化而调整，使水泵始终工作在高效区间内，避免因流量、压力不匹配而造成的能源浪费。

变频调速技术是改变水泵电机供电频率来调整电机转速，从而改变水泵的流量和扬程。用水量少时系统会自动降低水泵转速，减小出水量和压力，从而大大降低电机输出功率；用水高峰期提高转速以满足需求。平滑、精确的调节方式克服了传统阀门节流调节造成的巨大能量损失，也避免了多台泵组启停切换造成工况点频繁偏离高效区的问题。

配合高效节能泵组使用，其优势会更加明显。新型泵组在水力设计、材料、制造工艺上都有很大的提升，自身的运行效率也更高。将高效泵组和变频控制技术结合在一起，并用智能化的 PLC 控制和优化算法进行配合，可以对多泵系统实行最佳调度和联动控制，使整个泵站系统在各种工况下达到最佳的综合能效。该技术节能效果显著，能实现恒压供水，提高供水品质，系统机械冲击小，设备使用寿命长。

（三）供水压力优化调度技术

供水压力优化调度技术是供水系统精细化管理的重要体现，其目的是在保证

用户最不利点服务压力的基础上，尽量减小管网总的运行压力。管网压力和漏损量之间存在明显的正相关关系，压力过高不但会增大管道和接头处的渗漏，造成水量浪费，还会增大管道爆裂的风险，危及供水安全。科学合理地控制管网压力，就是节水和安全的综合步骤。

这项技术要依靠先进的在线监测系统，水力模型软件和智能控制算法。在管网的关键节点处装设压力传感器，实时采集数据，掌握管网压力分布的情况。利用经过校准的水力模型，对不同时段、不同的用水需求下管网压力进行模拟预测和分析，研究压力变化规律。

在此基础上，调度系统可以制定并执行最优的压力调控方案。这包括：

1. 分区调压，按照 DMA 分区特点，对不同的服务区域采取不同的压力调控策略，防止“一刀切”的高压供水。

2. 时间调压：根据一天中用水量的周期性变化，在用水低谷期降低供水压力，用水高峰期提高供水压力，实现按需给压。

3. 远程自动控制，利用远程控制泵站的出口压力、在线减压阀等，来动态精确的控制管网压力，使系统达到经济和安全运行的目的。

采用压力优化调度可以直接减少由于压力过大而引起的漏失水量，同时也能减少管网爆管事件的发生，降低维修费用，提高供水系统的韧性、可靠性。

二、用水系统节水技术

用水系统节水潜力巨大，涉及到工业、生活、农业等各方面。推广先进的节水工艺、器具、灌溉方式，提升终端用户的用水效率，是实现全社会节水目标、建设节水型社会不可缺少的重要部分，也是水务工程规划中用户侧管理的主要内容。

（一）工业用水循环利用与工艺改造

工业是用水大户，又是节水大户。推进工业用水循环利用、节水工艺改造，工业节水才能实现源头减量、过程增效的双轮驱动。关键在于建立源头减排、过程循环、末端再生的节水体系，把节水理念贯穿生产全过程。

用水过程循环的重点是提高水的重复利用率。企业对生产中产生的蒸汽冷凝水、设备冷却水等水质较好的废水进行收集处理后，回用到对水质要求不高的生产环节，实现分级串联使用。很多企业用高效的闭式冷却塔代替开式系统，或者

用先进的冷凝模块技术回收冷却塔排出的“白雾”，从而大大减少了循环水的蒸发和漂移损失。

工艺改造属于深层次的节水手段。用节水型的新工艺、新技术、新设备代替传统耗水工艺。纺织印染行业可以使用气流染色、冷轧堆前处理等技术；化工行业可以利用膜分离技术代替传统的蒸发浓缩工艺，从而大大减少单位产品的用水量。构建智慧用水管控平台，对全厂水系统实施集中控制、精细管理，能够很好地解决各个单元之间水量错配的问题，实现水资源的优化调度、合理利用。

（二）生活节水器具推广与应用

生活节水是建设节水型社会的全民行动，而节水器具的推广使用是生活中最直接、最有效的措施。节水器具主要是通过优化设计，在不降低甚至提高使用舒适度的前提下，减少单次用水量，从而在潜移默化中达到节水的目的。

节水器具主要有节水型水龙头、节水型坐便器、节水花洒等。节水型水龙头出水时带入空气，保证出水有足够冲刷力的同时减少实际用水量。节水型坐便器采用双冲式设计或者虹吸式节水技术，用户可以按照自己的需要来选择不同的冲水量，从而避免水资源的浪费。高效节水花洒改善喷头结构，用少量的水达到更好的淋浴效果。据测算，普及使用节水型器具的家庭月均用水量有所下降。

推广节水器具要依靠政策引导、市场培育和公众教育三者并重。政府部门要改进节水产品认证体系和市场准入标准，把节水性能当作强制性指标，给购买和使用高效节水器具的单位和个人一定的补贴或者奖励。通过广泛的宣传教育来提高人们的节水意识，使消费者主动去选择、使用带有节水标志的产品，把节水变成一种自觉的生活方式。

（三）农业高效节水灌溉技术

农业是用水量最大的领域，发展高效节水灌溉技术对保障国家粮食安全、缓解水资源短缺矛盾有重大意义。高效节水灌溉就是利用先进技术，把水准确而高效地送到作物根部，尽量减少在输送过程中的渗漏、蒸发、径流损失，灌溉水利用系数较高。

目前主流的高效节水灌溉技术列举如下：

常见高效节水灌溉技术及其特点

技术类型	主要原理	适用作物 / 场景	节水效率特点
滴灌技术	低压管道系统，滴头缓慢均匀供水至作物根部	果树、蔬菜等经济作物，干旱缺水地区	极高，几乎无地表蒸发和径流损失
微喷灌技术	微喷头雾化洒水至作物枝叶或根区附近	各种作物，可调节田间小气候	较高，灌溉范围和流量比滴灌大
喷灌技术	喷头将有压力水雾化模拟降雨	大面积平地或缓坡地，机械化程度高	较好，受风力影响大，投资较高
管道输水灌溉	地下管道或地面软管替代明渠输水	滴灌、喷灌等田间工程的前端配套	杜绝渠道渗漏损失，输水效率高

从上表可以看出，高效节水灌溉不能只选择合适的技术模式，还要和水肥一体化、智能灌溉系统结合使用。利用传感器实时检测土壤墒情和作物需水情况，实行按需、精准、自动灌溉，从而将水资源利用效率提升到新的水平。

三、水资源循环利用技术

水资源循环利用技术是解决水资源短缺问题、改善水环境质量的开源途径。它将已使用过的水（如城市污水、工业废水等）进行深度处理，使它达到一定的回用标准后再次使用，实现了水资源的“变废为宝”和循环永续，是建立城市健康水循环系统的重要支撑。

（一）城市污水厂提标改造技术

城市污水处理厂属于水资源循环利用的重要枢纽。由于国家对水环境保护的要求越来越高，许多早期建设的污水处理厂出水标准已经不能满足新的环保要求，必须进行提标改造。提标改造的主要目的就是进一步去除水中的常规污染物（化学需氧量、悬浮物）和造成水体富营养化的主要营养物质（氮、磷），使出水水质达到一级 A 标准或者地表水四类标准，为后续的再生利用打下基础。

提标改造技术路线主要有两种，一种是对现有的生化处理单元进行挖潜强化，另一种是在末端增设深度处理单元。

生化系统改造技术是在传统的 A2/O 工艺（厌氧 - 缺氧 - 好氧）的基础上，增大内回流比、添加碳源或者采用 MBBR 等移动床生物膜反应器技术，在反应器中投加悬浮填料以增加微生物量，提高脱氮除磷效果。

深度处理则是在二级生化处理之后增加的处理环节，其关键技术有：

1. 高效沉淀池：通过投加混凝剂和助凝剂，快速去除水中的悬浮物和大部分磷。

2. 反硝化滤池或者活性砂滤池，利用附着在滤料上的反硝化菌，用补充的碳源作为电子供体，将水中的硝态氮还原为氮气去除，同时过滤悬浮物。

3. 膜生物反应器：把膜分离技术同生物处理结合起来，用膜组件代替二沉池，能得到清澈稳定的出水，占地少，是提标扩容的好办法。

（二）分散式污水处理与利用技术

分散式污水处理技术是指相对于集中式污水处理而言的一种处理技术，适用于居住分散、人口密度低、不能接入市政污水管网的区域，比如广大农村地区、城乡结合部、度假村、高速公路服务区等。该模式按照就地处理、就地回用的原则，在污水产生地附近建设小型化、模块化的污水处理设施，就地对产生的污水进行处理。

分散式处理设施投资灵活、建设周期短、管网铺设费用少、运行管理方便。其核心技术一般是将物理、生物等处理工艺集成在一起的一体化设备。常用的组合方式有厌氧与好氧生物处理、人工湿地、稳定塘、膜生物反应器等。尤其小型MBR装置由于出水水质好、占地小、自动化程度高等优点而受到广泛的应用。

处理后的出水可依据当地情况加以利用。水质较好者可作农田灌溉、绿化浇洒、景观补水，既解决了污水污染问题，又实现了水资源的就近循环利用，减轻了偏远地区用水压力。分散式处理模式是集中式处理体系的有益补充，对完善城乡污水治理格局、改善农村人居环境起着不可替代的作用。

（三）再生水用于工业生态市政技术

经过污水处理厂深度处理达到一定水质标准的再生水，是稳定的“第二水源”，在工业、生态、市政等领域的应用前景广阔，是优化城市水资源配置、提高城市水系统韧性的关键环节。

再生水的应用场景十分广泛，主要包括：

1. 工业用途：再生水可以用作工业生产的冷却水、洗涤水、锅炉补给水等。特别是对于火电、石化、钢铁这些耗水量比较大的行业来说，用再生水取代部分新鲜水，一方面能节约大量的优质水资源，另一方面还能显著减少企业的用水成本，达到经济效益和环境效益双丰收的效果。

2. 生态环境用途，用再生水对城市河湖进行生态补水，可以改善河道水质，

提高水体自净能力，维持健康的河流生态系统。用再生水来营造和保持城市湿地景观，既美化了城市，又给生物多样性保护提供场所。

3. 市政杂用指再生水用于城市绿化灌溉、道路清洗、车辆冲洗、建筑施工、公共厕所冲厕等。这些用途对水质要求不高，使用再生水完全没问题，把宝贵的自来水留更多给居民生活使用，做到优水优用，劣水劣用。

大规模利用再生水就需要规划、建设完善的再生水输配管网系统，即“第二供水管网”，根据不同的用水需求制定科学、安全的水质标准和监管体系，保证再生水的安全、高效利用。

第四节 技术经济评价与选型决策

一、技术经济评价指标体系构建

创建全面且科学的评价指标体系，这是公正评判各个技术方案好坏的基础。该体系不能只从经济角度出发，而应该将财务可行性、环境社会效益、技术成熟度、适应性等各方面都考虑进去，从而形成一个多层次、多维度的综合评价体系。

（一）投资回收期、净现值等财务指标

财务指标是对水务工程项目经济性的一种基本评价，它关乎到水务工程项目投资效益及资金平衡。水务工程投资大、建设周期长、服务年限长，所以必须用动态评价的方法来科学衡量其长期经济效益。投资回收期，特别是动态投资回收期，用来衡量投资回本的速度，即项目需要多少时间才能用它的净现金流量收回全部初始投资。静态投资回收期的计算比较简单，但没有考虑到资金的时间价值，可能会导致错误的决策。动态投资回收期用折现后的未来现金流量来计算，克服了前者缺点，更能体现真实投资收益能力。

净现值是使用最广泛的决策指标之一，它把项目在计算期内所有年份的净现金流量，用设定的折现率（一般取行业基准收益率或者资本成本）折算到初始时点的现值之和。净现值为正说明项目的预期收益大于其资本成本，项目在经济上可行；净现值小于零则说明项目不能为投资者带来收益，方案不可行。净现值法考虑了资金的时间价值、项目的全部现金流、投资风险，可以清楚地表明项目给股东或社会带来的价值大小。

内部收益率是另一个十分重要的动态评价指标，它是使项目净现值等于零的折现率。内部收益率是反映项目自身盈利能力的指标，或说是项目所能承受的最高资本成本。决策准则是如果计算出的内部收益率大于基准收益率，则可以进行投资。内部收益率由于直观易懂的百分比形式，在实际使用中受到人们的喜爱。这些财务指标共同形成起评判技术方案经济吸引力的量化根基，给决策者赋予了清楚且可比较的财务依照。

（二）节能量、减排量等环境效益指标

在绿色发展理念深入人心的背景之下，水务工程的环境效益评价由原来的辅助性考量提升为重要的评价维度。构建合理的环境效益指标体系，一方面是对项目的社会责任，另一方面也是项目争取政策支持、实现可持续发展的需要。节能量、减排量属于评价新技术应用所造成资源节约、污染控制成效的量化标准，可直接体现技术方案的环境贡献程度。

节能量指标是指技术方案在全生命周期内，与传统技术或者基准方案相比所节约的能源总量。水务工程中表现为单位处理水量电耗的降低、水泵和风机系统效率的提高、通过优化工艺流程减少的能源消耗。采用高效曝气技术、能量回收装置或者智能调度系统等，可以大大降低污水处理厂的运行能耗。节能量的计算不能只考虑直接的电力消耗，还要包括化学药剂生产、运输等环节的间接能耗，进行全方位的评价。节约下来的能源量货币化后可以更加直接地体现出它的经济价值，从而提高它在综合评价中的比重。

减排量指标考察的是技术方案降低污染物排放的能力，特别是温室气体（二氧化碳、甲烷等）及其他大气、水体污染物的减排效果。污水处理时，用厌氧氨氧化这种新型脱氮工艺替代传统的硝化反硝化工艺，可以大幅削减能耗，缩减氧化亚氮这种强效温室气体的排放。同时污泥的资源化利用，例如厌氧消化产沼发电，可以回收能源，减少温室气体排放和最终处置的压力。发电减排效益、航运减排效益等都可以量化，可以纳入生态效益评价。减排效益可以用碳交易市场价格进行货币化评价，给环境友好型技术的选择提供强有力的财务依据。

（三）技术可靠性、社会影响等定性指标

尽管财务和环境指标可以提供重要的量化支持，但是水务工程技术选型过程中很多重要的因素都属于定性的范畴，不能用货币直接衡量，因此必须建立定性指标体系来进行全面评价。技术本身特性、运行管理复杂性、社会影响范围是技

术方案长期稳定运行和与社会和谐共存的重要保证，属于技术安全的指标。技术可靠度是定性评价的第一个因素，它决定工程能否在设计寿命内一直发挥作用。评价内容有技术成熟度，关键设备和材料耐久性，工艺流程抗冲击负荷能力，日常维护复杂程度，备品备件可得性。一种技术即便经济性好、环境友好，但如果可靠性不高、经常出现故障，那么就会引起服务中断、维修成本增加，从而造成整个项目的效益下降。

社会影响也是不可忽视的一方面，主要是指技术方案给公众、社区、区域发展带来的利弊影响。正面影响有提高供水水质带来的公共健康改善、改善水环境提高居民生活品质、创造就业机会等。负面影响则是在建设期由于征地拆迁、施工噪音、交通堵塞所造成的影响，在运营期由于臭气、视觉景观冲突等所造成的影响。对这些社会影响做全面的评价可以提高公众对项目的认同感，减少社会矛盾，保证项目顺利进行并长久运转。

操作的便捷性、人员现有技能与之相匹配的程度、政策相符合的程度、发展相适应的程度等均属于定性评价。高度自动化的技术可以节省人力，但是对运维人员的要求也更高，需要考虑培训成本和人才获取的难易程度。政策符合性指技术方案要符合现在和可以预见到的未来的环保标准、行业规范。对这些定性指标采用专家打分法、德尔菲法或者层次分析法等手段进行半定量化处理之后，就可以将其与定量指标结合起来，共同为最后的决策服务。

二、技术选型决策模型与方法

多种甚至互相矛盾的评价指标下选择最佳的技术方案，是一项复杂的决策。单一指标比较不能得出全面结论，因此要利用系统化的决策模型和方法，把定量分析和定性分析相结合，对各种备选方案进行综合排序和选择，还能增强结果的稳健性，从而为技术选型提供可靠支撑。

（一）成本效益分析法

成本效益分析法是公共项目决策中使用最广泛、最基础的经济评价方法。核心思想是，以全部经济效益与全部经济成本的现值进行对比，从而确定技术方案的经济净效应。总效益的现值大于总成本的现值时，即净效益为正值的时候，认为该方案可以投资。在比较不同的方案之后，净效益最大或者效益成本比率最高的方案一般就被认为是最优的方案。

水务工程中成本构成比较清晰，分为前期投资成本和运营维护成本。效益的识别与量化更加困难，除了可以直接用市场价格衡量的财务效益，如售水收入、污水处理服务等，还有很多不能直接用货币衡量的外部效益或社会效益。外部效益是成本效益分析的重点，防洪工程减少的灾害损失、供水水质改善带来的公共健康水平提升、水环境治理带来的土地增值和旅游发展、生态补水对生物多样性的维持等都属于外部效益。

非市场效益的量化属于成本效益分析中的难题与重点。常用的评估技术有影子价格法、替代市场法、旅行成本法、意愿调查法等。例如可以计算由于水质改善而减少的医疗费用，从而量化健康效益；也可以调查居民为了更加清洁的河道愿意支付多少钱，进而估量环境改善的价值。虽然这些方法带有主观性、不确定性，但是它们给决策者提供了一个把社会、环境价值纳入经济考虑的系统，使得各方面影响力可以在同一货币尺度上衡量，从而做出更符合社会整体福利的决策。

（二）层次分析法与模糊综合评价法

决策问题中存在不能用数量表示的定性指标或评价标准模糊时，采用层次分析法和模糊综合评价法。两种方法都适合于处理复杂的多准则决策问题，能很好地把专家的主观判断和定量数据结合在一起。层次分析法是由美国运筹学家萨蒂在 20 世纪 70 年代提出的，核心是把复杂的决策问题分解为清晰的层次结构，一般分为目标层、准则层和方案层。决策者对同一层次的各个元素相对于上层目标的重要性进行两两比较，得到判断矩阵。比如选择技术的时候，可以比较“经济成本”和“环境效益”，看哪个更重要。利用判断矩阵求出最大特征值及相应的特征向量，获得各个准则的相对权重。最终将各个方案在各个准则上得分与相应权重相乘，再相加得到综合得分，再排序选择。层次分析法的优点是系统地分解问题，量化地处理主观判断，决策逻辑清楚。

模糊综合评价法专门解决评价标准以及指标值本身具有模糊性的问题。水务工程评价当中，“技术可靠性高”“社会影响好”之类的表述都是模糊的。首先要确定评价因素集（即指标体系）和评价等级集（优、良、中、差等）。再通过建立隶属函数或者邀请专家打分，得到每一个方案在每个评价指标下对各个评价等级的隶属度，从而得到模糊关系矩阵。根据层次分析法或其它方法得到的指标权重，采用模糊矩阵运算（如加权平均模型）可以得出各个评价等级下各方案总隶属度，最后根据最大隶属度原则或预设模型进行综合评价。用层次分析法确定

评价指标的权重，用模糊综合评价法处理定性指标的模糊性，可以得到更加科学、稳健的评价结果。

（三）多目标决策模型应用

水务工程项目的决策本质上是一个多目标优化过程，因为决策者需要平衡相互矛盾的各种目标。成本最低化、可靠性最大化、环境效益最大化、社会效益最优化等目标之间常常发生冲突：提高处理标准获得更好的环境效益的同时，往往也会增大投资和运行费用。多目标决策模型就是为了解决这类问题而设计的，目的就是同时优化多个目标函数，而不是把所有目标都变成单一的维度来评价。

多目标决策模型的应用一般不追求唯一的“最优解”，而是一系列的“非劣解”（又称帕累托最优解）。一个解称为非劣解，即不存在其他的可行解可以在不损害任何目标表现的前提下，至少改善一个目标的表现。非劣解集也就是帕累托前沿，它表现了各种目标之间的权衡关系。帕累托前沿曲线可以清楚地表明，为了使污染物削减率再提高一个百分点，需要付出多少运行费用。决策者根据自身的偏好以及环境状况，在其中选择最合适的一个平衡点。

常用的多目标决策方法有加权求和法、约束法、目标规划法和近些年常用的智能优化算法（如多目标遗传算法 NSGA-II）。加权求和法通过对各个目标赋予不同的权重，将多目标问题转化为单目标问题来求解，方法简单易行，但是权重的设置带有主观性。目标规划法则可以为每一个目标设定期望值，以最小化期望值和实际值之间的差距为目标。智能优化算法对复杂、非线性多目标问题的搜索效果较好，可以得到分布均匀的帕累托前沿。采用这些模型以后，决策就由寻找唯一最佳方案变成理解并选择最佳权衡方案，给复杂的水务工程技术选型提供更深刻、更灵活的决策支持。

三、不确定性条件下的技术风险评估

（一）技术失败风险与应对成本分析

技术失败风险指的是所选技术使用的时候没有达到预期的效果，经常发生故障或者过早失效的可能性。使用创新技术或者把成熟技术运用到新的环境中，风险会更加突出。风险的来源是多种多样的，可能是技术设计本身存在缺陷，也可能是关键部件的质量问题，或者是工艺参数在实际水质条件下不适应，亦或是操作维护不当等等。评价技术失败风险时要先系统识别风险源，用故障模式与影响

分析等方法对容易造成失败的环节和模式进行识别。

已识别出的风险，要从发生可能性和一旦发生后果的严重程度两方面加以评判。可能性的评价可以参照类似项目的经验数据、中试实验结果、专家经验、设备供应商的可靠性数据。后果的严重程度要分析技术失败直接和间接造成的损失。直接损失主要是设备系统的修理费或者更换费，也包括多耗用的药剂、能源等。间接损失更加广泛，它包含因供水或者污水处理服务中断给社会经济活动带来的影响、未达到排放标准所造成的环保罚款、企业声誉受损以及对公众健康造成的潜在威胁等。

风险评估完成后，就必须要有相应的应对措施，并对其进行成本的剖析。应对方式一般有四种，即规避风险、减少风险、转移风险、承担风险。风险规避指放弃使用高风险技术；风险减轻通过优化设计、增加冗余设备、加强人员培训、制定详细的操作规程来降低风险发生概率或减轻风险后果；风险转移通过购买保险或者和供应商签订严格的性能保证合同来实现。分析这些应对措施的实施成本，与可能规避的风险损失进行比较，属于风险管理决策的关键步骤，其目的就是利用合理成本把技术风险控制在可以接受的范围之内。

（二）市场变化与技术更新换代风险

水务工程作为生命周期漫长的基础设施，在漫长的运营期内必然会遇到外部市场环境的改变和技术的不断进步，这两者都属于重要的长期风险。市场变化风险指的是影响项目财务可行性的主要的外部因素发生变动，它包括：

1. 政策法规风险，即水价政策的调整、环保标准的突然提高、政府补贴政策的变化等，都会对项目收入和成本造成直接冲击。如果居民用水价格不能及时作出合理调整，就会造成供水项目亏损；新的污染物排放标准出台，就可能使已建成的污水处理厂进行耗资巨大的升级改造。

2. 供需风险，城市人口增加或者产业结构调整，都会造成实际用水需求同预测值存在较大差别。能源、化学药剂等主要投入物价格的波动都会直接对运营成本造成影响，从而危及项目的经济性。

技术更新换代风险，又称技术过时风险，指由于科技发展，现在所选的技术在未来有可能被效率更高、成本更低或者更环保的新技术所替代，使得现有设施在经济上或者功能上处于不利的地位。由于水务工程固定资产投资大、不易改变，选定技术被“锁定”之后，过早的技术过时将产生巨大的沉没成本和机会成本。

十年前建设的高能耗污水处理工艺，从今天来看，其运行成本比采用新工艺的设备要高得多。对此类风险进行评价需要对该领域技术发展状况有较深的了解，对可能的颠覆性技术发展曲线、应用前景等进行分析。应对策略可以采取模块化设计以利于未来升级，也可以选择兼容性好、可扩展性强的技术平台。

（三）基于情景分析的风险应对策略

对于未来高度的不确定性，单次的预测是不可靠的。情景分析属于有效的战略规划方法，它并非试图预知未来，而是创建一系列逻辑上自洽、彼此独立的未来“情景”，探究不同的技术方案在这些不同的未来中所表现出来的不同结果，从而制定出更加稳健或者更具适应性的策略。有利于决策者对未来不确定性做出思考并做好准备。构建情景的第一步是找到决定项目成败的关键驱动因素，这些因素一般具有很大的不确定性，比如未来经济增长速度、气候变化程度、公众环保意识、技术突破速度等等。根据各种主要驱动因素的不同情况组合，就可以得到不同的未来图景。可以建立一个“绿色增长情景”，即经济快速增长、环保要求严格，一个“经济停滞情景”，即经济低迷、政府财政紧张。

对已建立的情景，分析各个技术方案在该情景中的表现。在绿色增长情景下，高标准深度处理技术投入初期的费用较高，但是产生的优质再生水可以卖给工业用户，得到的收入较高，而且能够达到严格的环保标准，因此表现出色。在经济停滞情景中由于财政负担小，低成本、易维护的常规技术更具有韧性。经过跨情景评估之后，可以得到两种理想的策略，一种是稳健策略，即该技术方案在任何或者大多数情景下都有较好的表现，虽然不是任何单一情景下的最优选择，但是综合风险最低；另一种是适应性策略，即在设计之初就考虑应对不同情景的预案和调整机制。模块化建设，先建当前所需的规模，留出未来扩展或者技术升级的空间，当某种情况（如人口快速增长）出现的时候，就可以立即着手下一个模块的建设。通过情景分析的方法，决策人可以从短期的成本效益中解脱出来，从更长的角度，更具弹性的技术路线选择上做出决策，提高水务工程对未来未知的生存与发展能力。

第五章 政策法规与标准规范协同

第一节 水务工程相关法律法规解读

一、国家层面核心法律解读

（一）《水法》的核心原则与规定

《中华人民共和国水法》是我国水资源管理和水事活动的基本法，给水务工程规划与实施提供根本的法律依据。其原则主要是确立水资源的国家所有，强调水资源的开发、利用、节约、保护、管理要坚持全面规划、统筹兼顾、标本兼治、综合利用、讲求效益的原则，充分发挥水资源的多种功能，处理好生活、生产经营和生态环境用水的关系。这些原则明确规定，水务工程项目在立项之初就要与流域综合规划、区域综合规划相衔接，保证水资源的开发利用不超过其承载能力。

根据《水法》规定，国家实行取水许可制度和水资源有偿使用制度。任何单位和个人直接从江河、湖泊或者地下取用水资源的，应当依法申请领取取水许可证，并缴纳水资源费。也就是说，水务工程特别是新增取水或改变取水用途的项目，必须经过严格的水资源论证并取得相应的取水许可之后，才具备项目合法性的前提条件。未取得许可擅自取水，将会承担严重的法律后果。

法律还对水资源的统一调度和管理作出规定。水资源匮乏或者出现重大旱灾，水污染事件的时候，有关部门可以实施水量分配，限制取水等应急举措。这就要求水务工程在设计和运行方案上，要考虑到整个区域水资源调度的大局和应急预案，提高工程的适应性和抗风险性。供水工程要服从区域性的水量分配方案，排污工程要服从紧急情况下限排的规定。

《水法》对水工程保护也有规定，划定保护范围，禁止在保护范围内从事危害水工程安全、影响水工程运行的活动。为水务工程设施的安全运营提供法律保障，工程规划阶段就要充分考虑与周边环境的协调，在工程实施及后期管理过程中严格落实保护措施，防止人为破坏、自然灾害给工程造成损害，保证工程长期稳定发挥效益。

（二）《水污染防治法》的相关要求

《中华人民共和国水污染防治法》是水务工程建设中又一部必须严格遵守的法律，它给控制水体污染、保护和改善水环境质量提供具体的法律依据和行为规范。该法坚持预防为主、防治结合、综合治理的原则，要求所有的产生水污染的单位或者个人都应当采取措施防止水污染，对造成的损害依法承担责任。对于水务工程来说，无论是供水、排水、水环境治理项目，都必须把污染防治贯穿到规划、设计、施工、运营的全过程中。

该法对建设项目环境影响评价、排污许可制度都作出强制性规定。水务工程在建设前必须依法开展环境影响评价工作，其环境影响报告书中应当明确水污染可能产生的情况及治理措施，报生态环境主管部门批准。未批先建项目不得开工。项目建成以后，如果要排放水污染物的，必须申领排污许可证，按照排污许可证核定的污染物种类、浓度、总量、排放去向等要求排放水污染物。这就意味着水务工程的设计、运营方案必须以稳定达标排放为前提，任何超标的、超总量的行为都将受到严厉的惩罚。

尤其是对饮用水水源保护区的管理，《水污染防治法》做了严格的规定。禁止在饮用水水源一级保护区内新建、改建、扩建与供水设施和保护水源无关的建设项目；已建成的此类项目，由地方政府责令拆除或者关闭。同时禁止在饮用水水源二级保护区内新建、改建、扩建排放污染物的建设项目，已建成的限期治理。这些规定直接关系到水务工程的选址和布局，凡是会危害饮用水安全的工程活动都会被严格限制，从源头上保证饮用水安全。

（三）《招标投标法》与《民法典》合同编的应用要点

水务工程实施阶段《中华人民共和国招标投标法》、《中华人民共和国民法典》合同编是规范市场行为、保障工程质量、控制投资效益的重要法律。这两部法律共同构成一个发包、承包、合同履行的全流程法律框架，保证交易的公平、公正、公开、诚信。

按照《招标投标法》规定，达到一定规模的水务工程项目必须进行招标。包括全部或者部分使用国有资金投资或者国家融资的项目，也包括使用国际组织或者外国政府贷款、援助资金的项目。其目的就是利用市场竞争机制，选择出具有相应资质、能力的勘察、设计、施工、监理单位，防止腐败、暗箱操作，优化资源配置。实际应用时要注意以下几点：

1. 招标程序的合法性: 必须严格按照法定程序发布招标公告、编制招标文件、组织开标、评标、定标。任何规避招标、虚假招标、串通投标的行为都是违法的, 中标无效并予以行政处罚。

2. 资格审查严格性, 对投标人的资质、业绩、信誉等实行严格的审查, 保证工程质量的前提。不得排斥潜在的投标人, 也不得给特定投标人量身定制招标条件。

3. 评标过程的公正性, 评标委员会应由符合法定条件的专家组成, 严格按照招标文件确定的评标标准和方法进行独立评审, 不受任何单位和个人的干预。

《民法典》合同编为水务工程的合同管理提供基本准则。工程合同是确定发包方、承包方以及其他相关方权利义务的主要文件。应用要点是合同条款要完备、严谨, 工程范围、质量标准、工期、价款及支付、设计变更、竣工验收、违约责任和争议解决等均应写入合同。尤其是水利工程, 工期长、技术复杂、外部环境变化大, 合同中应明确风险分担、变更管理等内容来应对地质条件变化、政策调整、材料价格波动等因素所带来的不确定性, 保证合同能够顺利执行, 避免不必要的纠纷。

二、行政法规与部门规章解读

(一) 《建设工程质量管理条例》的强制性规定

《建设工程质量管理条例》是国务院颁布的行政法规, 是保障所有建设工程(含水务工程)质量的纲领性文件。它对建设单位、勘察、设计、施工、监理等五个主体质量责任和义务作出规定, 是水务工程质量管理的核心法律依据。该条例的很多条文属于强制性条文, 是任何单位和个人不得违反的“红线”, 是工程质量的底线。

条例强制规定建设单位不得明示或者暗示设计、施工单位违反工程建设强制性标准, 降低工程质量。工程勘察、设计、施工、监理应由具有相应资质等级的单位承担, 不得无证或者越级承揽工程。施工单位必须按照工程设计图纸、施工技术标准进行施工, 不得擅自修改工程设计, 不得偷工减料。这些规定从源头上防止了由于主体不适格、行为不规范所造成的先天性质量缺陷。

条例还对施工许可及竣工验收实行严格制度。建设单位在开工前必须依法申请领取施工许可证, 没有取得施工许可证的不得擅自开工。工程竣工后必须组织

勘察、设计、施工、监理等单位进行验收，验收合格后方可投入使用。验收不合格的工程必须返工，直至合格。擅自使用未经竣工验收或者验收不合格的工程的，建设单位将面临巨额罚款以及其它法律责任。

条例还设立了工程质量保修制度，规定施工单位对所建工程在法定的保修范围内、保修期限内承担保修责任。质量责任向建设过程的延伸使施工单位更加重视质量控制，减少后期维修费用及风险。同时明确了各级建设行政主管部门、水利等部门的质量监督职责，依靠政府监督保证各项强制性规定落实，给水务工程质量提供最终保障。

（二）《水利工程管理条例》的特殊要求

水利工程管理条例是为水利工程这个特殊领域制定的专门行政法规，其中有关于水务工程在管理、保护等方面的特别规定。水利工程同一般工程相比，直接关系到防洪安全、供水安全和生态安全，水利工程的功能性、社会公益性更突出，因此条例对工程运行、维护、安全保障等规定更加严格、具体。

该条例内容之一就是水利工程的管理与保护范围作出明确。工程管理范围内不得进行爆破、打井、采石、取土等危害工程安全的活动。保护范围内不得建设妨碍行洪的建筑物、构筑物，不得倾倒垃圾、渣土等废弃物。这些规定意在保证水利工程主体及附属设施结构稳定、运行环境安全，对堤防、水库、泵站、输水管道等水务工程设施的长久安全十分重要。规划水务工程时，要预留出足够的管理与保护区域，并将其纳入土地利用规划之中，防止后期由于周边开发活动引发的安全问题。工程实施时必须严格避免出现禁止性规定列举的情形，不能给现有的水利设施造成损害。

（三）相关部委发布的专项管理办法

水利部、生态环境部、住房和城乡建设部等相关部门，对水务工程的某一领域或者某一个环节，制定了一系列的专项管理办法、技术标准以及规范性文件，有效补充和完善的法律法规体系。这些办法一般都针对某一专业领域，比如调水工程管理、水利工程造价管理、排污许可管理等，针对性、可操作性都很强，是指导水务工程实践的直接依据。

水利部发布的《水利工程造价管理规定》，对水利工程项目投资估算、设计概算、竣工决算全过程的造价管理活动进行了规定，目的是合理确定并有效控制工程投资。调水工程运行管理办法对跨流域、跨区域调水工程的调度、水质保障、

设施维护、应急管理等方面做出详细规定，保证调水工程安全、高效、稳定的运行。这些文件给水务工程的经济性和运行管理制定了具体的标准。

生态环境部为落实《水污染防治法》制定了一系列技术规范，如排污许可证申请和核发技术规范系列文件，对不同行业的排污单位申报排污信息做了详细的规定，使排污许可制度精准落地。住房和城乡建设部在城镇供水、排水、污水处理等众多方面出台了许多技术导则和运营标准，对城市水务系统的规划建设以及运行维护起到指导作用。专项管理办法共同构成起一个动态而细致的管理体系，水务工程的规划与执行必须依照这些最新规定来及时调整，保证技术方案、技术管理方法满足要求并且保持先进性。

三、地方性法规与政策差异

（一）各地水资源管理条例的差异性

各省、自治区、直辖市根据上位法《水法》等制定了本地区的《水资源管理条例》或者《实施水法办法》，在水资源规划、取水许可、水资源费征收标准、节水管理等方面存在较大差异。

1. 水资源配置及取水许可权限，在水资源较紧张的华北、西北等地区，地方性法规对地下水开采采取严格控制，甚至有禁采区、限采区。北京严格限制开采地下水，对机井开凿实行严格的审批和区域限制。而南方水资源丰富地区管理重点更多地放在水质保护、中小河流开发利用上。取水许可的审批权限及流程也不相同，部分地方根据取水量的多少，把审批权限下放至市县级水行政主管部门。

2. 水资源费、水价政策：水资源费征收标准由各省级政府确定，所以存在较大差异。缺水城市和地区通常会征收较高的标准，用经济手段来促进节水。同时各地推行阶梯水价、超定额累进加价等水价改革的进度和力度也不相同，也会影响到供水工程项目的经济效益评价以及运营模式的规划。

3. 再生水、雨水利用要求，许多城市，特别是缺水型大城市，通过地方立法强制新建小区、大型公共建筑等配套建设再生水回用系统或者雨水收集利用设施。这既是从事相关水务工程的企业所面临的机会，也是对工程设计施工的新要求。

地方水资源管理条例差异示例

区域类型	管理侧重点	取水许可	水资源费 / 水价	再生水 / 雨水利用
缺水地区	地下水开采控制、 限采区	审批严格、权限 下放	标准较高、阶梯水价	强制配套、要求高
丰水地区	水质保护、中小 河流利用	相对宽松	视情况而定	鼓励或有要求

从上表可以看出，不同地区的水资源管理侧重点、取水许可严格程度以及水价政策均存在显著差异。

（二）地方环保标准与排污许可要求

地方对环境保护方面可以制定严于国家标准的地区污染物排放标准。重点流域、重点区域、环境敏感区的地方环保标准，一般要严于国家标准。这对于水务工程，尤其是污水处理、工业废水治理工程影响很大。京津冀、长三角、珠三角等区域以及长江、黄河等重点流域，普遍执行更为严格的水污染物特别排放限值，对总氮、总磷等指标的控制要求非常高。

由此产生的差异就决定了水务工程所采用的工艺路线和技术水平。污水处理厂要达到地方性准Ⅳ类或者准Ⅲ类出水标准，常常要采用深度处理工艺，高级氧化，膜处理之类的技术，这样就必定会使工程投资和运作费用大幅上升。项目规划阶段一定要重视目标区域地方标准，不然技术方案达不到标准，返工造成巨大损失。

排污许可管理方面实行全国统一的排污许可管理信息平台，但是地方生态环境主管部门在核发和监管中拥有很大的裁量权。依照当地水环境质量改善需要可以对许可证的排放浓度、排放总量或者增加特别管理要求，比如特征污染物检测、环境风险应急预案等。因此，同地方环保部门搞好沟通，正确理解其监管重点和具体要求，是项目通过环评审批并取得排污许可证的重要保证。

（三）地方性优惠政策与扶持措施

为了吸引社会资本进入水务领域，加快基础设施建设，各地政府纷纷出台有地方特色的优惠政策和扶持措施。这些政策会对水务工程项目可行性及盈利性产生直接的影响，因此在项目决策的时候需要充分考虑到。优惠政策一般会表现在财政补贴、税收减免、土地供应、融资支持等各个方面。

在财政补贴上，地方政府对污水处理、再生水利用、海绵城市建设等公益性强、投资回报周期长的项目，会给予直接投资补助或者运营补贴。污水处理费收

入不能覆盖成本和合理收益时，由地方政府进行差额补贴。符合规定的环保、节能节水项目，可以依法享受企业所得税、增值税等税收减免或者即征即退的政策。一些地方对国家重大水利工程建设基金等还会给予地方减征优惠。税收优惠能很大程度上减轻项目的财务负担。地方政府对于重点水务工程的用地保障优先，协调地方金融机构提供低息贷款、绿色信贷融资支持，或者通过设立产业引导基金、采取 PPP 模式吸纳社会资本参与，降低项目融资门槛和融资成本。

第二节 国家标准与行业规范应用指南

一、国家标准的应用要点

（一）《室外给水设计标准》等强制性国家标准

强制性国家标准是为了保障人民生命财产安全、国家安全、生态环境安全，满足社会经济管理的基本需要而必须执行的技术规定。在水务工程领域，以 GB 50013《室外给水设计标准》为代表的强制性国家标准，是项目设计的刚性约束。这些标准对水源的选择、水质的要求、管网的布置、水压的计算、材料的选用、安全防护等各方面都有不能逾越的规定，是保证城市供水系统安全可靠运行的生命线。

项目的可行性研究、初步设计、施工图设计每一个环节都要严格对照强制性标准进行审查校核。设计单位负主要责任，设计成果必须百分之百满足强制性标准的要求。施工单位应严格按照经过审查的设计图纸施工，不得擅自改动。监理和质检单位要按照强制性标准，对工程实体质量和建设过程实施全方位的监督。违反强制性标准的行为都会造成项目不合格，并有可能带来法律责任、安全事故，绝对不能儿戏。

（二）《节水型社会评价标准》等推荐性国家标准

推荐性国家标准是生产、交换、使用等过程中，依靠经济手段或市场调节而自愿采用的标准。它们一般是本行业内先进技术的方向以及管理的水平。虽然推荐性标准没有法律的强制力，但是在水务工程实践当中，它们是提高工程质量、促进技术创新、推动绿色发展的重要途径。节水型社会评价标准 GB/T 41423-2022 就属于此类标准。

该标准给区域或者城市的节水工作提供了一整套评价指标和方法，使水务工程在设计阶段就将高效用水和循环利用的理念融合进去。采用此类推荐性标准，可以大幅度提高项目的可持续发展水平和社会效益，有利于项目得到政策支持、专项资金和环保荣誉。随着高质量发展理念的深入人心，许多推荐性标准在招投标过程中或合同中，已经被业主方或者地方政府采纳为项目的硬性要求，渐渐成为市场竞争中的一种“软实力”和事实上的必选项。

采用推荐性国家标准可以有效地提高工程技术和产品的技术含量，这是企业积极响应国家发展战略、承担社会责任的主动作为。它鼓励工程实践中寻求更好的解决途径，在水资源调配、再生水利用、管网漏损控制等各个方面使用更加先进的技术和管理方式，从而推动整个水务行业的技术创新和服务水平的提高。因此，积极跟上并采用合适的推荐性标准是企业增强自身核心竞争力的途径。

（三）国家标准在项目中的强制性执行

国家标准的强制性执行是项目全生命周期的一个系统工程，包括规划、设计、施工、监理、验收、运维等各个环节和各参与方。执行就是建立起一个完整的、环环相扣的责任链条，保证标准的技术要求能够从纸面实实在在地落到工程实体上。政府监管部门在其中起到监督的作用，审查和核验是强制性要求的最后一道关卡。

对设计文件审查，为保证标准的落实打下了基础。施工图审查机构必须严格按照现行有效的国家标准、特别是强制性条文对设计图纸的合规性进行严格的把关。施工期间，监理工程师和项目管理人員要就进场材料、施工工艺、关键工序等进行持续监督，保证其按照设计文件及有关标准执行。管材规格、连接方式、构筑物结构安全措施等均要符合强制性标准的规定。竣工验收的时候，建设单位组织一个验收委员会，按国家规定的标准检查。凡是不合格的项目都必须改正到达到合格后才可通过。这样一层一层的、全方位的执行系统使国家标准具有权威性、严肃性，是水务工程质量与安全的根本保证。

二、行业规范的实践指导

在国家标准的宏观框架之下，各个行业的主管部门所发布的行业规范给技术指导提供了更具体、更具有操作性的标准。水务工程牵涉到水利、市政、环保等诸多领域，因此，科学地选择、灵活地运用并妥善地协调不同的行业规范，对于

解决工程中具体的疑难问题就显得十分必要。

水务工程常见标准类型概述

标准类型	制定主体	性质特点	适用范围	示例
国家强制性标准	国家相关部门	必须执行的法律法规	全国范围内的共性技术要求，涉及安全、环保等	GB 50013《室外给水设计标准》
国家推荐性标准	国家相关部门	鼓励采用，自愿性	行业先进技术，提升品质、推动创新	GB/T 41423《节水型社会评价标准》
行业规范	行业主管部门	针对性强，具体操作指南	特定行业领域的技术要求和管理规范	《城镇排水与污水处理工程项目规范》
地方标准	地方政府或部门	补充国家、行业标准，应对地方特殊性	特定区域内的特殊要求	严寒地区管道防冻要求、沿海防腐标准

如上表所示，水务工程所涉及的标准类型多样，各有侧重。

（一）水利市政环保等行业规范选择

水务工程项目具有跨学科、多属性的特征，在选择技术规范的时候需要考虑全面。以水源地保护、水库建设、输水管线、城市净水厂、配水管网组成的综合供水工程为例,各个子系统需要分别遵守水利、环保、市政等不同行业的专业规范。例如，水库大坝的设计和施工要按照水利行业《水利水电工程等级划分及洪水标准》，城市内部供水管网主要参照市政行业《给水排水工程管道结构设计规范》。

选择的主导原则要按照工程的主要功能以及所属的监管体系。如果项目的主体是城市供水，那么就以市政工程的相关规范为主；如果项目主体是流域性的水资源调度，那么就以水利行业规范为主。项目规划之初就要确定各项工程内容应遵循的主要规范和辅助规范，形成一个清晰、无冲突的规范体系。此过程需要项目团队有广博的专业知识和丰富的实践经验，项目建议书、可行性研究报告中对规范的适用性要做出专题论述，报主管部门审批，防止后期设计、施工过程中出现标准引用混乱、技术要求矛盾的情况，保证工程的顺利进行。

在项目实践当中，需要有一个统领的规范体系。一般以项目审批及主管政府部门所属的行业规范为基本框架，其他相关行业的规范为补充和细化。以城市景观湖泊、生态修复为主要的的项目，主要参考环保、园林行业规范，同时借鉴市政排水、水利水电等领域的水量平衡、水质保持的技术条文。主次分明、有机结合的规范选择方法，对保证复杂的水务工程建设协调实施，最终达到综合目标起着至关重要的作用。

（二）行业规范对新技术应用的指导

行业规范相比国家标准，更新速度更快，专业性更强，是新技术、新材料、新工艺推广应用指导的主要载体。技术更新换代最快的水务行业里，很多创新成果在成为国家标准之前，会先在行业规范里被体现、确认，给工程实践的创新提供合规的渠道和技术支持。

行业规范给新技术的使用赋予了具体的技术参数和操作指南，很大程度上缩减了项目应用新技术的不确定因素和风险。

1. 针对新兴的智慧水务技术，如依托物联网的管网监测、数字孪生模型等，相应的行业协会或者主管部门会出台技术导则，对数据采集标准、模型创建要求、平台功能界定等予以明确，从而指引项目怎样科学地搭建并使用这些智能化系统。

2. 材料科学方面，新型环保管材、高效水处理药剂、特种防渗材料等的应用，一般由行业规范给出其性能指标、施工要点、验收标准，使设计人员、施工单位能够正确选用新材料并进行施工，保证工程质量。

行业规范把两者联系在一起，保证技术创新的严谨性、安全性，又加快了科技成果转化为实现生产力的速度，有力推动了水务行业发展。

（三）行业规范与地方标准的协调

除国家和行业标准外，地方标准在水务工程实践中也起着不可替代的作用。地方标准一般由省级建设或者水行政主管部门制定，用于解决本地区特殊的自然条件、经济发展需要或环境保护目标，例如严寒地区管道防冻要求、沿海地区防腐蚀标准、特定水源保护区污染物排放限制等。当行业规范的普遍规定和地方标准的特殊性要求发生冲突的时候，应该慎重协调。

协调的基本原则是从严不从宽、特殊优于一般。如果地方标准对某项技术指标的要求比行业规范更严格，就先执行地方标准。行业规范规定管材耐压等级为1.0兆帕，但是由于当地沉降风险较大，地方标准中规定使用耐压等级为1.25兆帕的管材，那么设计和采购必须按照1.25兆帕的标准执行。项目启动之初，设计单位就应该将项目所在地的所有相关地方标准全部收集起来，然后逐条与国家和行业规范进行对比，找出所有的冲突点或者差异点。对于识别出的差异，在设计文件中注明所采用的规范，必要时与地方主管部门沟通确认，保证最终的设计方案符合国家、行业基本要求的同时满足地方特殊规定，避免合规风险。

三、标准规范的动态更新与跟踪

（一）建立标准规范信息跟踪机制

面对越来越快的标准规范制定修订速度，水务企业及有关从业机构要从被动接受转变为主动跟踪，建立标准信息跟踪体系。这是达到合规性最低标准的基础条件，同时也是维持技术领先、获得优势的内在需求。有效的跟踪能够保证企业第一时间获取新标准的发布、修订、废止、征求意见稿等重要信息，为企业技术决策、项目规划提供前瞻性支撑。

企业应设立专门的部门或者岗位，比如总工程师办公室或者技术标准部门等。跟踪渠道要多样化，除了定期访问国家标准化管理委员会、住房和城乡建设部、水利部等官方网站以外，还要订阅有关行业协会、学会的通讯或期刊，使用专业的标准数据库服务，参加标准宣贯会议和行业技术交流活动等。获得的信息要经过内部整理，形成企业自己的标准动态库，通过内部通讯、专题培训等方式，及时传达到企业所有相关的技术、管理、项目执行人员。

此机制的目的就是把“事后学习”转变为“事前预判”，使企业可以预见到标准变化所带来的影响。当某个重要的材料标准马上要更改提高环保性能的时候，采购部门和设计部门就可以提前开始研究替代材料，并和供应商进行沟通协调，从而避免在新标准出来后陷入被动。企业就可以把标准更新这个可能的难题，变成提升管理水平和技术能力的好机会。

（二）新标准发布后的过渡期应对策略

新标准或者新规范从发布到正式实行期间，一般会留有一定过渡时间，给行业以及市场留出适应与调整的空间。此时对正在进行和即将开展的水务工程项目管理来说至关重要，必须要制订出具体的应对措施，避免由于标准更替造成的混乱、延误或者成本失控。

过渡期项目一般采用“以立项或合同签订时间为准”的原则，即在新标准实施日之前已经完成审批或签订合同的项目，原则上可以继续使用旧标准完成建设。项目管理者应同业主和监管部门就标准的适用性进行充分的沟通，并做好详细的记录。

1. 新立项的项目无条件转为新标准。项目团队要立即对新旧标准差异展开系统分析，找出设计参数、材料规格、施工工艺、检验方法等方面的重大变化。

2. 根据差异分析来评价它给项目成本、工期和技术方案造成的可能影响，并及时对项目预算和计划做出调整。

3. 对内进行有针对性的培训，确保每一位与本标准相关的工程师和技术人员充分了解新标准。

4. 与供应商、分包商的沟通也要同步进行，确保其提供的产品及服务符合新的标准。

经过一系列有条理的应对措施后，便能较好地解决过渡期的不确定性问题，使项目在新旧标准交替时合规并且达成优化。

（三）企业内部标准体系的建立与完善

单靠外部的国家、行业、地方标准，无法形成企业独有的核心竞争力。优秀的水务企业会依照外部法规的要求，创建并持续改进具有自身特色的企业内部标准体系。它是企业技术积累、管理智慧、项目经验的结晶，也是工程实施标准化、精细化、高效化的重要管理手段。

企业内部标准体系是对外在的各项规范的深化和细化。它把外部标准的原则性要求，转化为企业内部具体的、可操作的作业指导书、工艺流程卡、设计模板、质量验收细则等。以国家标准对混凝土质量的宏观要求为例，企业内部标准可以细化成各个工程部位的混凝土配合比优选方案、浇筑过程的温控措施、更为严格的内部验收指标。该体系还可以把企业在长期的实践中总结出来的“独门绝技”、“宝贵经验”固化、传承下来，比如在某种地质条件下基坑支护的优化设计、高效的管网冲洗消毒程序等，防止优秀的实践因为人员的流动而消失。

完善的内部标准体系是动态的、开放的生命体。它要创建起一个闭环的反馈更新体系，把各个项目执行时出现的优良做法与失败教训，系统地归入到标准体系的修订工作之中。通过定期的评审与更新，使企业的标准一直反映最新的最好的实践和科技成果，促进企业技术水平和管理水平螺旋式上升。不仅可以稳定提高项目的质量，而且可以大幅度地提高工作效率，降低成本，从而形成一种不能被模仿的强大的竞争优势。

第三节 政策支持与资金保障机制

一、国家与地方财政支持政策

（一）中央预算内投资与专项资金支持

中央预算内投资是国家对水务工程建设最直接、最重要的资金支持，是国家层面的资金来源。此类投资一般都会投向具有战略意义、跨区域影响、重大公共利益的项目上，国家水网重大工程、大江大河大湖治理、保障国家粮食安全和生态安全的重点水利项目都是此类投资的重点。其拨付和管理体现的是国家对于水资源调配、防洪减灾、水生态保护等进行宏观调控的意图，保证了国家水安全战略的顺利推进。

水利发展资金等专项资金属于中央财政支持水务发展的一个重要途径。按照财政部、水利部联合发布的《水利发展资金管理办法》，水利发展资金主要支持水旱灾害防御、水资源节约保护、水土保持、农村供水保障、中小河流治理等。这类资金一般用因素法来分配，考虑各地水利发展的需要、财力情况、政策倾斜等因素，目标明确、专款专用。中央政府设立专项资金，对一些具有针对性的水务问题给予资金支持，如支持农田水利“最后一公里”建设、山洪灾害防治非工程措施建设等，使资金使用更有针对性、效率更高。

（二）地方财政配套与补贴政策

在中央财政发挥主导作用的同时，地方财政的配套和补贴也成了水务工程资金来源的另一重要组成部分。地方政府根据本地区水务发展实际情况和财力状况，制定相应的配套资金政策，保证中央投资项目建设的顺利进行。由此形成中央和地方共同推进水务建设的上下衔接财政投入机制。配套资金的数量和比例，一般都直接反映出地方政府对于水务工作的重视程度，也是评价地方执行力的一个标准。

地方政府会根据自身的特点来设立地方性的水务建设专项补贴。该类补贴政策更加灵活，可以用于农村饮水安全工程的运营维护、节水改造、污水再生利用等项目的奖励。部分地区还创新实行“以奖代补”、“先建后补”等办法，激励社会力量、基层组织参与小型水利工程的建造与经营，这样既调动了各方面的积极性，减轻了政府直接投入的压力，又提升了公共服务的供给效率。

地方政府专项债券成为筹集水利建设资金的一种方式。在当前严格控制地方政府隐性债务的环境下，专项债券给地方重大水务项目赋予了一种合规且透明的融资途径。各地方积极用好此政策工具为水库建设、城乡供水一体化、流域综合治理等需要大量资金的项目提供资金支持，有力地促进了各地区水务基础设施的发展。

（三）政府购买服务模式的应用

政府购买服务成为转变政府职能、提高公共服务供给效率的重要方式，在水务领域也得到广泛的应用。政府把原本由政府承担的水务工程建设、运营、维护等公共服务事项，通过公开招标等方式交由有资质的社会企业来完成，政府按照合同约定和绩效考核结果向企业支付服务费用。

模式推行以后，公共服务由原来的“养人办事”变为“花钱买服务”，并且引入市场竞争，提升了水务服务的质量和效率。

政府购买服务模式的特点与应用范围如下表所示。

政府购买服务模式特点与应用范围表

特点 / 领域	描述
适用领域广	不仅可用于污水处理、再生水利用等有稳定现金流的项目，也逐步扩展到河道管护、水环境监测、智慧水务平台建设与维护等领域。
合同管理核心	关键在于构建科学合理的合同体系和绩效评价标准。政府需明确服务内容、质量标准、价格形成规则和考核办法，确保服务“物有所值”。
促进专业发展	通过购买服务，政府可借助社会资本的专业技术、管理经验和创新能力提升水务行业整体服务水平，自身则能更专注于政策制定、行业监管、绩效评估等宏观管理职能。

从上表可见，政府购买服务在水务领域应用广泛，且具有显著优势。

二、金融与税收优惠政策

发挥财政资金的主导作用的同时，用金融工具和税收优惠政策调动社会资本进入水务领域，降低项目建设和运营成本，是建立多元化投融资体系的重要环节。这些政策对于推动水务工程市场化、专业化的发展有重大意义，可以给水务事业注入持久的金融活力。

（一）绿色信贷、绿色债券等融资工具

伴随着绿色发展理念的深入，绿色金融给水务行业开辟出一条新的融资途径。

绿色信贷、绿色债券等融资方式专门为具有环境效益的项目提供资金，与水务工程的生态属性不谋而合。商业银行、政策性银行给符合要求的水资源节约型、污水处理、水生态修复、智慧水务等项目提供低利率、快速审批的绿色信贷，有效地降低了企业的融资成本。

绿色债券属于资本市场上的募集资金手段，能够给大型水务项目赋予长时间稳定的资金供应。水务企业发行绿色债券，可以直连资本市场，对接看重 ESG 的投资者。融资方式不仅拓宽了企业融资渠道，也提升了企业市场形象以及品牌价值。在水利基础设施上试点的不动产投资信托基金，用盘活具有稳定现金流的存量水务资产来筹集新建项目所需的资金，形成存量盘活、增量投入的正向循环。

政策性开发性金融工具在水利建设中起着非常重要的作用。该类工具一般由国家开发银行、中国农业发展银行等政策性银行提供，给重大水利工程等政策性项目的大额、长期贷款填补了商业银行无法覆盖的政策性项目融资空白，成为国家水网等大型基础设施建设的重要金融支撑力量。

（二）水务项目的税收减免政策

税收优惠属于引导社会资源投向某领域的一种政策杠杆。国家为了适应水务项目自身的特点，制定了相关的税收减免政策，目的是减轻水务项目建设者和经营者的税收负担，提高他们的投资回报率。企业所得税、增值税、房产税等税收政策给水务企业的发展营造出良好的税收环境。

按照中华人民共和国企业所得税法及其实施条例的规定，对从事国家重点扶持的公共基础设施项目（水利、公共污水处理等）投资经营所得实行“三免三减半”的企业所得税优惠。即从取得第一笔生产经营收入的纳税年度起，前三年免征企业所得税，第四至第六年减半征收。这项政策极大地提高了社会资本对于新上马水务项目的投资积极性。从事符合条件的环境保护、节能节水项目所得也可以享受同样的税收优惠，直接惠及从事污水处理、再生水利用、节水改造等的企业。为农业生产提供排灌、农村饮水安全工程建设和运营等，也可以享有相应的税费减免，体现了国家持续扶助农业基础和农村民生的政策。

（三）政府和社会资本合作模式

政府和社会资本合作模式是水务领域引入社会资本，实现风险共担、利益共享的一种主要方式。该模式通过授予特许经营权等方式，把水务项目的设计、建设、融资、运营、维护等环节的部分或者全部交由社会资本来负责，政府则负责

监管、政策协调、可行性缺口补助等。

PPP 模式在水务行业的运用比较普遍，在供水、污水处理等单一项目，到区域水环境综合治理等复杂的工程项目上都有成功应用。实践中出现 BOT（建设 - 运营 - 移交）、TOT（转让 - 运营 - 移交）、ROT（改建 - 运营 - 移交）等不同的合作方式，根据项目实际情况（新建、存量改造或者改扩建）选择使用。

成功的 PPP 项目应该具有明确的合同结构，合理的风险分配和稳定的收益机制。政府信用、合理风险转移、透明支付机制都是吸引社会资本的因素。PPP 新机制下，政策更加突出使用者付费原则，鼓励社会资本依靠提高运营效率、服务质量来获得收益，严格控制新增地方政府隐性债务，使 PPP 模式向着更规范、更可持续发展的方向发展。

采用 PPP 模式可以有效地减轻政府的财政负担，也可以引进社会资本先进的管理经验和技术创新能力，从而改善公共服务的供给效率和质量。这样一种合作关系使得政府职能由“划桨人”变为“掌舵人”，政府就可以把更多的精力放在战略规划、市场监管、绩效考核等上面，从而达到公共利益最大化的目的。

三、资金保障机制的构建

有效的政策支持必须要依靠科学的资金保障才能真正落实。建立多元化、受监管、重绩效的资金保障体系，是保证水务工程从规划蓝图变成现实的关键。资金筹集与资金安全问题同工程质量和运行效率密切相关，同工程的长期效益密切相关。

（一）多元化多渠道融资体系构建

单靠财政投入已不能满足现代水务发展巨大的资金需求。因此，建立以财政资金为引导、金融信贷为支撑、社会资本广泛参与的多元化、多层次、多渠道的水利投融资体系是必然的。财政资金要发挥引导和撬动的作用，以设立引导基金、贷款贴息、以奖代补等形式，吸引和放大社会资本的投入。

市场化融资属于拓展资金来源的途径之一。积极利用地方政府专项债券为公益性项目融资，鼓励水务企业发行企业债券、中期票据等债务融资工具来筹集资金。探索推广水利基础设施 REITs，把具有稳定收益的存量资产证券化，是盘活资产、形成投资良性循环的创新之举。同时创建“政企企”合作平台，加强水务项目同政策性银行、商业银行的对接，可以给项目提供长期稳定的信贷支持。多

元化的融资结构既分担了政府的财政压力，又用市场化的方式改善了资源配置，提高了资金使用效率。

（二）项目资金使用的全过程监管

为了保证巨额水务工程资金的平安、合规、高效率地运用，就必须创建出项目全生命周期的监管机制。全过程监管即对资金从源头到末端的全过程进行不间断的监督和控制在，防止资金被截留、占用、挪用，保证每一分钱都用在恰当的地方。

强化全过程监管需要综合运用多种手段，实现穿透式管理，其主要环节如下表所示。

项目资金全过程监管主要环节表

监管环节	关键措施	目标
事前预算评审	在项目立项、预算编制阶段，由财政部门或委托第三方评审机构对项目概算、预算的合理性、准确性进行严格审查。	从源头上控制投资规模与成本。
事中实时监控	依靠现代信息技术手段（如建立云监管平台），实现专项资金流动及使用合法性的实时监督。同时，通过现场稽查、定期报告等方式掌握项目进度和资金支付情况。	确保资金拨付与工程进度匹配，防止资金滥用。
事后结算审计	项目完工后，由审计部门或财政评审机构对项目竣工决算进行严格审核，核实工程造价的真实准确性。	防止出现高估冒算、虚假结算等问题。

上表展示了项目资金全过程监管的各个环节及其具体措施。

（三）资金绩效评价与审计监督

资金的使用不仅要合法，而且要有效。建立以结果为导向的财政资金绩效评价体系，是提高财政资金使用效益的主要途径。绩效评价要贯穿于预算编制、执行、决算的全过程，把资金投入同项目产出、社会效益、生态效益、民众满意度等联系起来。评价结果应该成为下一年度预算安排、政策调整、资金分配的依据，形成投入、产出、效益的闭环管理，促使项目单位不断提高管理水平，争取更好的投资回报。

审计监督是保障资金安全的最后一道防线，也是提高绩效的最后屏障。审计部门依法对政府投资建设项目预算执行和决算进行审计监督，具有独立性、权威性。审计重点已经不再只是对财务收支是否合法合规进行审查，而是要从项目建设管理的角度上发现深层次的问题，包括决策失误、管理漏洞、损失浪费以及背

后存在的违纪违法行为。审计结果和整改情况要向社会公开，接受社会监督，强化问责，以达到震慑违法违规行为，促进水务工程建设管理水平不断提高的目的。

第四节 合规性审查与风险防范

一、规划阶段的合规性审查

（一）规划选址与用地合规性审查

水务工程规划选址和用地合规性审查属于项目启动的第一步，主要目的是保证项目所占用的土地符合国家和地方土地管理法规、城乡规划的相关规定。审查工作要从严要求，主要是看项目是否触及生态保护红线、是否依法占用永久基本农田、是否通过自然保护区核心区或者缓冲区等禁止性规定。所有违反强制性规定的一律否决选址。

法律依据主要是《中华人民共和国土地管理法》、《中华人民共和国城乡规划法》及地方性土地利用总体规划、城乡规划。项目单位在提交选址方案时，应当附上规划和自然资源部门出具的规划选址、用地预审意见，这是证明选址合法性的证明。

审查时需要对项目的用地性质、范围、权属等作细致的核实。即查明地块的权属情况，确定其为国有或者集体所有，有无权属争议，拟用地是否符合国土空间规划中确定的用途。对于征收、征用土地的项目，审查范围还要扩大到征地程序是否合法、补偿标准是否到位、被征地农民权益是否得到保障等与社会稳定风险有关的合规性问题。对输水管线、堤防等线性工程来说，廊道控制的合规性审查尤其重要，必须保证它同交通、电力、通讯等其它基础设施规划相协调，避免相互影响。忽略用地合规性审查，会造成项目不能办理合法用地手续，或者建成后被责令拆除。

（二）规划环评与审批程序的合规性

规划环境影响评价简称规划环评，其审批程序的合规性，是保证水务工程和生态环境协调发展的重要制度。按照《中华人民共和国环境影响评价法》规定，水资源开发利用等专业规划要进行环境影响评价。

规划环评的合规性审查，首先要看环评工作是否在规划编制的早期就介入，以保证环保理念和措施能融入到规划决策的全过程。审查要确认环评工作的机构

是否具有法定资质、评价方法是否科学、评价内容是否全面，尤其是对水文情势、水环境、水生态可能产生的重大影响进行深入客观的预测分析。

审批程序合规性审查主要是看流程是否合法、完整。环评报告书在报送审批前是否依法进行了公示，是否充分听取了有关单位、专家和公众的意见，对于所采纳的意见及未采纳理由的说明是否合理。审查重点还在于规划草案报送审批机关时，是否附具了环境影响报告书。审批机关，即生态环境行政主管部门，在受理后会同水行政主管部门进行审查，形成审查意见。审查意见供规划审批机关审批时参考。

在这个过程之中，程序上的任何缺失或者瑕疵都会造成规划环评的法律效力被质疑。像“未评先批”、“批小建大”这样规避环评监管的行为，不但要承受严厉的行政处罚，而且会给区域生态环境造成无法预知的重大风险。因此对规划环评的实体内容及程序的合法性进行严格的审核，是防止由于水利工程造成系统性环境问题的防线，也是落实生态文明建设要求。

（三）与相关上位规划的符合性审查

相符性审查，主要看水利工程项目的宏观战略方向与上位规划是否吻合、空间布局是否能协调。上位规划指效力高于本规划或者优先于本规划的规划，包括国民经济和社会发展规划、国土空间规划、流域综合规划、区域性的水资源综合规划等。审查的主要任务就是论证水务工程的建设目标、规模、布局、时序是否和上位规划相衔接、相协调，防止出现规划冲突、资源错配。

审查工作可以从以下几个方面入手，保证项目与上位规划对齐融合。不同类型的符合性审查侧重点及核心要求见水务工程与上位规划符合性审查要点表：

水务工程与上位规划符合性审查要点表

审查类型	侧重点	核心要求
战略目标符合性	项目建设目标与宏观战略需求	符合国家水安全保障规划，支撑“以水定城、以水定地、以水定产”原则，不与上位规划战略意图相悖
空间布局符合性	项目选址、工程布局与空间规划	与国土空间规划“三区三线”叠合分析，不在法定禁建区内，与区域供水、防洪排涝总体布局协调
控制指标符合性	项目是否满足上位规划刚性指标	不逾越区域用水总量、水功能区限制纳污红线、地下水开采等“天花板”，并成为达成目标的有效手段
重大工程衔接性	跨区域、跨流域工程关联度	考察与区域内外其他重大基础设施工程的功能、规模、时序匹配，产生协同效应，避免单打独斗

从水务工程与上位规划符合性审查要点表可知，战略目标符合性审查项目建成后不能满足国家或者区域重大战略需要，即不符合国家或区域水安全保障规划，不能支撑“以水定城、以水定地、以水定产”。项目的定位必须与上位规划的战略意图相一致，不能相违背、相冲突。空间布局符合性是将项目的选址、工程布局方案和国土空间规划中的“三区三线”（即城镇、农业、生态空间，以及生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界）做精确的叠合分析，保证项目不在法定的禁建区内，并与区域供水、防洪排涝等总体布局相协调。控制指标符合性审查项目是否满足上位规划设定的各种刚性控制指标，包括区域用水总量控制、水功能区限制纳污红线、地下水开采控制指标等。水务工程不能逾越这些天花板，而是达成控制目标的有效手段。重大工程衔接性要求对于跨区域、跨流域的重大水务工程，在规划时需要考虑其与区域内以及跨区域、跨流域的其他重大基础设施工程之间功能、规模、时序三者的匹配性，以产生协同效应，避免出现单打独斗或者建设时序错乱的现象。

二、实施阶段的合规性管理

（一）招标投标程序与合同签订的合规性

招标投标程序的合规性在水务工程项目管理当中占据重要位置，对维持市场公平竞争环境、保障项目投资效益的实现起到十分重要的作用。根据中华人民共和国招标投标法及相关规定，达到法定规模标准的水务工程项目，施工、监理、设备材料采购等均应进行招标。

合规性管理首先要看招标范围是否确定准确，有无化整为零、规避招标的情况。对邀请招标或者不招标的特殊情况，要查看是否具备法定条件，是否办理了相应的审批手续。

招标具体流程中的合规性管理要覆盖全过程。即对招标文件的编制是否符合要求，有无歧视性、倾向性条款的审查；对资格条件的设置是否合适的审查；对评标办法是否合理、明确的审查。招标公告或投标邀请书发布的媒介和时限、组织投标人踏勘现场、答疑、开标过程的公开性、评标委员会专家来源和随机抽取方式、评标过程的保密性和独立性等，都是合规审查的重点。任何一个环节的程序上的小问题，比如泄露潜在投标人信息、专家评审受到不正当的影响、串通投标等，都会属于违法行为，会导致中标无效，并且会引发行政处罚和法律纠纷。

中标通知书发出以后,合同签订是否合规同样重要。审查的主要内容就是核对合同中的主要条款,如工程范围、价格、工期、质量标准等是否与招标文件、中标人的投标文件一致。偏离实质性原则的修改一概不予适用。同时应该推广使用国家或者行业发布的标准合同范本,根据项目具体情况加以补充完善。签订前要对合同进行严格审查,保证合同中的权利义务明确、风险分配合理、争议解决方式清楚,这是预防以后发生履约纠纷的基础。

（二）施工许可与质量安全监督的合规性

施工许可的取得、质量安全监管的有效执行,都是水务工程从图纸上的设想转变为现实建设的两个重要的合规环节。在开工之前,项目建设单位必须依法向工程所在地的县级以上人民政府建设行政主管部门申请领取施工许可证。

合规性审查主要看申请施工许可的前提条件是否都已满足,一般包括:工程用地批准手续已办理;在城市规划区的工程已取得规划许可证;施工场地基本具备施工条件;施工企业已确定;有满足施工需要的技术资料,施工图设计文件已按规定审查合格;有保证工程质量和安全的具体措施。任何未经许可而先行建设的行为都是严重的违法行为,要受到责令停工、罚款的处罚。

施工期间质量、安全的合规性监督是连续不断、动态的。质量管理方面要建立完善的质量保证体系,严格实行材料进场检查、工序交接检查、隐蔽工程验收制度。施工活动必须按照国家强制性标准以及设计文件的要求进行,监理单位应切实承担起监督责任,对关键部位和关键工序实施旁站监理。安全管理要求施工单位建立健全安全生产责任制,投入足额的安全生产费用,对施工人员进行充分的安全教育和施工前技术交底,对深基坑、高边坡、脚手架等危险性大的分部分项工程编制专项施工方案并组织专家论证。建设、监理、施工各方均应接受政府质量安全监督机构的监督检查,对发现的质量缺陷和安全隐患必须定人、定时、定措施进行整改,形成闭环管理。

（三）竣工验收与档案管理的合规性

竣工验收是对水务工程建设的成果进行全面的检验,评价它是否达到设计要求和使用寿命的一种法定程序,也是工程转入运行管理的必要前提。合规性管理的关键就是严格按验收标准、程序进行。验收工作不能简单处理,应由项目法人组织设计、施工、监理等单位共同参与。验收依据批准的设计文件、施工合同、国家及行业施工技术规范 and 验收规范。未经验收或者验收不合格的工程,不得投

入使用。验收时应检查工程质量、已完成工程量、投资使用情况、合同执行情况等各方面，并形成真实的、完整的竣工验收报告。

档案管理属于竣工验收的主要内容，同时又是项目全生命周期管理的基础。合规的档案管理，必须从项目立项之初就对前期工作、招标投标、勘察设计、施工管理、竣工验收等各个阶段产生的文件资料同步进行收集、整理和保管，保证其完整、准确、系统、安全。根据水利工程项目档案管理规定，项目法人对档案工作负总责，在项目竣工验收前应申请档案专项验收。档案验收不合格，项目就不能进行竣工验收。档案审查的主要内容有：档案的分类是否科学，组卷是否规范，内容是否能真实地反映出工程全貌，竣工图是否与工程实体相符等。这些档案是工程移交以及今后运行、维护、改扩建的依据，也是发生质量安全事故或者合同纠纷时进行责任追溯的凭证。

三、法律风险识别与防范

水务工程在生命周期里，不可避免地会遇到各种法律风险，这些风险就像暗礁一样，会致使项目延误、超支甚至引起诉讼。因此，主动识别、系统防范这些风险是保证工程项目的顺利进行、保障各方合法权益、实现项目预期效益的必然要求，同时也是项目管理从被动的应对转为有计划有安排的主动控制。

（一）合同纠纷风险与防范措施

水务工程项目合同体系繁杂，是法律纠纷多发区。主要风险点为工程变更、工期延误、工程款支付、质量缺陷、索赔和反索赔等。纠纷产生大多是由于合同条款不明晰、履约过程中缺少有效的证据管理、沟通协调机制不完善等所引起的。尤其工程变更时，如果合同里没有明确变更提出、确认、计价程序，极易产生结算争议。

为系统防范此类风险，必须采取综合性的防范措施：

1. 加强对合同签订前法律审查。在签订合同时请律师对合同文本中的工程范围、价款调整、工期顺延、质量验收、违约责任、争议解决方式等重要条款逐条进行审查，保证其明确、严谨、权利义务对等且合法。

2. 全过程履约证据管理，项目实施过程中产生的所有项目指令、变更通知、会议纪要、来往函件、现场签证等均应书面存档保管。对于隐蔽工程验收、工期延误原因等重要的事实要留有证据。精细化的过程管理能够在纠纷发生之时给出有力的事实支撑。

3. 健全完善的沟通与纠纷解决机制。项目内部要建立定期沟通协调会制度,及时解决履约过程中出现的问题。在合同中约定多元化争议解决方式,友好协商,协商不成再请行业专家调解,最后选择仲裁或者诉讼。这样的分层递进机制有利于矛盾在早期就被化解,从而节省时间和成本。

（二）行政处罚风险与应对策略

行政处罚风险伴随水务工程建设全过程,主要是由于违反行政许可、环境保护、安全生产、土地管理等各方面的法律法规而产生的。常见的风险行为有:未取得施工许可证就擅自开工、未经过环评批准就擅自建设、非法占地、未按规定进行安全生产投入、竣工后没有验收就擅自投用等等。一旦发现就会面临罚款、停工整顿、吊销资质等处罚,严重的话还会造成法律上的后果,对工程进度及企业声誉都有影响。

行政处罚风险应该采取以预防为主、应对为辅的方法。核心在于建立前置的内部合规管理体系,把项目各个阶段的重要行政审批节点梳理出来,形成合规流程图、责任清单,使每个环节依法办理。要定时安排员工去参加法律法规培训,提升所有人员的合规意识。当行政机关进行调查、检查的时候,应当以积极、合作的态度如实提供资料,并就事实和法律适用等问题同执法人员进行专业的沟通。如果最终会收到行政处罚决定书,那么就由法律顾问来判断是否合法合理。若认为处罚决定认定事实、适用法律或者执法程序有错误的,应当在法定期限内依法提出行政复议或者行政诉讼,维护自身的合法权益。

（三）劳动用工与安全生产法律风险

水务工程项目大多属于劳动密集型工程,劳动用工与安全生产是两个彼此交织、极易引发法律风险的领域。劳动用工风险主要是未签订劳动合同、拖欠或者克扣工资、超时加班、未依法为职工缴纳社会保险、工伤处理不当等。这些问题不但是引起劳动仲裁、诉讼、影响施工队伍稳定的因素,而且会因为违反劳动保障监察规定受到行政处罚。

安全生产的法律风险是最高额的,它包含民事赔偿责任,并且牵涉到行政责任或者刑事责任。风险点有安全生产责任制未落实到位,安全投入不足,施工人员安全教育培训不到位,特种作业人员无证上岗,对重大危险源监控不到位,应急预案等。一旦发生生产安全事故,特别是在出现重大伤亡事故的时候,项目负责人、安全管理人员等直接责任人将被追究刑事责任。

水务工程规划与工程实施协同手册：问题解决与优化策略

为了避免这两种风险的出现，就必须采取系统的措施来防治。在劳动用工方面要规范用工管理，与所有工人签订劳动合同，建立实名制管理台账，通过银行专户按时足额发放工资，依法为员工缴纳各项社会保险。安全生产上要落实安全第一、预防为主、综合治理的方针，从项目法人到一线班组建立安全责任体系，保证安全投入，加强现场安全巡查和隐患排查治理，定期组织应急演练，全面提高员工安全意识和应急处置能力。

第六章 水务工程经济评价与资金管理

第一节 投资估算与成本效益分析

一、投资估算的编制与审查

投资估算是水务工程项目建设所需的全部投资预先计算、评估的过程，是控制项目投资、筹措资金、财务分析的基础。科学、准确的投资估算对于有效防止超概算、保障工程顺利实施具有关键意义。其编制、审查工作必须按照国家规定、行业标准进行，保证工作的科学性、严肃性。

（一）投资估算的构成与编制方法

水务工程投资估算一般由建筑工程费、设备及工器具购置费、安装工程费、工程建设其他费用、预备费和建设期利息等组成。其中建筑工程费和安装工程费为主体部分，包括基础处理、主体结构、附属设施等所有实体工程的费用。设备购置费指的是水泵、阀门、自动化控制系统、水处理设备等主要设备的采购费用。工程建设的其他费用内容繁杂，如土地征用及拆迁补偿费、勘察设计费、项目管理费、环境影响评价费等。预备费分为基本预备费和价差预备费，基本预备费用于补偿设计中所未预见的工程变更、材料涨价等。

编制方法主要有概算指标估算法、类似工程预算法、扩大单价法等。在项目初期设计深度不够时，常使用概算指标估算法，用单位生产能力投资、单位工程量投资等指标快速估算。设计工作深入之后，可以采用类似工程预算法，参照已建成的同类型、同规模工程投资数据，并根据本项目具体情况进行适当调整。初步设计阶段多用扩大单价法，工程分部分项目进行工程量计算，分别乘以相应的扩大单价，然后相加得到总投资。根据项目的特征、设计阶段以及资料的完备状况来选择合适的方法，一般会将多种方法结合起来互相校核，从而提高估算结果的准确性。

（二）不同设计阶段估算精度要求

随着项目设计阶段越来越深入，水务工程投资估算是逐渐精确的，有由粗略

到精细，宏观到微观的特点。

水务工程投资估算精度要求

设计阶段	主要目的	估算依据	精度要求（误差范围）
项目建议书	初步可行性论证	宏观指标、经验数据	± 30% 以内
可行性研究	全面技术经济论证	详细资料、主要工程量	± 20% 以内
初步设计	方案基本确定	设备材料规格、数量	± 10% 以内（设计概算）
施工图设计	最详尽工程细目	所有工程细目	± 5% 以内（施工图预算）

项目建议书阶段的主要目的就是对项目做初步的可行性分析，此时的投资估算误差范围可以较大，一般控制在 ± 30% 之内。本阶段主要是根据宏观指标和类似工程的经验数据来估算，给高层决策者提供项目投资规模的判断依据，决定是否继续下一步工作。

在进入可行性研究阶段时，要进行项目的技术经济论证，投资估算的精度要求也随之提高，误差不能超过 ± 20%。这时就要收集更多的资料，对主要的工程量和设备价格作出大概的估计，形成较为详细的投资估算书，这是项目审批和资金筹措的重要依据，与项目的最终实现息息相关。

初步设计阶段设计方案基本确定，主要设备、材料规格、数量大体清楚。此时所做的投资估算叫做设计概算，精度要求较高，误差范围应在 ± 10% 以内。设计概算是对项目建设投资的最高限额，也是编制固定资产投资计划、签订工程总承包合同的基础。施工图设计阶段编制的是施工图预算，内容最详尽，几乎包含了所有工程细目，精度要求也最严格，误差一般不能超过 ± 5%，它直接用作工程招标投标报价、合同价款的确定以及工程款支付和竣工结算的依据。

（三）投资估算的动态调整与审查

投资估算的动态调整，是项目实施过程中对存在的不确定因素所采取的一种必要的管理手段。水务工程周期长，易受政策法规变化、市场价格波动、地质情况变化、设计优化、自然灾害等各方面因素的影响，静态投资预算不能完全包含整个建设期资金需求。因此必须要有动态调整。调整工作必须按照规定的程序办理，对于超过预备费数额的重大调整，必须经过充分的论证，分析原因，分清责任，重新办理审批手续，保证投资调整的合理性、合法性。

投资估算的审查，是保证投资估算质量，控制工程造价的重要环节。审查工作应该由具备资质、有经验的机构或者专家小组来实施，采取全面审查与重点审

查相结合的方式。审查的内容除了审查编制的依据是否充分、编制的方法是否正确、各项费用的取定是否符合标准、工程量的计算是否正确之外，还要重点审查有无漏项、重复计算、设备材料价格是否反映市场价、预备费的计取是否合理。审查时应该重视方案比选的经济性评价，促进设计优化，从源头上控制投资。同时审查结论要具体，对存在的问题提出切实可行的修改意见并监督落实。经过严格的审查，可以去掉估算中的水分，为后期的投资控制打下良好的基础。

二、成本费用的构成与核算

（一）建设成本运营成本的详细构成

水务工程的成本可划分为建设成本和运营成本两大类，两者共同构成了项目的总成本。

1. 建设成本，也叫初始投资成本，指项目从筹备到竣工验收交付使用之前发生的全部费用。其构成及投资估算中大部分项目重合，具体包括土地获取、勘察设计、环境评价、研究试验等工程建设其他费用；构成工程实体的建筑工程费，即水坝、堤防、管道、厂房等土建费用；水泵机组、处理模块、监测仪表、自动化控制系统等核心设施的设备及工器具购置费和安装工程费。建设期内由于借贷资金所产生的利息，以及为应对不可预见事件而设立的预备费，也属于建设成本的范畴。

2. 运营成本是指项目建成后，为保证其正常运转，发挥设计功能而不断发生的一些费用。这部分成本有长期性、经常性。其主要组成部分有：能源消耗费，特别是电费，是泵站和水处理厂的主要支出；水资源费或原水购买费；药剂费，即水质净化的混凝剂、消毒剂等；维修养护费，即保证设施设备完好、性能的日常保养和计划性大修；人员薪酬及福利，即维持运营团队稳定的必要开支；管理费用，即办公、差旅、培训、保险等行政管理支出；固定资产折旧费和无形资产摊销，即回收初始投资。

正确辨别这两类成本，是后面进行全生命周期成本核算和项目经济评价的前提。建设成本属于一次性投资，决定项目投资规模；运营成本为长期负担，影响项目持续盈利能力以及公共服务定价。

（二）全生命周期成本核算方法

全生命周期成本核算是一种先进的成本管理理念和方法，它把考察的时间范

围从单一的建设阶段延伸到项目的整个使用寿命，把建设成本、运营成本、维护成本直到废弃处置成本都考虑进去。其主要思想就是使项目的总成本最小化，而不仅仅是初始投资的最小化。水务工程中的某些投资较大的方案，会因为后期运营效率高、能耗低、维修费用少，在整个生命周期内表现出更好的经济性。

实行全生命周期成本核算，首先要确定项目的分析周期，一般与工程设计使用年限或经济寿命年限一致。之后需要对分析周期内可能发生的各项成本进行识别和估算，即前期的规划设计费、建设期全部投资、运营期各项开销、项目报废拆除、清理、环境恢复费用等。由于这些成本发生的时间点不同，因此需要用资金时间价值原理，用贴现率将所有的未来发生的成本折算成现值，再相加得到全生命周期成本现值总额。这个过程可以用净现值法来计算。通过对比不同的技术方案、设备选型或者建设标准的全生命周期成本现值，决策者就可以作出更加理性的长期决策，避免只考虑当前的低投资而造成后期运营维护负担过重的情况，从而使得项目的投资效益达到最大。

（三）成本核算的精细化与动态管理

成本核算的精细、动态，就是把成本控制的理念融入到项目实施的全过程之中。这就需要打破传统粗放式成本管理模式，创建起一个反应灵敏、覆盖全面的成本信息系统。精细化管理要点就是将成本控制目标层层分解落实到部门、班组、个人，营造全员参与成本控制的氛围。施工阶段可以设置详细的成本科目，把人工、材料、机械使用等费用和具体的工序、工程量清单项目对应起来，采用定额管理加实际消耗对比的方法，及时发现偏差并进行原因分析。在运营阶段则可对电耗、药耗等主要指标实施实时监测和标杆管理，依靠技术改造、优化调度来降低单位成本。动态管理即对成本数据进行及时的采集、反馈和调整。用现代信息技术建立建筑信息模型、物联网、大数据分析等可以实现项目的成本动态数据库。施工过程中发生的设计变更、材料价格波动、工程进度变化等各种信息都能被及时掌握，并且能快速反映到成本预测和控制系统当中，使管理层能够据此作出相应的调整，从而避免出现成本超支的现象。从静态核算到动态控制、从宏观管理到微观治理，是提高水务工程项目管理水平、实现降本增效的必然选择。

三、经济效益与社会效益评价

（一）财务内部收益率经济内部收益率

财务内部收益率、经济内部收益率都是用来衡量项目的盈利能力，但是由于它们的计算范围、评价角度以及使用目的存在很大的不同，所以被称为两种不同的动态评价指标。

财务内部收益率是从项目投资法人和所有者角度出发，评价项目本身在财务上盈利能力的指标。计算基础是项目的财务现金流量表，效益和费用均以市场价格计算，包括项目带来的全部营业收入和政府补贴，减去项目所有的经营成本、税金和贷款利息。财务内部收益率实质上是使项目在整个计算期财务净现值为零的那个贴现率。当计算出的财务内部收益率高于设定的财务基准收益率（一般为行业平均收益率或者投资者要求的最低收益率）的时候，则该项目从财务上讲是可行的，可以给投资者带来满意的回报。

经济内部收益率是从国民经济整体角度出发，评价项目对整个社会财富增长的贡献。用影子价格代替市场价格来消除市场不完善（垄断、税收、补贴等）造成的扭曲。经济费用效益分析中，税金是社会内部的转移支付，不应列入费用；贷款利息也是资金的社会内部转移，不应列入费用；项目改善环境所产生的效益必须量化后列入经济效益。经济内部收益率是使项目经济净现值为零的贴现率。当经济内部收益率大于社会折现率时，说明该项目有利于国民经济增长，资源的配置是合理的，项目的经济性是可行的。

（二）国民经济评价与社会效益分析

国民经济评价是水务工程项目可行性研究的重要内容，其主要目的不是从项目本身是否盈利出发，而是从整个社会资源最优配置的角度，考虑该项目是否必要、是否合理。它识别项目给整个国民经济带来的全部效益，估计项目付出的全部代价，评价项目的经济可行性。评价方法主要是费用效益分析，即把项目的经济效益同经济费用加以比较，常采用的评价指标有经济净现值、经济内部收益率和效益费用比。与财务评价不同的是，国民经济评价中费用和效益均采用影子价格计算，消除了税收、补贴等转移性支付的影响，考虑了环境影响、就业促进等外部效应，力求反映项目对社会真实资源的消耗和对社会真实福利的贡献。

社会效益分析的范围更加广泛，关注那些不能或者难以用货币来直接度量的

项目的影响。水务工程的社会效益十分显著，是项目综合价值的集中反映，如：

①保障生命财产安全，防洪工程可大幅降低洪水灾害的风险；②提升人民生活品质，供水工程供应安全稳定的饮用水，污水处理工程改善人居环境；③促进社会公平，向缺水或贫困地区供水，缩小地区差距；④维护社会稳定，保障粮食和能源安全；⑤提升区域形象，促进相关产业发展等。

社会效益分析时，常常采用定性描述和定量分析相结合的方式。对可以量化的非市场效益，如减少的疾病发生率、节省的出行时间等，可以采用意愿支付法、人力资本法等将其货币化后，计入国民经济评价体系中。对于无法量化，但是能反映出来的生态景观改善、居民幸福指数提升等非定量效益则采用专家评议、公众调查等方式来进行定性描述、分等级评价，为项目决策提供参考依据，保证决策的全面性。

（三）费用效果分析与综合效益评估

费用效果分析法是经济评价方法的一种，主要用在效益不能用货币来量化的公共项目上，例如环境保护、公共健康等。当存在多个可以满足某种不能用货币来衡量的目标（例如把某条河流的水质提升到某一标准）时，费用效果分析法就是选择最佳方案的有效工具。它并不直接计算效益的货币价值，而是计算单位效果的成本或者单位成本所能获得的效果，从而比较不同方案的效率。例如比较不同的污水处理工艺来达到相同的排放标准，费用效果分析可以选出年均成本较低的工艺。选择单位效果成本最低的方法就是成本效益最高的方法。

综合效益评估是在财务评价、国民经济评价、社会效益分析的基础上，对项目做全方位的价值判断。它是个多维多目标的决策过程。由于水务工程的效益组成比较复杂，既有可以用货币衡量的直接经济效益，也有不能用货币衡量的社会和环境效益，所以单一指标评价很容易出现偏差。综合效益评价一般用多标准决策分析法，即层次分析法、模糊综合评价。这些方法可以采用定性指标和定量指标，也可以给每一个备选方案设定不同的目标权重，对备选方案进行打分和排序。这就使决策过程更为透明、系统，可以全面考虑各个利益相关方的关心，最终选出一个在经济上可行、社会和环境效益也较好的综合最优方案。

第二节 资金筹措与融资模式优化

一、传统融资模式的特点与局限

在我国水务工程的发展过程中，逐渐形成了以政府财政、银行贷款、企业自有资金为主要支撑的传统融资结构。该结构为特定时期我国水务基础设施的迅速普及打下了基础。但是伴随着市场经济的发展以及项目复杂性的增加，其固有的缺陷也越发明显，成为制约行业发展的瓶颈。

（一）政府财政投资的模式与挑战

政府财政投资是水务工程最基本、最重要的资金来源，主要是以一般公共预算、政府性基金预算、专项债券等方式，直接对项目建设和运营进行投资。该模式最大的优势就是能充分体现出水务事业的公共性，对于市场失灵的地方，例如偏远地区的水管铺设、图书馆的民生项目等都能满足基本的需求。财政资金的注入给项目启动和推进提供有力的信用担保和初始动能，在重大自然灾害之后水利设施修缮、饮水安全保障等紧急事务中，其价值是无法取代的。

但单靠财政“输血”的方式也有不能被忽视的弊端。地方政府普遍处于财政收入增长缓慢、财政支出刚性扩大的两难境地，从而使得可用于水务建设的资金十分有限。近年来地方政府债务风险防控加强，大规模水务投资举债空间被进一步压缩。财政资金分配及使用效率低的问题比较突出，僵化的预算程序不能适应项目实施的变化，常造成资金拨付的延误或者资金利用效果不好，从而影响到工程进度。对于一些具备较好现金流潜质的经营性水务项目来说，过度依赖财政资金的供应就会挤占社会资本的参与空间，不能形成多元化的投资结构和市场化运营机制。

（二）银行贷款等债务融资的局限性

银行贷款是水务企业在建设投资高峰期获取外部资金的主要渠道。由于水务项目一般有稳定的现金流预期和低市场风险，所以银行等金融机构常常把其当优良的信贷资产。水务企业利用项目贷款、流动资金贷款等手段来迅速获得大量的建设资金，从而弥补财政资金的不足，加快项目建成投产的进程。该种融资模式操作流程标准化、融资规模大，是支持水务行业规模扩张的主要力量。

但是债务融资的局限性也很明显。水务工程投资大、回收周期长，其债务负

担一般较重，高额的利息支出会不断蚕食企业的利润，增加企业的财务压力。银行贷款大多需要提供足额抵押或者担保，这对轻资产运营或者资产所有权不明晰的水务企业来说，获得贷款的门槛较高。贷款期限结构与项目生命周期相适应的情形也常被遇到，短期贷款用以长期投资的错配状况时有发生，这无疑增大了企业的流动性风险以及再融资压力。过高的资产负债率会限制企业未来融资的能力，在宏观经济环境或者金融政策发生不利变化的时候，就会把企业推向偿债危机的边缘。

（三）企业自有资金投入的约束

企业自有资金主要是通过企业的日常经营收益积累、股东投入的资本金以及资产处置收入等途径取得，是企业正常运转和支撑部分小型更新改造项目的资金保障。使用自有资金投资，无需融资成本，也无需还本付息，可以提高企业财务稳健性以及经营自主性。项目决策时，自有资金的运用更灵活迅速，可及时对市场的变化和技术更新做出回应。

但是，对于投资动辄上亿、数十亿的水务大中型工程来说，企业自有的资金所能起的作用是微不足道的。由于水务行业属于准公益性行业，服务价格受到政府管制的，利润率普遍较低，利润积累缓慢，不能支撑大规模资本支出。即使是经营状况较好的大型水务集团，其自有资金也要先保障日常经营、技术研发和人员开支，可用于新增项目的资金很少。过度依靠自有资金，会严重拖慢项目建设的进程，错失发展机会，甚至造成企业在激烈的市场竞争中处于不利的地位。

二、新型融资模式的探索与应用

传统融资模式碰到瓶颈之后，水务行业就开始积极寻找并引进了许多新的融资方式和模式。创新实践目的在于撬动更多社会资金，改善项目投资结构，提高资金利用效率，提升项目经营管理水平，使水工程持续发展的活力得以增强。其中最具有代表性的就是 PPP 模式、资产证券化以及基础设施 REITs。

（一）PPP 模式的运作结构与风险分担

政府与社会资本合作，近几年来，在基础设施领域，特别是水务行业，得到了普遍推行。它的目的就是通过社会资本参与公共服务的设计、建设、融资、运营和维护来实现政府与市场优势互补、利益共享、风险共担。水务 PPP 项目中政府授予社会资本特许经营权，社会资本方成立项目公司具体实施项目，通过使

用者付费或者政府付费等方式回收投资并获得合理的回报。合同期满后，项目资产一般无偿或者有偿地移交给政府。

PPP 模式最突出的特点就是风险分担的设计。以合同形式将不同的风险转移给最能控制该风险的一方，这是提高项目成功率的一种重要方式。

PPP 项目风险分担表

风险类型	政府方承担的风险与责任	社会资本方承担的风险与责任
政策与法律风险	政策法律变更风险	政策法律变更风险对商业运营的影响
规划与审批风险	规划调整风险、审批延迟风险	因自身原因导致的建设审批延误
支付与信用风险	政府付费支付违约风险	融资成本波动风险
建设与运营风险	特定外部因素导致的建设运营风险	建设工期延误与成本超支风险、运营效率不达标风险、技术落后风险
市场与需求风险	特殊情况下的需求保障	市场需求变化风险
其他责任	创造稳定、透明、可预期的政策和市场环境，保障项目合法性，按约定付款。	发挥专业技术与管理优势。

从上表可知，PPP 模式通过合同的约定把风险合理的分担出去。政府方的主要职责就是创造一个稳定的、透明的、可预期的政策与市场环境，保证项目的合法性并按照约定付款。社会资本方主要承担融资、建设、运营和技术等各方面的商业风险，包括融资成本的波动、建设工期延误和成本超支、运营效率达不到要求、技术落后和市场需求的变化等。PPP 模式把解决政府短期财政压力当作切入点，更多地注重市场化竞争与激励，有利于改善水务工程全生命周期的管理效率与运作水平。

（二）资产证券化在水务领域的应用

资产证券化就是将缺乏流动性但是有可预期稳定现金流的资产，经过结构化设计后，打包成可以在金融市场出售和流通的证券的过程。水务方面，供水收费权、污水处理服务费收费权等是理想的基础资产。水务企业（原始权益人）将这些可以产生稳定收入的收费权转让给一个特殊目的载体，SPV 以此为基础发行资产支持证券，向投资者募集资金，将募集所得支付给水务企业，实现存量资产的盘活和未来收益的提前变现。

该模式为水务企业开辟出一条新的融资渠道，不再完全依靠传统的银行信贷，可以直接从资本市场取得资金。企业利用 ABS 把存量项目中沉淀下来的资金释

放出来，用于新的项目建设或者还债，从而改善自身的资产负债结构，提高资产的流动性以及使用效率。投资者由于水务收费权作为基础资产的 ABS 产品具有稳定现金流、低风险等特点而对水务收费权作为基础资产的 ABS 产品感兴趣。首创股份污水处理 PPP 项目收费收益权 ABS 项目属于行业标杆案例，很好地体现了该工具盘活存量资产、助推 PPP 项目发展的巨大潜能。

（三）基础设施领域不动产投资信托基金

基础设施领域不动产投资信托基金是标准化的金融产品。其通过发行收益凭证来募集资金，用这些资金去投资、持有已经成熟并可以产生稳定现金流的基础设施项目，并且把大部分收益（一般要求不低于 90%）按照比例分配给投资者。REITs 作为国际资本市场上成熟的工具，在近几年开始在中国进行试点，并且迅速成为盘活基础设施存量资产、建立投融资良性循环的重要一环。由于水务资产运营稳定、现金流可预测、与宏观经济周期的相关性小等特点，水务项目是发行 REITs 的优质底层资产。

水务企业通过发行公募 REITs，将已建成并投入运营的供水厂、污水处理厂等项目的部分或者全部股权公开上市交易，从而实现资产真实出售、风险真实转移。这是一种权益性融资，有利于企业由“重资产”模式转向“轻资产”模式。募集来的资金可以用来建设新的项目，形成“建设、运营、成熟、上市、再投资”的滚动发展模式，很好地解决了水务行业长期以来投资回收期长、资金沉淀严重的问题。富国首创水务 REIT 是市场首只水务类公募 REIT，给行业后续发展提供宝贵的经验借鉴，也为投资者打开分享优质水务资产增值红利的大门。

三、融资方案的优化决策

随着融资手段的多样化，水务工程的融资选择也不再局限于一条路，而是变成一个多维、复杂、把成本、风险、效率和战略目标结合在一起的决策过程。科学合理的融资方案优化决策是保证项目顺利推进，提高企业核心竞争力基本条件，需要对各种模式做详细比较，制订出最恰当的资本结构和风险管理对策。

（一）不同融资模式的成本与风险比较

选择最好的融资方式首先要认清各种融资方式的成本和风险，并将它们量度化。从融资成本的角度看，政府财政资金和企业自有资金几乎没有直接的财务成本，但是其机会成本和稀缺性很高。银行贷款成本是显性的，主要是利息支出，

银行贷款的利息高低是由基准利率、企业的信用等级、项目的风险等很多因素决定的。PPP 模式的综合成本比较繁杂，既有社会资本所要求的合理投资回报率，也有项目全生命周期内各种交易成本，比如咨询费、法律费、监管费等。资产证券化、REITs 的发行成本主要是承销费、评级费、律师费等，其资金成本是由市场决定的，是投资者对资产质量及未来现金流预期所决定的。

传统模式的经营风险主要来自政府和企业的自身，PPP 模式是通过合同把风险分担到政府与社会资本上。ABS 和 REITs 可以有效地将项目的运营风险、市场风险转移到资本市场上众多的投资者那里，实现风险的社会化分散。

（二）项目资本结构与融资方案设计

项目资本结构设计属于融资方案改善的重要部分，它指的是一种项目总投资当中股权资金和债务资金所占比例。一个合理的资本结构应该在有效控制财务风险和融资成本的基础上，最大程度上提高企业或者项目的价值。水务工程融资方案设计，应当坚持分层匹配、组合使用的原则。完全公益性、不能产生经营性现金流的部分，应该以财政资金投入为主，保证其公益性。对于收益不能覆盖成本的准经营性部分，可以考虑财政补助与债务融资相结合或者 PPP 模式下的可行性缺口补贴。而对那些能产生稳定、充足现金流的经营性项目来说，应优先使用市场化融资手段，即项目贷款或者发行债券，并且通过资产证券化或者 REITs 来实现滚动开发。

设计融资方案的时候还要考虑到项目所处的生命周期阶段。项目建设期资金需求大，风险高，可以引进实力强的、抗风险能力强的战略投资者，或者采用股权融资的方式来筹措资金。项目进入稳定运营期以后，现金流趋于稳定，风险降低，这时更适合使用成本较低的债务融资，或者通过 ABS、REITs 等方式进行再融资，置换掉早期高成本的资金，降低整个项目的财务负担，回笼资金投入新的项目。

（三）融资风险的识别与应对策略

任何融资活动都有风险，对这些风险进行前瞻性识别、评价并加以有效控制，是保证融资成功的重要保证。水务项目的融资风险是多元的。

1. 政策与法律风险：指由于国家宏观政策、财税制度、行业监管、环保标准等的变化而使项目融资环境或者盈利能力产生不利的影响。应对之策为加强政策研究、同政府部门保持密切联系、在融资合同中加入因政策变化造成调价或者补偿的条款。

2. 市场风险、利率风险：市场风险从广义上讲是市场中融资成本的变动，从具体到利率风险，是指利率的变动会导致公司因债务融资而支付的利息发生变化。企业可以采取固定利率和浮动利率相结合的方式融资，也可以通过利率互换等金融衍生产品将融资成本固定。

3. 信用和再融资风险：信用风险是指企业经营状况恶化或者负债过高而不能获得必要的融资。再融资风险就是指债务到期时，不能以合适的条件取得新的融资来偿还旧债的风险。企业要依靠稳健经营、改善财务结构、维持良好的银行关系和信用记录来加以防范，提早安排再融资。

4. 操作和管理风险：即融资过程中由于信息不对称、谈判能力不足、合同条款设计不当或者内部管理疏忽等原因所造成的风险。应对措施有聘请专业财务顾问与律师，创建标准融资管理程序，加大内控及审批力度，保证融资过程中每一步都合乎规则。

第三节 全生命周期成本管理

一、全生命周期成本管理理念

（一）从建设成本到全生命周期成本

传统的水务工程成本管理只重视建设阶段的一次性投入，即工程建设成本，容易忽略项目建成后长时间运营、维护、改造直至报废所产生的费用。形成一种重建设、轻运维的模式，造成项目总成本超支，表面上看建设投入低，实际上后期运营维护成本高，工程整体经济性大减。

全生命周期成本管理理念冲破了这个局限，它把眼界扩展到工程的全部生命周期，把建设投资、运行维护成本、修理更新成本、最终处置成本以及有关的环境和社会成本等，全都包含在同一个管理范畴之内。决策者从项目启动之初，就必须对未来几十年里会发生的所有支出做出综合的权衡和考虑。这就促使管理者在规划设计阶段就要预见到运营阶段的能耗、药耗和维修频率，从而设法降低这些运营成本，在建设成本和运营成本之间找到一个最佳的平衡点，最终实现项目全生命周期成本最小化、价值最大化。

（二）LCM 在水务工程中的应用价值

全生命周期成本管理在水务工程中综合效应和战略意义都非常明显。它是成本控制的一种有效方式，也是提高项目投资决策科学性和可持续性的一种重要保证。主要应用价值为如下几个方面，共同促进水务事业高质量的发展。

1. 改善投资决策以及设计方案。在项目可行性研究以及初步设计期间，对各种方案（不同处理工艺、管材、设备选型）的全生命周期成本展开量化对比分析，有益于避开那些初期投资看起来较低，不过后期运营成本较高的方案。有利于选出真正经济性好的最佳设计方案，从源头上控制项目的经济效益。

2. 降低项目的全生命周期成本，全生命周期成本管理的主要目标就是使项目的全生命周期成本最小化。通过前瞻性规划来防止由于短期行为而引发的长期成本急剧增加。例如初期投资选择高效节能的设备，虽然前期的投资较大，但是后续几十年的运行过程中可以节省大量的能源费用，从项目的总拥有成本上来说说是显著的降低。

3. 提高资产管理的效率和可持续性。把运维成本放在设计初期考虑进去，促使工程设计更加重视设施的可靠性、耐久性以及可维护性。这有益于制订更加科学合理的维修保养计划，由被动抢修转向主动预防、预测性维护，进而切实延长资产使用寿命，保障水务设施长久稳定运行，服务不断线。

（三）LCM 的实施框架与组织保障

要成功推行全生命周期成本管理，必须创建起清晰而稳定的执行架构，再配合以强大的组织保障举措，这样才能保证理念得以真正落实，并且渗透到项目的全部阶段当中。这不是财务部门的工作，是项跨部门、跨阶段的系统工程。

实施框架一般从顶层设计入手，确定全生命周期成本管理的目标、原则和大概的流程。要创建起一套涵盖规划、设计、创建、运作、退役所有时期的成本数据搜集、归类、剖析的标准体系。即确定各个阶段的成本构成要素，统一数据格式和核算口径，为后面成本建模、分析、决策提供高质量的数据基础。技术层面要开发或者引入专门的成本分析模型和软件工具，给各种方案的成本效益分析，敏感性分析和风险预测赋予支持。

组织保障是保证实施框架正常运转的。必须得到管理高层的坚决支持，把全生命周期成本管理的绩效作为项目考核的主要指标体系，自上而下推动。应该建立一个跨部门的成本管理工作小组，从规划、设计、施工、采购、财务、运营等

各方面挑选专业人员，统筹整个生命周期内所有的成本管理工作。培训与文化同样不能忽视，要使所有的项目参与者明白并接受全生命周期成本理念，自觉在本职工作中落实成本优化原则，形成人人参与、齐心协力的氛围。

二、建设阶段的成本控制

水务工程的建设期间是成本产生最密集的时段，也是成本管控的重要时期。此阶段成本控制的好坏直接决定项目初期投资的大小，对以后运营成本也有影响。因此，必须对设计、招投标、施工等各个环节进行系统的管理。

（一）设计优化对建设成本的影响

设计阶段给水务工程成本控制留下最大幅度的改善余地，据估计设计阶段对工程总造价的影响程度可以达到 75% 以上。这一小处改变，都会在后来的建造及运作里引发成本发生巨大增减的情况。因此做好精细化设计优化以控制建设成本，成为实现项目投资效益最大化的首要措施。

设计的改进主要是工艺路线的科学选择。根据原水水质、处理目标及地方条件，采用价值工程理论，对各种可行的处理工艺方案进行技术经济综合评价。不仅要比较建设投资，还要比较长期耗能、用药、维修费。在选择材料和设备的时候，不能只看价格，要从性能，使用寿命，能效，后期维护是否方便等各个方面考虑，选择全生命周期成本最低的材料和设备。比如使用更耐腐蚀的管材，虽然一开始的采购费用稍微高一些，但是可以减少以后更换和维修的费用。

具体工程设计时，优化水力高程、减少管线长度与弯头、合理安排处理构筑物，可削减土方开挖、结构建造、管道安装等工程量，节约不少建设资金。标准化设计、模块化的设计可以提高设计效率，缩短工期，降低施工难度及建设成本。用建筑信息模型等数字化技术进行协同设计、碰撞检测，可以在图纸阶段发现潜在的施工冲突，有效避免施工阶段因设计错误、漏项造成返工、变更，无疑是对建设成本最直接、最有效的控制方法之一。细致的地质勘察和评价十分重要，准确的地质数据是进行合理的基础设计、防止施工过程中出现意外、避免地基处理额外费用的前提，可以有效地规避重大成本风险。

（二）招投标与合同管理中的成本控制

招投标与合同管理，为设计与施工搭建起沟通的桥梁，决定成本目标、锁定价格风险、理顺权责。这个过程的严谨性、科学性，直接决定着建设成本能否得到控制并控制在预算内。

招标阶段，高质量的招标文件是基础。工程量清单要准确、全面，详细、无歧义地表述工程范围和技术要求，最大限度地降低承包商报价模糊的空间和将来产生争议的可能性。选择合适的评标方法也很重要，综合评估法比经评审的最低投标价法能更好地平衡价格、技术方案、工期、质量、投标人信誉等因素，选择综合实力最强、履约风险最小的承包商，避免出现中标靠低价、赚钱靠变更的现象。

合同管理就是把招标成果转化为具有法律效力的成本控制手段。合同条款要严密完备，明确双方权利义务，以及风险分担，工程范围，质量标准，计量支付，变更程序，索赔，奖惩等主要条款要清楚。根据工程的复杂程度、设计深度以及风险的确定性，选择恰当的合同类型，固定总价合同、单价合同或者成本加酬金合同，以此对项目成本予以合理的激励与约束。工程施工期间，业主方应设立专门的合同管理小组，对工程进度、付款申请、设计变更、现场签证等进行严格审核，保证所有的费用发生都有合同依据，防止出现成本超支的情况。

（三）施工过程中的变更与索赔管理

施工过程是水务工程建设成本动态变化的集中反映期，变更和索赔管理的好坏是防止成本超支的最后一道防线。工程变更指在合同履行期间对原定的工程范围、技术标准、施工条件等做出的任何改变。变更发生具有客观必然性，设计深化、地质条件变化、业主需求变化等，但是由于管理不善造成的变更往往是造成成本失控的主要原因。因此必须建立严格的变更管理制度。任何变更提出之后，都要做必要性、可行性论证，对其可能造成的成本、工期影响进行全面评价。必须遵守先审批后执行的规定，杜绝口头指示及现场擅自更改情况发生。

索赔管理是对于由于非承包商的原因（业主指令、设计错误、不可预见障碍等）而导致的额外成本或者工期延误所做的处理。成功的索赔管理应该坚持公平合理、有据可依的原则。当承包商提出索赔要求的时候，业主方应当指派专人根据合同条款及有关证据认真进行审核，对其中合理的部分予以认可，而对不合理的地方则应当据理力争。业主方应该主动管理可能引起索赔的各种风险因素，加强现场协调、及时提供图纸和支付工程款等方式减少索赔事件的发生。

为了有效的管理变更和索赔，必须对过程文档进行记录和管理。所有有关变更和索赔的指令、会议纪要、现场记录、往来函件都应妥善保存，构成完整的证据链。这既是后期进行成本核算和责任划分的基础，也是发生合同争议时保护自

身合法权益的保障。通过建立主动、规范、及时的变更和索赔管理制度，使施工阶段成本风险控制在可以接受的范围内。

三、运营阶段的成本控制

水务工程进入运营期以后，成本支出模式由以前的短期、集中式的建设投资变成长期、分散式的运营维护成本。本阶段的成本控制关系到水务企业是否能够持续盈利，公共服务是否能够持续提供，不能轻视，必须采取系统化、精细化的管理方式。

（一）能耗药耗维修成本的控制

能耗、药耗、维修费用为水务工程运营成本的三大构成部分，有效控制这三者是水务工程运营阶段降本增效的主要工作。

能耗控制主要是对水泵、鼓风机等耗能大的设备进行控制。建立能耗监测系统，对每一个工艺单元、每一台重要设备用电量实时跟踪，就可以准确地发现能耗异常点。水泵启停组合以及运行频次依靠大数据分析来确定，采取“削峰填谷”的调度办法，在夜间低谷电价时段实施抽水或者蓄水，能够有效地缩减电费开支。除了做好设备的定期效率评价和节能改造，淘汰落后低效的设备也是控制能耗的最根本的方法。

药耗成本的控制依靠精准投加，传统的经验加药方式容易造成药剂的浪费和二次污染。利用在线水质检测仪表、智能加药系统等设备根据进出水水质的变化来自动、准确地调节混凝剂、消毒剂等化学药品投加量，既能保证处理效果又能最大限度地减少药剂成本。

维修成本管理的主要任务就是从事后补救转向事前预防。建立完善的设备资产管理系统，制订合理的预防性维护计划，定期检查重要的设备并做好保养工作，及时更换破损零件，减少意外的故障发生，节省维修费用、生产损失。利用振动分析、红外热成像等状态监测技术进行预测性维护，在设备出现故障征兆的早期就能介入维修，达到最大的维修效益。

（二）人力资源成本的优化管理

人力资源成本是水务企业运营成本的重要组成部分，做好人力资源成本的管理对提高企业整体经营效率、经济效益起到决定性的作用。优化人力成本不是简单的减员，而是在科学的组织架构设计、人员配置、技能提升、激励机制的基础

上实现人尽其才、事得其人，达到投入产出的最优。应该对已有的岗位职责、工作流程进行梳理分析，去除冗余的环节、冗余的岗位，使组织结构扁平化，提高决策效率和执行效率。流程再造以后，人员配备会更加精干高效。

推行自动化和智能化是一种有效的途径来达到人力资源优化配置。技术发展之后，越来越多的巡检、加药、阀门控制等工作可以由自动化设备和智能控制系统来完成。工作人员不再需要长时间做这些体力劳动了，而是可以转向做一些具有一定技术含量的监控、分析、管理工作。像用无人机去巡视管道，用机器人去做管道检测这些事情，可以很大程度上提升工作的效率与安全水平，也能很好地控制住人力成本上涨的趋势。

合理的绩效考核和激励机制也十分重要。将成本控制、运营指标达成情况等量化目标和员工的薪酬、职业发展挂钩，可以调动员工节能降耗、挖潜增效的积极性。同时加强员工的专业技能培训，造就一批一专多能的复合型人才，提升劳动生产率，是人力资源成本优化的内在要求。采取综合性的办法，在不影响服务质量的情况下实现人力成本的合理控制和持续改善。

（三）基于数据驱动的精细化成本管控

在数字化的时代，依靠数据驱动的精细化成本控制，是水务工程运营环节实现革命性降本增效的最终手段。其要义在于利用物联网、大数据、人工智能这些现代信息技术，把运营过程中产生的海量数据转变成推进成本改善的洞察与决策，进而达成从“依靠经验管理”到“依靠科学管理”的重大转变。

在水源地、管网、泵站、水厂等重要节点布置大量的传感器、智能仪表、在线监测设备，形成全方位的实时数据采集网络。流量、压力、水位、水质、设备状态、能耗等数据一起组成了水务系统运行状况的数字影像，是实施精细化管控的数据基础。

把大量的数据汇聚到一个数据平台，利用大数据分析以及机器学习的方法来挖掘，就能找出传统办法不容易发现的改善成本的好机会。利用管网压力、流量等数据建立漏损检测模型，可以准确找到漏损点，减少产销差，节约宝贵的水资源、制水成本。采用水力模型以及需水量预测模型，能够达到全网智能调度的效果，进而优化泵站的运行策略，在保障供水压力满足需求的情况下，使系统能耗最小。按照进水负荷预测模型来精确调节曝气系统和加药系统，可以有效降低能源、化学品的消耗，实现处理过程成本最低。

数据驱动的决策比传统的依靠个人经验的决策更加科学、准确。可视化成本分析仪表盘的建立，可以使管理者随时了解各个成本指标的变化情况，跟踪各项措施的执行效果，对成本做多角度、深层次的钻取分析，达到全面、动态的成本控制目的。很明显，用数据驱动精细化管理的水务行业取得了以前所未有的管理成效。

数据驱动的精细化成本管控关键技术与应用场景表

关键技术	主要功能与优势	应用场景举例	预期效益
物联网传感器网络	实时、全面采集运行数据，构建数字映像	水源地、管网、泵站、水厂等关键节点的数据采集	提升数据实时性与全面性，为决策提供基础
大数据分析 with 机器学习	深度挖掘数据，发现潜在成本优化机会；建立预测模型	漏损检测、供需预测、设备故障预警、能耗分析	精确识别问题，优化资源配置，减少浪费
数字孪生与水力模型	模拟水务系统运行状态，优化调度策略	全网智能调度、泵站运行优化、水质模拟	降低能耗，提高供水稳定性与安全性
智能控制系统	基于数据分析结果，实现自动化、精确化控制	智能加药、曝气控制、阀门远程调控	节约药剂与能源，提高处理效率与达标率
可视化仪表盘与 BI 工具	直观展示成本指标，辅助管理者快速决策	成本构成分析、绩效追踪、异常预警	提升管理效率，支持科学决策，实现动态管控

第四节 水务工程经济风险分析与应对策略

一、宏观经济环境风险

（一）利率汇率波动对融资成本的影响

水务工程项目资金投入量大，初期投资大部分需要依靠长期贷款等融资方式来完成。利率的变动直接关系到项目财务成本的命脉。市场利率步入上升通道的时候，项目债务利息负担加重，尤其对于采取浮动利率贷款的项目而言，其还本付息压力剧增，于是项目的盈利空间被压缩，严重的还会威胁到项目的财务可持续性。如果利率的上漲幅度超出项目可行性研究时的预测范围，就会使财务评价指标变坏，降低项目投资的吸引力。

对于涉及到国外采购或者引进外资的水利工程来说，汇率的波动也是不能忽略的一种风险。项目如果从国外引进大型设备、关键技术或者材料，本币贬值将

使采购成本被动上升。当项目资金中有国外贷款时，本币兑换成外币的成本也会随之增加。该类汇率风险突发性强、难以预料，不但影响建设期投资成本，还会给运营期设备保养和更换成本造成长期危害，是项目财务计划中的一个极难预测的变量。

（二）通货膨胀对工程成本的影响

通货膨胀属于普遍存在的经济现象，对建设周期较长的水务工程来说，就形成了持续的成本侵蚀风险。通货膨胀表现为整个社会物价的上涨，工程建设所必需的各种要素成本也不断攀升。钢材、水泥、管材等大宗建筑材料价格上涨，会直接导致工程直接成本增加；劳动力成本、设备租赁和购置费用的上升，又会加重项目的财务负担。

因为项目的工期很长，通胀会不断地使总的投入大于最初的估算。对于采用固定总价合同的工程，由于成本的急剧上涨，承包商有可能出现亏损的情况，进而影响到工程的质量以及进度；在非固定价格合同中，由于成本超支的压力最终会传导到项目业主。由通货膨胀造成的成本上涨不是线性的，受到很多因素的影响，因此成本预测和控制难度加大。缺少足够的预备费和有效的价格调整机制，项目会资金不足从而影响工程的顺利施工。

通货膨胀对于项目的运维期也有影响。备品备件的采购成本、维护人员的工资、水处理药剂等消耗品的价格都会随着通胀水涨船高。在制定水价、测算运营收益的时候要考虑到通货膨胀长期的影响，使项目投入使用后可以形成财务上的良性循环。

（三）宏观经济政策调整风险

水务工程牵涉到国家宏观经济政策，政策的变动存在系统风险。财政政策的变动，即政府对基础设施投资补贴力度的增减、税收优惠政策的多少、专项资金支持规模的增减，都会直接决定项目的资本金来源以及项目整体的盈利水平。国家为了抑制经济过热而采取紧缩的财政政策时，原来计划中的财政支持可能会被削减或者延迟，项目融资计划也会随之受阻。货币政策调整，即中央银行提高存款准备金率、减少信贷额度来控制货币供应量，会使项目获得银行贷款的难度增大、融资成本提高，对依靠间接融资的水务项目来说，影响尤其大。和水务业相关的各种产业政策、环保政策、土地政策等的变化也同样会成为风险来源，严格的环保标准会要求项目增加技术改造、设备升级的资金投入，因此也会产生额外的成本。

二、项目层面经济风险

在水务工程实际推进过程中,除了要面对由外部宏观环境因素所带来的风险,还必须有效地管理项目内部可能出现的各种经济风险。这些风险同项目的勘察设计、建设管理、成本控制以及未来的运营息息相关,是决定项目成败的直接因素,对它们的管理与控制就是项目管理的主要任务。

(一) 投资超支风险与应对

投资超支属于大型工程项目的经济风险中最普遍的一种,严重的话有可能造成项目中途停止。水务工程投资超支的原因很多,前期工作疏忽,地质勘察不到位,设计深度不够,工程量估算严重失实,实施过程中遇到不可预见的地质条件,设计变更,材料价格暴涨,管理不善导致窝工,返工等等。这些因素叠加起来就很容易造成实际投资超出概算控制。

为有效应对投资超支风险,必须采取全过程、多维度的控制策略。

1. 前期工作深入化、决策科学化,在项目决策阶段就要投入足够的时间和精力做详尽的可行性研究,尤其是地质勘察要细致全面。设计阶段要实行限额设计,把投资控制的思想贯穿设计全过程,通过多方案比选和价值工程分析,从源头上优化设计,避免不必要的浪费。

2. 加强合同管理及过程监督,用严格的合同条款来明确甲乙双方在风险分担、价格调整、工程变更等各方面的权利义务。施工过程中,健全预算执行监督分析制度,严格工程进度款支付、设计变更审批、现场签证管理,使每一笔款项都能被用到实处。

3. 建立投资风险准备金制度,在项目总投资中合理、足额地预留不可预见费(预备费),作为设计变更、材料价格波动、意外情况发生等的专项资金储备。这笔费用的支出要严格按照规定进行审批,专款专用,提高项目抗风险的财务弹性。

通过以上措施的综合运用,可尽可能将项目投资控制在批准的概算内,确保项目顺利建成。

(二) 运营收入不及预期的风险

水务工程建成后的主要目的是发挥它的社会效益和经济效益,稳定的运营收入是实现可持续发展的经济基础。运营收入低于预期的风险,即项目建成之后实

际的售水量、水费回收率或者核定的水价低于可行性研究报告预测的数值，造成项目现金流不足，不能支付运营成本，也无法偿还贷款本息。

造成该风险的因素很多。从需求方面看，区域经济发展放缓、人口增长低于预期或者节水技术的推广，都会使实际用水需求的增长放缓。管网漏损率过高、水费定价方式僵化、水价调整审批程序繁杂且受民意影响、部分用户恶意拖欠水费等，都会直接导致项目营业收入减少。供水项目的水价确定及调整过程较为复杂，经常滞后于成本的上升，容易出现成本倒挂的现象，对水务企业正常经营产生严重的影响。

应对风险，在项目规划阶段就需要对市场需求做出谨慎的预测，并且对预测结果做多种情况下的敏感性分析。项目运营期间要加快智慧水务创建进程，依靠现代化的管网监测体系缩减漏损率，改进供水效能。积极同政府部门沟通，促成科学、透明、联动的水价调整机制的形成，使水价能够及时反映供水成本的变化。就水费回收而言，需要通过法律手段并改善客户服务来建立有效的催缴体系，保证应收账款的及时收回，保证项目的健康现金流。

（三）资金链断裂的风险防范

资金链是水务工程项目生命线，一旦断裂，不管项目进行到哪一步都会出现停工的风险，甚至引发一系列合同纠纷、法律诉讼，后果是灾难性的。该风险指的是项目建设或者运营过程中由于资金筹集不足、款项支付延误或者意外支出大幅增加，造成项目可用资金不能满足即期支付需要的情况。触发原因有资本金不能按时到位、银行贷款审批受阻、财政资金拨付延迟、工程款支付纠纷、投资严重超支或者运营收入骤减等。

防范资金链断裂风险的首要任务就是制定稳健、多元、有前瞻性的融资计划。项目启动前必须保证资本金足额按进度到位，这是之后融资和项目启动的前提。融资方案不能仅依靠某一种渠道，应该尝试采用政府专项债、政策性银行贷款、商业银行贷款、社会资本（PPP 模式）等多种方式相结合的融资结构，以分散融资风险。

细致的现金流控制是应对资金链风险的技术手段。项目法人应当编制年度、季度或月度的资金使用计划和现金流量预测表，随时掌握项目的资金进出状况。对未来资金需求做出准确的预估之后，就可以提前开展融资活动，保证资金的连

续性。必须留有流动资金储备，或者同金融机构签订备用信贷额度，用作突发大额支出的“安全垫”，保证项目在遭遇意外冲击时还具备基本的支付能力，从而有效防止资金链突然断裂。

三、经济风险的应对与转移

（一）风险规避与风险缓解策略

风险规避是风险应对中最直接的方式，主要是改变项目计划或方案，从根本上消除某个或者某些特定风险发生的可能性，或者完全避开该风险的影响。项目选址时，如果发现某地地质灾害风险很高，处理成本很大，项目决策者就会放弃该场址，选择去寻找更安全的地方，这就是风险规避。从技术方案选择上看，如果某项创新技术有潜在优势但是还很不成熟，失败的风险较大，那么项目就会选择采用比较成熟、可靠的传统技术来避免由于技术失败带来的经济损失。风险规避策略一般用在发生概率高、后果严重的时候，它的决策成本是放弃可能获得的更高收益。风险缓解并不是要完全消除风险，而是降低风险发生的概率或者减轻风险发生时造成的损失。对利率变动风险采取固定利率贷款合同，使用利率互换等金融衍生产品锁定融资成本；对通货膨胀风险在工程合同中加入价格调整条款，对材料价格变化超过一定幅度进行相应调整。

（二）风险自留与风险转移

风险自留，也叫风险承担，即项目主体在识别、评估风险之后，主动选择自行承担风险带来的后果。这种情况一般适用于风险发生的概率小，损失不大或者控制风险所花的成本大于风险带来的损失。风险自留可以是无计划的被动接受，也可以是有计划的主动承担。积极的风险自留，即设立专门的风险准备金或应急基金来应对可能发生的损失，这就是“自我保险”。施工过程中出现的小范围塌方、小型设备故障，项目部用预备费来修复、处理，这属于风险自留。

风险转移就是通过合同约定或者购买保险产品等方式，把风险的财务后果转移给第三方来承担。这是应对重大风险的有效方法。保险是最常见的风险转移方式，为项目投保建筑工程一切险、安装工程一切险、第三方责任险等，在自然灾害、意外事故造成损失时，保险公司赔付大部分经济损失。另一种风险转移的方法就是通过合同来约定。在设计、采购、施工总承包模式中，业主可以采用固定总价合同把设计风险、施工风险、价格波动风险大部分转给总承包商。政府与社

会资本合作项目可以利用特许经营协议把项目运营风险、市场风险大部分转移给社会资本方。

（三）建立经济风险预警与应急机制

对经济风险实行动态管理并加以主动控制，就必须创建起一套系统的风险预警和应急响应机制。其目的就是通过对风险进行持续监控来实现对潜在危险的及时发现，在风险事件发生的时候可以立即启动应急预案，有条不紊地进行应对，从而将损失降到最低。创建起这套机制，项目才算是由被动应对风险转变为主动管理风险。

建立有效的预警与应急机制，需要完成以下关键工作：

1. 创建预警指标体系：设计一套科学的项目中所会出现的各种经济风险的监测指标。这些指标应该具备敏感性、代表性，可以选取关键建材市场价格指数、国家基准利率和汇率变化趋势、项目投资完成进度与资金支付进度的偏差率、月度运营收入达成率等。对于上面的指标进行实时的跟踪以及周期性的分析，当某一个指标超出事先设定的阈值的时候，预警系统就会被触发。

2. 确定预警响应流程，按照风险指标偏离程度设置蓝、黄、橙、红等不同的预警级别。为每一等级制定出相应的报告途径、决策人以及应对措施。例如黄色预警只需要项目经理关注并作出相应调整，红色预警就要上报公司决策层并且立即启动高等级应急预案。

3. 制定应急预案：对资金链断裂、重大投资超支、经营收入大幅下滑等重大经济风险要事先制定详细的应急预案。预案要明确应急组织的组成、职责、信息沟通渠道、资源调配方案、具体的应对步骤和善后工作流程。另外，要定时安排有关人员开展预案桌面推演或者模拟演练，考察预案的可行度，加强团队的应急处置能力。

以上经济风险的应对与转移策略，可见下表：

经济风险应对与转移策略分类表

策略类别	主要特点	适用场景	具体措施举例
风险规避	消除或避开风险源，避免发生	发生概率高、后果严重且有替代方案的风险	放弃高风险选址；选择成熟可靠的技术方案
风险缓解	降低风险发生概率或减轻损失	无法完全规避但可控的风险	固定利率贷款；合同中设价格调整条款；改善安全措施
风险自留	主动承担风险后果，或被动接受	发生概率低、损失小，或处理成本高于损失的风险	设立风险准备金；动用预备费处理小型故障
风险转移	将风险财务后果转移给第三方	重大风险或自身无法承担的风险	购买保险（工程险、责任险）；EPC 总承包模式；PPP 模式

通过上述策略灵活使用并加以系统管理，可以使得水务工程项目的经济风险得到更好的应对，保证水务工程项目的建设及运营顺利开展。

第七章 水务工程环境影响与社会效益评估

第一节 生态环境影响评价方法

一、水文水资源影响评价

（一）对水文情势的改变及影响分析

水务工程，尤其是水库、大坝、引调水工程，对河流天然水文情势的改变非常大。水库修建之后，原本奔腾不息的河流变成了流速缓慢的库区，造成下游河道径流过程变缓，洪峰流量减小，枯季流量增大。这样的改变在防洪、供水上是有利的，但是对生态系统的影响也不能小觑。它会直接导致河流水力学条件改变，也就是水位、流速、水面比降发生变化，从而影响到河床的冲淤状况。

径流过程的改变还会造成下游河道形态的改变。由于上游泥沙被水库截留，下游河段因清水下泄而产生的持续冲刷，会引起河床下切、岸坡失稳。对于依靠特定水文脉冲（洪水泛滥）进行繁殖或者生长的动植物而言，水文情势的改变会破坏它们生命周期里重要的环节，造成种群数量下降。河漫滩植被更替、鱼类产卵信号等都与天然水文节律息息相关。

评价工作要依靠水文模型，精细模拟工程运行前后不同时空尺度的水文要素变化情况，涉及流量，水位，流速，输沙率等。用比较分析法来定量地衡量出工程对水文节律、洪峰特征、水沙关系的影响程度，并依据河流地貌学、生态水力学等知识深入剖析这些变化会对下游河道物理形态、河口三角洲发育以及江湖关系造成的一系列连锁反应，为制定合理的工程调度方案和生态补偿措施提供科学依据。

（二）对水资源量与质的影响评价

水务工程对水资源量的影响主要是对水资源时空分布的重新调配。蓄水工程利用拦蓄洪水增加某一地区、某一时期内的可用水量，以改善水资源短缺的状况。但是水库蓄水蒸发、输水过程中的渗漏等都会造成水量损耗。更重要的是它改变了流域内上、中、下游之间水资源分配的关系，容易引发区域间的用水矛盾。评

价时应采用水量平衡分析法，准确计算工程影响下各个控制断面的水量变化，评价工程对区域供水保证率、地下水补给和下游生态系统需水满足程度的影响。

在水质上，施工期的废水、废渣及生活污水排放，如不加以妥善处理，就会对周围的水体造成直接污染。水库在运营期形成之后，水体的水动力条件也会发生改变。流速减小、滞留时间变长，水体的自净和稀释扩散能力就被削弱了。来自上游和库区周边的氮、磷等营养物质很容易在库区内积聚，当水温、光照等条件适宜的时候，极易引起藻类大量繁殖，造成水体富营养化，甚至爆发“水华”，严重威胁饮用水源地的安全。水库底层水体由于缺氧，会导致底泥中的重金属、有毒物质被释放出来，造成次生污染。评价应该以工程对水体水温、溶解氧、营养盐、特征污染物浓度的影响为主，预测水质变化趋势。

（三）生态流量保障措施的评价

生态流量，又称环境流量，指为了保证河流生态系统健康、河流生态系统服务功能，需要保留在河道内的流量过程。它是保证水生生物生存、保护河道形态、保证水体自净能力的基础。水务工程建设一般要以牺牲下游部分生态流量为代价，因此制定并实施有效的生态流量保障措施，是衡量工程生态友好性的主要标准。

保障措施评价首先要考察生态流量目标的科学性。目标确定时是否考虑了河流的天然水文节律，以及鱼类洄游、产卵、鸟类栖息、河岸带植被生长等不同的生态对象的需水要求。单纯设置一个最小流量值是远远不够的，理想的生态流量应该是模拟天然流量波动过程的一个完整过程，包括基流、生态脉冲等各个部分。

评价应关注保障措施的技术可行性与可靠性。

1. 实施机制是否清楚，即大坝分层取水设施的精确下泄，还是通过生态调度来优化水库运行。这些措施能否保证下泄流量的过程、水温等符合生态要求。

2. 检测及反馈系统是否完善。在主要断面处是否建有实时流量、水质监测网络？当实际下泄流量不能满足目标要求的时候，有没有相应的预警和应急调整机制？

评价要考量这些措施的长远效果，这就得创建起长期的生态监测计划，不断追踪下游水生生物群落结构，栖息地品质，河道形态等指标的变动状况，按照追踪得到的结果去对生态流量保证举措展开动态评定和调整，从而构建起一种目标设定，举措推行，监测评定，反馈改善的闭环管理体系。适应性管理策略，就是保证生态流量保障措施从纸面走向现实，发挥出生态效益的重要手段。

二、水生生态系统影响评价

水务工程对水生生态系统的影响是直接且深远的，它以改变水文、水质、物理连通性的方式重塑着水生生物的栖息地。评价其影响，就是认识工程活动对水生生物多样性、栖息地质量、生态系统结构与功能的改变状况，从而为制定有效的生态保护与修复措施提供依据。

（一）对水生生物多样性的影响

水务工程建设给水生生物多样性造成全方位的冲击。大坝等水工建筑物形成物理障碍物，隔断鱼、底栖动物等水生生物洄游通道。对具有江湖洄游或者江海洄游习性的物种，如中华鲟、白鲟等，洄游通道被阻断之后，会直接影响到它们的产卵、索饵、越冬等重要的生命活动，进而造成种群数量急剧下降，甚至出现功能性灭绝。即便修建了鱼道等过鱼设施，其效率和适用物种范围仍然有限，不能完全代替天然河流的连通性。

工程造成的水文情势变化打乱了水生生物的生存节律信号。很多鱼类的繁殖活动需要水文脉冲（涨水过程）作为刺激信号，水库调节使下游流量趋于均匀，就会造成这些鱼类不能繁殖。水库蓄水使原来急流险滩变成了深水缓流的库区环境，适应流水环境的鱼类（如裂腹鱼类）失去栖息地，而适应静水环境的鱼类（如鲤鱼）成了优势种，最终整个鱼类群落结构发生了演化，物种单一化趋势明显，特有种、珍稀物种的生存受到了严重威胁。

（二）对栖息地连通性与完整性的影响

河流不但是水流的通道，也是能量、物质、生物迁移扩散的生态廊道。水务工程一般都会对河流生态系统连通性和完整性造成破坏。纵向连通性，即上下游的联系，被大坝所阻断。这既隔开了生物种群，影响了基因交流，又阻断了泥沙和营养物质的向下输送，对下游河床稳定、河口生态系统健康会产生不良影响。

横向连通性，即河流主河道和两侧的洪泛区、湖泊、湿地之间的联系，也会因堤防建设、河道渠化而受到影响。自然条件下，洪水泛滥对于河漫滩湿地生态系统有积极的促进作用。它给许多鱼类提供临时性的产卵场、育幼场，同时也给河岸植被带来丰富的养分。工程实施后水力联系减弱或者消失，造成洪泛区湿地萎缩、功能退化、生物多样性下降。

评价工作要依靠景观生态学方法，分析工程建设前后河流廊道的破碎化状况，

栖息地斑块连接度指数等指标的变化情况。用栖息地模型模拟不同物种在受干扰河流网络中扩散、迁移的过程，找出重要的生态节点和障碍点。有利于从系统层面上认识工程对生态系统结构的影响，指导生态廊道的修复与重建工作，设置生态友好的护岸、恢复河湖之间自然连通，以提高栖息地网络的完整性。

（三）对水体富营养化及自净能力的影响

天然河流生态系统有一定的自净能力，可以经过物理、化学、生物等过程来降解、转化污染物。水利工程，尤其是大型水库的修建，都会对其造成巨大的影响。水库建成以后，水流从河流型变为湖泊型，水流速度大大减慢，水体的交换更新周期大大增长。这就为悬浮物的沉降以及营养盐的积累创造了条件。

库区水体环境的变化是造成富营养化的主要内因。缓流环境有利于藻类的生长，当水体中氮、磷等营养物质含量超过环境承载能力的时候，就会造成藻类的疯狂繁殖，形成“水华”。水华会恶化水质、影响供水安全，而且在衰亡分解的时候，会大量消耗水中的溶解氧，造成水体底层出现厌氧环境。厌氧环境又会导致底泥中封存的内源性污染物如磷等被释放出来，形成恶性循环，水体的自净能力彻底丧失。水库热分层还会造成底层水更加缺氧，对底栖生物的生存不利。因此，水体富营养化评价应该综合考虑外源污染输入、水动力条件变化、内源污染释放风险，用水质模型预测富营养化的发生概率和程度。

三、陆生生态系统及其他环境影响评价

水务工程影响范围并不仅限于水体，施工占地、道路修建、运行管理等活动，也会给周边陆生生态系统及其它环境要素带来较大的影响。对全部影响加以全面评价，这是保证工程同区域生态环境和谐共处的必经过程，牵涉到施工活动、长期运作以及景观视觉等诸多方面。

（一）施工期对土壤植被的影响

水土工程施工期对陆生生态系统冲击大且猛烈，主要是对土壤、植被的破坏。大规模的土石方开挖、场内道路修建、施工营地和料场占地，都会直接清除地表原生植被，导致生物量减少、栖息地丧失。特别是工程区包含森林、草地、湿地等生态功能区时，造成的影响更严重。植被清除之后，土壤暴露在外，一遇降雨或者刮风就容易出现水土流失。

土壤结构与性质也会受到严重影响，具体表现可见下表：

施工期对土壤植被的影响

影响方面	具体表现
土壤压实	大型施工机械反复碾压，造成土壤严重压实，土壤孔隙度、渗透性减小，不利于植物根系生长、微生物活动。
土壤肥力破坏	表层熟化土的剥离和不当堆放，会破坏土壤肥力，为后期的植被恢复增加困难。
土壤污染	施工过程中，油料泄漏、化学物质洒落、建筑废料随意丢弃都会造成局部地块土壤污染，进而通过食物链危害生态系统健康。
边缘效应	工程边界附近区域的微气候、光照和湿度发生变化，进而影响到周边未受干扰区域的植被生长情况。

评价工作要准确算出植被覆盖损失面积，评判对区域生物多样性和生态系统服务功能（水源涵养、水土保持）的损害程度，制订严格的表土剥离保护和迹地恢复植被重建方案，尽量缩减施工期的生态创伤。

（二）运营期噪声扬尘等环境影响

进入运营期的水务工程已经停止了大规模的土石方作业，但是仍然会有一些设施产生环境影响。噪声问题比较突出。泵站的电机、水轮发电机组、泄洪时高速水流和空气的掺混都会产生很大的噪声。噪声不但会影响周边居民的正常生活，还会对敏感于噪声的野生动物造成危害，使其避开工程设施所在的区域寻找生活空间。

扬尘主要是由于管理区的交通运输和部分裸露地表的风蚀造成。虽然其影响范围和强度一般小于施工期，但是干旱多风的季节里，巡检车辆的往来和管护活动也会产生扬尘，对周边的空气质量、植被生长造成一定的影响。另外工程管理区、枢纽建筑夜间照明会带来光污染，影响夜行性动物的活动规律、昆虫的导航。评价需依照声环境、大气环境标准，预测运营期噪声和扬尘叠加影响的程度与范围，核实与居民区等敏感目标的距离是否符合防护要求，提出设置隔声屏障、道路硬化、喷淋降尘、合理设计照明等缓解措施。

（三）对景观格局与视觉环境的影响

大型水利工程属于人工建筑物，大小、形状与自然环境有较大差别，所以对所在区域的景观格局、视觉环境带来较大影响。水库形成会淹没原有的河谷、农田、村庄，形成广阔的“高峡平湖”景观，本身就构成了一种景观类型的变化。这种改变或许有着独特的审美意义，不过也可能会损毁带有地方特色的自然或者人文景致。

大坝、厂房、输水管道等混凝土或者金属结构，由于体积庞大、线条硬朗、材料工业化，很容易对自然地貌和视觉和谐性造成破坏，形成视觉上的疤痕。在风景名胜区或者自然保护区，视觉入侵现象比较严重。评价工作需要从景观生态学、美学角度出发，对工程元素介入后对景观基质、斑块、廊道格局产生的变化进行分析。

用三维可视化模型模拟工程建成之后各个角度的视觉效果，来判断它是否与周围环境协调。评价内容包括工程体量、形态、色彩、材质是否与背景环境协调，有无破坏重要观景点和视觉通廊。根据评价结果可以指导工程建筑设计，选择适合的饰面材料、色彩，用景观重塑、植被配置等方式，使工程建筑在满足功能需要的前提下更好地与周围环境相融合，甚至成为新的具有积极意义的景观节点。

第二节 社会接受度与公众参与机制

一、社会影响评价

（一）对当地居民生产生活的影

水务工程的建设与运行，不可避免地会对当地居民的生产和生活方式带来直接而深远的影响。

从生活角度而言，工程施工期间会造成交通拥堵、噪声粉尘、临时水电中断等，都会对居民的日常生活居住环境造成影响。工程竣工之后，虽然可以带来更加稳定的供水和更加优质的水源，但是也会改变居民原有的用水习惯和成本结构。尤其是大型水库工程，在蓄水过程中还会造成局部小气候的改变，从而影响到居民的日常生活。这些影响有正面的也有负面的，要进行量化分析、定性评价，全面衡量项目所造成的影响，保证项目给人们带来的福祉远远超过其带来的不便。

在生产上，就更复杂而且重要了。对于以农业为主的地方，水务工程会直接改变当地的灌溉排水状况。一方面，科学调水可以有效防洪抗旱，保证农业稳产增产；另一方面，不合理的工程设计会破坏农田水利系统，或者因为水源、水质的变化造成水产养殖业的损失。对于工业生产来说，可靠的水源供应是其发展的命脉，水务工程可以为区域吸引和承接高耗水产业奠定基础。评价工作要进入到具体的生产环节中去，找出各个群体（农民、渔民、工厂主等）最关心的问题，预估他们生产活动将来的机会与威胁。

从长远来看,水务工程会对居民生产生活产生结构性的影响。它可能会改变社区的社会关系网,改变传统的生产生活方式。因工程建设而形成的集镇会给当地带来新的商业机会,但是也可能破坏原有乡村社会结构。另外改善水源条件和环境卫生,从长远看有利于提高居民的健康水平和生活质量。因此评价工作要具备前瞻性,不能只看到短期内直接的影响,而应该看到这些变化对社区文化、社会资本、居民长期福祉可能产生的潜在影响,为制定趋利避害的应对措施提供有力的支持。

（二）征地拆迁与移民安置的社会风险

征地拆迁、移民安置是水务工程中最为敏感,也是最容易引起社会矛盾的环节,其社会风险很高。稍有不慎就会造成严重后果,影响工程进度,甚至造成项目失败。核心风险就是土地对于人们生存的意义以及情感的联结。土地是农民的生产资料,是农民的收入来源,是家族的记忆,是文化的传承,是乡土的情结。强制的土地征收、搬迁,即便有经济补偿,也会割断居民与故土的联系,破坏已经形成的稳定的社关系、互助关系,产生强烈的失落感、不公平感、抵触情绪。补偿标准不透明、补偿过程不公正、对居民的诉求置若罔闻,都会成为引发矛盾的导火索,进而引发群体性事件,给社会稳定造成严重威胁。

移民的长期生计恢复和社会融入也成了另一大风险。搬迁之后的移民要承受极大的适应新环境的压力,生产方式的改变,就业技能的匮乏,人际关系的重新建立,文化认同的丧失等等。如果后续扶持政策不给力,移民群体就会陷入“搬得出、稳不住、富不起来”的窘境,出现生计断裂、相对贫困化的问题。同时移民社区和迁入地原住民社区由于资源竞争、文化差异、生活习惯不同等原因产生隔阂甚至冲突,形成新的社会排斥、边缘化。由于这些深层次社会风险的长期性、隐蔽性,需要建立长期的跟踪、观察、帮扶制度,持续关注移民群体社会经济状况、心理健康状况,促进他们真正融入新的社会环境,从源头上化解潜在的社会不稳定因素。

（三）对区域就业与经济带动作用的

水务工程作为大型基础设施投资项目,对区域就业和经济发展具有显著的积极带动作用。

在工程建设阶段,项目本身就是一个巨大的就业“容纳器”,可以创造出大量的就业岗位,从高技术水平的工程师、项目管理人员到普通建筑工人、设备操

作员等各个层次都有涵盖。不仅可以吸纳当地的劳动力，有效地缓解区域的就业压力，还可以在工作的过程中对当地的工人进行培训，提高其专业技能水平。同时工程建设要消耗大量的建筑材料、机械设备和后勤服务，这就对上游供应商和下游服务商产生了巨大的需求，从而带动了建材、运输、餐饮、住宿等相关产业链的发展，产生了更多的间接就业机会，形成了乘数效应，为地方经济注入了强劲的动力。

工程建成并投入使用以后，它对经济发展的长期带动作用就会更加突出。一个稳定的可靠的水利基础设施体系是区域经济社会发展的基础。充足优质的水资源供给，可以明显改善农业生产条件，保证粮食安全，为发展现代高效农业、特色农业提供可能。对于工业部门来说，水务工程可以满足扩大再生产对水资源的需求，降低企业的经营风险，改善区域营商环境，吸引更多的高附加值产业投资。改善的水生态环境，新增的人工湖、湿地景观，可以成为旅游业、康养业的基地，有利于区域经济结构多元化。在规划阶段就要充分预见并引导这些长期效益的实现，使工程的经济红利惠及更广阔的区域和人群，最终实现工程建设与区域经济发展的良性互动。

二、公众参与机制构建

（一）公众参与的阶段与方式

公众参与不能被视作项目开始后应对舆论而采取的被动行为，而应该成为水务工程全生命周期中一种主动、持续的制度性安排。保证参与有效性的关键就在于根据各个阶段匹配相应的、准确的方式，使公众的声音在最适宜的时刻、以最优的方式被听见。全程参与模式有利于及时发现问题，纠正偏差，使可能产生的社会矛盾在萌芽之时就得以化解。

针对不同阶段的特点，应设计和运用多样化的公众参与工具，以确保参与的广度和深度。

公众参与阶段与方式表

阶段	目的	推荐方式
项目规划及可行性研究阶段	影响最大，需广开言路，听取公众最关心的问题及愿望。	公众听证会、问卷调查、专家与社区代表座谈会
工程设计阶段	将公众的实践智慧融入技术设计。	设计方案工作坊、焦点小组、三维模型展示
施工建设阶段	关注施工造成的直接影响，建立信任。	施工现场开放日、社区联络员制度、24 小时投诉热线
运营管理阶段	监督与效益共享，共同评价项目长期效益。	社区代表运营监督委员会、定期公布水质 / 水量 / 生态数据、社区发展基金管理

从上表可以看出，选择参与方式的时候必须考虑到各个利益群体的特殊性。文化水平低、信息获取能力弱的弱势群体，应该更多使用口头、形象的沟通方式，比如乡村坝坝会、入户访谈等，保证他们的声音不被忽略。对分散居住的受影响人群来说，可以利用现代信息技术，比如开发专门的手机应用程序或者微信群，来克服地理空间的限制。参与方式的选择要以包容性、有效性为标准，争取让每一个利益相关方都有意愿、有能力、有途径参与项目的决策。

（二）信息公开与意见反馈渠道

信息公开是公众参与的基础和基本保障。缺少透明、充分的信息，公众就无法进行有意义的参与。所以必须建立全面、主动、及时的信息公开制度。公开内容要完整，包含项目立项背景及决策依据、完整的环境和社会影响评价报告、工程总体规划及设计方案、项目预算及资金来源、征地拆迁范围及补偿安置方案、工程进度报告和最终的竣工验收报告。

关键之处在于所有的公开信息必须用通俗易懂、简洁明了的方式来表达，尽量不用专业术语。对复杂的图纸、数据用简明的图表、模型、动画等进行说明。信息的发布渠道也要多样化，在政府和项目官方网站设置专栏的同时，还要利用地方媒体、社区公告栏、宣传手册等传统媒体，使信息能够触达所有利益相关者，特别是不太擅长使用互联网的人群。

除了保证信息可以顺利流出之外，还要建立意见回流的畅通渠道。建设立体多元的反馈体系非常重要。线上渠道可开立项目电子邮箱、官方网站，社交媒体平台留言专区等途径专人每天登录查看回复。线下渠道要贴近社区，在村委会或者社区中心设置固定的意见箱、联络点，定期组织项目管理人员、技术专家到社

區開展面對面的諮詢會、懇談會，直接聽取居民意見、建議。設立一條專門、永久公開的監督熱線電話，保證工作時間有人接，這是處理緊急問題和投訴的一種有效方式。所有的這些途徑都必須大力宣傳，讓公眾知道什麼時候、什麼地方、用什麼方法可以提出訴求。同時要對反饋的信息進行管理，所有收到的意見都要進行登記、分類、匯總、分析，為之後的採納和回應做好基礎。

（三）公眾意見的採納與回應機制

收集公眾意見只是第一步，怎樣科學、公正地對待這些意見，怎樣對公眾說明處理意見，是公眾參與機制能否取信於民的关键環節。必須建立一套標準化的內部工作程序，對所收到的公眾意見加以管理。首先要對意見進行分類，把普遍性訴求和個性問題區分開來，把項目宏觀決策的意見和具體實施細節的意見區分開來。接下來就要成立一個由項目管理者、技術專家、社會專家甚至利益相關方代表組成的評審組，來對意見是否合理、是否技術可行、經濟成本多少做出判斷。評價過程必須要有明確的判斷標準，不能隨意決定。

對於公眾提出的合理、可行的意見，必須採納，並落實到項目規劃、設計、施工或補償方案的調整中。採用就是對公眾參與價值最好的承認。更重要的是，無論意見是否被採納，都應當建立一個清晰、及時的反饋機制，形成完整的“反饋閉環”。對採納的意見要詳細說明採納的內容以及採取的措施。對於由於技術、法規、成本等原因而未被採納的意見，不能簡單地置之不理，要以誠懇、尊重的態度，給公眾提供詳盡、令人信服的解釋。解釋要具體說明未採納的客觀限制因素，盡量提出替代性方案或未來的考慮方向。

全部意見採納和回應過程都要有據可查，並以適當的方式向社會公開。可以定期編印公眾意見處理情況報告，在項目網站、社區公告等處公布。報告中要有收到的主要意見類型、採納意見的比例和案例、不採納意見的主要原因等。決策過程透明化可以清楚地呈現公眾參與對項目決策的影響，雖然有些意見不會被採納，但是公開理由可以在一定程度上得到公眾的理解。既保留住了項目方的公信力，又教會了民眾以理性和建設性的方式參與公共事務，為以後良性互動打下了基礎。

三、提升社会接受度的策略

（一）加强科普宣传与沟通解释

提高社会接受度的第一步就是开展主动的、长期的、有目的的科普宣传和解释。此项工作不能只停留在发布生硬的项目公告层面，而应该转化成一場深入浅出的公众对话。要设计一套沟通方案，用大白话，联系当地民众关心的实际问题，把水务工程的必要性、紧迫性、长远利益讲清楚、讲明白。以本地发生过洪涝、干旱灾害的故事讲工程的防灾减灾作用，以水质提高后对居民健康、农产品品质的改善效果让效益看得见、摸得着。宣传材料的形式也要丰富起来，除了传统的宣传册、展板之外，还要制作简单易懂的动画短片、科普图解，通过地方电视台、广播、社交媒体等不同的传播渠道发布，以达到最广的信息覆盖效果。

沟通必须双向真诚，目的是建立信任而不是单向灌输。这就意味着，在沟通的时候，必须要诚实地面对工程所可能引发的负面效应和风险，比如施工时的噪声，临时占用土地，生态扰动等等，并且要明确告诉公众，项目方已经采取或者即将采取哪些缓解与补偿措施。主动暴露问题、提出解决办法比回避或者粉饰太平更能让公众信任。组织有影响力的社区领袖、媒体记者和普通民众代表到已经建成工程的现场进行实地考察，让他们亲眼看到工程的管理水平、安全措施和环境影响控制情况，从而消除疑虑、消除不实传言。眼见为实的效果是任何语言解释都代替不了的，它可将公众从项目的旁观者变成见证者，使公众在情感上与项目贴近。

（二）建立利益共享与补偿机制

跳出传统的物质损失一次性补偿模式，是获得社会认同的重要条件。需要建立更加公平、可持续的利益共享和补偿机制，核心就是让受项目影响最直接的人群，即征地拆迁移民，能够长期从项目中获益，实现“因水而富”。补偿方案要具有包容性和发展性，在保证足额货币补偿的基础上，提供多种选择供移民挑选。部分补偿款可以转为项目公司股权或者收益权，使移民成为项目公司股东；移民可以得到系统的技能培训，在项目建设、运营岗位中优先录用符合条件的个人及其子女；条件允许时，通过配套水利设施建设的方式为移民提供置换土地，促进其农业生产能力的恢复或提高。

建立社区发展基金是实现利益共享的有效制度创新。可以从水务工程未来预

期的供水收益、发电收益、旅游收益等中拿出一定比例的资金，设立由地方政府、项目公司、社区代表共同管理的基金。该基金用来专门支持受影响社区的公共事业发展，修建学校、卫生院、道路、文化活动中心等，或者给当地的中小企业和创业者提供小额贷款和技术支持。该机制把工程的经济效益直接回馈给社区，使项目由外来“闯入者”变成社区发展的“长期合伙人”，从根源上形成项目和社区之间“一荣俱荣”的紧密联系。

对当地的社区给予优惠政策也是提升好感度的补充。给工程所在地居民提供优惠的水电价格，投资改善项目区周边农村安全饮水、污水处理设施，支持当地的教育事业和传统文化保护项目。虽然这些措施不一定花费很多，但是它们传达出项目方尊重当地、回馈社会的一种积极信号。它们如涓涓细流般不断滋养着项目和社区之间紧密的关系，使经济上的互相利用达到情感上的价值认同，从而形成一个稳定坚实的支撑系统。

（三）发挥社区与非政府组织的作用

提高社会接受度的时候，把社区自身以及专业的 NGO（非政府组织）当作合作伙伴，而不是管理对象，常常可以收到事半功倍的效果。社区，尤其是社区组织，是项目方与千家万户之间天然的桥梁。它们扎根于当地社会，熟悉当地的风俗民情、利益格局、主要矛盾，有项目方难以达到的“地方性知识”和人际关系。在项目规划阶段邀请社区组织参加讨论，就选址、线路规划等事项征求社区组织的意见，可以避免触及当地文化禁忌或者生态敏感点。执行阶段社区组织帮助政策解读、组织群众参与、调解邻里纠纷、监督补偿款发放，沟通成本、管理难度大减。给予社区组织一些资金扶持与能力培育支持，并赋予其在项目事务里能起更为积极角色的权限，这乃达成有效社区治理，加强项目社会嵌入性的一种明智选择。

拥有环保、社法援助专业知识的非政府组织会给项目带来不同寻常的价值与信誉。它们可以担当多种积极的角色。作为独立的第三方监督者，NGO 可以对项目的环境和社会影响评价、移民安置方案的实施情况等进行独立监督和评估，其发布的报告一般比政府或项目方自己的报告更具有说服力，有利于提高项目的国际国内形象。NGO 能充当社区的专业顾问，辅助受影响的社区更好地认识项目文件以及有关的法律政策，引领他们用合法且理性的手段去争取自身的利益，避免矛盾升级。许多 NGO 在社区发展、生计恢复等项目上有丰富经验，可

以同项目方一起设计并执行有针对性的可持续帮扶方案。同有良好声誉的中立的 NGO 合作，一方面可以从中得到专业的知识、资源，另一方面也可以向社会展示项目开放、包容、负责任的形象。

第三节 生态补偿与可持续发展策略

一、生态补偿机制构建

建立一套比较完善的生态补偿机制，是协调水务工程开发和生态保护之间利益关系的制度保障。对因工程建设造成损害的生态系统及有关利害关系人给予合理补偿，可内部化环境成本、促进生态保护，从而保证工程建设的生态环境公平和社会正义。

（一）生态补偿的主体对象与标准

水务工程生态补偿机制的核心就是确定补偿和被补偿双方，并建立一套合理的补偿标准。通常，补偿主体是水务工程的开发者、经营者和因为工程而直接受益的地区或者个人。这些主体由于工程活动而获得经济或者社会利益，应当承担其活动给生态环境带来的不利影响的责任，这就是“破坏者付费”原则。

受偿对象更为广泛，包括因为工程占地、水源涵养功能受损而利益受损的当地社区、农民等个人或组织，也包括被改变或者破坏的河流、湿地、森林等自然生态系统本身。确定受偿对象时，要准确找出因工程造成社会发展机会丧失、生活品质下降的群体，补偿才会有很强的针对性。

补偿标准的确定是机制有效运作的基础，这个过程很繁杂，要考虑到很多因素。理想的准则应当把生态系统服务价值损失量、生态修复费用、保护区域为守护生态所放弃的发展机会成本全部考虑在内。具体核算时可采用成本法、替代市场法、意愿调查法或者当量因子法等方法。标准的设定不能“一刀切”，应该充分体现区域差异性，按照当地经济发展水平、财政承受能力、生态环境敏感程度来制定可以动态调整、可以操作的补偿额度或者方式，保证补偿的公平、合理。

在实践中，补偿标准的确定是政府、开发商和受补偿人之间博弈、协商的结果。因此建立透明公正、多方参与的协商平台就显得十分必要。公开听证、专家论证、社区访谈等，征求各方面的意见，特别是受影响群体的意见，减少矛盾，

提高补偿政策的接受度和执行效率。补偿的方式不能只是简单地用一次性资金进行补偿，而应该把技术扶持、产业转移、就业安置、社会保障纳入等打包在一起的一揽子措施综合起来使用，从源头上保证受偿者的长远生活和发展。

生态补偿实践中常见的评估方法及特点

评估方法	主要特点	适用场景	优点	缺点
成本法	基于生态恢复或重建的成本	生态系统受损后需修复的场景	直观易懂，数据获取相对容易	可能低估生态系统服务总价值
替代市场法	基于替代品或相关市场价值	生态服务有替代品或关联市场的场景	考虑市场价值，具有一定客观性	替代品价值并非完全等同生态服务
意愿调查法	通过问卷调查居民支付意愿	评估非市场价值，如美学价值	能反映公众对生态服务的偏好	易受主观因素影响，存在假设性偏差
当量因子法	基于不同生态系统的服务功能相对重要性	宏观尺度，快速评估，资源有限时	简单快速，适用于大范围评估	结果粗略，可能忽略区域特异性

（二）生态补偿资金的筹集与管理

生态补偿资金稳定来源、规范管理，是保证生态补偿机制持续发挥作用的物质基础。渠道多样化是保证充足性的。目前资金来源主要是纵向财政转移支付，即中央、省级财政对承担重要生态功能的地区给予补助。同时，水务工程项目法人应按照规定，从工程投资或者运营收入中提取一定比例的专项资金，用于工程影响区的生态建设补偿。可以依法征收水资源费、排污费等，其中一部分作为生态补偿基金，真正实现谁开发谁保护、谁受益谁补偿。探索吸引社会资本，即企业捐赠、公益基金投入等也是拓宽资金来源的有效途径。

资金的高效透明管理是生态补偿政策赢得公众信任、顺利推行的前提。必须建立严格的资金管理制度，保证专款专用。可以设立一个独立的生态补偿基金，由财政、环保、水利等有关部门来共同监管，防止资金被截留或者挪用。资金的拨付使用要建立全面预算绩效管理体系，实行全过程跟踪、重点评价，保证每一笔资金都用得其所，产生预期生态效益和社会效益。资金分配方案、资金使用情况、绩效评价结果应当向社会公开，接受社会、媒体的监督，形成有效制约，防止权力寻租、资源浪费，保护好受偿对象的利益。

（三）市场化多元化生态补偿模式

在政府主导的财政补偿之外，积极探索并发展市场化、多元化的生态补偿模式，是提高补偿效果、激发内在动力的关键方向。该模式依靠市场机制来调节生

态保护者和受益者之间的利益关系，让生态产品的价值经由市场交易表现出来，进而给生态保护行为赋予“造血”功能，营造起持续的激励体系。

市场化补偿模式的实践探索日益丰富，展现出强大的活力与潜力：

1. 水权交易：在流域上下游之间建立水权交易市场。上游地区通过节水或者水质改善，将节约下来的水权或者水环境容量指标，出售给需水量大或者排污压力大的下游地区，把生态保护行为转化为直接的经济收益。新安江流域跨省生态补偿试点就是成功的范例，它用建立水质对赌机制的方式，调动了上游安徽省治污的积极性。

2. 碳汇交易：水务工程一般会伴随湿地恢复、植被重建等生态措施，新增的林草、湿地具有很强的碳吸收能力。这些碳汇量经过核证之后可以被当作碳信用产品，在碳排放权交易市场上进行销售，给项目业主或者生态保护地区带来额外的收入，从而将生态价值货币化。

3. 引导绿色产业发展：用生态补偿资金引导、鼓励和扶持补偿区发展与生态环境相协调的绿色产业。依靠水库形成的良好水域风光发展生态旅游、康养度假项目，依靠优良水质资源发展有机农业、生态渔业等特色种养殖。这种“造血式”的产业促进，取代了以前的“输血式”补偿，当地社区在保护生态的同时变得富裕起来，形成了良性循环。

市场化模式能否顺利推行，取决于政府有没有好的顶层设计和政策支持。政府应当做好搭台建机制、强监管的服务者。加快水权、排污权、碳汇权益等资源环境权益初始分配和交易规则的制定，为市场化交易提供法制保障。依靠财政贴息、税收减免、绿色信贷等激励政策，调动更多的社会资金、专业化企业加入到生态产品的开发和交易中来。建立健全监测评估体系，保证市场化交易在获取经济效益的同时也能带来生态环境质量的改善，防止出现公地悲剧或者市场失灵。

二、可持续发展策略融入

（一）绿色设计施工与运营

绿色理念的落实要从工程的起点，也就是设计阶段做起。绿色设计从工程功能要求出发，最大程度上减少对自然环境的破坏。在选线选址时主动避开生态敏感区、生物多样性热点区，采用本地的、可再生的、低能耗的环保材料，从水力学角度优化泵站运行，降低能耗，提前设置再生水回用、雨水收集等循环利用设

施，从源头上减少资源消耗和废弃物的产生。

施工阶段是绿色理念得以实现的时期。绿色施工的核心是过程控制，以减少施工活动给周围环境造成的即时影响。具体的措施有严格按水土保持方案实施，防止施工造成的水土流失，建设废水、废气、固体废弃物分类处理、回收系统，减少污染物排放，采用低噪声、低振动的施工设备和工艺，减少对附近社区和野生动物的影响，临时占地及时进行生态恢复。

运营阶段绿色化的主要表现就是智慧化。以数字孪生流域、智慧水务平台为基础，采用物联网、大数据、人工智能等技术，对水源、管网、泵站、水厂实行实时监控、智能调度。不仅可以精确预测需水量、优化供水压力、及时发现管网漏损，从而大大节约水资源和电能，还可以对水质进行连续监测和预警，保证供水安全，最终实现水务系统高效、低碳、安全运行。

（二）循环经济理念在水务工程应用

循环经济给水务行业的可持续发展提供了一种核心的方法论，即把水务系统从传统的线性模式(资源-产品-废弃物)转变为闭环模式(资源-产品-再生资源)。在此理念下，以往的废水、污泥被重新定义为宝贵的资源，污水处理厂也由单一的污染处理设施转变成了城市水资源工厂、能源回收中心。

具体实践表现在几个方面，首先水的再利用，把达到标准的市政污水或者工业废水作为再生水，广泛用于工业冷却、园林绿化、道路清扫、农业灌溉、生态补水等，有效减少了优质地表水、地下水的开采。第二是能源和资源的回收。污水处理时产生的污泥，经过厌氧消化可以产出沼气用来发电或者提纯成生物天然气；消化之后的沼渣能够制作成有机肥料或者工程材料，从而让污泥达到减量化、稳定化以及资源化的效果。污水中的氮、磷等营养物质也可以用专门的技术回收，制成缓释肥料。

雨水以及初期径流的资源化利用属于循环经济的重要组成。建设海绵城市设施，如透水铺装、下凹式绿地、雨水花园等，就地消纳和净化雨水，并将其收集到蓄水模块或者地下水库中，作为城市杂用水或者补充地下水使用。“变废为宝”的循环利用模式可以大幅度提高水资源综合利用率、减轻城市排水系统和受纳水体的环境负担、通过资源回收获得新的经济价值，为水务行业开辟出一条可持续发展道路。

（三）应对气候变化的适应性策略

全球气候变化正以改变降雨方式、加大极端天气事件如洪涝、干旱的频次和强度的方式，给水务工程的安全性及运作带来严峻挑战。因此，水务工程规划与设计要有前瞻性，充分考虑气候变化造成的影响，建设有韧性、适应性的水务基础设施体系。这就意味着水务规划不能再仅仅依靠历史水文数据，而需要结合最新的气候变化模型预测，对未来降雨量、洪水峰值、干旱时长等重要参数进行科学预测。

适应性策略是全方位的。防洪方面要提高水库、堤防等工程的设防标准，增加蓄滞洪区的调蓄能力，大力推进海绵城市建设，利用绿色基础设施增强城市对暴雨的吸收、缓冲能力。在供水保障上要形成多水源联合调度供水格局，减少对单一水源的依赖；通过节水措施和提高再生水的利用率来减少总需水量来应对长期干旱。水源地要加强水土保持、生态修复工作，提高流域涵养水源能力，减小径流的季节性变化。沿海地区水务设施还要考虑海平面上升带来的咸潮入侵、风暴潮威胁，采取加高海堤、建设防潮闸等保护措施。把气候适应性策略纳入水务工程的全部时期，是保证未来不确定气候条件下水安全、粮食安全、生态安全的基本要求。

三、生态修复与功能提升

（一）受损水生态系统的修复技术

修复受损水生态系统的目的是使水生态系统恢复健康结构、功能，达到自我维持、自我演替的目的。修复技术的选择要根据实际情况来确定，一般采用物理、生物等多种技术相结合的综合性措施。

1. 物理 - 形态修复技术属于生态修复的基础部分。对被渠道化、硬质化的河道进行拆除不必要的混凝土护岸，恢复河流自然的蜿蜒形态和复式断面，创造深潭、浅滩、急流、缓流等多种水力条件。对内源污染较严重的湖泊水库，可使用生态清淤法来清除含氮、磷等污染物底泥，削减内源负荷，给生物修复创造条件。

2. 水质净化技术主要是利用生态工程提高水体自净能力。人工湿地是目前应用较多的一种技术，它构建了基质、微生物、植物三者组成的复合系统，能有效地去除水中的营养盐、有机物和重金属。生态浮岛、曝气增氧、水生植物群落重

建等技术都常被用来改善水动力、增加水体溶解氧、吸收降解污染物从而恢复水体的清澈度。

3. 生物群落重建技术在水体物理形态和水质得到初步改善后，核心任务就是重建健康的水生生物群落。恢复沉水植物、浮叶植物到挺水植物的完整植被群落，给水生动物提供栖息地和食物。经由科学增殖放流本地鱼类、底栖动物等途径，慢慢复原并完备水体食物链，改善生态系统的稳定性以及生物多样性。

综合使用这些技术，目的就是将一个退化、功能单一的水体逐步转变为结构完整、功能健全、可以自我循环的健康水生态系统，从根本上解决水环境问题。

（二）工程与生态景观的融合设计

现代水务工程设计思想由原来的单一功能向功能、生态、美学三者结合转变。将生态景观理念融入工程设计，不仅可以消除传统水利设施的生硬、突兀，也可以创造出兼具休闲、游憩、科普教育等多项功能的城市或者乡村公共空间，使水务工程本身成为具有观赏价值的场所。

融合设计的核心就是“师法自然”。在堤防、护岸设计中，抛弃传统的垂直浆砌石或混凝土结构，使用有孔隙、供植物生长的生态混凝土砌块或者建造缓坡式、阶梯式的植被型生态护坡。既满足防洪安全需求，又给两栖动物、昆虫等给予栖息场所，形成有生命活力的滨水生态廊道。水库、调蓄湖等工程周边，利用地形开展景观设计，创建亲水平台、滨水步道、湿地公园等，设置解说标牌，宣传水知识、生态保护理念，变成服务社区的开放式生态空间。就算是纯粹的功能性鱼道、闸门等构筑物，通过恰当的造型和材料选择，也可以具备雕塑一般的美。

（三）提升生态系统服务功能的措施

生态系统服务功能是指生态系统给人类带来的各种好处，包括供给服务（提供清洁水源）、调节服务（净化水质、调节洪水）、支持服务（维持生物多样性）和文化服务（提供休闲娱乐场所）。水务工程应当以提高这些服务功能为目的，进行主动的功能性设计。

具体的措施有规划阶段创建连通江湖、河库的水系网络，打通水生生物的洄游通道，保证水生态系统连通、完整。河道治理时除了防洪、航运外，还要主动营造多样化生境，设置乱石堆、生态丁坝等，为鱼类产卵、索饵、隐蔽提供场所。在水库周围规划并营造一定宽度的水源涵养林和植被缓冲带，不仅可以拦截、过滤面源污染物，还可以给陆生野生动物提供迁徙的生态廊道。

生态化的调度运行可以模拟自然水文节律，在合适的时间给下游河道进行生态补水，满足下游河道中水生生物关键生命期（繁殖期）的生态需水要求，从而保证河湖健康生命。因此，水务工程不再只起到取水、输水、防洪的作用，而是会成为区域生态系统的一部分，提高区域生态产品供给能力，增加人类福祉。

第四节 综合效益评估指标体系

一、指标体系构建原则

（一）科学性、系统性与可操作性原则

科学性原则即所选取的指标要有坚实的理论依据和明确的科学内涵，能够准确、客观地反映水务工程效益的某一个方面。每个指标的定义、计算方法、数据来源都应当清楚规范，不能含糊不清、主观臆断。在评价水质改善效果时，应该使用国家或者行业标准的化学需氧量、氨氮等具体的水质指标，而不能使用“水质变清”这样的含糊描述。

系统性原则就是要求指标体系的全面性、完整性，所选取的指标应涵盖水务工程所涉及的经济、社会、环境等各方面内容，能体现出各个子系统之间相互联系和影响。指标体系应当是一个有机的整体，既可以把握总体效益，又可以分析具体环节，避免因指标的遗漏而造成评估结果的偏差。

可操作性原则对于保证评价体系由理论走向实践是十分关键的。指标数据的获取要经济、便捷、可靠，相关的监测数据和统计资料要可获得，不能因为数据采集成本太高或者技术难度太大而让评价工作无法实施。指标设计要尽可能简单，便于理解与计算，利于不同评估人员及决策者使用。在保证科学性、系统性的基础上，首先要选择那些已经建立常规监测渠道或者可以通过现场调查、查阅资料轻易获取数据的指标，保证评价工作的时效性、可持续性。一个不能落地的评估体系，再完美再理论化，也无济于事，可操作性就是理论联系实际的桥梁。

（二）定量与定性指标结合原则

水务工程综合效益常常复杂多变、层次繁杂，很多影响无法用一个数值准确衡量。因此，在构建指标体系的时候，一定要坚持定量指标和定性指标相结合的原则。定量指标用数字来表示，具有客观、准确、可比等特点，是效益评价的重

要依据。如供水量、发电量、防洪标准提高带来的直接经济损失减免额、水土流失控制面积等指标，可以直接反映工程的物理产出和经济价值，是成本效益分析的重要依据，可以准确衡量出工程在物质方面做出的贡献。

但是，定量评估是不够的，定性指标的加入是必不可少的补充。水务工程的社会效益以及部分环境效益，比如区域形象改善、公众安全感提升、生物多样性恢复、水景观文化价值等，都很难货币化或者完全量化。效益的评价使用描述性评价、等级评定或者满意度调查等定性的评价方式。可以请专家评审工程的美学效果，也可以发放问卷调查居民对改善后的供水质量是否满意。定性指标的使用，使评价体系具有了人文关怀和整体视角，可以从更深层次、更长远的角度去把握工程的影响，从而对工程的综合价值做出更加全面、均衡的判断。两者结合起来，既可以体现定量分析的严谨性，又可以体现定性判断的灵活性和深刻性。

（三）动态性与可比性原则

水务工程的效益并不是一成不变的，会随着时间的变化而变化。工程在建设期、运营初期、长期运营阶段效益类型、大小和重点不同。动态性原则指的是要让指标体系可以反映时间上的变化。评价工作不应该是一次性的静态评价，而应该是动态的、贯穿工程全生命周期的评价。即指标体系要包含可以跟踪效益变化过程的指标，设置不同的时间节点作为评估周期，持续监测和评价水库蓄水前后下游生态流量变化、灌区作物产量在工程运行几年后是否持续增加等。动态的视角可以及时发现问题、总结经验并改善调整运营管理策略，使工程长期真实效益的评价更准确，避免短期效益掩盖长期的问题或者长期潜力被忽略。

可比性原则指标设置以及数据采集方法要统一规范，便于对不同水务工程项目间的效益、同一工程不同方案间的效益、同一工程不同时期不同区域的效益进行有效的横向比较和纵向比较。为了保证可比性，指标的定义、计量单位、计算口径必须一致。评价不同的节水改造工程时，应采用相同的单位面积节水量或者单位投资节水量作为比较标准。没有可比性的评估结果会变成一个个信息孤岛，无法给区域水务规划的宏观决策、项目排序、资源配置等提供可靠的依据。因此，在建立指标体系的时候，把动态性、可比性当作内在基因，是保证评估体系生命力、决策支持能力的关键根基。

二、指标体系的层次结构

为了使众多的评价指标条理化地组织和使用，建立一个层次分明、逻辑严密的层次结构十分重要。该结构一般采用自上而下的分解方式，从最宏观的目标层开始，逐层分解到最具体的指标层，形成一种树形结构，将复杂的评价问题有条理、系统地分解开来。

（一）经济、社会、环境效益准则层

在指标体系顶层设计中一般会设置目标层，即水务工程综合效益最大化。紧接着就是准则层，把总目标分成几个方面。参照可持续发展观念，准则层大体被分成经济效益、社会效益、环境效益这三块。这种分类方法被国内、国外的项目后评价领域普遍使用，可以包含水务工程价值取向的所有方面，使评价具有宽泛性、全面性。

经济效益准则主要是用来衡量工程对区域经济发展所做的贡献、投资回报率以及水资源作为生产要素的配置效率。它重视项目的经济合理性、财务可行性，是项目持续经营、有经济动力的根基。

社会效益准则考查工程在民生、公共安全、区域协调发展等各方面的作用。这包含保证居民生活用水安全、提高防洪除涝标准以保障人民生命财产安全、改善农村生产生活条件、推进城乡供水一体化、创造就业机会、维护社会公平正义与稳定等各个方面。社会效益直接关系到人民群众的获得感、幸福感、安全感，是检验工程“以人为本”发展理念落实情况的重要标准。

环境效益标准主要考察工程对生态系统造成的影响，即减少水污染、修复水生态、防治水土流失等正面影响，同时要考虑可能给河流流量、水生生物栖息地等造成的不良影响。体现了对于自然规律的尊重和对生态文明建设的积极作用，是保证水利工程可持续发展的生态基石。这三层标准互相联系、互相影响，一起构成评价水务工程综合价值的完整框架。

（二）各准则层下的具体指标设计

在经济、社会、环境三大准则层之下，还要进一步分解出具体、可测量的指标，形成指标层。这些指标是衡量工作成效的最小单位，设计的好坏直接决定评价的结果。所选指标要贴近各准则层的内涵，还要依照供水、防洪、水生态治理等各类水务工程的工程类型，有侧重地进行设计。

具体而言，指标设计可遵循以下思路：

1. 经济效益指标层，一般分为财务评价指标和国民经济评价指标。前者如财务内部收益率、投资回收期、净现值、年供水净收益等，是从项目投资方角度来衡量盈利能力。后者是从全社会的角度出发，包括防洪减灾效益、发电效益、灌溉增产效益、水资源配置优化带来的区域宏观经济效益、增加的旅游收入等，更能反映工程的公共产品性质。

2. 社会效益指标层，本层指标要兼顾定量和定性。定量指标可以是供水受益人口、改善灌溉面积、防洪保护人口和城镇数、新增就业岗位数量等。定性指标可以借助社会调查、专家打分等方式来获得，居民用水满意度、公共安全感提升程度、区域均衡发展贡献度、水文化传承与发展促进作用等都可以作为评价指标。这些指标一起描绘出工程给人民带来的福祉。

3. 环境效益指标层环境指标设计要全面反映工程对水环境、水生态、周边环境的影响。具体可分为水环境质量改善指标、水生态系统健康指标、水资源节约和循环利用指标以及其它生态效应指标等。通过这些具体的指标可以监测评价工程对生态文明建设的贡献，及时发现环境风险。

（三）指标权重的确定方法

多指标综合评价体系中各个指标对总目标的贡献度不同，所以需要给每个指标赋予不同的权重来体现其重要性。指标权重的确定是综合效益评价的关键技术环节，指标权重的确定是否合理，直接影响评价结果是否客观公正。权重的确定方法有主观赋权法、客观赋权法和主客观结合赋权法三大类，实践中根据项目的特点、数据的情况以及评价的要求灵活选择或者组合使用。

主观赋权法主要依靠专家的知识、经验以及判断，常用的有德尔菲法、层次分析法。德尔菲法用多轮匿名专家问卷调查和意见反馈，使专家的意见趋于一致，最后得出各个指标的权重。层次分析法把复杂的决策问题分为目标层、准则层、指标层等若干层次，然后请专家对同一层次的各个元素两两比较形成判断矩阵，再计算判断矩阵的特征向量得到各指标的权重。此类方法的优点是可以最大限度地发挥专家的智慧，能够较好地处理难以量化的定性指标；缺点是主观性强，容易受到专家群体和专家个人偏好的影响。

客观赋权法完全按照指标数据本身的规律来确定权重，不受到人为因素的影响。常用方法有熵权法、主成分分析法、变异系数法。熵权法是根据指标数据的

离散程度来确定权重，指标值变异越大，信息熵越小，即该指标提供的信息量越大，其权重就应该越大。客观性强，但完全依靠数据，有时候会与指标的重要程度不相符，而且对数据的质量要求较高。

常用指标赋权方法简要对比表

赋权方法类型	常用方法	优点	缺点	适用场景
主观赋权法	德尔菲法	充分发挥专家经验，处理定性指标较好	主观性强，易受专家偏好影响	缺乏客观数据或定性指标较多时
	层次分析法	将复杂问题分解，逻辑性强	判断矩阵构建存在主观性	指标体系层次清晰，需专家判断时
客观赋权法	熵权法	完全依据数据，客观性强	仅依赖数据，可能与实际重要性不符，数据质量要求高	数据量大且质量高，希望避免主观影响时
	主成分分析法	降维，消除指标间相关性	结果不易解释，权重含义不直观	指标间存在较强相关性时
主客观结合法	线性加权法（如结合 AHP 和熵权）	兼顾专家经验与数据特性，结果更均衡	方法设计相对复杂	追求评价结果全面、准确、均衡时

为了既保证主观判断的合理性，又反映客观数据的真实性，在实践中越来越多地使用主客观结合的赋权法。先用层次分析法得到主观权重，再用熵权法得到客观权重，最后用某种数学方法（如线性加权）将两者结合起来，得到更均衡、更可靠的综合权重。

三、综合效益评价模型

在建立指标体系并确定权重之后，就要选择或者构建合适的数学模型，把各个指标的评价值和权重综合起来，得到一个能够全面反映水务工程综合效益的最终评价结果。这也就是综合效益评价模型的应用。

（一）多指标综合评价方法的选择

多指标综合评价方法是把多个指标值合并成一个总评价值，选择什么方法直接决定了评价结论的科学性。目前应用较多的方法有多种，要按照指标体系的特点、数据的类型以及评价目的的具体要求，慎重选择。

比较简单直观的方法为线性加权综合法，也称为模糊综合评判法。该方法先对各个指标值进行无量纲化处理，消除不同指标量纲、数量级的差异，再将无量

纲化的指标值与对应的权重相乘后求和，得到综合评价值。该方法计算方便、物理意义明确、容易理解，在评价实践中被广泛应用。

当评价问题中包含大量的模糊性和不确定性信息，并且定性指标所占的比例较高的时候，模糊综合评价法就更加适合。此方法使用模糊数学隶属度理论来确定各个指标对于优、良、中、差等评价等级的隶属程度，建立模糊关系矩阵，再与指标权重矩阵进行模糊变换，得到反映综合效益属于不同等级可能的模糊向量，最后用最大隶属度原则或者其它去模糊化方法得出评价结果。

针对复杂系统评价还可以用更高级的模型。物元可拓学方法可以用于从矛盾问题的角度去分析和改善效益，数据包络分析适合用来评价不同的水务项目的相对效率。选择何种方法主要取决于它能否很好地与指标体系相匹配，能否科学合理地解决所面对的评价问题。

（二）评价标准的设定与等级划分

综合效益评价不能只给出“高还是低”的量化结果，更要回答出“好还是不好”的定性判断。这就要求给每一个指标定出具体的评判标准，在此基础上再做等级划分。评价标准是衡量指标实际完成值好坏的尺度、参照系，它的设置是把现状与目标、现实和理想联系起来的桥梁。标准的来源是多元化的，可以是国家、行业或地方颁布的法律法规、技术规范、质量标准等，如地表水环境质量标准、防洪标准等；也可以是水务发展规划提出的目标值，如节水型社会建设规划中规定万元工业增加值用水量下降率目标；也可以是国内外同类型工程的先进水平或历史最好水平。对于缺少统一标准的指标，可以采用专家咨询或者公众期望调查的方式确定合理的参照值。

设定评价标准后，一般会将指标的取值范围分成有序的等级，比如“优秀”、“良好”、“一般”、“较差”、“很差”五级，或者分成Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级、Ⅴ级。等级划分使得评价结果更加直观，利于管理者与公众理解。每一个等级都需要有明确的规定，并且要有相应的数值范围。以供水水质达标率为例，设定99%以上为优秀，95%-99%为良好，90%-95%为一般，<90%为较差。等级划分过程要科学严谨，可采用等分法、标准差法或者专家意见的非等距划分法。通过底层指标的等级加权汇总得到项目的综合得分、综合等级，用作项目优劣排序、决策的依据。

（三）评价结果的应用与反馈机制

综合效益评价最终目的并不是为了评价本身,而是要用评价结果来指导实践,提高水务工程规划、设计、施工、运营管理水平。因此,创建起完备的评价结果应用与反馈机制,才是发挥评价工作核心价值的关键。

评价结果最直接的作用就是给决策提供支持。对规划阶段的各种备选方案,综合效益评价能促使决策者从经济、社会、环境等多方面来考虑,选出综合效益最好的方案。对已经建成的项目来说,评价结果可以作为项目的验收、绩效考核、奖惩激励的依据。

更重要的是要创建起有效的反馈系统。评估过程中发现的问题和不足要及时向项目相关责任主体,即规划部门、设计单位、施工单位、运营管理单位反馈。如若评价显示某项目存在生态流量保证问题,那就需将此结果告知运营单位,促使他们作出相应的调度方案调整,并把结果告诉规划、设计单位,在以后类似项目里考虑生态用水需求。反馈机制要针对单个项目,也要面向整个行业管理体系。通过对大量的项目评价结果进行归纳分析,可以发现水务工程建设中普遍存在的问题以及共性规律,从而推动相关技术标准、管理制度、政策法规的修订和完善。评价结果应该用恰当的方式向社会公开,接受公众监督,这样可以提升决策的透明度和公信力,集社会各界智慧,推动水务事业健康发展。当形成一个“评价—决策—反馈—改进”闭环体系之后,综合效益评价就会真正成为推动水务工程高质量发展的强大力量。

第八章 智慧水务系统架构与功能

第一节 智慧水务系统架构与功能

一、智慧水务总体架构设计

（一）感知层网络层平台层应用层架构

智慧水务系统一般采用分层垂直的结构模式来构建，从下往上分为感知层、网络层、平台层和应用层，各层职责分明，层层相接。

智慧水务系统层次架构概览

层次	定位	主要功能	关键设备 / 技术
感知层	系统的“五官”	全天候、高精度动态采集水务设施运行状态和水环境参数	流量计、压力传感器、水质在线分析仪、液位计、高清摄像头等物联网终端
网络层	系统的“神经网络”	将感知层数据安全、可靠、高效传输至数据中心	5G、窄带物联网、光纤通信、无线专网等
平台层	智慧水务的“大脑中枢”	统一存储、治理、整合、分析多源异构数据，提供可复用服务组件	云计算、大数据、人工智能、数据中台、业务中台、地理信息服务、模型算法服务等
应用层	价值实现的最终窗口	搭建面向供水、排水、防汛、水环境、节水等全业务的智慧应用	管网漏损分析、智能调度、水力模型模拟、内涝风险预警、河湖长制管理等

从上表可以看出，感知层是系统的“五官”，分布在水源地、水厂、管网、泵站、用户终端、排水设施等各个地方，用流量计、压力传感器、水质在线分析仪、液位计、高清摄像头等各类物联网终端设备，对水务设施运行状态和水环境参数进行全天候、高精度的动态采集，为整个系统提供源源不断的基础数据。

网络层是系统的“神经网络”，主要把感知层汇聚的大量数据安全、可靠、高效地传送到数据中心。该层使用 5G、窄带物联网、光纤通信、无线专网等通信技术来创建一个覆盖面广、可靠稳定的空天地一体化的通信网络。网络层主要考虑的是低延迟、高带宽、高并发，保证日常监测、应急响应等各种情况下的信

息流不拥塞，给上层平台实时分析、快速决策提供时间保证。

平台层是智慧水务的“大脑中枢”，主要由基础设施平台、数据中台、业务中台构成。它依靠云计算、大数据和人工智能等技术，在集中存储、治理、整合和解析各种数据的基础上展开工作。数据中台的目的是构建全域水务数据资源池，对数据进行清洗、标准化、关联分析，将数据转化为有价值的资产。业务中台将水务管理中通用功能及业务逻辑沉淀为可复用的服务组件，例如地理信息服务、模型算法服务、预警预测服务等，以服务化的形式支持上层应用快速开发和灵活创新。

应用层是智慧水务系统价值最终的体现环节，面对的是管理者及一线操作人员。该层依靠平台层的强大数据和能力支撑，搭建起供水、排水、防汛、水环境、节水等全部业务的智慧应用，其中包括管网漏损分析、智能调度、水力模型模拟、内涝风险预警、河湖长制管理等。应用层依靠可视化的用户界面，把繁杂的分析成果用图表、报表、三维场景等容易理解的形式表现给用户，从而助力管理者认清问题，作出合理决定，给现场人员给予精确的作业指引，达成业务流程的闭环。

（二）云边端协同技术架构

随着水务业务对于实时性、可靠性要求越来越高，传统的纯中心化云计算架构暴露出数据传输延迟大、网络带宽压力大的问题。因此智慧水务系统越来越使用云、边、端协同的技术架构，在靠近数据源头或者控制单元的地方增设计算和存储资源，从而高效地处理数据并快速响应业务。这种结构把计算任务在云、边、端之间做好分配，形成一种优势互补的智能系统。

该协同架构下端侧智能设备除了能进行数据采集外，还有一定的数据处理以及边缘智能的能力。智能水表可以定时对流量数据进行存储和上报，在智能摄像头中设置算法实时识别河面漂浮物或者设备异常等，可以大大减少上传到云端的数据量，并且能够及时发出告警。

边缘侧是云和端之间连接的桥梁，一般设在水厂、大泵站或者区域管网监控中心等关键节点。边缘计算节点将管辖范围内各终端设备的数据汇集起来，可以对数据进行清洗、聚合、实时分析，也可以实现本地化的智能决策和控制。以供水管网分区计量为例，边缘控制器可以对本 DMA 内实时流量、压力状况作出漏损判断和压力调节指令，不需要等待云中心的远程控制指令，响应速度大大提高，而且更加可靠。

云中心主要做全局性的、长时间的、大跨度的复杂计算和深度分析。云平台汇集边缘节点上传的摘要数据、关键事件数据，依靠自身强大的计算能力完成水力模型的整体优化、长时间水量预测、资产健康状况评估、跨区水源联合调度等工作。云还会对分布到边缘和终端的算法模型进行统一训练、更新和管理，然后把更新过的模型发到边缘节点，从而使整个系统的智能水平不断迭代演化，形成云端训练、边端推理的高效模式。

（三）系统架构的开放性与可扩展性

水务工程的复杂性、长期性决定了智慧水务系统必须是一个能与时俱进、不断成长的“生命体”。因此系统架构的开放性以及可扩展性就显得十分重要。

系统开放性的核心就是标准化、模块化。设计之初就应按照国家、行业及国际相关标准对数据格式、接口协议、服务规范等做出统一规定。

1. 使用标准接口协议：系统要提供 RESTful API 等业界主流的技术标准的接口协议，使第三方应用、设备能方便的接入到系统中去，从而达到数据双向流动、功能互调的目的。利用 API 实现系统集成，可以很大程度上降低集成的复杂性以及成本。

2. 构建微服务架构，将大型单体应用拆分为多个小而独立的服务，每个服务对应一种功能，可以独立进行开发、部署和扩展。系统中各个功能模块独立存在，升级或者更换某个功能的时候，只需要对相应的微服务进行操作，不会影响整个系统的正常运行。

3. 创建统一平台，建立低代码或者无代码环境，让业务人员可以快速利用拖拽、配置等方式创建新的应用场景，满足不同人的管理需求，让系统更具有适应性、生命力。

系统可扩展性就是系统对业务量增加、功能需求变化的能力。这就需要从计算、存储、网络、应用等各个方面做前瞻性设计。从基础设施层面来讲，用虚拟化以及容器化技术（Docker，Kubernetes）来达成计算与存储资源的弹性伸缩，使得系统可以依照业务负荷的起伏，自行增加或者削减资源，进而实现按需分配、节约成本、提升效率的目的。数据上使用分布式数据库加大数据处理框架，保证数据量呈爆炸性增长的时候，系统依然可以保持较快的查询和分析速度。从应用角度来讲，模块化设计使得新增业务功能如同搭积木一般简单，可以作为新的模块或者服务轻松加入到现有的体系中，不需要对核心架构进行颠覆性的改造，从

而保证系统可以灵活、低成本地应对未来水务管理不断变化的需求。

二、智慧水务核心功能模块

智慧水务系统厉害之处在于一堆面向具体业务场景的功能模块。这些模块把前沿的架构和技术转化成解决实际问题的工具，实现了对水源地、工厂、管网、用户、河流、洪涝等水务全链条的智能化运作和协同优化。

（一）水源地监控与原水调度模块

水源地是城市供水生命线，保证水源地水质安全和供水稳定是水务管理的第一要务。水源地监测与原水调度模块利用物联网、大数据技术，建立以水源保护区、取水口、输水管线这三个空间为主的立体监测及调度系统。在水源地的关键断面和取水口设置水质、水量、水动力等多参数在线监测设备，可以实时掌握水源地水文水质动态变化情况，一旦发生污染超标、水位异常等状况，系统就会立刻发出警报，给管理部门采取应急措施赢得宝贵时间。

该模块的核心价值就是把被动应对转变为主动预测。它把气象、水文、污染源等多维数据融合起来，依靠水质演变模型和水量预估模型，可以提前预知未来一段时间内水源地水质的变动趋向以及可供水量。根据上述预测的结果可以得出原水调度的功能可以制定出跨流域、多水源联合调度方案。枯水期系统可以给出最优取水量比例，满足城市用水需求；发生突发性水污染事件时系统可以模拟出污染物扩散路径，生成应急调度方案，例如启动备用水源、关闭或者调整取水口等，把事件影响降到最小，保证原水供应的安全和韧性。

（二）供水管网智能运行与调度模块

城市供水管网是庞大的、复杂的地下设施，它的运行好坏关乎着千家万户的用水感受。供水管网智能运行与调度模块属于实施管网精细化管理的途径，能够降低供水管网的运营成本。本模块以管网地理信息系统为载体，将在线监测数据、生产调度系统数据、用户用水数据进行整合，得到精确的管网数字孪生模型。该模型不但是管网静态资产的数字化再现，更是其动态运行状态的实时模拟器。

基于数字孪生模型，系统可开展多项智能化应用。

1. 根据分区计量数据及夜间最小流量确定漏损地段。用压力、流量、听音设备得到的数据，加上相关性分析、机器学习算法这些手段，可以把漏损点找到米级的准确度，这样修复速度就会提高，产销差就会减少。

2. 水力模型和智能调度系统内部具有水力模型，可以对管网中的水流、压力分布进行实时模拟，也可以根据调度方案的改变来预测全网水力工况的变化。在此基础上智能调度功能根据全网需水量时变特性，自动调整泵站启停组合及频率，达到管网压力动态平衡，既能满足远端用户用水压力要求，又能防止近端压力过高造成能耗大、管道爆裂等安全风险，从而达到整个系统节能的目的。

3. 应急模拟和辅助决策，在爆管、水源污染等突发事件发生的时候，管理人员可以在数字孪生模型上做快速模拟，对受影响的用户以及水质扩散路径等进行分析。系统能自动生成关阀方案、应急供水方案等处理措施，为抢修指挥、应急决策提供直观、科学的支持，从而缩短应急响应时间。

（三）排水防涝与污水处理监管模块

城市内涝问题日趋严重，水环境保护的要求不断提高，排水防涝和污水处理智慧化监管就显得尤为重要。该模块把气象预报、管网液位、泵站状态、河道水位、污水处理厂进出水水质水量等各种信息整合起来，从而对城市排水、防涝、治污的全过程实施联动控制。在排水防涝上，模块可以使用暴雨内涝模型、雨量实测、管网液位实时数据，动态判断城市重要区域是否积水，用不同的预警色对城市各个部分进行可视化展示。

系统根据预测结果，在预报到高风险内涝时，可以自动或者半自动启动应急预案，智能调度排涝泵站、闸门等设备，按照预先设定的优化策略将雨水快速、有序地排出，最大程度地减小城市内涝灾害的影响。系统还可以利用移动应用把积水情况和预警信息迅速传递给市民、相关部门，便于公众避险，也有利于协同排涝。污水处理监管，污水从产生、收集、输送、处理达标排放全过程在线监测。通过管网关键节点、污水处理厂进出水口的连续监测，可以及时发现雨污混接、污水偷排、管网堵塞等问题。还可以对污水处理厂工艺运行参数进行智能分析、优化，帮助厂区节能降耗、稳定达标排放，给城市水环境质量持续改善提供准确的数据支撑和监管抓手。

三、智慧水务系统的集成与协同

智慧水务的价值，不在于各个功能模块本身的强大叠加，而在于打破信息壁垒，实现数据、业务的全面集成和高效协同。智慧水务系统把分散的管理要素有机整合起来，产生更深层次的管理洞察，具有更高的联动反应能力。

（一）各业务系统数据共享与业务协同

传统水务管理当中，收费系统、客服系统、生产调度系统、资产管理系统等常常各自独立运作，由此产生许多“数据孤岛”。智慧水务系统首要的集成工作就是打通竖井，创建统一的数据共享平台。借助企业级水务数据中台，把分散在各个业务系统里的数据开展汇聚，清洗，标准化等操作，从而构建起一个统一的，权威的，可信的全域数据视图。进而达成跨系统的业务流程再造与协同。

当客服系统收到用户报修漏水时，可以和收费系统用水量异常的数据做初步的关联判断，在地理信息系统上定位到用户的位置，生成工单，推送到资产管理系统和维修人员的移动终端。维修人员现场修理完毕之后，通过移动终端反馈信息，数据会自动更新到所有的相关系统中。这样的业务协同依靠数据，可以改进工单处理的速度和客户的满意程度，达成业务流程的闭环管理并做到全程可追溯，给以后的管理改善赋予可信的根据。

（二）与城市信息模型平台对接

水务系统是城市基础设施的重要组成，它的规划、建设、运行同城市其它系统有着密切的关系。将智慧水务系统同城市信息模型平台对接起来，这成为达成水务工程同城市发展深度协同的重要一环。城市信息模型平台是承载城市地上地下、室内室外、历史现状未来多维信息的数字底座，通过对接，可将水务系统各类信息融入到更大的城市数字空间中。

这种对接带来了多重价值。

1. 规划协同：设计人员使用城市信息模型平台在城市规划阶段查看水务管道和燃气、电力、通信等市政管线空间关系，进行综合规划，在源头上防止管道碰撞、多头开挖等问题。

2. 建设协同，用建筑信息模型把水务工程嵌入城市信息模型平台，对施工进度实施可视化监控和管理，模拟施工给周边交通、环境带来的影响，进而改进施工组织方案。

3. 运行协同：发生火灾时城市信息模型平台可以调用智慧水务系统消防栓数据，给消防部门提供最近水源信息；道路塌陷时可以快速查询地下是否有供水主干管，为应急处置提供关键信息。利用跨领域数字孪生联动，城市在处理复杂、突发事件的时候协同能力会得到很大提升。

（三）跨部门跨区域信息协同机制

水问题具有复杂性、流域性、社会性，治理水问题不能靠水务部门单打独斗，要建立跨部门、跨区域信息协同机制。智慧水务系统应该成为水务数据的主要提供者、枢纽，并积极融入政府数据共享体系。这不只是一个技术层面的对接，也是一个制度层面的对接。要制订数据共享清单、标准规范、安全协议等，确定各个有关政府部门在数据共享过程中享有的权利和应承担的责任。

在跨部门协同上，水务部门要同环保、气象、规划、应急、交通等相关部门建立数据交换的常设机制。环保部门污染源监测数据可以预警水务部门水源地风险，气象部门的精准天气预报是水务部门开展防汛调度、需水预测的重要输入。同时水务部门管网漏损、城市内涝等信息也可以给其它部门管理决策提供支持。跨界河流的流域管理要依靠上下游城市来共建共享流域信息平台。共享上下游的水文水质监测数据，建立公平合理的水量分配、水质污染联防联控机制，共同应对洪水、干旱、污染等突发事件，从而让各个区域由“各自为政”变为“流域共治”，达到水资源的可持续利用、水生态协同保护的效果。

第二节 大数据与物联网技术应用

一、物联网技术在水务感知中的应用

物联网技术是物理世界与数字世界的桥梁。在水务系统各个环节部署感知设备，实现水务设施运行状况、水资源信息全面实时的采集。这种全域感知能力就是智慧水务系统的根基，给后面的数据分析以及智能决策赋予了优质的源头数据，从根本上改变了传统水务依靠人工巡检和经验判断的落后局面。

（一）智能水表与智能传感器的部署组网

智能水表和各种智能传感器的安装，为建立水务物联网感知系统打下了基础。就像供水管网系统中分布着的神经末梢一样，随时感知着系统的工作状况。智能水表可以自动远程抄表、上报用水量，也可以实时监测用户侧的用水情况，给精细化管理和服务提供数据支撑。除了安装水表外，在管网重要节点、水源地、水厂和二次供水设施等处安装压力、流量、水质（浊度、余氯、pH 值）、声学等传感器，可以实现对管网水力工况和水质变化的全面动态掌握。

部署策略的好坏直接影响到感知网络的性能和成本。一般用基于地理信息系统的网格分区法，结合管网的拓扑结构和重要性等级来规划。对漏损严重、压力敏感、重要用户、管网末端等部位应增加传感器的布置密度。在组网上，窄带物联网、LoRa 等低功耗广域网技术因为覆盖广、功耗低、连接数量大等优点，成为目前智能水务传感网络的主要选择，可以很好地解决传统无线技术信号穿透、电池续航等方面的问题。

大规模设备部署组网存在复杂城市环境下无线信号稳定性问题、无源或者微功率设备长期供电方案问题、海量异构设备接入兼容性问题。因此在规划阶段就要考虑现场环境，选择最合适的通信技术组合。同时制定统一的接入设备标准和通信协议，使得各种各样的传感器不管是什么品牌、什么型号都可以轻松接入，并且能协同工作，构建起一个开放、可扩展的水务物联网平台。

（二）物联网数据采集、传输与预处理

数据采集是物联网应用的重要环节，数据质量的好坏决定了上层的数据分析与决策的价值。部署在水务系统各个角落的传感器按照设定的频率，自动对瞬时流量、累计流量、管网压力、水质多参数指标、设备运行状态等大量的原始数据进行采集。这些数据以时间序列的形式记录下不同时段、不同空间里水务系统所发生的各种变化，从而形成水务系统的数字映射。

采集到的原始数据经由 NB-IoT、4G/5G 等无线通信网络，加密之后送到物联网平台或者数据中心。数据传输需要保证可靠性、实时性和安全性。为了保证数据在传输过程中不被窃听、篡改，需要采用端到端加密的方式，并进行身份认证。由于部分监测点网络信号弱，所以设备需要有数据缓存和断点续传的功能，在网络恢复后可以将缓存的数据全部上传，不会出现数据丢失的情况。

原始的传感器数据往往会包含噪声、异常值或者缺失值，不能直接用于分析，因此数据预处理是保证数据质量的关键步骤。预处理一般在边缘计算节点或者云端实施，主要包括清洗数据、转换数据格式、规整数据等。数据清洗是为了识别并纠正由于传感器漂移、通信干扰、环境因素等原因造成的数据异常和缺失值；数据转换就是将不同厂家、不同协议的设备数据统一成标准格式；数据规整是对时间戳进行对齐、数据聚合等操作，最终得到干净、规范、可用于分析的高质量数据集，为上层大数据分析应用提供可靠的数据原料。

（三）物联网设备的运维与管理

物联网传感器、智能仪表在水务系统中大规模铺设之后，运行维护、管理工作就成为保证整个智慧水务体系长时间稳定运行的重要环节。海量的设备分布在各个地方，很多安装在地下、高空等恶劣的环境之中，传统的定期人工巡检方式成本高、效率低，不能满足实时高效的管理需求。因此，建立智能化的设备运维管理系统迫在眉睫。

一个高效的物联网设备运维管理平台应该能够对资产进行全面的管理、对状态进行监控、对设备进行远程的维护，其主要功能一般包括：

1. 建立统一的设备电子档案来管理设备资产全生命周期，记录每台设备的基本信息、配置信息、维护记录、报废年限等，实现设备从采购到安装、使用到报废的全过程数字化管理。

2. 实时状态监测、智能告警，平台对所有设备的运行状态数据进行实时采集，包括电池电量、信号强度、工作温度、数据上传频率等。合理设置阈值，可以自动识别出设备离线、电量不足、通讯故障等异常情况，并且及时通过短信或者 App 的形式通知运维人员去处理。

3. 远程配置、远程诊断、远程维护，可对在线设备进行远程参数设置、远程固件升级、远程重启、远程故障诊断等操作。运维人员不需要频繁到现场巡检维护，尤其是偏远、难以接触的设备来说，运维成本被大幅度降低，故障修复时间也被大大缩短，提高了整个感知网络的可用性、可靠性。

二、大数据技术在水务分析中的应用

物联网形成了一张巨大的数据采集网，而大数据技术就是从中挖掘价值、提炼洞察的大脑。采用先进技术手段对数据实施存储、处理、分析，把纷繁复杂的数据转化成指引水务工程规划和经营决策的知识，推动水务管理由依靠经验指导转向被数据引导，深刻地改变了水务管理的各个领域。

（一）水务大数据的存储、清洗与治理

水务大数据有来源繁杂、结构多样、体量宏大的特点，涉及物联网传感器实时监测数据、SCADA 系统生产数据、GIS 系统管网空间数据、客户服务系统业务数据、气象数据和社会经济数据等外部数据。面对海量、多态数据，传统数据库技术已经不能满足需求了，需要使用分布式文件系统、NoSQL 数据库和数据

湖等新一代大数据存储技术来实现结构化、半结构化、非结构化数据的有效弹性存储和处理。

数据的价值是由数据的质量决定的，因此数据清洗是大数据应用必不可少的前期工作。由于传感器老化、信号干扰、人为录入错误等原因，原始数据中经常存在噪声、异常值、重复值、缺失值。数据清洗过程使用统计方法、机器学习算法等技术手段，自动或者半自动识别出这些脏数据，例如设置阈值或使用孤立森林算法剔除异常值，用插值法或者预测模型填补缺失值，从而保证进入分析模型的数据是正确的、一致的。

数据治理为数据资产长期可持续利用提供制度保障。它的目的就是建立一套完整的数据管理体系，制定统一的数据标准、元数据管理规则、数据质量评价标准和数据安全、隐私保护办法。经过数据治理之后，不同业务系统之间的“数据孤岛”现象被打破，数据的所有权和使用权变得清晰，数据的整个生命周期流程也被规范，从而使得数据的可信度、可用性、安全性得到提高，为企业的数据驱动决策打下坚实的基础。

建设统一的水务数据中心或者数据湖，这就是实现数据全面整合共享的好办法。把各个业务系统零散的数据汇聚起来，再进行整合、关联，就可以得到全局统一的“数据视角”。在此基础上，数据科学家以及业务专家能快速、便捷地获取到各种所需的数据来进行跨主题、跨领域深层次的分析来发现数据所含有的价值，使水务企业前所未有的洞见力为创新打开全新的道路。

（二）基于大数据的用户行为分析

智能水表使用可以获取用户高频率高精度的用水数据，给深度分析用户用水行为模式提供了前所未有的数据支撑。传统的水务管理只能获取月度或者季度为周期的用水总量，大数据分析可以达到小时甚至是分钟级别，准确地描绘出用户的用水规律，把宏观的管理提高到了微观的洞察。

利用大量的用户时间序列用水数据进行聚类分析，可以找出具有不同用水特征的用户群体。例如白天用水为主的商业用户与夜间用水为主的居民用户，而居民用户中又可以分为早晚双高峰型、平稳型、随机型等。依靠数据驱动的用户画像比传统按用途分类更加精确，能为水务服务的差异化、个性化提供支持。

用户行为分析有广阔的应用价值。它能为需求侧管理提供科学依据，通过对不同用户用水高峰期以及用水弹性进行识别，可以制订出合理的阶梯水价、分时

水价政策，从而引导用户错峰用水、节约用水。通过建立每一个用户的正常用水行为基线模型，可以对用水异常进行实时监控。当发现用水量一直大于正常值时，就说明存在户内管道漏水的情况，此时系统就会自动对用户发出警报，以减少水费的损失以及水资源的浪费。用户行为分析有利于精准营销、提高客户满意度，可以给用户提供个性化的用水报告和节水建议。

（三）基于大数据的管网漏损分析与预测

供水管网漏损是全世界水务行业所面临的严重问题，不但造成珍贵的水资源浪费，还会增加供水企业的运营成本。大数据技术为管网漏损精细化管理打开了一条新思路，用分析预警的方式代替了以前被动的听漏修缮。

基于大数据的漏损分析，首先要对供水分区进行细水龙头的计量和监测。通过对各分区夜间最小流量进行分析，可以对该区域的漏损情况有一个大概的了解。利用大数据平台可以对全网几百个 DMA 的夜间最小流量进行跟踪，也可以进行同比、环比分析。当某个区域夜间最小流量突然增大时，系统就会发出警报，提示管理人员该区域有高漏损嫌疑，从而快速缩小人工查漏范围。将压力数据、用水量数据、管龄管材数据、历史爆管记录等结合起来，使用机器学习算法（随机森林、梯度提升树等）来建立漏损预测模型，找出漏损发生的主要影响因素，预测管网中各个管段未来发生漏损或爆管的概率，形成管网健康度的“风险地图”。有利于指导企业把有限的管网更新改造资金首先投向风险最大的地方，从而取得最大的投资效益。

三、数据驱动的决策支持

（一）供水调度优化决策支持系统

传统的供水调度很大程度上还依靠调度员个人经验，很难在保证供水压力稳定、满足用户需求、降低泵站能耗等方面做到全局最优。以数据为驱动的供水调度优化决策支持系统，依靠全网实时数据和先进的算法模型，实现了从经验调度到智慧调度的转变。

该系统首先根据历史用水数据、天气预报、节假日信息等，使用时间序列预测模型或者神经网络模型，准确预测接下来 24 小时甚至更久的各个供水分区用水需求量。然后根据管网压力、水厂清水池水位、泵组运行状态等信息调用内置管网水力模型进行在线仿真计算。

调度优化引擎以全网压力最均衡、总供水能耗最小为优化目标，在满足所有供水安全约束的条件下，用最优化算法（遗传算法、线性规划等）计算出未来一段时间内各水厂出厂压力、各泵站启停组合和运行频率的最优调度方案。此方案以指令或者建议的形式传递给调度人员，指导其准确操作，使供水系统的总能耗降低，管网压力波动减小，爆管的风险降低，提高供水质量。

（二）排水防涝应急决策支持系统

城市暴雨内涝越来越频繁，传统的应急响应方式反应慢、信息不准确、调度乱。数据驱动的排水防涝应急决策支持系统把气象、水文、设施运行等各种信息整合起来，可以实现对内涝风险的提前预警、过程模拟、应急资源智能调度等功能，大大提高城市防汛排涝能力。

该系统可以实时接入气象部门雷达降雨预报数据、城市内部雨量计数据、分布在排水管网、检查井、河道、易涝点的液位传感器数据。当监测到强降雨天气过程时，系统立即启动内置的城市排水管网水力模型，根据实时雨情和管网、河道初始水位快速模拟预测未来几个小时各个区域的降雨径流过程，可能出现的积水点、积水范围、积水深度等预警信息会用一张图直观地呈现出来。

根据模型预测出的内涝风险，可以自动产生并推送应急处置预案。即提出重点区域排水泵站、闸门的最佳启停及开度调度方案，尽可能发挥管网和河道的调蓄作用；并根据实时交通状况和应急仓库物资情况，给出抢险队伍、移动泵车的最佳调度路径规划。智能化决策支持给予了管理者珍贵的应急准备时间，城市由被动抢险转变成主动防御，削减了内涝灾害给城市运作，市民生活带来的损害。

（三）设备健康管理及预测性维护

水厂、泵站中的泵组、阀门、风机等重要机电设备是保证水务系统正常运转的“心脏”，一旦发生意外故障停机，会造成严重的供水或者污水处理中断。预测性维护使用大数据分析技术来实时评价设备的健康状况，并且预测设备未来的发展趋势，把过去按照时间表安排的定期维修或者故障发生后维修的方式，转变为根据实际情况而定的精确且有前瞻性的维护方式。

该系统对重要的设备安装了高频振动、温度、电流、压力等传感器，对设备运行状态进行连续采集。数据被传送到之前训练好的机器学习模型里，比如支持向量机、深度神经网络等等。模型学习了设备从正常到故障全过程数据模式之后，就可以随时发现预示设备性能下降或者隐藏故障的细小异常。当设备的健康指数

不断降低并小于预警临界值时，系统就会自动向运维人员发出警报，报告出现的故障及原因。

进一步利用设备历史运行数据以及同类型设备故障数据进行分析，可以对设备剩余使用寿命进行预测。这样企业就可以在设备性能明显下降或者出现功能性故障之前，提前做好备品备件的采购和检修时间的安排，在最合适的时间开展维护工作，最大限度地减少非计划停机时间，降低维修成本，延长设备的使用寿命，保证整个水务生产过程的连续可靠运行。

为了更清晰地展示物联网设备运维管理平台的功能，错误纠正码参数和属性可见下表。

物联网设备运维管理平台主要功能表

功能类别	具体功能描述
资产管理	设备资产全生命周期管理：统一电子档案、基础信息、配置信息、维护记录、报废年限
状态监控	实时状态监测：电池电量、信号强度、工作温度、数据上传频率
智能告警	异常情况自动识别与告警：设备离线、电量不足、通信故障，通过短信 /App 通知
远程维护	远程配置：参数设置、固件升级、重启
	远程诊断：故障诊断、减少现场巡检

第三节 信息化平台建设与运维

一、信息化平台建设规划

（一）平台建设的目标与需求分析

水务工程信息化平台的主要目的就是打破数据壁垒，实现规划、实施两个环节业务之间的对接和信息交流。平台主要就是建设一个包含水务工程全生命周期的综合管理、决策支持系统。即提高规划的科学性，加强规划过程的精细化管理，提高资源的配置效率，提高突发水灾的应急响应能力。汇集成各种水务相关资料，用模型分析、可视化方法为管理者提供准确的依据。

需求分析为目标设定提供基础，需要对水务管理的每一个业务环节做深入的研究。该过程要全面收集整理规划部门、工程管理部门、调度运行部门、财务部

门和一线作业人员的需求。需求不仅仅是数据查询、统计报表、流程审批、GIS 地图服务、仿真模拟等各方面的功能需求，还包括系统性能、可靠性、安全性、易用性、可扩展性等方面非功能需求。需求分析的深广度直接影响平台设计是否合理，最终用户是否能接受，是保证平台建设好、用得上的根本条件。

为了保证需求分析的全面性、准确性，一般会采用问卷调查法、专题访谈法、现场观察法、业务流程图法等。分析结果要形成系统的需求规格说明书，各个功能的业务逻辑，数据来源，操作流程和预期产出都要写清楚，还要对需求做优先级排序。以业务为驱动的需求导向模式，能保证平台功能设计与实际工作紧密联系，真正解决水务工程协同管理的痛点难点，达到技术同业务的融合。

（二）技术选型与架构设计

技术选型和架构设计，是把平台目标转换成实际系统的技术桥梁，其是否合理将会直接影响到平台的性能、稳定性和生命周期。选择技术的时候要考虑到技术的成熟度，社区的活跃程度，运维的成本以及和技术体系的兼容性。目前主流的技术栈大多采取前后端分离的方式，前端可以选择使用 Vue、React 等框架来提高用户的交互体验，后端可以使用 Java 或者 Python 语言搭建微服务集群，保证系统的高内聚、低耦合。数据库方面，结构化的业务数据可以使用关系型数据库 PostgreSQL 存储，日志、地理空间信息等半结构化或非结构化数据可以使用非关系型数据库 MongoDB、Elasticsearch 存储。

平台整体架构要依照分层、模块化和服务化原则来加强系统的灵活性与可扩展性。典型的分层架构分为如下几层：

平台典型分层架构

层级	主要功能	常用技术或特点
基础设施层	提供计算、存储、网络资源	私有云、公有云、混合云；容器化技术和容器编排
数据资源层	数据汇聚、清洗、转换、存储、治理	数据仓库构建；提供统一、标准、高质量数据服务
应用支撑层	提供通用服务和中间件	用户认证中心、流程引擎、地理信息服务、消息队列、人工智能算法服务
业务应用层	针对不同业务场景开发应用模块	规划方案比选、工程进度监控、管网运行模拟、水量水质监测、资产设备管理
展示交互层	提供用户界面及数据展示	Web 门户、移动应用、大屏驾驶舱；注重用户体验和个性化

如上表所示,基础设施层提供计算、存储和网络资源,以私有云、公有云或混合云的形式部署。容器化技术和容器编排技术可以对资源进行管理,实现应用快速部署、弹性伸缩和高可用性。数据资源层为平台提供了数据的基础,主要负责数据的汇集、清洗、转换、存储以及治理。本层是数据仓库的构建层,同时也是数据服务化的实现层,向上提供统一、标准、高质量的数据。应用支撑层为平台运行提供通用服务和中间件,如用户认证中心、流程引擎、地理信息服务、消息队列、报表引擎、人工智能算法服务等。对公共组件进行抽象与沉淀,可以减少应用开发中重复的工作,提高开发效率。业务应用层针对不同的业务场景开发出规划方案比选、工程进度监控、管网运行模拟、水量水质监测、资产设备管理等各种应用模块。直接面向最终用户的模块,是平台价值体现。展示交互层则利用 Web 门户、移动应用、大屏驾驶舱等不同的形式把平台功能以及数据提供给不同的用户。设计时要重视用户体验,给予个性化的界面以及简便的操作流程,保证信息得以有效传递。

（三）项目实施的组织与管理

信息化平台项目实施属于一个比较复杂的系统工程,为了保证项目顺利进行需要建立起科学合理的组织架构及管理制度。项目一般采用矩阵式的管理,从上至下设立有项目经理、产品经理、架构师、开发团队、测试团队、运维团队等职能岗位并且明确职责。横向按不同的业务模块或者子系统来创建项目小组,由项目经理来调配资源,并保证各个小组之间紧密协作,信息交流无阻。还要成立以水务部门领导、业务专家、技术专家为成员的项目指导委员会,对项目的重大决策进行审议和把控,保证项目始终沿着正确的方向前进。

项目的开发可以采取传统瀑布模型和敏捷式开发相结合的方式。需求明确、边界清楚的模块使用瀑布模型,保证研发工作的严谨性。对于需求具有不确定性或者需要快速迭代验证的创新应用来说,更适合使用敏捷开发方法,通过短周期的迭代不断交付可用的功能,根据用户的反馈及时调整开发的方向。灵活的管理方式有利于协调好项目进度、成本、质量三者的关系,提高对需求变化的响应速度。

在实施的过程中沟通管理、风险管理、质量管理这三个环节是最重要的。必须定期召开项目例会、评审会、沟通协调会,使各干系人随时掌握项目进展情况,防止矛盾、纠纷的发生。风险管理要求在项目开始时就对可能遇到的技术风险、管理风险和业务风险有所认识,并做好相应的应对预案。质量管理渗透到需求、

设计、编码、测试、上线全过程中，依靠严格的代码审查、单元测试、集成测试、用户验收测试来保证最终交付系统的质量达到预期标准。

项目交付验收不能忽略。验收不但是对合同条款、功能达成情况的确认，也是对系统性能、安全状况、文档完备性、可运维性进行全方位检查的过程。只有经过严格的验收测试、试运行考核以后，项目才算是真正意义上的交付。后期应该制定详细的上线计划和用户推广方案，使平台能顺利地进入日常运维阶段，被广大用户所接受和使用。

二、数据资源中心建设

数据是信息化平台的血液，数据资源中心建设是盘活水务信息资产、发挥平台核心价值的根本。其目的就是统一标准、规范，整合分散异构的水务数据，提高数据资产质量，为上层智慧应用提供有力支撑。

（一）数据标准与规范体系建设

数据标准与规范体系是数据资源中心建设的根基，也是达成数据互联互通、业务协同的前提。该体系的建设工作浩大繁杂，必须从源头上统一数据的“语言”。它由基础标准、数据标准、技术标准、管理标准四部分组成。基本标准给出通用编码规则，例如行政区划代码、人员机构代码等。数据标准针对水务的核心业务对象，如水源地、水厂、泵站、管网、监测站点等，对数据模型、字段定义、数据类型、取值范围、度量单位等做出统一规定，以保证同样的数据在不同的系统中的一致性。

技术标准主要是对数据采集、交换、存储、服务全过程中的技术要求进行制定。比如数据接口协议，数据交换格式 (JSON 或者 XML)，数据采集频率，时间戳等等。管理标准用制度来保证数据标准的执行，对数据管理的组织架构、岗位职责、工作流程、数据质量考核和奖惩制度做出规定。建立跨部门数据管理委员会，对标准进行审定、发布、修订并监督执行，是保证标准落地见效的重要组织保障。标准的形成要充分征求各个业务部门意见，保证标准的科学性、合理性、可行性，以正式文件形式发布，作为日后所有信息化项目必须遵循的纲领。

（二）数据资源目录与数据仓库构建

数据资源目录是数据按图索骥的工具，它就像数据中心里的“图书馆藏目录”，清楚地显示着数据中心有哪些数据、数据在哪儿、数据是什么意思、数据的质量

怎么样、数据属于哪个部门。构建数据资源目录的过程，首先要对水务部门所有的信息系统、数据资产进行全面清点，心中有数。按照前面所述的标准对每一项数据资源进行元数据著录，元数据信息包含数据名称、编码、业务含义、数据来源、更新频率、责任人等。目录应该具备方便的检索、浏览功能，让用户可以轻松找到自己需要的数据以及该数据的权限和申请程序。

数据仓库是数据资源中心的物理核心，也是各类数据的集中存储和处理平台。数据仓库的创建一般采用 ETL（抽取、转换、加载）的方式。抽取就是从各个分散的业务系统、物联网感知设备、人工填报系统等数据源中获取原始数据。转换是 ETL 过程最关键的一步，它根据标准对数据进行清洗（去除重复、错误的数据）、转换（统一格式和编码）、整合（关联不同的数据源），保证入库数据的质量。加载就是把经过处理的优质数据装载到数据仓库的主题库中。数据仓库一般按照业务主题进行组织，比如水资源主题、供水安全主题、工程建设主题、排水防涝主题等。面向主题的组织方式可以使得数据更方便被业务人员理解分析，为后面的决策支持、数据挖掘、模型训练打下坚实的基础。

（三）数据安全与隐私保护

随着数据资源的集中程度越来越高，数据安全和隐私保护越来越重要，它是数据资源中心建设不能逾越的底线。必须建立纵深防御安全体系，用技术、管理两方面来保证数据的机密性、完整性、可用性。从技术上来讲，要设置防火墙、入侵检测系统、数据加密技术、数据库审计等安全设备和技术手段，防止被外界攻击和非法访问。存储于数据仓库里的敏感数据，有关个人隐私或者国家安全的需要加密存储，在数据传输的过程中使用全加密信道来防止数据的泄露或篡改。

从管理的角度来说，应该建立健全的数据库安全管理制度。即构建基于角色的访问控制体系来保证每一个用户的访问权限在它的可访问资源之内。制定数据分类分级管理制度，根据不同的密级采取不同的保护措施。健全数据操作日志和审计制度，对所有的数据访问及操作都予以记录，以便日后查考，确定责任。同时要定时做数据安全风险检测及应急演练，提高对安全事件的警觉性并做好应对措施。对涉及个人隐私的数据，在采集和使用过程中必须严格遵守合法、正当、必要的原则，在获得用户同意之后才能使用，并将数据进行脱敏处理后再用于分析、共享等，必须严格按照国家有关个人信息保护的相关法律法规来操作。

三、平台运维与持续优化

信息化平台生命力的来源在于它稳定的运行和不断的进化。形成一套科学有效的运维和优化体系，是保证平台长久发挥其价值、适应业务发展的重要必然要求。运维工作不能只是“救火队”，更应该成为平台健康的“保健医生”，由被动响应变为主动预防。

（一）系统运行监控与故障处理

系统运行监控是保证平台稳定性的第一道防线，主要目的就是対平台软硬件资源进行全方位、实时、可视化的监控。监控内容要包括服务器的 CPU、内存、磁盘利用率，网络设备流量、带宽，数据库连接数、慢查询，各个应用服务的健康状态、接口响应时间等。使用 Zabbix、Prometheus 等开源监控工具建立集中式监控告警平台。平台要设置合理的告警阈值，当指标异常的时候，可以采用短信、邮件、即时通讯工具等多种方式，第一时间将告警信息推送给运维人员，从而实现故障的早发现、快处理。

故障处理要有标准操作程序。运维人员在收到告警之后，首先要对故障进行分级，确定它造成的影响范围和紧急程度。按照事先制订好的应急方案，迅速进行故障定位、分析、排除。建立常见故障类型的知识库，把故障问题的现象、原因、解决方法记录下来供以后参考。每次发生故障之后都要做复盘总结工作，分析故障产生的原因，促使改进措施落实到位，可能会涉及代码优化、配置改变或者硬件更换等，从而达成由被动应对转向主动防范的转变，使系统变得越来越健壮、越来越可靠。

（二）数据更新与模型迭代

数据是否新鲜、模型是否准确，是平台能否一直给出好的决策支持。因此必须建立数据资源中心的数据更新机制，使数据资源中心中的数据能及时反映业务最新的状态。这就需要同各个数据源系统建立起稳定的同步链路，针对不同的数据，采用不同的更新方式，实时同步、准实时同步或者定时批量同步。健全数据质量监督机制，定期进行入库数据的完整性、准确性、一致性稽核，对发现的问题进行追溯，待问题改正后形成数据治理闭环。

业务模型和算法模型都要不断进行优化迭代。随着业务环境的变化以及新的数据不断增加，原来的分析模型或者预测模型的准确性会下降。所以应该创建模

型全生命周期的管理机制。定期评价模型的性能，把模型的预测结果同实际发生的状况加以对比，从而找出误差产生的原因。根据评价结果，用新数据对模型进行再训练，或者用新算法对模型进行更新和重构。在模型迭代的过程中要邀请业务专家参加，保证模型优化的方向与业务要求保持一致。采用数据与模型相互促进、不断迭代更新的方式，保持信息化平台的先进性和生命力。

（三）用户培训与技术服务

用户是平台价值的最终实现者，良好的用户培训和技术服务可以提高用户满意度，进而提高平台的使用率。因此，就必须创建起多层次、常态化的用户培训体系。

1. 基础功能操作培训：对新人员或者使用系统第一次的用户进行基本功能的操作训练，使他们能更快掌握并上岗。

2. 高级功能专题培训：对有深度使用需求的用户定期组织专题培训班，详细介绍高级分析功能、模型配置、报表自定义等内容。

3. 在线学习资源：制作详细的在线帮助文档、操作视频教程、常见问题解答等，供用户随时查阅、自学。

技术服务体系要提供多渠道、快速响应的服务。可以设立专门的服务热线、在线客服或者服务邮箱，安排专门的技术支持人员来回答用户的咨询，解决问题。对于用户提出的新需求、新建议，应该用标准化的需求管理工作流进行记录和分析，评估之后将其加入到平台迭代版本的规划当中。通过用户座谈会、主动征询用户意见、使用问卷调查法、满意度调查法等方式，促使用户参与到平台持续完善的过程中。积极响应、质量优良的技术支持系统既可以解决用户当下的迫切需求，又可以增加用户对平台的信任感和归属感，从而促进平台在水务工程协同管理中发挥最大的效能。

第四节 数字化协同管理案例研究

一、深圳市供水系统数字化协同案例

作为一个超大城市，深圳市的供水系统复杂而且要求严格，对高效协调管理有更高的需求。深圳水务系统利用数字化技术的巧妙之处在于，规划的前瞻性同工程实施的精细之处形成了有效的联动机制，从而给城市供水安全创建起了坚实的根基。

（一）案例背景与建设目标

深圳市水务集团承担着为 300 多万人口供水排水的重任，业务范围遍布全国多个省份，管理着众多的水厂和庞大的管网。但是传统管理方式长期存在信息孤岛、响应滞后、资源调配效率低等问题。为解决这些困难，满足市民不断提高的高品质生活用水需要，深圳市制订出智慧水务规划。该计划的主要目的就是通过新一代信息技术，实现对水源、供水、用水、排水、治水全过程的智慧化管理，全面提升水务管理决策科学化、服务精细化水平。建设重点是破除业务壁垒，汇聚数据资源，依靠更全面的感知、更智能的决策，提升环境管理、污染源监管能力，提升公众服务水准，从而改善区域环境质量，保障供水安全。

在此背景下，深圳市水务集团开始了全面数字化转型的道路，希望通过互联网 + 技术来建设智慧水务平台，从而重塑客户服务体验、优化内部运营效率。其中龙岗区率先采用基于开源鸿蒙的操作系统，建设智慧泵房，探索如何解决传统模式下人工依赖程度高、调控不精准等问题，探寻关键基础设施数字化转型的新路子。这一系列举措的最终目的，是建设集约高效、绿色智能、循环通畅、调控有序的现代水网，给深圳建设具有全球影响力的经济中心城市提供可靠的水安全保障。此次转型不但是技术层面的革新，更是管理模式的深刻变革，目的是使广大市民享受到五心服务，即用心、放心、省心、舒心、贴心。

（二）数字化协同平台的架构与功能

为达成智慧水务的创建目的，深圳环境水务集团创建了名为“深水云脑”的云化数字孪生智慧体。该平台是集团数字化转型的中心枢纽，依靠开放的云原生技术建立起水务大数据中心、云计算中心，进而打造出智能开放的数字云网基础架构。平台整体架构以实现供排水生产、运营、服务全流程的数字化、智能化为目标，用云计算、大数据、人工智能等先进技术来解决水务运营中遇到的各种问题。平台向下连接超过 158 万个物联感知终端，形成天、地、水、工一体化的感知网络，对河流、管网、泵站、水库大坝等重要设施进行全方位的在线监测。

深水云脑平台具有全过程的功能。平台建立中央数字仓库，把所有数据归拢起来处理，彻底打破了以往供排水业务各个应用程序中信息孤岛的现状，为协同管理打下了统一的数据基础。平台开发出智慧供水、智慧环保等很多数字化应用模块。它的智慧供水管控系统具有全知觉、即时反应、智能决策的功能，可以凭借自主研发的 AI 算法完成从水源地到用户水龙头全过程数字化管控的任务，依

靠机器智能来替代人工经验。平台为市民提供微信公众号、网上营业厅、i 深圳智慧城市平台等丰富的线上服务渠道，使业务的办理更方便快捷，做到业务办理“指尖化”。同时借助外勤云工单中心，对外勤作业实行了标准化、扁平化管理，实现了人、时间、地点、业务信息的数字化闭环。

（三）应用效果与经验总结

深圳市供水系统数字化协同管理取得明显成效，运营效率、服务质量、管理水平均有较大提高。因为数字化转型，营业厅人工服务量下降了不少，用水报装业务的办理步骤和时间都缩短了一半，外勤人员的综合工单效率提高了 48%。水厂智能化改造之后生产管理实现了少人或者无人值守，人员减少 30% 以上，电耗、药耗降低 5% 到 10%。供水产销差得到有效改善，水质综合合格率一直保持在 99.99% 以上，很好地保障了市民的用水安全。

总结其成功经验，可归纳为以下几点：

1. 统一规划、顶层设计，深圳市对于智慧水务一体化建设的总体技术要求进行明确，强调项目整合共享、业务协同，防止重复建设、信息壁垒等问题的发生，为全市创建统一数字孪生水网打下了良好的基础。

2. 技术驱动与业务融合，成功转型的核心是把大数据、云计算、物联网、人工智能等新一代信息技术深度嵌入到水务业务当中。依靠强大的数字底座“深水云脑”，技术才成为提升生产力和水平的服务。

3. 以人为本，服务创新，数字化平台不但优化了内部管理，而且改变了客户的服务方式。线上线下渠道整合之后推出“指尖水务”，极大地提升了用户体验，切实体现了以市民为中心的服务理念。

4. 全程共享联动，从水源到用户水龙头数据共享、业务联动。无论是上游水源地保护，中游智慧化水厂的管理，下游管网的精细化管理以及外勤调度，都在同一个平台上相互配合、共同前进。

二、长三角一体化智慧水网协同案例

长三角地区河网密布、水系相通，生态环境具有天然的整体性。推进区域水务工程规划和实施的协同，既是防洪供水安全的内在要求，又是实现区域生态绿色一体化高质量发展必然的选择。智慧水网的形成，给这一目的赋予了重要的技术途径。

（一）跨区域协同的挑战与需求

长三角一体化协同治水有很多挑战。因为行政区划的分割，水环境治理信息不能充分共享，各地规划标准、数据格式、监测体系等方面存在差异，形成了信息孤岛，流域层面的统一高效决策调度受到制约。跨界河湖责任界定不明，上下游、左右岸利益协调难，容易在污染防治、生态补偿等方面产生矛盾。随着气候变化和经济社会的发展，流域面临旱涝并重、水资源供需矛盾、水生态环境恶化等多重压力，对水利基础设施互联互通和联合调度能力提出更高的要求。

因此，该区域对协同管理的需求显得尤为迫切。其在各个层面的需求概括见下表：

长三角跨区域协同管理需求

信息整合	建立统一的共享信息平台，整合水利、环保等相关部门信息，实现数据互联互通。
机制构建	建立跨区域协同机制（如联合河湖长制、联合监测、联合执法），解决分域治理问题。
设施补短板	加快补齐水利工程短板，特别是太浦河、吴淞江等重要通道的建设拓宽，提升流域防洪蓄泄和水资源优化配置能力。

（二）流域智慧管理平台的协同机制

为了突破跨区域合作难关，水利部太湖流域管理局创建起太湖流域水环境综合治理信息共享平台，并且不断加以完善。江苏省生态环境厅上线的感知太湖数字平台就是智慧协同机制的典型。都是依靠大数据、云计算、人工智能这些先进技术建成的。

协同机制的核心就是共享和联动。平台把各个行政区、各有关部门的涉水信息整合起来，把重点站点的水位、流量、水质等十余种重要信息集中到一个平台上，做到实时共享，破除了数据壁垒。平台自身具备强大的分析决策支持功能。以感知太湖平台为例，它把卫星遥感数据同地面监测数据融合起来，绘制出流域水污染物热力图，自动找出污染高值区，产生问题清单，直接下达到地方开展排查整治。平台能够对行政交界断面水质变化进行分析，明确上下游责任，给生态补偿金额的计算提供直接依据。平台对蓝藻水华实行实时监控，依据监控结果合理安排蓝藻打捞力量。平台还建有“一河一策”案例库，为各级河长提供决策参考，也进一步推动了联合巡河、联合管护等制度的落实。由被动应对变为主动预警，由分散治理变为共同治理。

（三）协同效益分析与启示

长三角一体化智慧水网建设，对生态、经济、社会各方面都有明显的协同效应。生态环境上，靠联防联控、精准治污，区域生态环境质量不断向好。太湖流域的水质指标多年以来都是最好的，连续多年实现了保证饮用水安全、不发生大面积湖泛的“两个确保”目标。从经济上来说，统一规划、统一管理使水资源得以合理调配，为长三角我国经济发展最活跃的地区之一提供可靠的水安全保障。同时，通过一体化制度创新获得的跨域统一生态环境准入制度等成果，也塑造起区域高质量发展的公平有序的市场环境。从社会层面来说，智慧平台的建立提高了流域水治理的现代化水平，提高了人们对生态环境改善的获得感、安全感。

该案例给我们的启示是，跨区域协同必须以前期的顶层设计以及机制创新为条件。长三角地区通过发布协同治水行动方案、建立联席会议制度等办法凝聚起治水的合力。技术平台成了高效协作的实质。没有统一的数据共享、智能分析平台，跨部门、跨区域的联动就是无源之水。第三、协同治理要和具体责任挂钩。使用量化的评价标准，确定上下游责任的方式让生态保护的责任得以落实，有效地防止了公地悲剧的发生。一体化协同过程是动态发展的，应该不断从项目层面的协同走向区域一体化制度创新的方向，才能有效应对越来越复杂的水问题。

三、西咸新区海绵城市数字化管控案例

西咸新区是国家级新区，也是海绵城市试点区，在西北干旱半干旱地区的应用实践方面更多的予以关注。怎样依靠数字化手段，对分散的海绵设施展开监测、评价并协同控制，保证它们在应对城市内涝、推进雨水资源化利用等方面发挥出最大作用，这是海绵城市建设碰到的难题。

（一）海绵城市设施的数字化监测

为了对海绵城市建设和海绵城市建成区建设成效进行精细化管理、科学评价，西咸新区建立了一套完整的数字化监测体系。该体系依靠物联网、大数据这些现代信息技术，对海绵城市各类相关设施及重要水文、水环境指标实施实时、动态的感知。监测对象包括低影响开发设施（绿色屋顶、下凹式绿地、透水铺装等）、排水管网和自然水体这些终端设施。

具体的监测内容非常丰富，包含气象降雨数据、设施实时水位、土壤湿度、管网流量、河湖水系水质和水位等诸多方面。在重要的节点处设置了传感器、雨

量计、流量计、水质在线监测仪等前端感知设备，大量的数据被实时上传到了统一的数据监测管理平台。该平台不但是数据汇集中心，还是可视化的综合展示窗口。利用地理信息系统技术，平台用“海绵一张图”的形式把所有的监测点位、设施状态、项目空间分布等信息直观地展示出来，实现了海绵城市运行状态的全景式掌控。全过程监控管理为后面模拟分析、效果评价、协同决策打下了良好的基础，使原本分散隐蔽的海绵设施变得透明可感。

（二）基于模型的模拟与协同决策

数字化管控的价值，不只是单纯的监测，而在于用数据模拟分析辅助决策。西咸新区的实践具有“模型驱动”的特点，依靠创建与当地自然条件相匹配的评估模型体系，可以对海绵城市建设成果进行预估，并且推动改良决策。

这一过程主要通过以下步骤实现：

1. 建立模型系统：平台把 SWMM 等各类专业模型和人工智能算法整合起来，形成一个可以对本地区降雨、径流、污染过程进行模拟的在线云模型库。这些模型以实时监测到的数据为输入，能对不同的降雨情景下雨水在城市下垫面、管网和各类海绵设施中的流动、下渗、调蓄、净化过程进行仿真模拟。

2. 多维模拟评价，项目设计之初就进行方案的预评价，进而对设施的布局和规模做出相应的优化。同时，也可以评价建成区实际运行效果，比如年径流总量控制率、面源污染削减率等主要指标完成情况，城市内涝风险等。用模拟结果和监测数据对比验证，不断对模型参数进行率定，提高预测准确率。

3. 支撑协同决策，模拟评估的最终落脚点就是支撑协同决策。当模型预测出某个暴雨场景中某地区洪水风险较大的时候，系统就会自动发出预警，并给出排水调度和应急处理的建议。当检测到多个下凹式绿地的土壤湿度长时间处于饱和状态时，系统会发出临时启动排水泵的建议，以达到各类设施之间相互联动的作用，从而使海绵系统的最大效用得以发挥出来。

（三）案例对规划实施协同的借鉴意义

西咸新区海绵城市数字化管控案例，为解决水务工程规划与实施相脱节问题提供了一个很好的范例，其借鉴意义主要表现在多个方面。它说明把宏观的规划目标同微观的工程项目联系起来的途径。年径流总量控制率这样的顶层规划指标，在数字平台上逐级细化到每一个排水分区、每一个建设项目地块，然后全程监测评价，保证规划意图在实施层面得以不折不扣地执行。

该案例很重视技术标准体系的建设。西咸新区经过设计规划、施工验收、运行维护之后会生成本土化、量化的技术标准和指南，使数字化协同可以有着统一语言和规则，保证数据的一致性和可比性。标准化建设是实现大规模协同管理的前提。

再次，从“重建设、轻运维”到“重运维、轻建设”。数字化监测与评价体系使海绵设施的长期运行情况可以被知晓、被考察，从而给依照成效付费的 PPP 项目运作机制以及精细化的保养工作提供数据支撑。这就使工程实施阶段除了考虑建设本身之外，还要从全生命周期的效能出发，促使规划设计更加关注实用性和经济性。依靠政产学研用的协同创新平台来促进技术和应用实践的不断融合，规划理念和技术工程互相促进、共同提高，形成良性循环的协同优化闭环。

第九章 水务工程信息化与数字化协同

第一节 运维管理体系构建

一、运维管理的组织与职责

（一）集中式与分散式运维管理模式

水务工程运维管理模式选择的好坏直接影响到管理效率、成本控制以及响应速度。集中式管理模式是以某一个管理机构为中枢，对辖区内所有水务设施的运维决策、资源调配、技术支持进行集中管理。该种模式的好处是集中专家资源、技术和设备，可以共享技术、设备和备件，有利于推行统一标准，产生规模效应，降低单位管理成本。尤其在数字化、智能化技术高度发展的今天，集中式管理可以发挥数据中心、智慧调度平台的作用，对整个水务系统实行宏观调控、精准决策。

分散式管理模式，就是将运维的权责下放给各个区域或者具体的工程项目部门，由其独立负责自己范围内日常运行、维护和初级故障处理。该模式反应速度快、现场反应灵敏，对于区域性的突发事件具有更好的应对能力。分散管理会造成各机构标准不一、资源重复使用，技术力量不足、分布不均，不能够形成合力来解决复杂的技术问题。在实践中，大多数大型水务机构采取集中与分散相结合的混合方式，即中心机构做战略规划、定标准、给核心技术、重大应急指挥，区域运维团队管日常巡检、维护、快响，彼此取长补短，争取最佳管理效果。

（二）运维岗位职责与技能要求

明确的岗位职责是保证运维工作“人人有事做、事事有人管”的基础。水务运维体系一般包括管理层、技术层、操作层。管理岗位（运维总监/经理），负责制定运维策略/预算/团队/绩效考核；技术岗位（工艺工程师/设备工程师/自动化工程师），解决技术问题/改进工艺流程/设备改造升级/制定技术标准；操作岗位（水厂运行人员/管网巡线员/维修工）是运维工作的直接执行者，日常工作有设备操作/巡检/定期保养/故障上报。

随着水务工程智慧化程度的提高，对运维人员的技能要求也发生改变。除传

统专业知识外，现代水务运维人员还要具备跨界融合的能力：

1. 数据分析能力：可以阅读并分析监控系统产生的大量数据，从中发现潜在问题，判断设备的状态，从而优化运行参数。

2. 信息化技术应用能力：熟练掌握运维管理软件、移动应用终端、智慧水务平台等各种信息化技术应用工具，用信息化手段提升工作效率。

3. 自动化控制知识：了解可编程逻辑控制器，监控及数据采集系统等自动化控制系统的相关基础知识，能做简单的调节和排除故障。

4. 应急处理与沟通协调能力：遇到突发情况时可以保持冷静，按应急预案的程序进行工作，很好地同各方面进行交流协调。

因此建立持续的职业培训和发展机制，鼓励员工取得相关职业资格证书，是保证运维团队的能力与时俱进，满足未来发展需要的有效方式。

（三）运维外包服务的质量管理

将部分非核心、专业性较强的运维工作外包给第三方服务公司，是现代水务管理提高效率、降低成本的常用手段，设备专项维修、水质检测、管网探测等都属于此类。专业化分工可以使得水务主体更加专注于自己核心业务的管理。但是外包服务又带来了新的管理问题，质量的好坏直接关系到整个水务系统运行的安全。因此建立严格的外包服务质量管理体系就显得尤为重要。

对外包服务的质量管理要从承包商的选择开始，建立严格的准入机制，对外包商的资质、业绩、技术力量、管理水平等各方面进行综合评定。合同签订时要明确服务范围、技术标准、响应时间、验收标准、违约责任等，把质量要求通过法律形式固定下来。在服务执行阶段要设立专门的监督岗位或者部门，采用日常巡查、定期抽检、技术会商等办法来动态监督承包商的服务过程。并且创建量化的 KPI 考核制度，把服务质量同支付费用相联系起来，从而产生有效的激励与约束效果。这可以保证外包服务不但是工作负担的减轻，而且是提高整体运维水平的可靠助力。

二、运维管理制度与流程

（一）设备操作、维护、检修规程

设备是水务工程的主要资产，设备能否正常运转直接关系到水务工程质量的好坏。为了保证设备一直保持最好的状态，必须要有设备全生命周期内操作、维

护、检修规程并严格执行。规程是指导运维人员正确使用、保养设备的技术文件，也是预防事故、延长设备寿命的根本保证。

设备操作规程中必须要对每台设备的开、停机，运行过程中实时监控及参数调节，异常情况处理等每一项操作步骤、要求作出具体的规定。内容要具体、清楚、容易理解，强调安全注意事项和关键控制点，保证不管操作人员经验多丰富，都能按照规程执行标准化操作，防止因为操作失误导致设备损坏或者生产事故的发生。

维护保养规程要按照设备特点和制造商的建议分为日常保养、定期保养和专业保养。日常保养由操作人员进行，主要是清洁、润滑、紧固等简单的作业。定期保养是由专业维修人员按照一定的周期进行的更为深入的检查、调整和易损件更换。检修规程要对设备的大修、中修和项修作出明确规定，包含周期、内容、技术标准、工艺流程以及质量验收要求等，保证重大维修活动有章可循、质量可控。所有的规程都必须以文件的形式公布出来，并对相关人员进行培训，使其严格地执行。

（二）安全生产与应急管理流程

水务工程运维中包含高压电气、有限空间作业、化学品使用等各种危险源，安全生产是运维管理的红线底线。健全的安全生产、应急管理程序是企业保证员工生命安全、工程设施正常运转的基本要求，也是企业履行社会责任的体现。安全生产管理要遵循“安全第一、预防为主、综合治理”的方针，创建起全员、全过程、全方位的安全责任体系。

应急管理流程是突发事件的行动纲领，目的是把事故损失降到最低。完整的应急管理流程应该包括以下几个方面：

1. 建立灵敏的监测预警系统，对水源污染、主管爆裂、设备重大故障等可能发生的事故风险进行预警。明确事件发生后信息上报的渠道、时限和上报内容，保证管理层能第一时间收到正确的信息。

2. 按照预案的等级做出应急响应。确定指挥机构以及各个应急小组的职责分工，对现场处置、抢险救援、人员疏散、资源调配等重要行动做出规定，以达到响应及时、处理有条不紊的目的。

3. 事故控制之后，马上展开现场清理，设施修缮以及生产恢复。并组织专家对事故发生的原因及救援的过程进行调查和评价，从中吸取教训，根据教训来修

订和改善应急预案，不断提高应急救援管理水平。

（三）运维记录与档案管理制度

运维记录和档案是水务工程的历史病历、记忆芯片，是事故追查、经验总结、绩效评价、资产管护的依据。建立完善的运维记录、档案管理，对于运维工作的可追溯、提高管理决策的科学性起着不可替代的作用。缺少准确完整的记录，运维管理就会陷入“盲人摸象”的困境。

运维记录要包含所有的关键活动，即设备运行日志、巡视检查记录、维护保养记录、故障与维修记录、水质水量数据、能耗数据等等。记录要及时、准确、完整、清晰，记录时间、记录人员、记录地点、设备信息、事件描述、处理过程、结果都要有。信息化技术的发展之后提倡电子记录取代传统的纸质记录，用运维管理系统实现数据的自动采集和结构化存储，从而提高记录工作的效率和准确性。档案管理制度应当对各类记录的分类、编目、归档、保管、借阅、销毁等程序作出规定。尤其是设备图纸、技术说明书、验收报告、重大维修方案等技术档案，必须严格管理程序，保证安全、完整、方便查阅。用现代信息技术建立数字化档案室，提高档案检索效率和共享水平，是改善档案管理水平的一种方法。

三、运维标准化建设

（一）制定运维服务标准

运维服务标准是衡量运维工作好坏的尺码，也是对社会的、用户的承诺。制定出一套清楚、可度量、可操作的服务标准，是标准化建设的主要内容。这些标准要覆盖水务服务的所有方面，供水服务要包含水质合格率、压力合格率、供水保证率等指标，污水处理服务要包含出水水质各项指标限值、污泥处置的合规性要求。

除了结果性的指标之外，服务标准中还应该有过程性的指标来规范服务行为。包含有故障报修响应时间、维修完成时限、投诉处理完成率、满意度、计划性停水的提前通知时限等等。标准的制定要兼顾国家法规、行业规范、地方要求、技术可行性和成本效益，还要按照社会的发展和用户的需要不断调整。公开服务标准，接受社会监督，一方面可以提高用户的满意度，另一方面也能促使内部管理持续改进。

（二）推行标准化作业流程

标准化作业流程即对运维活动中的每一步骤、每一个动作进行规范化、程序化的设计，形成最优的作业流程。其目的在于抹除由个人所造成的操作随意性，使得任何人在执行同样的任务时，皆能依照同样的高效、安全的路径，得到同样的高品质成果。推行标准化作业流程，可以实现运维的精细化管理，也可以保障作业的安全。

标准化作业流程的形成，就是要对现有的各项运维任务，比如设备巡检、水样采集、阀门启闭、药剂投加等等，进行深入的分析 and 优化，去掉不必要的步骤，改进不合理的操作，固化最佳实践。形成的流程应该用作业指导书、操作卡片、流程图等直观的形式表示出来，语言简明，图文并茂，便于一线人员理解并执行。

推行标准化作业不是发个文件那么简单，关键在培训和监督。必须全员培训，讲解、示范、实操，确保员工会标准流程。同时要加强对现场的巡查工作，监督作业过程是否符合规定，对不符合规定的及时予以制止。依照标准化的作业程序形成回馈机制，促使职员在操作时给予改良意见，让标准化的作业程序于实际操作中不断改良与发展，保证标准化具备先进性及实用性。

（三）建立运维质量考核体系

建立科学的运维质量考核体系，就是运维标准与流程闭环的最后一步。考核体系对运维工作成效进行系统的评价，把管理要求转化为具体的绩效目标，调动组织及个人的积极性，促使资源流向关键领域和薄弱环节。一个好的考核体系把战略目标和日常运作联系起来。

运维质量考核体系的设计要符合公平、公正、公开的原则，考核指标要与岗位职责和工作目标紧密结合，做到量化、可度量、可达成。

常见运维质量考核指标

指标类别	具体指标	衡量维度
设备管理	设备完好率	设备正常运行状态
	平均故障间隔时间	设备可靠性
	平均故障恢复时间	故障处理效率
运行效率	单位水量电耗	能源消耗效率
	单位水量药耗	药剂消耗效率
	生产任务完成率	生产计划执行情况

续表

指标类别	具体指标	衡量维度
服务质量	用户满意度	客户服务体验
	投诉率	服务问题发生频率
	故障响应时间	响应及时性
安全环保	安全事故发生率	安全生产水平
	出水达标率	环保合规性
	突发事件应急处置能力	风险应对能力

1. 关键绩效指标的设定：考核指标应该包含设备管理（设备完好率、平均故障间隔时间）、运行效率（单位水量电耗、药耗）、服务质量（用户满意度、投诉率）、安全环保（安全事故发生率、出水达标率）等各个方面。运维质量考核指标见上表。
2. 数据采集与评价，建立合理的数据采集途径，保证考核数据的真实性、准确性。评价的方法要科学合理，可以采用权重打分、目标达成度对比等方法来综合评价。
3. 结果应用与改进考核结果要同薪酬激励、评优评先、职业发展等直接挂钩，切实发挥好指挥棒作用。对考核中发现的问题和短板要进行深入分析，提出切实可行的改进方案并加以实施，使运维管理能力呈螺旋式上升趋势。

第二节 设备维护与更新策略

一、预防性维护策略

（一）设备分类与维护周期制定

对于复杂的水务工程来说，首先要做的是对众多的设备系统进行分类，并确定合理的维护周期。设备分类主要是以设备在工艺过程中起的作用大小，运行环境的复杂程度，设备故障产生的后果严重性，设备本身的造价，设备自身的特点等为标准进行划分的。可以按照设备的重要性将设备分为关键设备、重要设备、一般设备。依据此种分类可以对有限的资源进行有针对性的投入，以保证最关键环节得到足够的资源支持。

维护周期的确定要综合考虑制造商推荐的标准、设备实际运行时间、历史维修数据、现场运行环境等各方面因素。周期不是固定不变的，而是动态变化的。

长期处于高负荷运行或者恶劣环境下的设备，其保养间隔应当适当缩短。季节性使用的设备在停用期间可集中进行大修、保养。建立设备信息档案，对每次保养的内容和效果进行详细记录，可以给后续维护周期的调整提供数据支持，逐步形成一套符合水务厂站自身特点的维护周期体系。

（二）基于状态的维护技术应用

基于状态的维护属于预防性维护当中较为高级的一种形式，它依照对设备运行状况的实时监测数据，从而确定是否执行维护以及何时开展维护。它的核心就是按需维修，避免了传统定期维护可能导致的过度维护或者维护不足的问题。这项技术渐渐地被应用在水处理工程上，从而使得设备的管理更准确、有效率。通过传感器对设备运行参数进行实时采集可以有效地提高设备利用率，降低维修费用。

基于状态的维护实现的核心就是状态监测技术的应用。常用的技术有振动分析、温度监测，油液分析、声学分析等。在大型水泵机组上安装振动传感器，可以持续监测水泵机组的振动模式变化。当振动特征出现异常的时候，一般预示着轴承磨损、转子不平衡、对中不良等早期故障。红外热成像技术可以有效地发现电气柜、电机等设备由于接触不良或过载造成的局部过热。油液分析能检测润滑油中的金属颗粒物含量和化学成分变化，以此来判断齿轮箱等传动部件的磨损情况。经过分析处理之后的技术获取数据可以给维护决策提供直接的依据，实现从“计划保养”到“预知保养”的转变。

（三）预防性维护计划与执行

预防性维护计划的制订与执行，是保证维护计划得以实施的关键环节，是对维护任务、资源、绩效进行的一种管理。一份详细的计划不仅可以保证设备的正常运转，还可以优化资源的配置，提高整个运营的效率。

制定计划时要确定所有需要维护的资产，按照资产重要性来决定维护优先级。然后根据设备制造商建议、行业标准、历史数据等确定每项资产具体的维护工作内容、周期、操作规程。对于某型号离心泵来说，计划中会规定每季度检查轴承润滑情况、每半年测量电机绝缘电阻、每年做一次动平衡检测。计划中还要详细列出所用工具、备品备件和安全操作规程，保证维护工作规范有效。

计划执行与跟踪离不开责任的明确，要将具体的任务落实到人。使用计算机化的维护管理系统或者企业资产管理软件来安排、分配并跟踪所有的保养工作。

工作人员到现场后用移动终端记录工作内容、消耗备件、设备状态等信息，并自动上传到系统数据库中。管理者可以利用系统看板来查看计划完成率、任务延误情况、维护成本等各项信息，从而对执行过程实现全方位掌控。

维护计划不是固定不变的，而是一个不断被监督、不断调整的过程。对长期积累的设备运行数据以及维护记录加以分析，可以评判目前维护计划的成效。如果某项定期维护之后设备的故障率没有明显降低，就需要对维护项目或者周期的合理性进行重新考虑。设备运转正常时，可以适当增加关键部位维修的周期来减少维修的成本。依靠数据来持续改进，预知性保养策略才能不断地自我优化，更好地符合实际运营的需求。

二、预测性维护策略

（一）基于传感器数据的设备健康监测

预测性维护的基础就是对设备的健康状况进行实时、准确的监测。主要依靠分布在设备关键部位的振动传感器、温度传感器、压力传感器、电流传感器和声学传感器等各类传感器，对设备运行过程中产生的各种物理参数进行连续采集。传感器就是设备的神经末梢，可以感知人眼看不到的细微变化。

水务系统里，大型泵组，鼓风机，加药泵等旋转设备属于健康监测的重点对象。在水泵轴承座上安装高精度的振动传感器，就可以实时采集到振动信号的频谱特性。当有特定的频率峰值出现的时候，可能是轴承内外圈、滚动体、保持架的损伤。同样通过检测电机电流信号、采用算法分析它的频谱也可以判断出转子断条、气隙不均匀等电气故障。传感器产生的大量原始数据经物联网传到中央数据平台，给后续数据分析与故障预测打下了坚实基础，使得保养决策从以前的个人经验走向基于数据。

（二）设备故障趋势预测

设备故障趋势预测就是预测性维护的主要价值所在，它依靠对长时间积累下来的监测数据做深入分析，建立模型来达到预测设备未来状态变化的目的。一般用统计学模型、机器学习算法或者深度学习模型来发现数据中隐藏的模式和趋势。常用的预测模型有时间序列预测模型，回归预测模型，比较复杂的是神经网络模型（RNN、LSTM）。

数据驱动的故障诊断一般分为训练和测试两个步骤。用大量历史数据（正

常运行数据、已知故障数据等）训练算法模型，使模型学会从正常到故障演变过程中数据特征。经过训练的模型就可用于新监测数据的分析。当实时数据流中出现了与已知的故障模式相似的特征的时候，模型能够推测出潜在的故障类型，同时根据退化的程度来判定将要发生故障的时间段，也就是剩余使用寿命。从轴承振动信号能量值随时间的增长趋势来分析，就可以大致判断出轴承到达失效阈值需要多少周或者多少个月的时间，从而能提前几个月甚至几周为保养计划做出安排。

（三）预测性维护的经济效益分析

虽然在开始实施预测性维护策略时要对传感器、数据采集系统和分析软件进行投资，但是从长远看它所带来的经济效益是巨大的。主要的好处就是降低维护成本、提高资产效率、加强运行安全。通过准确预测达到及时维修故障的目的，避免预防性维护中过度维修造成零件的更替、人工费用的不必要的浪费，避免事后维修使设备损坏很严重、维修花费大。

准确的故障预估可以大大缩减非计划的停机时长，这是预测性保养最直接的价值。水务行业当中，一次泵站的突然停机就会引发大面积的供水中断，造成极大的社会影响与经济损失。预测性维护依靠提前预警，给维修团队留出充足的时间来安排维修活动，将维修活动安排在生产计划的空闲时间段，最大程度地保证供水服务的连续性、稳定性。一般而言，一次准确的预测可以避免的停机损失，就能覆盖预测性维护系统部分投资成本。经过连续监测并改良设备运作情况，可以有效地增长设备的总使用寿命，进而提升资产的投资收益比率。

三、设备更新与改造决策

（一）设备经济寿命与技术寿命评估

评估设备寿命是做出更新改造决策的前提。设备寿命可从技术寿命和经济寿命两个方面衡量。

设备寿命评估指标对比

指标	定义
技术寿命	设备从投入使用到因技术落后（如性能无法满足新要求）而被淘汰的持续时间。
经济寿命	设备从投入使用起，直至其年综合成本（年运行成本与年均资产折旧成本之和）最低时所经历的时间。

从上表可知，随着科技的快速发展，新设备在效率、能耗、自动化程度等各方面不断改进，即使旧设备从物理上仍然能够使用，但是技术落后也会使其失去使用价值，即技术寿命终止。设备运转过程中的维修费用每年会不断增加，运行效率也降低。当旧设备继续使用的成本大于新设备购置并使用成本的时候，就表示旧设备已经到达经济寿命的终点。经济寿命一般是对设备是否更新的主要判断标准，因为经济寿命直接影响到运营的经济性。

评价这两种寿命须要搜集并剖析许多数据，包含设备的最初投入，多年的运转保养费用，备件替换情况，能耗数据，市场上的同款新款设备的技术参数和价格信息等。

（二）设备更新改造的技术经济分析

当设备评估表明其接近或者已经达到了经济寿命时，就要开始进行更新改造的技术经济分析。这是一个多维的决策过程，其目的就是备选方案里选择出最优解，即在保持现状、局部改造、整体更新三者之间选择最佳方案。分析的核心就是全生命周期成本的比较。全生命周期成本不只是设备的购置和安装费用，它包括设备在全部使用年限内运转、保养、修理、耗能以及报废处理所涉及的一切费用。

开展技术经济分析的时候，要给每个方案创建详尽的成本模型。局部改造方案要估算出改造所需要的技术成本、施工费用以及改造之后能效提高、维护费用降低等收益。对“整体更新”方案要考虑到新设备的购买价、安装调试费，还要预估它未来生命周期内较低的能耗及运维成本。可以用净现值、内部收益率、投资回收期等经济指标来衡量各个方案的好坏。除经济因素外，技术先进性、可靠性、与现有系统的兼容性、环境影响等非经济因素也应该被考虑进来，从而使最后做出的选择是科学和前瞻性的。

（三）设备全生命周期管理策略

设备全生命周期管理就是将设备从概念设计、选型、采购制造、安装调试、运行维护到最终报废处置的全过程作为一个完整的、需要不断改进的系统来考虑的一种管理思想。其主要目的在于通过各个阶段协同管理来达到设备总拥有成本最小化、资产价值最大化的目的。

在水务工程中实行全生命周期管理，不能只考虑设备选型时的一次性采购费用，还要考虑到设备长期使用中所需要的能耗、维护费用和预计寿命。运行维护

阶段按照前面所述的预防性、预测性维护策略，保证设备一直处在高效低耗的最好工作状态，同时利用信息化系统对所有的运维数据进行详细的记录。这些数据不仅可以指导日常工作，而且可以给以后设备的更新提供重要的依据。

当设备进入寿命末期的时候，管理策略的重点就转到了报废处置和资产置换上面。对设备的残值进行准确的评估，并采取恰当的处置方式（回收、再利用），可以收回部分资金。之前所有的沉淀下来的全生命周期数据，将会成为下一轮设备选择的“经验与教训”，形成一个从“使用”到“反馈”再到“优化”的闭环，实现水务资产管理的持续升级。

第三节 绩效评价与持续改进

一、运维绩效评价指标体系

（一）设备可靠性与可用性指标

设备是水务工程正常运转的物质基础，设备的可靠性、可用性直接关系到系统服务保障能力。因此，对设备的状态进行量化评价十分重要。相关指标反映的是设施设备在某个时间段内能够保持其应有的功能，以及出现故障后恢复功能的速度。核心指标一般是平均无故障运行时间和平均修复时间。前者可以反映设备连续无故障运行的时间，是评价设备内在可靠性的主要参数；后者是在故障发生后从发现、处理、修复到恢复正常所经历的时间，用来衡量维修保障体系的水平。

这两个重要的指标一起决定设备的可用性，即设备在总运行时间里处于可工作的比例。高可用性就是系统尽可能地保证稳定的提供服务。实际操作时根据不同设备种类（水泵、阀门、监测仪表等）来设置更加具体一些的评价参数，例如泵组的启停成功率、仪表测量准确度的漂移率等等。持续追踪并剖析这些指标，有益于预知设备老化的趋向，改良维修策略，妥善规划备品备件的库存，把非计划停运的风险和损失缩减到最低限度，保证水务系统整体运行的稳定可靠。

（二）服务质量指标

服务质量属于水务工程社会价值的最重要体现，关乎到广大用户的利益及满意程度。评价服务质量的指标体系从用户的角度对工程的服务水平、稳定性进行

考查，它把工程效益与社会民生连接起来。这些指标应该具有可量化、可感知的特点，能直接体现水务服务“最后一公里”的通畅情况。

1. 供水压力达标率，在管网各个监测点上，供水压力处于规定标准范围内的时数占总时数的比例。此指标直接影响到用户的用水感受，是反映供水系统运行稳定性的好坏决定性因素。

2. 水质综合合格率：根据国家相关标准，对出厂水、管网水、末梢水的浊度、余氯、微生物等项目进行检测，统计所有检测点位、检测批次的合格比例。这是公共卫生安全的生命线，是服务质量中不能妥协的指标。

3. 客户投诉处理情况：根据用户数统计出客户的投诉次数，并且按水质、水量、服务态度等各方面进行分类。跟踪投诉从受理到处理完结的及时性、有效性，也就是投诉解决率与用户满意率。此指标可以反映服务中的缺陷，是外部监督的晴雨表。

4. 抢修及时率，即管网漏损、爆管等突发事件发生之后，从接到报修到抢修人员到达现场并完成抢修所耗时间。抢修及时率同突发事件给社会带来的影响范围、程度有关，体现的是应急响应和处置能力。

（三）成本控制与能耗指标

成本及能耗指标可以用来衡量水务工程的经济价值以及绿色发展水平，也可以体现出运行过程精细化管理和可持续发展程度。保证服务质量、保证设备可靠性的前提下有效控制成本和能耗，这是水务企业长久健康发展的基础，也是企业履行社会责任和环境责任的条件。这些指标改善的程度直接决定水价是否合理、工程需要财政补贴多少、自身的碳排放量是多少。

成本控制指标主要是单位产水量（或处理水量）的综合成本，包括电费、药剂费、大修费、污泥处置费和人工工资等。对这几种成本构成进行分解并做趋势分析，可以准确找到成本异常的环节，并采取相应的管理或者技术改造措施。能耗指标用能源利用效率来考虑，比如吨水电耗、单位污染物削减能耗等等。电费在总成本中占比较大，采用节能设备、改善处理工艺和改进泵组调度等方法来减少用电量，是降本增效最直接有效的办法。管网漏损率也是十分重要的一个复合型指标，它一方面造成巨大的水资源浪费，增加不必要的产水成本和能耗，另一方面管网长期渗漏还会造成地质安全隐患。

水务工程运维核心绩效指标参考表

指标类型	具体指标	衡量维度	示例评估方法
设备运维	平均无故障时间	可靠性	统计设备在两次故障间隔期的平均运行时间
	平均修复时间	可维护性	统计故障发生到修复完成的平均时长
	设备可用性	整体效率	$(\text{总运行时间} - \text{停机时间}) / \text{总运行时间}$
服务质量	供水压力达标率	用户体验	监测点压力符合标准时段占总时段比例
	水质综合合格率	公共卫生	出厂水 / 管网水 / 末梢水关键指标合格批次比例
	客户投诉解决率	用户满意度	已解决投诉数 / 总投诉数
	抢修及时率	应急响应	突发事件从报修到抢修完成的平均用时
成本能耗	单位产水 / 处理水综合成本	经济效益	$\text{总运行成本} / \text{总产水} / \text{处理水量}$
	吨水电耗	能源效率	$\text{总用电量} / \text{总产水} / \text{处理水量}$
	管网漏损率	资源利用 / 安全	供水量与销售量差值占供水量比例

从上表可知，这些核心指标涵盖了水务工程运作的主要方面，给实现精细化运作和不断改良赋予了量化依照。

二、绩效评价的实施与反馈

（一）绩效数据的采集与核算

绩效数据的准确性、完整性、及时性是绩效评价工作的生命线，直接影响评价结果的公信力以及有效性。数据采集和核算要依靠严谨、规范的流程，自动化监测与精细化人工管理相结合，保证每一个数据点都有来源、有依据。

自动化采集已经成为数据采集的主要形式。依靠水务工程的 SCADA（数据采集与监视控制），在线监测仪表，各种传感器，对水量，水位，压力，水质，设备运行状态，能耗等重要参数进行不间断的实时监测。既可高效又可以最大程度地减少由于人为干预产生的误差，给动态分析、预警提供坚实的基础。

人工记录和核对不能缺失。维修工时、备件消耗、客户投诉详情、巡检记录等无法被自动化设备直接采集到的数据，只能通过标准的记录表格、工作流程，由相关人员填写。为了保证人工数据的准确性，应该建立交叉核对和抽查制度。

所有采集到的原始数据在进入核算流程之前，必须要经过严格的清洗与校验。剔除由于仪表故障、通讯中断等造成的明显异常值，对缺失数据进行合理的插补，对不同来源的数据进行逻辑一致性检查。总供水量和各分项计量之和应该相等，

如果不同则要查找计量误差或者遗漏未计量的区域。

绩效指标的核算要严格按照事先规定好的公式和规则来进行。核算过程要尽可能的自动化，用绩效管理软件或者电子表格模板把核算逻辑固定下来，削减手工核算的失误。对需要分摊、核算复杂的情况要明确统计口径和分摊原则，保证不同评价周期的结果可以进行有效比对。

（二）绩效评价的组织与流程

绩效评价能够进行的前提就是明确组织架构、规范工作流程。明确由谁来负责、什么时候进行评价、如何评价，是保证评价工作系统、公正、持续开展的重要条件。良好的组织与流程能够把绩效管理理念融入日常工作中，成为提高管理水平的常规手段，而不能是一时的检查。

组织保障一般会成立跨部门的绩效管理小组或者指定一个牵头部门（生产技术部、运营管理部、企管部等），统一协调绩效评价工作。这一小组的任务是指标体系的保持更新，数据的收集核对，撰写绩效分析报告，开展绩效评审会议。各个业务部门（水厂、管网所、客服中心等）是绩效数据的提供者，也是绩效改进的执行人，其负责人要对本部门的绩效负责。矩阵式管理结构一方面保证评价工作专业、独立，另一方面也保证各方责任的落实。

评价流程大体上是按 PDCA（计划、执行、检查、处理）的循环过程进行的。具体的流程为：在评价周期开始的时候（如年初），绩效管理小组依据年度战略目标公布年度绩效考核计划，确定各项指标的年度目标和权重；评价周期内（如每月、每季度）各个部门上报数据；绩效管理小组汇总计算；评价周期结束时，绩效管理小组编写绩效分析报告，客观反映各个项目标的完成情况；对大的波动或者偏差作出初步原因分析；组织绩效评审会议，由管理层、绩效管理小组以及各个业务部门负责人参加，审议绩效结果；就问题原因进行深入讨论；最终形成决定，确定后续改进任务和责任人。

（三）绩效结果的反馈与应用

绩效考核的最终目的不是为了打分或者排名，而是利用评价的结果发现问题、激励先进、推动组织持续学习与进步。如果评价结果只是作为报告或者存档使用，那么整个绩效管理体系的价值就无法体现出来。所以必须要有快速、透明、多层的反馈与应用系统。

绩效结果反馈要即时、有针对性。绩效报告用图表、趋势线等直观的形式表

现出来，提供给各级管理人员以及员工。对高层管理者反馈的内容主要是整体战略达成度、主要风险指标和跨部门协同情况等，供其做战略决策和资源配置。中层、基层管理者的反馈要针对其负责的业务指标进行详细分析，找出偏差的原因，和行业标杆或者历史最佳水平对比，从而激发改进的动力。对于一线员工来说，反馈可以直接与岗位职责相关联，从而让他们明白自己的工作表现怎样会直接影响到整个绩效水平。

绩效的结果要同激励挂钩。将评价结果作为发放绩效奖金、评优评先、晋升的依据，可以激发团队和个体的积极性。激励可以是物质的，也可以是精神上的，比如公开表扬、授予荣誉称号等。公正透明的激励机制能形成多劳多得，优绩优酬的组织氛围，促使全体员工把注意力放在完成绩效目标上。

也是最重要的一环，就是把绩效结果应用到持续改进循环中。暴露出来的问题、短板不能停留在批评或处罚上，而应该把它转化为具体的改进项目。管理层要主导拟定具有针对性的改进方案，规定出改进目的、负责单位、完工时间以及所需要的资源。绩效结果也作为资源分配的参考依据，把更多的预算、人力、培训机会向绩效好或者需要提高的关键领域倾斜，使组织的资源投入到最能产生效益的地方。于是绩效评价结果就成为下一轮管理改善的开始，形成一种螺旋式上升的良性循环。

三、持续改进机制

（一）基于绩效问题的原因分析

绩效评价结果表明，某项或者某几项指标未达到预期时，首先应该做的不是追责，而是组织相关方开展系统、深入的原因分析，准确找到问题的根源。只有找到根本原因，后续的改进措施才能对症下药，避免浪费资源以及问题的反复。表象性问题只是冰山一角，要想从根本上解决问题，就必须找出其背后的深层次原因。

实践中可以利用成熟的工具辅助该过程。鱼骨图分析法（石川图）是行之有效的一种系统分析方法，它使团队从人员、机器、材料、方法、环境、测量等各方面，全面列出影响绩效指标的所有潜在因素，再逐层深入，直到找到根本原因。另一种常用的方法就是5个为什么分析法，对一个表象问题连续问至少五次“为什么”，一层层剥离，直到找到管理流程、技术缺陷或者资源配置等根本原因。

从根本原因入手，探究症状和病根。以吨水综合电耗偏高为例，如果只归因于水泵效率低，那就只是表象。连续追问，就会发现根本原因是缺少实时需水量变化的泵组优化调度模型，或者预防性维护计划没有被执行，导致设备性能下降。

（二）制定与实施改进措施

确定了问题的原因之后，接下来就是制定具体的可行的改进措施。本阶段主要工作就是把分析得出的结论转化为一系列有计划、有步骤的行动方案，保证改进工作有条不紊、高效地进行。一个完善的改进计划不仅要说明做什么，还要明确谁来做，什么时候完成，达到什么程度。

制定改进措施时，应遵循 SMART 原则，确保每一项措施都具备：

1. 具体性：即措施表述清楚明确，没有含糊不清的地方。将“加强巡检”具体化为，把管网 A 区每天巡检里程从 5 公里增加到 8 公里，使用电子巡检系统记录轨迹。

2. 可衡量：改进效果应该有量化评价标准。目标就是 3 个月内目标区域管网漏损率低于 10%。

3. 可实现：所设目标及采取的措施，在现有的资源和技术条件下，经过努力是能够实现的，避免过高过难。

4. 相关性：改进措施与所要解决的根本原因直接关联，并有助于达成整体战略目标。

5. 有时间限制：为每个改进任务设定开始日期和结束日期，形成明确的时间表。

改进措施实施时项目管理方法论起着非常重要的作用。项目负责人和项目团队成员职责要明晰，责任到人。建立起定时的进度追踪交流机制，比如说每周例会，每月汇报之类的，以便尽快解决在执行时遇到的各种难题。就复杂的需要跨部门合作的改进项目而言，高层管理者所给予的授权与支持就显得十分重要，它可以冲破部门间的壁垒，整合起各种资源，并保证各项措施相互配合，进而把改进蓝图变成现实的运营成果。

（三）改进效果的验证与标准化

改进措施的实施不是持续改进循环的终点，必须对它的效果进行客观、量化的验证，才能判断问题是否得到解决。同时，对证明行之有效的改进方法、流程加以固化，使之成为组织的标准化实践，从而防止问题再次发生，将局部创新推

广为全局能力。这是保证改进成果可以长久保持并且变成组织核心竞争力的重要步骤。

改进效果的验证实际上就是再评价。改进措施实施一个周期后，要重新采集和该措施有关的绩效指标数据，并将其与改进前基线数据对比。经过数据比较之后，就能知道采取的改进措施是否有效。针对高耗能问题进行水泵优化调度之后，需要比较实施前后的单位产水量电耗是否明显下降。除了核心指标的检验，还要考察改进措施是否给其它相关指标带来了意想不到的负面影响。验证的结果要形成正式的评估报告作为项目结项以及成果确认的依据。

当某项改进措施被证明有效时，就要启动标准化程序。标准化就是把新的、更优的工作方法、操作规程或管理制度写入组织的官方文件体系中，如岗位操作手册、设备维护规程、应急预案等。通过组织培训、技术交底、现场指导等形式，让所有人员了解、掌握新标准。对于技术方面的改进还要更新相关的规范或标准。通过标准化，各个团队的成功经验可以被复制、推广，进而提高整个组织的运营水平，达到持续改进、螺旋上升的目的。

第四节 应急响应与故障处理

一、应急预案体系建设

应急预案体系属于水务工程应急管理工作的顶层设计和行动纲领，给突发事件应对工作赋予了制度化、规范化的架构。科学完善的预案体系可以明确责任、整合资源、优化程序，保证风险发生后各方面应急工作可以迅速步入正轨，达成高效协同作战的效果。

（一）综合应急预案与专项预案

综合应急预案是整个水务应急体系的纲领性文件，具有全局性、指导性。它从宏观上规定了应急工作组织架构、指挥体系、响应级别、信息发布、后期恢复等通用原则。该预案涵盖所有种类的突发风险，包括自然灾害、事故灾难、公共卫生事件等，作为一个通用的框架，它给突发应急行动提供整体协调保障，保证应急工作启动时各方面行动的统一性。它既是内部行动的指导文件，又是政府其它部门和社会力量联动的基础性文件，规定了部门间协调的接口和机制。

与综合预案相辅相成的，是对某一类或者某一种突发事件而制定的专项应急预案。对水源地污染、主干管爆裂、水厂停电、网络攻击等高发或者高危风险会分别制定出详细的处理预案。专项预案的内容具体而可操作，对某种情况下需要监测预警的指标、先期处置措施、技术手段、抢险队伍及装备调度等都作了规定。综合预案和专项预案共同组成一个有机整体，综合预案是战略框架，专项预案是战术执行的细节补充，两者互相支持，使应急响应既有宏观的战略统筹，又具备现场的执行力。

（二）应急预案的编制与评审

应急预案的编制是一项系统工程，其起点就是全面深入地开展风险辨识和评价。编制小组需要对从水源到用户整个水务工程流程进行系统梳理，并识别出在各个阶段可能存在的自然风险、技术风险和社会风险，再对这些风险发生的可能性以及潜在的影响进行科学评价。该步骤的结果就是风险评估报告，它是确定预案内容、重点和资源配置的依据，保证预案的针对性与实用性。

应急预案的内容要完整，条理要清楚，要有应急指挥机构及其职责、预警与信息通报、分级响应程序、应急资源保障、善后处理与调查评估等内容或要素。在响应行动部分根据不同的等级设定启动条件以及相应的行动清单，并规定每一个任务的责任部门及完成时限。语言必须简洁明了，不能含糊不清，以免一线工作人员在紧急情况下不能迅速准确地理解并执行。

预案的生命力在于持续有效的状态，需要严格的审查和不断的修订来保证。预案制定完成之后应该邀请管理人员、技术专家、一线操作人员和有关的外部人员参加评审会，从合法性、完整性、针对性、可操作性等多方面进行审查。预案不是一成不变的，必须建立定期修订制度，一般一年或者三年修订一次；发生重大事件、应急演练发现存在问题、法律法规或者技术条件发生变化时，及时组织专项修订。以这样的编制、评审、发布、修订的闭环来保证预案一直处在一个很好的状态。

（三）应急物资储备与队伍建设

应急物资是应急抢险的物质基础，储备是否充足直接决定应急响应的效率和效果。物资储备要依据风险评估以及应急预案的要求制定科学、详细的储备清单。管理上采取集中与分散相结合、实物储备与协议储备相结合的方式。对大型移动泵车、应急发电机组这类价值高、通用性强的设备，采用中心储备库集中维护；

对日常抢修消耗品，采用各区域站点分库就近取用的方式。协议储备，即同供应商签订协议，在紧急情况下可优先取得物资供应，属于经济有效的补充方式。

应急队伍是应急响应的实施主体，是化解危机的决定性力量。专业应急队伍的建设包含许多方面，各方面的分工及职责如下表所示。

应急队伍类型与职责表

指挥管理组	由具备能力、协调经验丰富的管理人员组成，负责统一指挥应急响应，做出关键决策。
技术专家团队	由水力、水质、结构、自动化等各领域专家组成，为复杂的故障诊断和处理提供智力支持和专业指导。
抢险抢修队伍	由受过专业培训、技术熟练的一线工人组成，是现场处置的骨干力量，负责具体抢修作业，必须保证 24 小时待命。
后勤保障组	负责提供应急物资运输、餐饮、住宿、医疗等后勤支持，确保抢险人员的持续作战能力。
对外协调组	负责与政府部门、媒体、公众等外部机构沟通协调，发布信息，争取支持，维护社会稳定。

应急队伍的建设不只是人员的简单聚集，更多的时候是依靠制度化的管理与持续的培训，使其成为一支组织性强、纪律严明、技术过硬的队伍，成为一支随叫随到、来之能战、战之必胜的可靠力量。

二、故障诊断与快速响应

（一）常见故障类型与诊断方法

管网系统故障属于水务运营中最常见的难题，管道爆裂，漏损，暗漏等均属于此类。诊断的第一手信息来自于压力监测系统数据突变、水量平衡计算异常或者巡线人员目视发现。初步判断之后，应该尽快做精确定位。传统的听音杆、阀门检漏法仍然有效，现代技术手段更加高效，例如利用相关仪通过两个传感器接收漏水声波的时间差来精准定位漏点；在复杂环境中可以使用探地雷达、管道机器人等内部检测设备对故障点进行“画像”。

水厂和泵站设备故障具有突发性强、影响面广的特点，所涉及的设备有水泵、电机、阀门、变配电等。SCADA 系统是诊断这类故障的主要工具，可以对设备电流、电压、振动、温度、出水压力等参数进行实时监测，从而及时发现异常。电流增大是电机过载或者水泵堵塞的先兆；振动频率的变化，就可能是轴承磨损的先兆。

有经验的运行人员依靠历史数据以及设备声音等辅助信息，可以迅速对故障原因做出初步的判断，给维修工作指明方向。

水质突发事件响应等级最高，关乎到人民群众生命安全。原因比较复杂，可能是由于水源污染、处理工艺失效或者管网二次污染所致。在线水质监测仪表（浊度仪、余氯仪、pH 计等）为第一道防线，数据超标会立刻发出警报。诊断工作与时间赛跑，应急小组必须马上加密采样，对各个关键节点多点取样送实验室分析，确定污染物种类和浓度。同时用管网水力模型模拟污染物扩散的路径及影响范围，根据模拟的结果来决定切源、分段隔离或者发出预警。

信息化高度发展的时代，水务自动化控制系统自身故障也不能忽略，比如 SCADA 服务器宕机、PLC 控制器故障、现场仪表通讯中断等。这类故障会造成调度中心失明、失聪，不能够对系统进行有效的监控。诊断一般从网络层面入手，利用 ping 命令、查看交换机状态、服务器日志等手段对网络连通性以及软硬件健康情况进行排查。为了应对这些故障，系统设计时就要考虑冗余配置，采用双机热备、环形通讯网络等方式，并制定详细的“黑屏”状态下人工控制预案，保证自动化系统出现故障时，仍能依靠人工操作维持核心功能的正常运行。

（二）故障上报与指挥调度流程

故障信息流转越有效，快速响应的前提就越充分。必须建立一个全覆盖、立体化的故障上报渠道，将热线电话、网站、移动应用、社交媒体、内部巡查、SCADA 系统自动报警等多渠道纳入其中。所有信息都要集中到应急指挥中心，由接线员或者系统自动将信息录入工单系统。工单中需要填写发生的时间、准确的地点、现象描述、上报人信息等主要数据。系统要有智能研判模块，根据预设的故障类型、影响范围、管径大小等规则，对事件进行初步分等级，比如“紧急”“重要”“一般”等，用不同的颜色标签标出来，方便指挥员抓住重点。

故障信息核实并分级之后，指挥调度流程就立即开始。调度长是现场指挥的“大脑”，依据应急预案赋予的权限做出迅速的决策。调度员通过专用调度系统或者对讲机，命令距离故障点最近、最拿手的抢修队，指令一定要清楚，要说明故障大概情况、大概位置、带什么工具等。同时调度中心要按照事件等级启动横向协同机制，通知水质检测部门到现场取样，协调公关部门准备对外信息稿件，联系交通管理部门进行必要的交通疏导。调度过程要体现出扁平化的指挥以及信息的双向流动，抢修队伍要定时向上级汇报现场的情况和处置的进展，调度中心

依照收到的反馈信息来重新安排资源调配和应对举措,由此形成一个高效的感知、决策、行动、反馈的闭环。

（三）快速抢修技术与装备

为了最大限度减少社会生活受影响程度,现代水务抢修越来越倾向于使用高效、低扰动的先进技术。非开挖修复技术就属于此类。它与传统的开挖维护方式完全不同。对老旧管道的结构性缺陷可以采用CIPP翻转内衬法,在压力的作用下,将浸润树脂的软管翻转后紧贴旧管道内壁,加热固化形成一根新的“管中管”,无需大规模路面开挖,工期短,交通拥堵少,环境污染小。为应对紧急情况下供水的恢复,模块化应急供水系统,大口径临时软质输水管道、便携式增压泵组等可以在数小时内搭建起旁路供水管线,为医院、学校等重要用户的生命线提供保障。

精良的装备是抢修队伍战斗力的放大器。一体化应急抢险车属于现代水务应急体系的标志装备。特种车辆就如同一个移动的作战平台,车体装备大功率发电机、潜水泵、电焊机、管材切割设备、照明系统、通讯设备、各种工具及备件。抢修队伍到达现场之后,车辆可以马上投入工作,提供作业所需的一切动力和支援,在夜间或者无外部电源的恶劣环境下,它的价值更加明显。无人机的应用也越来越广泛,它能够快速飞到人难以到达的区域,通过搭载的高清或者红外摄像头,迅速发现管线泄漏点,评估灾害影响范围,把实时画面传回指挥中心,给决策者提供宝贵的空中视角。

信息化、数字化工具深度应用,给抢修抢修加注了智慧动力。抢修人员手中的工业级平板电脑成了他们的第二大脑。利用移动GIS系统可以随时查看事故点周围的管网分布图、阀门分布图、历史维修记录等,避免因图纸不清楚而造成误操作。利用内建的工单管理软件可以接收任务、上报进度、拍摄现场照片、记录更换材料的过程,实现抢修全过程无纸化。在关键的现场处置节点上,还可以视频连线,把实时画面传到后方的专家那里,获得远程的技术指导。数字化工作模式提高了单次抢修效率与准确度,同时沉淀下来的数据也为之后故障分析、资产管理、预防性维护打下了基础。

三、应急演练与能力提升

（一）应急演练的计划与组织

应急演练是否成功，很大程度上是前期策划是否周密决定的。水务企业应编制年度演练计划，系统性地覆盖水源地突然被污染、供水主干管爆裂、水厂因为网络攻击而停产等各种风险情况。演练的形式也应该多样化，包括检验决策流程的桌面推演、检验某项专项功能的专项演练、检验整体联动能力的全要素、全流程实战演练。每一次演练都要有目的，可以是检验新版预案是否可行，也可以是检验新装备的实战能力。演练方案中的脚本设计十分关键，应该为参训人员设置逼真的背景及各种事件，甚至包含一些非预期的意外来检验队伍在突发情况下反应的能力。

演练组织工作繁杂，须要创建一个有效的临时组织机构。一般设总指挥部来领导演练活动，导演组按脚本安排演练过程并发号施令，评估小组由内、外专家组成，在演练过程中独立观察、记录、评价所有的各项工作情况，保证场地、物资、通讯、安全等各项工作顺利进行。演练时组织方要营造身临其境的紧张气氛，用模拟媒体采访、市民投诉电话等形式增加真实感与压迫感，使参加人员在接近实战的情况下作出反应。同时必须把安全保障放在第一位，对所有环节进行风险评估，制订出应急预案，保证演练本身不能造成任何次生事故。

（二）演练效果评估与预案优化

演练的最终目的不是表演，而是发现问题。因此科学客观的效果评价就是演练工作的核心。评估工作要贯穿演练的始终，评估组成员拿着评估量表，按照预案的要求和最佳实践的标准，逐项对应信息上报及时度、指挥决策科学度、资源调配合理度、部门配合顺畅度、现场处理规范度等各项指标进行打分并做好记录。评价不能只是找出不足之处，还要分析原因，是预案本身有问题，还是人员技能不够，还是资源配备不到位。

演练结束之后，要马上召开复盘总结会，参演的各个单位以及评估专家都要参加，开诚布公地谈论演练期间出现的优点和不足。在此基础上，评估组整理出一份详细的正式的评估报告。这份报告不能流于形式，应该指出问题所在，分析问题产生的原因，提出切实可行的改进建议。这些建议可能小到更改预案里的一个电话号码，也可能大到建议改变整个应急指挥架构或者增加某种重要设备。

评价报告成为启动预案改善程序的发令枪。相关部门要根据报告里提出的要求制订详细的整改计划，包括整改内容、责任人、完成时间。最终的整改成果体现在应急预案修订版、更新的设备清单或者新的培训大纲里。至此才算形成了一个演练、评估、反馈、整改、优化的闭环管理流程。持续改进的螺旋式上升是应急能力不断进化、臻于完善的根本途径，保证每一次演练的投入都转化为应急准备水平的实际提高。

（三）应急人员技能培训与考核

应急人员是应急体系中最重要因素，他们才是应急体系中最活跃的因素，应急人员的专业素质与心理状况决定应急处置是否成功。因此就必须创建起一套系统化、常态化的培训体系。培训内容要有很强的针对性，做到因岗施教。对指挥调度人员的培训重点是应急决策方法、信息研判、资源统筹、危机沟通；对技术抢修人员的培训重点是新设备操作、新工艺应用、复杂故障诊断排除、危险环境安全作业规程。培训不能只是课堂上的理论灌输，而应该采用案例分析、桌面推演、模拟器训练、现场实操等多种方式，把知识变成实实在在的能力。

为保证培训的效果落到实处，必须要有严格的考核认证作保障。考核要同培训内容相衔接，分成理论知识考试和实际操作测试两块。例如阀门操作工在规定的时间内要完成某一片区关阀止水的工作，水质化验员要熟练使用应急检测设备并能够解读数据。考核结果要同岗位资格、绩效挂钩，从而产生有效的激励和约束。可以开展应急技能等级认定，设初级、中级、高级，促使员工不断学习、提升技能。定期考核能知晓应急队伍整体能力水平及短板，为之后的培训计划制定给予参考，使应急队伍能力精准提升，持续发展。

第十章 水务工程协同优化案例与未来展望

第一节 典型工程协同优化案例分析

一、南水北调工程协同案例

南水北调工程是世界级的调水大工程，成功实施是大型水利工程系统协同的典范。该工程不只是物理意义上的长距离输水，牵涉到水源区和受水区、工程建设和运营管理、经济发展和生态保护等诸多方面、诸多层次的利益相关者协调。积累的经验对以后大型水利工程建设有深远的意义。

（一）工程概况与协同挑战

南水北调工程是解决中国北方水资源严重短缺的战略性基础设施，分为东线、中线、西线三条线路，连接长江、淮河、黄河、海河四大流域。工程横跨多省、市、自治区，线路长，投资大，涉及面广，协同问题史无前例。主要挑战有：

1. 跨行政区划、跨部门的行政协同，工程建设与运行牵涉水利、环保、财政、地方政府等众多部门。怎样创建高效统一的指挥协调机制，保证中央决策与地方执行保持一致，这是工程顺利进行的基础。

2. 水源区与受水区生态经济利益的协调，水源区为保护水质做出了巨大的环保投入和产业结构调整，受水区要建立合理的水价和生态补偿机制，实现区域间公平、可持续发展。

3. 工程建设和运营管理之间存在协调问题，在设计规划阶段就要考虑到长期运行的效率、安全、成本控制，防止出现重建轻管的情况。

4. 工程效益与生态保护协调：当调水给原有的汉江河流生态系统造成损害的时候，必须持续的科学论证以及生态修复手段跟上才能使综合效益达到最优。

（二）全链条协同实践

面对艰巨的协同问题，南水北调工程摸索出了一套包含规划、建设、管理、生态保护等各个环节的全链条协调制度。

顶层设计、组织协同，国家设立高级别的领导小组和专门的管理机构（中国

南水北调集团有限公司），统揽全局、协调重大利益关系、统一调度管理。形成了强有力的中央协调核心，很好地解决了跨区域、跨部门的组织协同问题。

工程实施与管理协同，在中线工程管理中，提出一种创新性的立体化管理方式，即智能设备、信息化平台、人工巡查三者相结合。运用智能化检测运维技术，大大提升工程管理水平及安全度，实现技术与管理相结合保证水源地至用户端水质水量的安全。

生态和经济的协调发展，东线工程实行先治污、后通水的执行政策，投入巨资治理沿线污染源，并推动区域内产业进行绿色转型发展。建立水源地生态保护补偿机制，用财政转移支付等方式支持丹江口库区等水源地生态建设、民生改善。采用生态补水的方式改善了华北地区一些河流湖泊生态环境，让已经干涸多年的白洋淀又有了新的生命，充分体现了调水工程的生态效益。

（三）协同效益与经验启示

南水北调工程的协同实践带来了显著的综合效益。

社会效益工程通水以后，累计调水量达数百亿立方米，直接受益人口达 1.85 亿以上，极大地缓解了北京、天津等北方大中城市用水紧张的局面，改善了居民的饮水质量，实现了从“有水喝”到“喝好水”的转变，提高了人民群众的获得感、幸福感。

经济效益，丰富的水资源对北方地区工业、农业的发展起到了巨大的支撑作用，优化了产业布局，为京津冀协同发展等国家战略的推进提供了强大的水资源支撑。

生态效益是有效削减了受水区城市地下水的开采量，遏制了地面沉降，向河流湖泊生态补水，改善了多地的生态环境。

该案例的经验启示有以下几点：

1. 强有力的顶层协调机制是应对巨型工程复杂性的根本保障，需要创建超越地方、部门利益的权威协调组织。

2. 协同要贯穿于工程的全生命周期，在规划设计的源头就充分考虑运营管理、生态保护和社会影响等各方面的因素。

3. 利益共享、成本共担才是可持续的协作，要建立起科学合理、能反映各方利益的生态补偿、水价机制。

4. 科技创新是提高协同效率的催化剂，应该充分利用数字化、智能化技术来

对工程建设、调度、管理等实施赋能，达到精细化协同的目的。

二、深圳茅洲河综合治理案例

深圳茅洲河治理过程，是高速发展的特大城市怎样解决非常复杂的水环境问题的生动写照。这条曾经的珠三角污染最严重的河流，在经历了一场声势浩大的系统治理战役之后，由原来的“墨汁河”变成了今天的生态景观带。其多主体、多维度协同治理模式，给同类城市河流污染治理提供了一个范本。

（一）多项目多部门协同复杂性

茅洲河治理面临典型的“大城市病”与“高密度病”叠加局面，其协作困难主要体现在：

1. 跨行政区域协同难题：茅洲河是深圳和东莞的界河，治理需要两市在规划标准、治理进度、执法监管等方面高效联动，任何一个方面的滞后都会影响到治理的效果。

2. 市内多部门协同复杂性：河流治理牵涉到水务、环保、规划、城管、街道办等诸多职能部门，职责交叉、信息壁垒、管理条块分割的顽疾一直存在。例如管网建设与河道整治、污染源查处和排污许可管理分属不同的部门，缺少统一调度不能形成合力。

3. 海量工程项目协同管理：茅洲河治理由数千个正本清源小区改造工程、数百公里管网新建与修复工程、多座污水处理厂的新扩建工程、河道清淤工程、生态修复等组成。项目点多面广，施工组织和质量控制的协同管理难度很大。

这些多重复杂性要求治理体系具备高度的系统性和协同性。

（二）厂网河一体化治理模式

为了解决以上协同难题，深圳在茅洲河治理中采取了全流域统筹、大兵团作战的方式，核心就是“厂网河一体化”的系统治理模式。该种模式打破了以往各项工程各自为政、管理职能条块分割的现状，把流域内所有相关的设施，如污水处理厂、排水管网、河道、泵站、排涝设施等作为一个整体进行统一规划、统一管理。

组织保障深圳建立高级别指挥部，设立茅洲河流域管理中心，对整个流域治理实施统一指挥、统一调度，解决了跨部门、跨区域协调问题。

工程实施首次用 EPC 的工程总承包方式，把流域内各项目都外包给大型专

业化的企业集团，以达到设计、采购、施工、运营一体化深度融合的目的。大兵团作战的方式大大提高了工程建设的效率和协同性，创造了单日敷设管网数公里的“深圳速度”。

技术与管理协同，以水质达标为目标倒逼全链条协同。对河道水质实施连续监测，并据此倒推管网运行情况以及污水厂的处理成效，从而达成由结果向过程的闭环管控，保证各个设施系统效能的充分发挥。

（三）案例对区域协同借鉴意义

茅洲河治理的成功，为其他地区，特别是快速城市化地区的水环境协同治理提供了深刻借鉴。

1. 系统思维、流域统筹，才是解决复杂水环境问题的根本出路。必须摒弃头痛医头、脚痛医脚的碎片化治理方式，把整个流域看作一个生命共同体，进行一体化的规划、一体化的治理。

2. 大兵团作战式的工程总承包模式，对项目多、工期紧、情况复杂的治理场景来说，是补齐基础设施短板的有效方式，可以依靠专业化整合达到效率和质量的双提升。

3. 建立强有力的流域层级协调机构：面对多部门、跨区域复杂的协调，有权威、有权的专门机构是打破行政壁垒、整合各方面力量、保证“一张蓝图绘到底”的必由之路。

4. 管理协作与长效运维：茅洲河治理由以建设为主转向建管并重，建立排水管理进小区等精细化管理模式，重视长效运维对于巩固治理成果的重要性，给水环境长治久安提供有价值的管理协作经验。

三、上海智慧水务系统案例

作为我国超大城市代表，上海在水务管理领域率先开展数字化转型，其智慧水务系统建设实践，集中反映了在复杂信息环境之下，依靠技术与业务深度融合，破解数据孤岛，提升管理效能的途径。给水务行业数字化、智能化升级提供一个良好的范例。

（一）跨平台跨系统数据协同难点

上海水务管理范围大，包含原水、供水、排水、污水处理、防汛等业务板块，各个时期都建立了自己的信息系统。由于普遍采用的是“烟囱式”的系统建设模

式，数据协同面临较大的难题：

1. 数据标准不统一，各个系统的数据格式、编码规则、接口协议不一致，造成数据壁垒难以逾越，信息无法共享，不能进行关联分析。

2. 系统平台异构，不同的系统采用不同的开发语言、数据库类型、技术架构，跨平台数据实时交互、业务流程联动技术难度大、成本高。供水调度系统数据和管网漏损监测系统数据如果不协同，就无法对压力进行准确的调控，也无法对漏损进行快速的定位。

3. 业务流程割裂，各个业务部门习惯于在各自的封闭系统内工作，缺少跨部门业务协同的意识和机制，造成数据即便在技术上可以打通，也无法在业务层面发挥应有的价值。

这些难点共同构成了智慧水务建设中“数据孤岛”和“应用孤岛”的核心问题。

（二）技术与业务协同实现路径

上海智慧水务建设在破解数据协同难题时，探索出一条“平台加应用”的技术与业务协同之路。

技术协同：主要是建设智慧水务的数字基础架构。即创建数据中台和物联网平台。数据中台对供水、排水、水环境等各个业务系统数据进行汇聚，清洗、治理、整合之后形成标准的数据资产，破除数据孤岛。物联网平台统一接入全市各地的水务传感器、监控设备，把大量的前端感测数据标准化采集并管理。在此基础上用数字孪生技术对重点区域或者设施（南市水厂）进行虚拟数字建模，从而实现了物理世界和数字世界之间实时的映射与仿真。

业务协同以业务需求为驱动，注重以业务需求为导向来应用技术。上海从供水安全保障的提高、调度的改进、精细化管理等实际业务的痛点出发，将上述数据作为上层智慧应用（供水管网智能压力管理、水质全流程监控、泵站联合智能调度）的基础。系统不再仅仅是一个部门独立的工具，而是各个部门之间互相配合的协同工作平台。创建综合运营管理平台，将分散的业务流程集中起来，从发现题目，分发工单到处理反馈形成闭环管理，使信息技术团队与水务业务部门互相配合，保证技术方案真的解决业务问题，提升协同工作的效力。

（三）案例对数字化协同示范作用

上海智慧水务系统的实践，为全国水务行业数字化转型提供了清晰的样板。

1. 统一数字底座是协同的前提：只有在数据中台、物联网平台等基础设施建

设好之后，才能把分散的数据和感知能力整合起来，为上层应用智能化和业务流程协同化打好基础。

2. 业务驱动是数字化协同的根本导向，智慧水务的建设不能只是简单的技术叠加，要以安全、高效、绿色等业务目标为引领，从解决实际问题出发，开发应用系统，才能保证投资的回报和应用的效果。

3. 数字孪生技术属于达成深度协同的一种高级形态，借助创建数字孪生体，可以做到针对水务系统运行情况开展模拟、诊断、预估并实施优化控制，从而给防汛警报、水量调配、应急处理等繁杂决策赋予了前所未有的科学支撑，它是未来水务协同管理的一种关键走向。

上海智慧水务系统关键协同要素表

协同维度	核心内容	实现方式	显著成效
技术协同	数据集成与标准化	构建数据中台、物联网平台，标准化接口与数据管理	打破数据孤岛，实现数据互联互通
	物理 - 数字映射	采用数字孪生技术对重点设施（如南市水厂）进行建模	实时监测、模拟、预测，支撑精准决策
业务协同	需求驱动技术应用	聚焦供水安全、精细化管理等业务痛点，开发智慧应用	提升供水调度、水质监控等业务效率
	跨部门流程整合	建立综合运营管理平台	实现业务闭环管理，提高协作效率
管理协同	组织架构调整	设立专门机构或团队，促进IT与业务部门融合	确保技术方案有效落地，提升整体管理效能

从上表可以看出，上海的探索表明数字化协同不是技术问题，而是管理变革过程，组织架构、业务流程和技术平台的同步变化之后，水务管理才能向智能化、高效化方向发展。

第二节 问题解决经验总结与启示

一、顶层设计与组织保障是前提

水务工程协同是否能够成功，根本在于顶层设计是否科学、组织保障是否有效。权责分明、目标一致、沟通顺畅的组织机构，是化解矛盾、凝聚力量的基础。如果没有高瞻远瞩的顶层设计以及强有力的组织保障，局部改善或者技术层面上

的努力都是徒劳无功的，不能从根本上解决系统性的协同问题。因此打造一个有效的组织体系，是保证规划与实施顺利对接的首要一步。

（一）建立高级别协同领导决策机制

复杂的水务工程项目部门之间、专业之间存在着协作壁垒，阻碍了协同效率的提高。打破这些壁垒就要创建一个可以冲破单一部门利益束缚、拥有权威决策权的高级别协同领导机构。该机构一般由政府主管领导担任牵头人，规划、水利、环保、住建、财政等相关部门主要负责人和项目法人、主要设计、施工单位负责人参加。其主要工作就是解决项目推进过程中出现的重大战略性问题，保证各项工作在统一的意志下顺利推进。

这样的决策机制要正常运转，就得有清楚的议事规则和权责划分。定期召开联席会议，就项目规划方案的重大修改、重要的资源分配方案、核心技术路线的确定、实施过程中出现的重大矛盾等进行审议。该机制把决策往前推，集中起来，避免了部门之间来回沟通，公文来往不畅导致效率低、决策慢的情况。拿珠江三角洲水资源配置工程来说，高级别领导协调机制在应对跨区域征地拆迁，多水源联合调度这些棘手问题的时候，起到了决定性的作用。

强有力的领导决策核心可以给项目提供政治保证和组织向心力。它可以是纠纷的最后裁决者，也可以是共同目标的守护者。依靠有效的决策可以整合各个层次各个部门的力量，使它们集中到项目总体目标之下，形成统一指挥、步调一致的行动态势，从而消除最高层次的组织障碍，保证项目按照正确的方向稳步前进。

（二）明确各方权责利形成协同合力

水务工程项目一般会涉及政府部门、项目法人、设计单位、施工单位、监理单位、运营单位、社会公众等多元主体。各个主体的立场千差万别，诉求也各不相同。权责利不明，容易造成项目推进过程中互相推卸责任、争抢利益的现象，从而严重影响协同效率。因此建立一套明晰公平合理的权责利分配机制是调动各方面积极性、形成协同合力的制度保障。

权责必须明确，要以合同、管理章程、合作协议等载体，对规划、设计、施工、运维各阶段各方的权责范围、工作内容、质量标准、进度要求等做出具体限定。规划部门做宏观布局、指标控制，设计单位落实规划意图到技术方案上，施工单位按图施工。同时要建立问责制，对由于未尽职责导致项目拖延、质量不过关、超支的，要承担责任，做到“谁负责，谁担责”。

合理分配利益是各族人民参与的内在驱动力。它不只是指经济利益的共享，还包括品牌声誉、技术提高、市场拓展等非经济性利益。项目开始时就要建立透明化利益分配模型，使各方投入和回报相对应。就模式来说，更得依靠精算的财务模型、严格的法律条文，来确定政府与社会资本之间的收益分配、风险承担以及回报机制，保证社会资本方能拿到合理的回报，从而达成长时间、稳定的资源和智慧投入。

依靠法律和制度手段把各方的权、责、利紧密联系起来，形成一个“一荣俱荣、一损俱损”的利益共同体。各方不再是简单的甲乙双方博弈关系，而是为了项目的成功而共同努力的伙伴。设计单位会主动优化方案以利于施工，施工单位也会及时反馈现场问题来改善设计，从而产生内生的协同动力，实现项目整体效益最大化。

（三）强化规划引领实现源头协同

规划是水务工程建设的“总龙头”，规划是否科学、前瞻、可行，直接关系到后面工程实施是否成功、高效。工程实施阶段的矛盾和问题，大多是由于规划阶段考虑不周、协同不够所造成的。因此规划的引领作用必须在规划编制之初就体现出来，即实现源头协同，避免后期被动调整。

实现源头协同，要求规划编制过程本身就是一个多方深度参与、充分博弈和共识达成的过程。

1. 跨部门数据共享衔接，规划编制要打破部门间的信息壁垒，把水文、气象、国土空间、社会经济、生态环境等各方面数据系统汇聚起来。创建统一的数据共享平台，使规划决策依靠全面准确的信息，避免由于数据不一致引发的规划矛盾。

2. 公众参与、以需求为导向，在规划时要充分听取用水户、受影响区域的居民等社会各方面的意见，掌握真实的需求及主要的问题。通过座谈会、听证会、网络征求意见等渠道使公众由被动接受者变成主动参与者，使规划方案更贴近实际更有民意基础减少实施阶段的社会阻力。

3. 规划的实施导向：规划方案不能脱离实际，更不能成为不切实际的空中楼阁。规划方案中必须要考虑施工技术的可行、经济费用能否承担、后期运营是否可持续。在规划阶段就应邀请有丰富施工经验的专家及运营管理人员，对地质情况、施工工法、材料供应、运维模式等展开评价，把实施阶段可能遇到的问题在规划阶段就予以规避。

通过加强规划的综合性、协调性、实施性，可以保证规划方案在一开始就有很高的共识基础和可行性保障。这既可以在很大程度上降低工程实施阶段由于设计变更、方案返工造成的社会资源浪费，又能从源头上建立起一个统一的框架与目标，使得后续的设计、施工、运营等各环节可以在同一个体系内按照共同的要求进行工作，达到全流程、一体化协同的目的。

二、技术创新与平台支撑是关键

（一）数字化技术深度应用

建筑信息模型同地理信息系统实现深度融合的应用，给水务工程规划与实施的协同带来革新的技术手段。技术利用创建三维数字化模型的方式，把工程项目从筹建到结束期间所有有关的物理和功能信息整合在一起，并且还具有宏观地理空间环境分析的能力。两者结合，实现了微观构件到宏观环境所有要素、全方位的信息集成与可视化。

在规划设计阶段，与相结合可以实现方案的虚拟预演、多维度评价。设计人员可以利用带有真实地理环境信息的平台，对模型进行多方案布置比选以及日照、流体动力学、地质碰撞等仿真实验，在设计最开始阶段就发现问题并予以解决。以珠三角水资源配置工程为例，利用平台进行地下管线、地面设施的碰撞检测，避免施工阶段返工。湖北黄荆口水库项目采用技术，把水工建筑物同地质地形完美衔接，使设计冲突率下降了 60%。

工程实施阶段融合了进度、成本信息模型加上空间定位，可以对施工过程实现精细化、可视化控制。管理人员可以清楚地看到工程进度的状况，准确预测所需要资源的数量，对工程质量安全风险进行实时预警。模型与施工计划进行绑定之后可以自动生成预警，对施工过程中出现的延期风险及时进行提示，缩短工期。同时结合无人机倾斜摄影、激光雷达等技术可以快速获取施工现场实景三维模型，并与设计模型进行比对，实现施工偏差的实时监控和纠偏，保证工程实施与规划设计高度一致。

（二）构建一体化信息协同平台

水务工程协同的最大障碍就是“信息孤岛”，各个参与方在不同阶段、用不同的软件，数据标准不统一、格式不一样，造成信息流转不顺畅、协同效率低。构建起覆盖项目全生命周期的，打破数据壁垒、实现协同的必然选择，就是创建

一体化信息协同平台。该平台要以云架构为基础，结合物联网、大数据等技术，形成集中式数据仓库和协同工作环境。

该平台的主要功能就是统一存储、统一管理、方便共享数据。所有参建方即规划、设计、施工、监理、运营等单位都在同一个平台上工作，从而保证信息来源唯一、数据一致。平台要有很强的格式兼容和轻量化能力，可以对各专业软件模型进行集成浏览和审批，使非专业人士也能轻松理解复杂的工程信息。上海市水务局创建的数据中心和水务应用管理协同平台，就做到了模型共享，工程数据集中监管。

更重要的是，一体化协同平台是一个各个管理流程线上化、智能化的平台。设计变更、技术核定、质量验收、安全检查、进度款支付等传统的线下审批流程，都可以在平台上通过电子表单、流程引擎的方式来完成，大大提高了审批效率，并且所有的过程信息有据可查、全程留痕。海南智慧水网信息平台建设就是把涉及水的业务智能应用整合起来，搭建起一个互联互通的信息平台，实现一张图的智能化管理。平台化的协同模式可以把分散、割裂的管理行为统一起来，在规划意图传递到每一个实施环节的时候都是完整的，而在实施过程出现的问题也能及时返回到决策层去，从而形成高效管理闭环。

（三）推动技术创新驱动管理升级

技术创新不单是工具的更新，更是一股强大的推动力量来促使管理理念、模式进行革新。以物联网、人工智能、数字孪生等新兴技术为代表，正在使水务工程管理由原先的依靠经验做决策，变为用数据来进行决策。管理者应主动接受技术的改变，用技术推动管理能力的质的提高。

数字孪生属于管理升级的典型情况。它把实时物联网监测数据等融合起来，形成一个与物理工程实体实时映射的数字孪生体，从而让水务工程运行情况做到“全景可视、智能预警、模拟推演”。就城市供水管网而言，数字孪生系统可对管网的压力、流量变化做实时模拟，一旦出现爆管的情况，系统就会根据模型快速找到泄漏的位置，估计影响范围，并提出最适合的关闭阀门方案，把应急响应时间从一小时缩短到几分钟。

人工智能算法的加入，给管理决策赋予了智慧的大脑。对海量的历史运行数据进行深度学习之后，就能够开展设备故障的预测性维修工作，精确优化水厂制水能耗，并且实施智能化的供水调度决策。深圳龙岗区智慧水务项目，采用鸿蒙

系统和算法之后，实现了泵房无人值守，总体能耗降低 10%，核心控制器采购价降低 5%。技术创新所引起的管理升级，使管理者从繁重的日常工作中解脱出来，有更多时间去研究战略性的、前瞻性的问题，大大提高了水务工程规划与实施的协同质量与效率。

水务工程数字化技术应用概览

技术名称	核心功能	应用阶段	典型效益
BIM	三维建模、信息集成	规划、设计、施工	优化设计、碰撞检测、施工可视化
GIS	空间数据管理与分析	规划、设计、运营	环境分析、选址优化、管网管理
物联网	实时数据采集、远程监控	施工、运营	设备监测、数据感知、智能预警
大数据	海量数据分析、模式挖掘	规划、运营	需求预测、风险评估、决策支持
人工智能	智能识别、预测、优化	规划、运营	故障诊断、能耗优化、智能调度
数字孪生	实时映射、模拟推演	全生命周期	状态监控、应急模拟、全景可视

从上表可以看出各种数字化技术在水务工程各阶段起的作用不同，管理效率和效益也不同。

三、机制创新与文化培育是保障

（一）建立利益共享与风险共担机制

多方参与的工程不能只依靠合同约束和行政命令来实现真正的协同。建立起合理的利益分享、风险共担机制，把各方面的力量凝聚起来，形成利益共同体，这才是内生协同的动力源泉。其核心就是项目成败关系到每一个利益相关者，因此促使各方跳出个人局限，为共同目标而努力。不仅可以应用于政府和社会资本合作模式，也可以应用于传统的工程总承包等模式。利益共享机制设计不能只是简单的利润分成，它包括：优化设计或施工方案节约下来的成本按照设计方、施工方和业主之间的约定比例进行分配；项目提前完工所获得的效益对关键贡献方进行奖励；技术创新获得的专利或者奖项共享知识产权的收益。正向激励可以促使各方的智力资源得到充分的发挥，并主动地去提高效率和效益。风险共担机制就是要求项目初期就要系统识别市场风险、技术风险、环境风险、管理风险等各种风险，并在合同中明确各方对不同的风险所负的责任。政府要承担由于政策法规的变化所造成的风险，而社会资本或承包商则要承担由于项目建设和运营所造成的风险。风险划分清楚，可以避免出现问题时互相推卸责任，让各方只管好自己负责范围内的风险。其一是公平合理，风险和收益成正比，共担共享，良性循环。

（二）培育协同合作的项目文化

项目文化是项目全体成员所共有的价值观、信念、行为准则的总和，它无处不在，像空气一样，影响着人们如何去合作，如何去工作。以信任、开放、互助为文化来打破部门墙、促进沟通、消融矛盾。有协作文化的企业，成为高绩效组织的可能性是没有协作文化的企业的五倍。培育这样的文化需要项目高层领导的倡导以及持之以恒的努力。

领导者要率先垂范，以自己的行为来体现对协同合作的重视。定时开展跨部门、跨单位的团队创建活动，共同培训、技术研讨会、体育比赛等，有助于成员相互认识、建立信赖，破除组织壁垒，形成非正式交流途径。斯坦福大学的研究证明，好的团队合作效率可以提高 35%。

建立开放、透明沟通环境。激励员工不管职位高低，单位大小，都可以大胆发言，直言不讳地提出问题、发表意见、挑战权威。定期的项目沟通会议、开放式办公区、即时通讯软件、协作软件等都是加快信息快速对称流动的有效途径。当信息不再是权力，而是成为解决问题的共享资源的时候，协同的基础才能真正形成。

就是建立起一个以团队贡献为依据的评价和奖励制度。考核和奖励的时候，固然要重视个人的成绩，但是也不能忽视在协作中所付出的贡献，比如是否愿意分享知识、帮助别人解决困难等。对表现优秀的团队成员进行公开表扬和物质奖励，向全体成员传递这样一种信息，即协作合作是项目成功的保证，也是个人实现自身价值的一种途径。

（三）加强人才培养与团队建设

协同最终要靠人来完成，只有拥有一支既懂技术又具有协同能力的高素质人才队伍，才能达到水务工程规划与实施协同的目的。协同工作对人才的要求越来越高，除了有较好的专业基础外，还要有跨界交流、系统思考、化解矛盾、利用新技术等能力。因此对人才培养以及团队建设开展系统的工程，成为解决复杂协同问题最基础的工作。

人才培养要贯穿项目始终，采取多种形式。对管理层实施战略思维、组织协调和领导力的培养，对技术骨干开展数字孪生等新技术应用的培训，鼓励他们参加跨专业技术交流；对所有的项目成员开展沟通技巧、团队合作、冲突管理等软技能的培训。利用导师制，让老专家带年轻工程师来加速知识与经验的传递。支

持员工参加外部认证、学术会议等保证知识体系的更新。

团队建设是人才培养成果的集中反映，其目的就是使各个不同的个体成为一个能够合作的整体。这就需要组建起一个结构合理、角色互补的团队。在组建项目团队的时候，就要有意识地把不同专业、不同性格、不同资历层次的人员融合在一起，保证团队既有冲劲又有稳重，既会创新又能落实。明确每个人所扮演的角色以及承担的职责，但同时又不能固化角色，保持边界模糊、灵活变通，使得成员在需要的时候可以相互补位、相互支援。锤炼、升华，最后造就出一个可以驾驭各种复杂的协同战局的王牌军队。

第三节 未来水务工程发展趋势

一、智慧化与深度数字化

信息技术正在改变传统水务行业。智慧化、深挖数字已成为主要动力，大大提升了水务工程整个流程的管理效率，推动这个行业发展趋向于精细化、智能化。这一进程不但是数据采集和应用方式的变革，更是新的管理模式和决策机制的产生，给解决复杂的水问题赋予了前所未有的技术途径。

（一）数字孪生流域与工程应用

数字孪生流域就是利用多源数据，构建与物理流域实时交互、精准映射的虚拟模型，属于智慧水利建设的重要内容。这项技术把地理信息、水文气象、工程结构、社会经济等各方面的数据汇集起来，就形成了一种可以在数字空间里重现物理流域全部要素、全过程的“虚拟副本”。借助该平台管理者可以实现流域运行的全景式、动态化感知，并且对复杂水系统有更深入的认识。

数字孪生技术在工程规划、设计阶段的运用方式也发生改变。设计者不再仅仅依靠静态的图纸和经验公式来工作，而可以在虚拟的环境里创造出各种不同的工程方案，并做高保真的模拟推演。通过此种方式，可以直观评价不同的方案在应对洪水、干旱等极端情况下所表现出来的效果，并可以评价其对生态环境和社会经济等各方面可能造成的影响，从而在建设之前就找到潜在的风险并优化工程布局，科学决策，提高规划的前瞻性与可靠性。

工程运行管理阶段数字孪生流域的价值体现在“四预”，也就是预报、预警、

预演、预案的强大功能上。平台可以接入实时监测数据模拟洪水演进、污染物扩散的过程并发出预警。突发事件发生时，管理者可以事先在孪生系统里预演各种调度方案，然后选定最好的方案，向各个相关枢纽发出指令，实现对水库闸门等基础设施的精准自动化控制，最大程度地减少灾害损失，保证水利工程安全高效运转。

（二）人工智能驱动的自主决策控制

人工智能技术使水务系统由自动化向自主化发展，核心就是依靠算法模型从大量的数据中学习规律，实现智能预测并进行自主控制。使用机器学习、深度学习算法对历史数据和实时数据进行分析，可以比较精确地预测出未来一段时间内的用水量、管网压力波动、原水水质变化等很多重要的指标。预测精度比传统的统计模型要高很多，给精细化管理的开展提供充分的决策支持。

依靠精准的预测能力，人工智能可以对水务设施做出自主的决策，并且可以实行闭环控制。智慧水厂中 AI 系统根据进水水质、出水标准自动调节药剂投加量、反应时间，保证出水达标的同时减少药耗、能耗。供水管网调度，智能算法实时得出泵站启停、阀门开度最优方案，保证系统压力平衡、减少管网漏损、降低耗能、提高运营效率，释放大量劳动力。

（三）水务系统全面感知与泛在连接

未来水务工程的基础就是建立一个可以全方位、深层次感知物理世界的神经网络，这就需要大量的传感器布置和物联网技术的支持。从水源地到水龙头再到排水系统，流量、压力、水位、水质、声波、振动等各种传感器都被密集地布置在那里，如同人体神经末梢一般，实时感知着水务系统每一个细微的变化。

传感器依靠 5G、NB-IoT 这些无线通信技术组成了一个泛在网络。泛在连接冲破了传统水务管理里各部门、各环节的资讯隔阂，达成从水源到水厂再到管网直至用户的全部链条数据相通并加以共享。

遥感技术属于重要的非接触式感知方式，从宏观角度来讲，它具备特殊的监测本领。卫星遥感能够对地表水体面积、土壤湿度、植被覆盖等开展大范围的周期性监测，给水资源评价和生态监测赋予数据支撑。无人机遥感具有机动性好、分辨率高，对河道巡查、工程勘测、水污染溯源等有重要的作用。

全面感知、泛在连接的最终目的是形成数据驱动的闭环管理模式。实时、全面地掌握系统瞬时状态，可以发现管网漏损、水质异常等现象并且定位。长期积

累下来的这些数据可以给资产的健康度评定，保养计划安排，系统扩大改造等工作赋予科学依据，推动水务工作从被动应对转向主动防范，由事前的事后维护转变为预测性维护，从而达成资源的最佳分配和系统的持续运转。

二、绿色化与可持续发展

由于资源环境压力越来越大，水务工程发展观念发生着绿色革命。可持续发展已不再是可选项，而是必然要求，促使工程规划理念和运营模式不断向着环保、低碳、循环方向发展，力求达到经济效益、社会效益、生态效益的和谐统一。

（一）碳中和目标下的发展路径

水务行业属于能源消耗密集型行业，曝气、加压输送等处理环节耗电量大，污水处理过程还会排放温室气体，因此碳中和是水务行业实现绿色发展的重大课题和必由之路。该目标的实现要依靠全方位的科技革新和管理上的提高，并贯穿于工程的全过程。

实现水务碳中和的具体路径涵盖了多个层面，是一套组合策略。

1. 提高能源利用率，使用高效节能水泵、风机等设备，采用人工智能算法对系统进行调节可以大大降低单位产出消耗。智能化的泵站调度系统可以根据需要随时改变运行参数，可以防止能源浪费。

2. 利用水厂、泵站等场所的闲置空间（屋顶、调节池水面）布置光伏发电系统，实现能源就地生产、就地使用。此模式一方面可以减少对外购电的依赖，另一方面也可以降低电网输配损耗。

3. 水处理设施的能源转化污水和污泥中含大量化学能、热能。采用厌氧消化技术从污泥中回收生物质能（沼气）发电或者供热，利用水源热泵技术从污水中提取热能，是水务设施由“耗能大户”向“能源工厂”转变的关键。

4. 低碳工艺和材料的应用：在工程的设计、施工阶段优先采用生命周期碳足迹小的工艺和材料，减少隐含碳排放。

水务碳中和关键技术与策略表

策略类别	具体措施	碳减排 / 增汇机制	应用实例
能效提升	高效设备更新	降低运行能耗	智能变频水泵、风机
	智能调度优化	优化能源配置	AI 调度泵站运行
能源替代	光伏发电	清洁能源替代	水厂屋顶光伏、水面光伏
	生物质能回收	废弃物资源化	厌氧消化产沼气发电
	污水源热泵	废水余热利用	区域供暖 / 制冷
过程优化	低碳工艺	减少工艺碳排放	短程硝化反硝化
	循环利用	资源高效利用	再生水回用，污泥土地利用
碳汇能力	生态湿地	自然碳捕集	人工湿地处理污水

水务碳中和关键技术与策略如上表所示，涵盖了从能效提升到碳汇增加的多个维度。

（二）基于自然的解决方案主流化

基于自然的解决方案以利用和修复生态系统来应对水问题为重点，正逐步由边缘走向主流，成为传统灰色工程设施的重要补充甚至替代方案。其目的在于用适应性、多功能的方式解决水安全、水环境、水生态问题，保护、恢复、可持续地管理生态系统。

在城市区域中，基于自然的解决方案是海绵城市的构成要素。修建绿色屋顶、透水铺装、植草沟、雨水花园等，可以就地消纳、净化雨水，缓解城市内涝，补充地下水，改善城市微气候。这些绿色基础设施除了具有水文功能之外，还给人们提供生态、景观价值。

从更宏观的流域角度看，基于自然的解决方案也起着非常重要的作用。保护并恢复上游森林植被，涵养水源、削减水土流失，从源头上保证水质水量。中下游地区退耕还湿、恢复河岸缓冲带、构建生态湿地可以自然净化径流污染、增强河流自净能力，给洪水提供滞蓄空间，从而提高整个流域的生态韧性。

（三）水资源循环利用的极致化

由于水资源短缺和水污染问题日趋严重，水资源由传统线性模式（取用排）转变为循环闭环模式（取用处理再用）已成必然。极致的循环利用就是尽量发挥每一滴水的价值，把处理过的废水当成稳定的“第二水源”。

该趋势是由先进的水处理技术推动的。膜生物反应器、反渗透、高级氧化等技术的成熟应用，使得污水经过深度处理后，水质可以达到或者优于某些天然水

源的标准。这些好的再生水可以被用作工业冷却水、市政杂用、园林绿化、生态补水等，可以代替宝贵的优质自来水。在水资源非常匮乏的地区，经过严格处理、监测过的再生水被用作间接或者直接的饮用水补给，实现了水资源价值的最大化利用。

三、系统化与韧性提升

传统的单体工程思维已经不能解决复杂的水问题了。未来的水务工程不能再孤立地做某一个工程，而要从整体上考虑水系统受到冲击之后恢复力，保证水系统的核心功能不衰退。这就要求规划与实施不能局限于单个项目，而应该从流域空间、长时间两个角度进行综合考虑。

（一）从单一工程到流域系统治理

未来水务工程开始出现范式转变，从过去只关注单个的、孤立的水务工程项目，变成关注整个流域生态、水文、社会经济系统的综合治理。把河流看成一个有生命力的有机整体，认为上游、下游、左岸、右岸、干支流之间相互联系，任何局部工程措施的改变都可能对整个系统产生连锁效应。

流域系统治理的核心就是它的整体性和协同性。规划不再仅仅为了防洪修堤，为了供水建库，而是要综合考虑水安全、水资源、水环境、水生态四大目标。它要于水域与陆域之间创建起协同管理的关系，在水利、环保、农业、城建等众多部门之间展开协调联动工作，联合制订出综合性的流域规划。

该方式重视的是多目标优化，而不是单一目标的最大化。在防洪规划中，除了传统的加高堤防等“灰色”措施外，还会考虑上游水土保持、中游蓄滞洪区建设、下游城市排水系统等各方面，形成综合立体的防护体系。该种治理模式旨在达到流域总体效益最大化、人与水和谐共生和流域可持续发展这三个目的。

由单一工程发展成流域系统治理，实际上就是一种治理理念的现代化。它要求决策者具备系统思维，不能被行政边界、部门分割所限制，而是应该从整个流域的健康、福祉出发做长远考虑。这是工程技术的提高，也是管理体制和协调机制的根本改变，其目的就是用综合措施来解决复杂的水问题。

（二）应对极端气候的韧性水务建设

气候变化造成极端天气事件发生得越来越频繁、厉害，给水务系统安全稳定带来了前所未有的冲击。韧性水务的创建目的，就是建立一个在洪水、干旱等极

端冲击下具有有效抵抗能力、能够迅速适应、高效恢复的供水排水系统，保证系统最主要的功能不中断。

构建韧性水务体系要用“灰绿蓝”融合的综合办法。一方面要加固、提高堤防、水库、防潮闸等传统的灰色基础设施，使之能抵御更大的灾害。另一方面大量采用以自然为基础的“绿色”方案，建造海绵城市、恢复滨河湿地等，依靠生态系统自身调节作用吸收、缓洪峰、增加缓冲能力。同时用“蓝色”的智慧化手段，即创建高精度的气象水文预报预警系统，争取防灾减灾的时间。

（三）城市水系统的弹性与自适应能力

城市水系统弹性与自适应能力是在韧性概念的基础上更进一步的深化，指系统面对不确定性时所具有的灵活性以及长期演化的能力。弹性指的是系统受到比设计标准大的冲击时不会发生灾难性的崩溃，而是能够优雅地降级并迅速恢复核心功能。分布式、模块化的供水或者污水处理单元，即使中心系统遭到破坏，局部地区依然可以保持基本的服务，使整个系统具备抗毁性。

而自适应能力是指系统在长期发展中所具有的演化能力。这就意味着规划、设计阶段就要预留出未来可以调整、升级的“接口”，使系统可以适应气候变化、城市发展等未来情景的变化。设计可分阶段建设、便于扩容的水厂，或者可以根据监测数据、运行经验自我调节的智能控制系统。动态的、灵活的适应性设计可以避免由于未来不确定性带来的投资锁定、资产搁浅，保证城市水系统在很长一段时间内都具有服务能力和效率。

提高城市水系统的弹性、自适应性还需要依靠管理策略的革新。多元水源战略就是联合调度地表水、地下水、再生水、海水淡化等多方面水源，降低对单一水源的依赖；建立灵活的水权交易和动态水价机制，用市场手段引导需求方的反应，提高应对干旱等危机的能力。

第四节 协同优化策略的实施建议

一、完善协同管理政策法规体系

政策法规是引导和规范协同行为的根本保障。建设系统性、层次化制度体系，能为水务工程全生命周期的协同管理打牢法律基础，明确行为准则，在制度上清除协同工作中体制机制方面的障碍，使各方分工明确、协作一致。

（一）出台促进水务工程协同的指导意见

为了实现水务工程规划与实施的深度协同，需要由国家或者行业主管部门牵头，研究并发布专门的意见。纲领性文件要确定出协同工作的总体要求、基本原则、主要目的及重点任务，成为地方各级水务部门及相关单位行动的共同指南。阐述协同内涵、体现价值，突出协同对提升工程质量、降低建设投资成本、缩短工期和保证水安全等方面的重要作用。

对规划实施各个阶段、各主体之间相互协作的责任与义务进行明确，规定好信息共享、决策共商、风险共担等具体的协调合作方法。指导意见里还得有一套激励保障体系，像设立协同示范工程试点、给予财政补贴或者税收优惠、把协同成果纳入政绩考核指标之类的做法，以调动各方面的主动性，营造良好的政策氛围，促使整个行业朝着集成化、高效化、智慧化的方向前进。

（二）建立跨部门跨区域协同协调机制

水务工程的复杂性必然会牵涉到水利、住建、环保、自然资源、交通等许多部门，也会牵扯到上下游和左右岸等不同的行政区。部门壁垒、区域分割属于协同过程中常见的阻碍因素。因此建立常态化的、制度化的跨部门、跨区域协同机制就显得十分必要。其目的在于创建不拘泥于某个部门或地区的沟通决策平台。

具体操作中可以以重大水务工程项目为载体，建立由各相关政府部门、流域管理机构、地方政府、项目法人共同参与的工作小组或者协调委员会。该机构主要负责解决项目在规划选址、环境评价、征地拆迁、施工组织、运营管理等方面出现的跨领域、跨区域矛盾，实现一体化审批、一条龙服务。以定期召开联席会议、建立信息通报制度、开通线上协同工作平台等手段保证信息流畅通、决策科学高效。

核心就是打破信息孤岛，促使各方从整体和长远的角度出发来商量解决办法。流域性防洪工程规划时统一协调上下游地区防洪标准和蓄滞洪区安排，在跨区域调水工程实施过程中平衡水源地和受水区的生态、经济和社会效益，把矛盾化解在决策之前，保证工程顺利推进并长效运行。

（三）将协同要求纳入标准规范

把抽象的协同理念转化为具体技术参数和管理要求，并将其固化到现有的水务工程标准规范体系当中去，就是保证协同工作规范化、常态化的关键一步。需要对涉及水务工程勘察、设计、施工、监理、验收、运维全生命周期的国家、行

业、地方标准进行系统性的梳理和修订，并补充有关协同作业的强制性或者推荐性条款。

具体修订内容可以包括以下几个方面：

水务工程协同管理标准规范修订要点

类别	建议修订内容	目的
设计标准	要求初步设计和施工图设计阶段包含跨专业协同设计篇章，明确各专业间接口条件及信息交互要求，推广统一数据模型的协同设计模式。	确保设计阶段各专业高效协作，减少返工，提升设计质量。
施工及验收规范	规定承包商应使用协同管理平台对进度、质量、安全、成本进行综合控制；将多方协同沟通记录、数据共享情况作为过程监督和竣工验收的重要内容。	强化施工过程的协同管理，提升项目执行效率和透明度，保障工程质量。
数据标准	统一水务工程信息分类、编码、交付标准，使规划、设计、施工、运维各阶段、各主体产生的异构数据能够方便地集成与共享。	打通数据壁垒，为全生命周期的协同奠定数据基础，支撑智慧水务发展。

从上表可知，将协同要求固化为技术标准之后，协同就不再是可选项，而是必选项，从而从根本上改变了各自为政的工作方式，使行业形成无协同不成工程的新风尚。

二、推广协同管理技术与工具

先进的技术、工具是实现高效合作的物质基础和主要动力。在数字化、信息化浪潮席卷各行各业的时候，利用现代信息技术来赋能水务工程协同管理，能够极大地提升信息交互的效率与准确性，实现复杂工程的精细化、可视化、智能化管理。

（一）制定 BIM CIM 等协同技术应用指南

建筑信息模型、城市信息模型等数字化技术，依靠创建三维可视化数字孪生体，给水务工程跨阶段、跨专业、跨地域的协同赋予了革新性工具。这些技术可以把分散的工程信息整合到一个模型里，帮助做方案比选、碰撞检查、施工模拟、进度管理、智慧运维，很好地解决了传统二维图纸导致的信息孤岛和沟通难题。

目前尽管部分大型水利工程已经使用 BIM、CIM 技术，但是整体上仍存在应用深度不够、标准不统一、价值没有得到充分挖掘等问题。为此，行业主管部门应当组织力量，根据水务工程（水库、大坝、输水管道、水厂、泵站）的特点

来制定详细的 BIM、CIM 技术应用指南。指南应根据不同类型的水务工程、不同规模的水务工程、不同阶段的水务工程，明确不同类型、不同规模、不同阶段水务工程适用的技术具体的应用目标、实施路径、数据标准、交付成果和评价方法。

这份指南应当具备很强的操作指导意义，既要包含技术层面的实施方法，也要涉及管理层面的组织架构调整和流程再造建议，促使业主、设计、施工等单位把技术应用和管理变革结合起来。推广标准化的应用指南，可以降低技术应用门槛，避免各个单位在摸索中重复试错，引导行业科学、有序、高效地普及数字化协同技术，实现由点及面的发展。

（二）支持国产化协同管理软件研发应用

协同管理软件是项目信息整合、流程控制、多方合作的中心。目前市场上的通用工程项目管理软件有很多，但是高端的核心高端软件还是以国外厂商为主。过度依赖进口软件，成本高，信息安全、数据主权等方面存在潜在风险。同时国外软件在适应中国水务行业的管理模式、标准规范、业务流程时也会出现“水土不服”的情况。

因此大力支持和推广国产化协同管理软件的研究和应用，有重大的战略意义。政府应该设立专项科研基金、减免税收、建立产业联盟等方式来激励国内软件企业、科研院所和水务龙头企业的强强联合，针对水务工程全生命周期协同管理的特点和痛点，研发出具有自主知识产权的核心软件产品。此类软件应当深入融合 BIM、物联网、大数据、人工智能这些前沿技术，而且要符合国内主要的操作系统和数据库。在推广使用上可以采用国产软件推介会、示范应用项目、政府投资重大水务工程优先采购国产软件等办法，给其创造一个广阔的应用市场，通过应用获得反馈、迭代、优化，使之更加完善。

（三）建设行业级协同数据共享平台

水务工程协同的瓶颈之一就是数据分散、标准不一，造成跨单位、跨系统之间出现数据壁垒。要达成真正的协同，就需要建立一个权威的、统一的、开放的行业级协同数据共享平台。该平台将成为水务行业的数据中枢，整合规划、勘察、设计、施工、监测、运维等各个环节的基础地理信息、工程模型数据、实时监测数据、业务管理数据。

该平台的创建要遵照“统筹规划、分步实施、标准优先、安全可控”的准则。必须创建统一的数据标准、接口规范来保证多源异构数据能顺利接入、解读。平

台要有很强的数据存储，清洗，治理，分析和可视化能力，可以做到“一张图”把水务工程的全部动态情况展现出来。同时平台要建立安全审计与权限管理机制，保障数据安全的基础上，根据不同用户（政府部门监管人员、项目业主、建设单位、公众等）的需求提供不同的共享和使用服务。

该行业平台可以为单个项目提供数据支撑，也可以对大量的行业数据进行深入挖掘分析，进而为区域水资源优化配置、流域防洪减灾决策、水务行业发展规划等宏观决策提供有力的依据。平台建成之后，从根本上打通信息大动脉，实现数据驱动的智慧水务协同新范式，它的价值远大于单个工程项目的价值。

三、加强协同管理人才培养

人才是做任何事情的基础，水务工程协同管理属于一个包含工程技术、信息技术、管理科学等多学科知识的复杂系统工程，对从业人员综合能力提出前所未有的高要求。因此需要建立起面向未来的、多层次、全方位的协同管理的人才培养体系。

（一）在高校设立交叉学科专业

目前高校的专业设置仍以传统学科划分为主，水利工程、土木工程、计算机、管理学等专业之间壁垒分明，培养出来的人才知识结构单一，不能满足水务工程协同管理的实际需求。为了从源头上培养出具备跨学科视野和综合能力的人才储备，应该鼓励和支持有条件的高校特别是水利特色高校打破传统院系壁垒，设置水务工程协同管理交叉学科专业。

这些新兴交叉学科专业，智慧水务工程与管理、水利工程信息管理等，课程体系要由水利、土木、计算机、软件工程、管理学等学科课程模块有机融合而成。教学内容既要有扎实的基础专业知识，也要把BIM、CIM技术的应用，大数据分析，项目管理，法律法规等相关知识和技能的教育作为主要的教育内容。同时积极推行校企合作、产教融合的培养模式，创建校外实践基地，使学生能够在真实的水务工程项目上开展协同工作，把理论学习同实践能力培养结合起来，培养出能迅速适应行业发展最新需求的人才。

（二）开展在职人员协同管理能力培训

对于数量庞大的行业内在职人员来说，他们的知识结构和行为习惯早已固化，这是推行协同管理模式时不能忽视的一个群体。建立健全系统化、常态化在职人

员协同管理能力培训机制，转变思想、提升技能适应新的工作方式。培训对象为水务公司的各个层次管理层和技术人员、一线操作员等等所有的员工，根据不同的岗位需求开展相应的培训活动。

培训形式可以是短少脱产研修，也可以是网络课程，专题报告，现场参观等。培训内容主要围绕协同管理的要素展开，大致有：

1. 理念与政策培训，主要学习协同管理的价值理念、最新的行业政策法规和标准规范，从思想上认识协同工作的重要性和必要性。

2. 技术工具培训：系统学习 BIM 软件、协同管理平台、物联网设备等新技术的操作及运用，培养其利用现代技术进行协同工作的基本能力。

3. 组织管理培训，学习项目管理知识、跨部门沟通技巧、协同流程再造方法等，提高在复杂的组织环境中组织、协调资源、化解矛盾的能力。

大规模、长时期的在职培训可以加快现有水务人才知识更新和能力转变的速度，解决实行水务工程协同管理时人力短缺的问题。

（三）建立协同管理专家库与知识社区

为了应对协同管理过程中产生的各种问题，发挥各行业专家的智慧，方便知识的积累和分享，需要建立起全国或者区域性的水务工程协同管理专家库和知识社区。这就会产生一个永不落幕的行业智库和交流平台。

专家库要广泛吸纳水务工程协同管理政策研究、技术研发、项目实践、人才培养等各方面的专家学者。地方或者项目单位在协同推进工作的时候，如果遇到困难，就可以通过平台向专家库求助，得到有权威、专业的人提供的指导和解决办法。知识社区指的是行业中所有的从业者都可以自由使用的网络平台，其中人们能够分享协同管理的经验、教训、技术体会、创新的想法等等。社区设置问答区、案例库、资料下载、线上论坛等区域，用积分激励、内容推送等方式调动用户参与、贡献的积极性。该平台可以将分散在个人头脑中的隐性知识，变成整个行业可以共享的显性知识资产，经过不断的交流、积累，形成教学相长的良性生态系统，从而不断推动水务工程协同管理理论和实践的发展。

参考文献

- [1] 李弘扬,薛安捷,赵敏. 生命周期视角下茅洲河流域水环境综合治理[J]. 水利经济, 2022, 40(5): 49-56.
- [2] 付希义,田亮,张庆萍,等. 数字孪生技术在水利工程运行维护管理中的应用[J]. 水利科技与工程, 2024, 30(2): 178-182.
- [3] 孙杰. 基于BIM+GIS技术的智慧工地建设技术分析[J]. 电子乐园, 2023(4): 43-45.
- [4] 张世能,陈柏妤. 水利水务厂站群自动化系统的标准化体系研究[J]. 水利科技与经济, 2023, 29(2): 143-146.
- [5] 张洋. 市政给排水技术及项目工程全过程管理[J]. 工程施工与管理, 2025(12): 22-28.
- [6] 杨磊,刘文黎. 城市智慧水务平台架构及关键技术应用[C]//2024年全国土木工程施工技术交流会论文集(上册). 北京: 中国建筑工业出版社, 2024: 345-349.
- [7] 李林珠. 贵州都匀: 农田水利工程协同管理新模式探讨[J]. 中国农村科技, 2025(5): 38-40.
- [8] 黄津辉. 水与环境工程的智慧发展与创新[J]. 国际学术动态, 2020, (4): 44-48.
- [9] 卜伟. 住宅小区施工全过程废弃物减量化碳减排效益分析[J]. 环境保护科学, 2024(32): 118-121.
- [10] 郑传迅. 道真县城乡供水一体化现状及可持续发展对策研究[J]. 给水排水, 2025, 51(6): 10-15.
- [11] 钮海涛. 以节水增效为引领 构建节约用水新格局[C]//第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集(一). 上海: 同济大学出版社, 2025: 200-205.
- [12] 罗诗琪. 崇州市桫木河流域水系连通综合治理的案例研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [13] 王思如,杨松,刘欣,等. 雄安新区智慧水务管理系统顶层设计研究[J]. 中国水利, 2025(13): 66-72.

- [14] 苏炯恒,王琦,王礼炳,等. 考虑成本-弹性-水质的供水管网多目标协同设计方法[J]. 中国给水排水, 2020, 36(21): 82-87.
- [15] 林拱清. 基于标准化的水厂管道施工流程优化与实践[J]. 大众标准化, 2024 (22): 59-61.
- [16] 杨宇,南帝,邬彤,等. 水利工程在水土保持生态建设中生态修复的运用[J]. 水上安全, 2024(5): 100-102.
- [17] 朱争明,马星博,齐迎爽,等. 生活污水处理技术在河道治理中的应用探析[J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(11): 144-146.
- [18] 佟保根,梁礼永. 徐州市铜山区智慧水务综合管理平台研究与应用[C]//第二届长三角水论坛暨水利先进技术(产品)展示会. 上海: 上海科学技术出版社, 2024: 234-239.
- [19] 章敏,龙虹池,俞小胖,等. 基于BIM的碰撞检查在市政水务项目协同设计中的应用[J]. 科技与创新, 2022(18): 23-26.
- [20] 祁司亮,洪光. 市政污泥与生活垃圾协同焚烧处理探讨[J]. 给水排水, 2023, 49(2): 50-55.
- [21] 黄晨霞,张行南,徐双全,等. 杭州湾北沿上海段水下地形冲淤变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2023, 21(2): 379-389.