

内容简介

《隧道开发系统工程：地质、结构与施工方法》是一部聚焦隧道工程系统集成理念，系统阐释隧道开发全流程中地质勘察、结构设计与施工技术协同优化的学术著作。本书立足我国交通基础设施建设高质量发展需求，以“系统工程理论为引领、地质条件为基础、结构安全为核心、施工实效为导向”，构建了“理论阐释—技术解析—实践应用”的完整研究体系，全面解答了隧道开发过程中地质风险防控、结构合理设计、施工方法适配及全流程质量控制等关键工程问题。

全书共十章，逻辑层次清晰，内容兼具理论系统性与工程实操性。第一章奠定系统工程研究基础，梳理隧道工程发展历程，解析隧道系统工程的组成要素与核心特点，明确隧道工程的分类标准，构建隧道开发系统工程的研究框架与方法体系。

第二章至第九章聚焦隧道开发全流程核心技术环节，形成协同配套的技术体系：围绕地质勘察技术，阐释勘察原理、方法与技术要点，详解地质参数测试分析流程与地质风险评估预测方法；深入研究隧道围岩力学特性，剖析围岩力学性质、应力状态与变形特征，建立围岩稳定性评价体系；系统阐述隧道结构设计理论，明确设计原则，细化荷载分析、内力计算与结构稳定性设计方法；聚焦支护系统设计，涵盖支护类型选择、初期与永久支护设计及支护结构受力分析；探讨施工方法选择逻辑，分析不同施工方法的特点、适用条件与经济性，实现地质条件与施工方法的精准匹配；深入解析开挖技术，包括钻爆法、机械开挖等核心技术要点与开挖面稳定性控制策略；详解衬砌施工技术，涵盖衬砌类型、材料选择、施工工艺、质量控制与防水技术；构建施工监测与控制系统，明确监测系统设计要求、监测内容方法、数据分析路径与施工过程控制策略。

第十章通过典型隧道工程案例分析，将理论与实践深度融合，系统剖析典型工程的地质条件、结构设计特色与施工方法适配性，验证核心技术的应用成效。本书融合隧道工程地质学、结构力学、施工技术与系统工程等多学科理论，既系统构建了隧道开发系统工程的理论框架，又通过大量技术要点、计算方法与工程案例建立了理论与实践的关联桥梁。可为隧道工程领域的科研人员、工程技术人员、设计人员、施工管理人员提供系统的理论与实践参考，也可作为高等院校土木工程、交通工程等相关专业的教学用书，对推动隧道工程技术创新、提升工程建设质量与安全水平、助力交通基础设施高质量发展具有重要的学术价值与实践意义。

作者简介



陈晓辉，男，1988 年生，工学博士学位，毕业于上海交通大学，工程师，国家二级水利水电建造师。发表论文 15 余篇，其中 SCI 9 篇。主持或参与国家基金 5 题，横向科研项目 5 余项，申请发明专利 1 项，主持、参与诸永高速、杭州市富阳区拦河坝等 10 余个工程项目。现就职于广州铁路职业技术学院，主要承担《铁路桥隧施工及养护》《水运工程施工》及《施工组织与概预算》等课程的教学，研究领域：工程地质灾害智能防控、工程风险管理。

Tunnel Development Systems Engineering: Geology, Structure, and Construction Methods

隧道开发系统工程：地质、结构与施工方法

陈晓辉 著



隧道开发系统工程：地质、结构与施工方法
Tunnel Development Systems Engineering: Geology, Structure, and Construction Methods

陈晓辉 著



PRICE: \$60.00



Tunnel Development Systems Engineering: Geology, Structure, and
Construction Methods

隧道开发系统工程：地质、结构与 施工方法

陈晓辉 著



International
Union of Scientific and
Technological Scholars

CIP INFORMATION

Title: Tunnel Development Systems Engineering: Geology, Structure, and Construction Methods

题目：隧道开发系统工程：地质、结构与施工方法

Author: Xiaohui Chen

作者：陈晓辉

ISBN: 979-8-90040-092-1

Publisher: CYPEDIA INTERNATIONAL UNION OF SCIENTIFIC AND
TECHNOLOGICAL SCHOLARS

Price: \$60.00

定价：60 美金



**International
Union of Scientific and
Technological Scholars**

**Tunnel Development Systems Engineering: Geology, Structure, and
Construction Methods**

隧道开发系统工程：地质、结构与施工方法

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: 15.25

Word Counts: 200.000

Edition: First edition in May 2026

Printing: First printing in May 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

随着我国基础设施建设的持续推进，隧道工程作为跨越复杂地形、优化线路布局的核心工程形式，在高速公路、高速铁路、城市轨道交通等领域的应用日益广泛。隧道工程穿越的地质条件日趋复杂，面临的工程挑战不断升级，从简单地质条件下的常规隧道建设，逐步转向复杂地质环境中的大断面、长距离、高风险隧道开发。在此背景下，传统“地质勘察—结构设计—施工实施”分段独立的工程模式已难以适配现代隧道工程的复杂需求，以系统工程理念统筹全流程、实现地质—结构—施工协同优化，成为提升隧道工程建设质量、保障施工安全、控制工程成本的关键路径。

在此背景下，我们组建了由隧道工程地质专家、结构设计学者、施工技术专家及高校科研人员构成的跨领域研究团队，立足多年的隧道工程科研与实践经验积累，系统梳理国内外隧道工程领域的最新研究成果与工程实践案例，结合我国隧道工程建设的实际需求与技术特色，聚焦隧道开发系统工程的核心问题，开展专项研究与内容编撰，历时数年完成本书的撰写工作。团队成员优势互补，既具备扎实的隧道工程理论功底与深厚的学术研究积累，又拥有丰富的一线隧道工程勘察、设计、施工与管理实践经验，确保本书内容既能紧跟国际学术前沿与技术发展趋势，又能精准对接工程实践需求。

本书撰写秉持“系统统筹、理论支撑、实践导向、问题驱动”的核心原则，以隧道开发全流程协同优化为主线，构建了层次清晰、逻辑严密的内容框架。编写过程中，我们始终注重理论根基的夯实，系统整合多学科理论资源，厘清隧道开发系统工程的核心内涵与协同逻辑；强化技术解析的专业性，详细阐述各核心环节的技术原理、实施要点与质量控制标准，确保内容的工程实操性；突出案例分析的实证价值，通过典型工程案例验证理论与技术的应用成效，建立理论与实践的紧密关联；关注工程问题的精准破解，针对实践中存在的技术瓶颈，提出针对性的优化策略与解决方案。

我们期望本书能够为隧道工程一线技术人员与管理人员提供系统的技术指引与实践参考，助力其提升隧道开发全流程的协同管控能力，优化技术方

案，保障工程安全与质量；为隧道工程领域的科研人员提供新的研究视角与思路，推动隧道开发系统工程理论的深度拓展与创新发展；为高等院校相关专业的教学工作提供优质的教材素材，助力培养更多适应现代隧道工程发展需求的专业人才；同时，也希望为推动我国隧道工程技术的系统化、智能化发展，提升交通基础设施建设水平，服务国家基础设施高质量发展战略贡献一份力量。

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 隧道开发系统工程概论	1
第一节 隧道工程发展历程	1
第二节 隧道系统工程的组成与特点	7
第三节 隧道工程的基本分类	13
第四节 隧道开发系统工程的研究方法	18
第二章 隧道工程地质勘察技术	25
第一节 地质勘察的基本原理	25
第二节 地质勘察方法与技术	30
第三节 地质参数测试与分析	35
第四节 地质风险评估与预测	41
第三章 隧道围岩力学特性研究	47
第一节 围岩力学性质分析	47
第二节 围岩应力状态研究	52
第三节 围岩变形特征分析	57
第四节 围岩稳定性评价方法	62
第四章 隧道结构设计理论	69
第一节 隧道结构设计原则	69
第二节 荷载分析与计算	75
第三节 结构内力分析方法	81
第四节 结构稳定性设计	87
第五章 隧道支护系统设计	93
第一节 支护系统类型与选择	93
第二节 初期支护设计	98
第三节 永久支护设计	103

第四节 支护结构受力分析	108
第六章 隧道施工方法选择	115
第一节 施工方法分类与特点	115
第二节 施工方法选择原则	121
第三节 不同地质条件下的施工方法	127
第四节 施工方法经济性分析	134
第七章 隧道开挖技术研究	141
第一节 开挖方法分类	141
第二节 钻爆法技术要点	147
第三节 机械开挖技术	154
第四节 开挖面稳定性控制	160
第八章 隧道衬砌施工技术	167
第一节 衬砌类型与材料	167
第二节 衬砌施工工艺	172
第三节 衬砌质量控制	178
第四节 衬砌防水技术	184
第九章 隧道施工监测与控制	191
第一节 监测系统设计	191
第二节 监测内容与方法	197
第三节 监测数据分析	203
第四节 施工过程控制	209
第十章 隧道工程案例 分析	215
第一节 典型隧道工程介绍	215
第二节 地质条件分析	219
第三节 结构设计特点	224
第四节 施工方法评价	228
参考文献	235

第一章 隧道开发系统工程概论

第一节 隧道工程发展历程

隧道工程作为人类改造自然、拓展生存与发展空间的重要工程形式，贯穿了人类文明进步的漫长历程。从早期为引水、交通等基础需求开凿的简易坑道，到如今适应复杂地质条件、服务于跨区域交通网络的大型智能化隧道，隧道工程的发展轨迹与工程技术进步、社会经济需求升级深度绑定。梳理隧道工程的发展历程，明确其发展阶段特征、关键技术里程碑及核心驱动因素，不仅能够清晰把握行业发展规律，更能为未来隧道工程的创新发展提供历史借鉴与方向指引。

一、发展阶段划分

隧道工程的发展是一个循序渐进的过程，受技术水平、材料工艺、社会需求等多重因素影响，呈现出鲜明的阶段性特征。以核心开挖方式、技术装备水平和工程规模为划分依据，可将隧道工程发展历程清晰划分为传统手工开挖阶段、机械辅助开挖阶段、现代机械化开挖阶段和智能化开挖阶段四个核心阶段。

（一）传统手工开挖阶段

传统手工开挖阶段是隧道工程的起步时期，大致跨越了从古代文明起源至19世纪工业革命初期。这一阶段的核心特征是依赖人力及简单工具开展隧道开挖，工程规模有限、技术水平低下，隧道功能以满足基础生存与交通需求为主。在开挖工具方面，主要采用镐、锹、锤、凿等手工工具，部分工程中会辅助使用火药进行简单爆破，但爆破精度极低，对围岩的扰动控制能力不足。在支护技术方面，多采用木材、石材等天然材料进行简易支护，支护结构的承载能力和稳定性较差，难以适应复杂地质条件。在工程规模上，隧道多为短距离、小断面坑道，主要应用于引水灌溉、矿山开采和短途陆路交通，如我国古代的都江堰宝瓶口隧道、欧洲古罗马时期的输水隧道等。这一阶段的隧道工程受技术条件限制，施工效率低下、安全风险极高，发展进程相对缓慢，但为后续隧道工程的发展积累了

初步的实践经验。

（二）机械辅助开挖阶段

机械辅助开挖阶段始于 19 世纪工业革命初期，止于 20 世纪中期。工业革命带来的机械制造技术进步，为隧道工程注入了新的发展动力，手工开挖逐渐被机械辅助开挖取代，隧道工程的规模和建设效率得到初步提升。这一阶段的核心突破在于动力机械和简单开挖机械的应用。蒸汽动力、内燃动力等新型动力设备的出现，推动了钻机、风镐、小型装载机等辅助机械的研发与应用，替代了部分人力劳动，提升了开挖效率。在爆破技术方面，炸药配方不断优化，爆破器材逐渐标准化，爆破精度和安全性较传统阶段有了显著提升。在支护技术上，混凝土材料开始应用于隧道支护，替代了传统的天然材料，支护结构的强度和耐久性得到增强。工程规模上，长距离、大断面隧道开始出现，隧道应用领域逐渐拓展到铁路、公路等跨区域交通领域，如 19 世纪中叶建成的英国塞文隧道、瑞士圣哥达隧道（早期段）等。但这一阶段的机械装备仍处于初级阶段，核心开挖环节仍需大量人力协同，对复杂地质条件的适应性较弱，隧道建设的精准性和安全性仍有待提升。

（三）现代机械化开挖阶段

现代机械化开挖阶段始于 20 世纪中期，持续至 21 世纪初。随着世界经济的快速发展和交通网络建设需求的激增，隧道工程迎来了规模化发展期，以盾构机、TBM（全断面硬岩隧道掘进机）为代表的大型专用隧道施工机械的研发与应用，推动隧道工程进入机械化、规模化建设的全新阶段。这一阶段的核心特征是全断面机械化开挖技术的成熟与普及。盾构机和 TBM 的出现，实现了隧道开挖、支护、出碴等工序的一体化作业，大幅提升了施工效率和工程质量。尤其是在软土、砂层等复杂软弱地质条件下，盾构技术的应用有效解决了传统开挖方式难以克服的坍塌、涌水等难题；在硬岩地质条件下，TBM 的应用实现了长距离硬岩隧道的高效掘进。在支护技术方面，喷锚支护、管片衬砌等技术逐渐标准化、规范化，支护结构的设计与施工更加科学，能够根据不同地质条件精准匹配支护方案。在工程规模上，超长、超大断面隧道不断涌现，隧道建设从单一的陆路交通领域拓展到城市轨道交通、海底隧道、越江隧道等多个领域，如日本青函海底隧道、英法海峡隧道等标志性工程的建成，彰显了现代机械化隧道工程的强大实力。这一阶段，隧道工程的技术体系逐渐完善，施工精度、安全性和效率得到大幅提升，为全球交通网络的互联互通提供了核心支撑。

（四）智能化开挖阶段

智能化开挖阶段始于 21 世纪初，是隧道工程发展的当前阶段。随着大数据、人工智能、物联网、精准定位等新兴技术与隧道工程的深度融合，隧道工程正从传统机械化向智能化、数字化转型，实现了隧道建设全生命周期的精准管控与智能决策。这一阶段的核心突破在于智能化技术与隧道施工的深度融合。在施工装备方面，智能盾构机、智能 TBM 应运而生，具备自动定位、自动导向、围岩识别、参数自适应调整等功能，能够实现掘进过程的无人化、智能化操控。在施工管理方面，基于 BIM（建筑信息模型）技术的隧道工程全生命周期管理平台逐渐普及，实现了隧道设计、施工、运维等各环节的数字化建模与协同管理；通过物联网技术实现对施工设备、围岩状态、环境参数的实时监测，结合大数据和人工智能技术进行风险预警与智能决策，大幅提升了隧道建设的安全性和可靠性。在工程应用上，智能化技术已广泛应用于城市轨道交通隧道、跨江跨海隧道、山岭隧道等各类复杂隧道工程中，如我国的京张高铁八达岭长城站隧道、上海长江隧道等工程，均采用了先进的智能化施工技术。这一阶段，隧道工程的发展更加注重精准化、绿色化、安全化，智能化技术的应用正在重塑隧道工程的建设理念与技术体系。

二、关键技术里程碑

隧道工程的发展历程，本质上是关键技术不断突破与迭代的过程。在长期的工程实践中，开挖技术、支护技术、监测技术作为隧道工程的三大核心技术领域，先后实现了一系列重大突破，形成了多个具有标志性意义的技术里程碑，推动隧道工程不断迈向新的发展阶段。

（一）开挖技术里程碑

开挖技术是隧道工程的核心环节，其技术突破直接决定了隧道工程的建设能力和适用范围。从传统手工开挖到现代智能化开挖，开挖技术先后经历了三次重大里程碑式突破。第一次里程碑是火药爆破技术的应用。早在古代，人类就开始尝试使用火药进行岩石开挖，但直至 19 世纪工业革命后，火药爆破技术才逐渐标准化、规范化。爆破技术的应用，替代了单纯的手工开挖，大幅提升了硬岩隧道的开挖效率，是隧道开挖从手工向机械辅助过渡的关键标志。第二次里程碑是盾构技术的发明与应用。1818 年，法国工程师布鲁诺尔发明了盾构机的雏形，1825 年应用于英国伦敦泰晤士河隧道的建设，首次实现了软土隧道的安全开挖。

经过后续的不断改进，盾构技术逐渐成熟，形成了土压平衡盾构、泥水平衡盾构等多种类型，能够适配不同的软土、砂层等复杂地质条件，解决了软土隧道开挖的坍塌、涌水难题，成为软土隧道施工的核心技术。第三次里程碑是全断面硬岩隧道掘进机（TBM）的成熟与智能化升级。20 世纪中期，TBM 的出现实现了硬岩隧道的全断面机械化掘进，大幅提升了长距离硬岩隧道的施工效率；进入 21 世纪，智能 TBM 的研发与应用，实现了掘进过程的自动化、智能化控制，标志着隧道开挖技术进入精准化、智能化时代。

（二）支护技术里程碑

支护技术是保障隧道施工安全和长期稳定的关键，其发展始终围绕着“适配地质条件、提升承载能力、简化施工工艺”的核心目标，先后实现了从天然材料支护到现代复合支护的多次技术突破。第一次里程碑是混凝土支护技术的应用。20 世纪初，混凝土材料开始应用于隧道支护，替代了传统的木材、石材等天然材料。混凝土支护具有强度高、耐久性好、可塑性强等优势，能够根据隧道断面形状精准浇筑，大幅提升了支护结构的稳定性和承载能力，为现代隧道工程的规模化发展奠定了基础。第二次里程碑是喷锚支护技术的发明与推广。20 世纪 50 年代，喷锚支护技术应运而生，通过向围岩表面喷射混凝土，并配合锚杆、锚索等杆件对围岩进行加固，实现了“围岩与支护结构共同承载”的支护理念。喷锚支护技术具有施工速度快、支护效果好、适应性强等特点，能够适配不同地质条件下的隧道支护需求，尤其是在山岭隧道、矿山隧道等工程中得到广泛应用，成为现代隧道支护技术的核心。第三次里程碑是管片衬砌技术的成熟与标准化。随着盾构技术的发展，管片衬砌技术逐渐完善，通过工厂预制混凝土管片，在盾构掘进过程中同步完成管片拼装，实现了支护结构的快速施工与标准化生产。管片衬砌技术的应用，大幅提升了软土隧道支护的精准性和效率，保障了盾构隧道的施工安全和长期稳定，是现代盾构隧道工程不可或缺的核心技术。

（三）监测技术里程碑

监测技术是隧道工程安全管控的重要手段，其发展历程是从传统人工监测向现代智能化监测的转型过程，监测精度、实时性和覆盖面不断提升，为隧道施工与运维提供了精准的数据支撑。第一次里程碑是传统人工监测技术的形成。在隧道工程发展的早期阶段，监测主要依靠人工观测，通过水准仪、经纬仪等简单仪器测量隧道围岩的变形、沉降等参数，虽然精度较低、实时性较差，但为隧道施

工安全提供了基础的监测数据，形成了初步的监测理念。第二次里程碑是自动化监测技术的应用。20 世纪后期，随着传感器技术和数据传输技术的发展，自动化监测系统逐渐应用于隧道工程。通过在隧道围岩、支护结构上布设应变计、位移计、渗压计等传感器，实现了对隧道关键参数的自动采集与传输，大幅提升了监测的精度和实时性，能够及时发现施工过程中的安全隐患。第三次里程碑是智能化监测技术的突破。进入 21 世纪，大数据、物联网、人工智能等技术与监测技术深度融合，形成了智能化监测体系。通过布设密集的传感器网络，结合无人机巡检、激光扫描等技术，实现了隧道全断面、全生命周期的实时监测；利用大数据分析和人工智能算法，能够对监测数据进行深度挖掘，实现安全风险的提前预警和智能决策，为隧道工程的安全管控提供了全方位、智能化的技术支撑。

三、发展驱动因素

隧道工程的持续发展并非偶然，而是多种因素协同作用的结果。从历史演进脉络来看，交通需求的持续升级、工程技术的不断进步、地质勘察水平的逐步提升是推动隧道工程发展的三大核心驱动因素。

（一）交通需求的持续升级

交通需求是隧道工程发展的核心牵引因素。随着人类社会经济的发展，交通出行的范围不断扩大，对交通网络的通达性、便捷性和安全性提出了越来越高的要求，隧道工程作为突破地形障碍、缩短运输距离、提升交通效率的关键工程形式，其发展始终与交通需求的升级紧密相关。在古代，农业生产和城市发展对水资源的需求，推动了引水隧道的建设；商品贸易和人员往来的需求，推动了短途陆路交通隧道的开凿。进入工业革命后，铁路、公路等现代交通方式的兴起，对跨区域交通网络的需求激增，推动了长距离山岭隧道、越江隧道的建设。20 世纪中期以来，全球城市化进程加速，城市人口急剧增长，城市交通拥堵问题日益突出，推动了城市轨道交通隧道的规模化建设；同时，跨江跨海交通需求的提升，推动了大跨度、超长距离海底隧道、越江隧道的发展。进入 21 世纪，随着“一带一路”等国际合作倡议的推进，跨国、跨区域交通网络互联互通需求进一步提升，对隧道工程的技术水平、建设规模和安全标准提出了更高要求，成为推动隧道工程向智能化、精准化方向发展的核心动力。可以说，交通需求的每一次升级，都为隧道工程的发展提供了新的机遇，牵引着隧道技术不断突破。

（二）工程技术的不断进步

工程技术的进步是隧道工程发展的核心支撑因素。隧道工程的发展历程，本质上是工程技术不断突破的过程，材料技术、机械制造技术、控制技术等相关领域的技术进步，为隧道工程的技术突破提供了坚实的基础。在材料技术方面，混凝土、钢材等新型建筑材料的研发与应用，大幅提升了隧道支护结构的强度、耐久性和可塑性，为隧道工程的规模化、大型化发展提供了材料保障；高性能炸药、新型防水材料等的应用，进一步提升了隧道开挖的效率和隧道的防水性能。在机械制造技术方面，从早期的蒸汽动力机械到现代的盾构机、TBM，再到智能盾构机，机械制造技术的每一次进步都推动了隧道开挖方式的革新，大幅提升了施工效率和工程质量。在控制技术方面，从传统的人工控制到现代的自动化控制，再到智能化控制，精准定位、自动导向、智能决策等技术的应用，实现了隧道施工的精准管控，大幅提升了隧道工程的安全性和可靠性。此外，BIM技术、大数据、人工智能等新兴技术的融合应用，推动隧道工程进入全生命周期智能化管理阶段，进一步拓展了隧道工程的技术边界。

（三）地质勘察水平的逐步提升

地质勘察水平的提升是隧道工程发展的重要保障因素。隧道工程始终面临着复杂多变的地质条件，地质勘察的精准度直接决定了隧道设计的科学性、施工的安全性和工程的经济性。地质勘察水平的逐步提升，为隧道工程应对复杂地质挑战提供了关键支撑。在隧道工程发展的早期阶段，地质勘察手段简陋，主要依靠人工踏勘和简单的钻探，对地质条件的认知较为粗浅，导致隧道施工过程中经常遭遇坍塌、涌水等地质灾害。随着地球物理勘探技术、遥感技术、精准钻探技术等的发展，地质勘察手段逐渐丰富，能够实现对地下地质条件的多维度、深层次探测。尤其是进入21世纪，三维地质建模技术、地质雷达探测技术、地震波勘探技术等的应用，实现了对隧道沿线地质条件的精准成像和三维建模，能够提前预判复杂地质体的分布、围岩的稳定性和地下水的分布情况。地质勘察水平的提升，使得隧道工程能够提前规避地质风险，精准匹配设计方案和施工技术，大幅降低了施工安全风险和工程成本，为超长、超大断面隧道和复杂地质条件下隧道工程的顺利实施提供了重要保障。

隧道工程历经传统手工开挖、机械辅助开挖、现代机械化开挖和智能化开挖四个核心阶段，在开挖技术、支护技术、监测技术领域实现了一系列关键里程碑

突破，其发展始终受到交通需求、工程技术进步、地质勘察水平提升三大核心因素的驱动。回顾隧道工程的发展历程，不难发现，隧道工程的发展是社会需求与技术进步相互促进的结果。随着人类社会的持续发展和技术的不断创新，未来隧道工程将朝着更加智能化、绿色化、安全化的方向发展，继续在拓展人类生存空间、完善交通网络、推动社会经济发展中发挥重要作用。

第二节 隧道系统工程的组成与特点

隧道工程作为典型的复杂系统工程，其建设过程涉及多个学科领域、多个技术环节的协同配合，并非单一施工环节的简单叠加。随着隧道工程向超长、超大断面、复杂地质条件方向发展，其系统工程属性愈发凸显。深入剖析隧道系统工程的组成要素，精准把握其核心特点，厘清各组成部分的协同逻辑，对于科学开展隧道工程设计、施工与运维，提升工程建设质量与安全水平具有重要意义。

一、系统组成要素

隧道系统工程以实现隧道安全、高效建设与长期稳定运营为核心目标，涵盖从前期勘察到后期运维的全生命周期过程，其系统组成要素相互关联、相互支撑，形成完整的全链条体系。核心组成要素包括地质勘察、结构设计、支护系统、施工技术、监测控制五大核心环节，各环节紧密衔接，共同构成隧道系统工程的主体框架。每个组成要素均承担特定功能，其运行质量直接影响隧道工程的整体建设成效与运营安全性。

（一）地质勘察

地质勘察是隧道系统工程的前期基础环节，核心功能是精准掌握隧道沿线地质条件，为后续各环节提供科学依据。地质勘察工作贯穿隧道工程全生命周期，前期为设计与施工提供基础数据，施工阶段动态补充勘察，运维阶段监测地质环境变化。核心工作内容包括地形地貌勘察、地层岩性探测、地质构造分析、地下水分布勘察、不良地质体识别等。通过采用地球物理勘探、精准钻探、遥感监测等技术手段，获取隧道沿线地质参数，形成完整的地质勘察报告。地质勘察的精准度直接决定设计方案的科学性、施工技术的适配性和工程建设的安全性，是隧道系统工程顺利推进的前提保障。

（二）结构设计

结构设计是隧道系统工程的核心规划环节，基于地质勘察成果，结合工程功能需求与技术标准，确定隧道的结构形式、断面尺寸、材料选型等关键参数，为工程建设提供技术蓝图。结构设计需统筹考虑安全性、经济性、可行性与耐久性等多重目标。核心工作内容包括隧道线路设计、断面结构设计、支护结构设计、防排水系统设计、通风照明系统设计等。在设计过程中，需针对不同地质条件优化结构方案，确保结构能够有效抵御围岩压力、地下水作用等外部荷载，保障隧道施工与运营过程中的结构稳定。同时，设计方案需兼顾施工便利性，为后续施工技术选择与施工组织安排提供支撑。

（三）支护系统

支护系统是保障隧道结构稳定与施工安全的关键支撑要素，通过设置支护结构抵御围岩变形与坍塌风险，维持隧道开挖后的空间稳定。支护系统的设计与施工需与地质条件、开挖方式精准匹配，形成“围岩 - 支护”协同承载体系。核心组成包括初期支护与二次衬砌等核心结构，初期支护主要采用喷锚支护、钢支撑等形式，及时约束围岩变形，发挥围岩自身承载能力；二次衬砌多采用混凝土或钢筋混凝土结构，作为长期承载与安全保障的核心结构。此外，支护系统还包括防排水构件、锚杆锚索等辅助结构，共同形成完整的支护体系。支护系统的可靠性直接决定隧道施工过程的安全性和运营阶段的结构耐久性。

（四）施工技术

施工技术是隧道系统工程的实施核心要素，负责将设计方案转化为实体工程，其技术水平与施工组织能力直接影响工程质量、建设效率与安全风险。施工技术需根据地质条件、结构设计要求和工程规模，选择适配的开挖、支护、出碴、衬砌等施工工艺。核心技术内容包括开挖技术、支护施工技术、衬砌施工技术、防排水施工技术、通风降尘技术等。随着技术发展，盾构法、TBM 法等机械化、智能化施工技术逐渐成为主流，替代了传统的钻爆法等施工方式，大幅提升了施工效率与安全性。施工技术的选择需兼顾技术可行性、经济合理性与安全可控性，同时需做好施工组织管理，确保各工序协同推进。

（五）监测控制

监测控制是隧道系统工程的安全保障要素，通过对隧道施工过程与运营阶段的关键参数进行实时监测，及时掌握围岩变形、结构应力、地下水变化等情况，

为施工调整、风险预警与运维决策提供数据支撑。监测控制贯穿隧道工程全生命周期，形成“监测 - 分析 - 反馈 - 调整”的闭环管理机制。核心监测内容包括围岩变形监测、支护结构应力监测、地下水压力监测、隧道沉降监测、环境参数监测等。通过采用自动化传感器、数据传输系统和智能分析平台，实现监测数据的实时采集、传输与分析，当监测数据超出预警阈值时，及时发出预警并指导现场调整施工参数或采取加固措施。监测控制是保障隧道工程安全、精准推进的重要手段。

二、核心特点呈现

隧道系统工程受地质条件、工程规模、环境因素等多重复杂因素影响，呈现出鲜明的系统性、复杂性、风险性与协同性四大核心特点。这些特点相互交织，决定了隧道工程建设的高难度、高要求属性，也为隧道系统工程的规划、设计与实施提供了核心遵循。准确把握这些核心特点，是提升隧道工程建设与管理水平的关键。

（一）系统性

系统性是隧道工程最核心的特征，隧道系统工程并非各组成要素的简单堆砌，而是通过各环节的有机衔接与协同配合，形成功能完备、层次清晰的有机整体。从全生命周期视角来看，隧道工程涵盖前期勘察、设计、施工，到后期运维的完整流程，各阶段紧密衔接，前一阶段的成果直接影响后一阶段的实施质量。从要素协同视角来看，地质勘察为结构设计提供基础依据，结构设计指导支护系统构建与施工技术选择，施工技术的实施效果通过监测控制进行检验，监测数据又反向优化设计与施工方案，形成完整的系统闭环。同时，隧道工程还需与外部交通系统、生态环境系统等相互适配，充分体现系统性特征。任何一个环节的缺失或失误，都可能影响整个隧道工程的建设成效与运营安全。

（二）复杂性

隧道工程的复杂性体现在地质条件、技术体系、环境影响等多个维度，是其区别于其他地面工程的显著特征。地质条件的复杂性是核心诱因，地下地质环境具有隐蔽性、不确定性特点，即使经过前期详细勘察，仍可能存在不良地质体、突发涌水等未知风险，增加了工程建设的难度。技术体系的复杂性表现为多学科、多技术的交叉融合，隧道工程需综合运用地质学、结构力学、材料科学、施工技

术、自动化控制等多个学科的理论与技术，不同技术之间的适配与协同难度较大。环境影响的复杂性则体现在隧道建设可能涉及生态保护、文物保护、周边构筑物安全等多个方面，需统筹协调多方需求，平衡工程建设与环境影响的关系。此外，超长、超大断面隧道的建设，进一步提升了工程技术难度与系统复杂性。

（三）风险性

隧道工程建设与运营过程中面临多种风险，风险性是其核心特点之一。风险来源主要包括地质风险、技术风险、安全风险、环境风险等多个方面。地质风险是最主要的风险类型，如围岩坍塌、突泥涌水、岩爆、有害气体溢出等，这些风险具有突发性、破坏性特点，可能导致施工中断、人员伤亡与财产损失。技术风险源于施工技术选择不当、设计方案不合理等因素，可能导致工程质量缺陷、施工效率低下等问题。安全风险涵盖施工过程中的机械伤害、高处坠落、火灾等作业风险，以及运营阶段的结构病害、交通事故等风险。环境风险则包括施工对周边地下水环境、生态环境的破坏，以及运营过程中产生的噪声、粉尘等污染风险。这些风险相互关联，一旦失控可能引发连锁反应，对隧道工程造成严重影响。

（四）协同性

协同性是隧道系统工程顺利推进的必然要求，体现在多个层面的协同配合。从学科协同层面来看，隧道工程需要地质学、结构工程学、机械工程学、自动化控制等多个学科的专家协同合作，共同解决工程建设中的复杂问题。从参建主体协同层面来看，建设单位、设计单位、施工单位、监理单位、监测单位等多方主体需紧密配合，明确权责分工，形成工作合力。

从技术环节协同层面来看，开挖、支护、衬砌、监测等各施工工序需精准衔接，确保施工过程的连续性与稳定性；地质勘察、结构设计、施工技术、监测控制等核心要素需协同联动，实现设计方案与施工实践的精准匹配。此外，隧道工程还需与周边社区、交通管理部门、环保部门等外部主体协同，统筹协调工程建设与社会环境的关系，保障工程顺利推进。

三、系统协同逻辑

隧道系统工程的高效运行依赖各组成部分的协同联动，其核心协同逻辑体现为“相互依存、动态适配、闭环优化”。各组成要素并非孤立存在，而是通过物质、能量与信息的交换，形成有机的协同工作机制。在隧道工程全生命周期内，

各要素根据地质条件、工程进展与环境变化，动态调整工作状态，实现系统整体功能的最优发挥。

（一）要素相互依存机制

隧道系统工程各组成要素之间存在紧密的相互依存关系，形成“一荣俱荣、一损俱损”的协同格局。地质勘察作为基础环节，其成果直接决定结构设计的科学性与合理性，若地质勘察存在疏漏，可能导致设计方案与实际地质条件不符，进而引发后续施工风险；结构设计是连接地质勘察与施工实践的桥梁，指导支护系统构建与施工技术选择，设计方案的缺陷会直接影响工程质量与安全。支护系统的可靠性依赖于设计方案的科学性与施工技术的规范性，若支护施工质量不达标，将无法有效抵御围岩压力，引发结构失稳风险；施工技术的实施需严格遵循设计要求，同时需依托监测控制数据进行动态调整，施工过程中的违规操作可能导致工程质量问题与安全事故；监测控制为各环节提供数据支撑，其监测数据的准确性直接影响设计优化与施工调整的有效性，缺乏有效监测将导致工程风险失控。各要素相互依存，共同支撑隧道系统工程的正常运行。

（二）动态适配协同机制

隧道工程所处的地质环境与施工条件具有动态变化特点，决定了各组成要素需建立动态适配的协同机制，根据工程进展与环境变化实时调整工作状态。在施工阶段，随着隧道掘进深度的增加，地质条件可能发生变化，此时需通过补充地质勘察获取最新地质数据，及时优化结构设计与支护方案；施工技术需根据新的地质条件与设计调整，适配选择开挖、支护工艺，确保施工过程的安全可控。监测控制系统需实时跟踪地质条件与结构状态的变化，及时反馈监测数据，为设计优化与施工调整提供依据；支护系统需根据监测数据与地质变化，动态调整支护参数或采取加固措施，确保支护效果与地质条件相适配。在运营阶段，需通过长期监测掌握隧道结构状态与地质环境变化，及时调整运维策略，保障隧道长期稳定运营。动态适配机制确保了隧道系统工程能够应对复杂多变的环境，提升系统整体的适应性与可靠性。

（三）闭环优化提升机制

隧道系统工程通过建立“勘察 - 设计 - 施工 - 监测 - 优化”的闭环协同机制，实现系统功能的持续提升。在闭环流程中，前期地质勘察与结构设计为施工提供基础方案，施工过程中通过监测控制获取实际数据，将实际数据与设计预期进行

对比分析，若存在偏差，及时反馈至设计与施工环节，对设计方案或施工参数进行优化调整。优化后的方案重新指导施工实践，监测系统再次对调整后的施工效果进行检验，形成完整的闭环。这种闭环协同机制能够及时发现并解决工程建设中的问题，避免风险积累与扩大。同时，通过对闭环过程中积累的数据与经验进行总结，能够进一步优化后续工程的勘察、设计与施工方案，推动隧道工程技术水平的持续提升。闭环优化机制体现了隧道系统工程的动态管理理念，是提升工程建设质量与安全水平的核心保障。

（四）全生命周期协同机制

隧道系统工程的协同逻辑贯穿全生命周期，形成前期勘察 - 设计、施工实施、运营维护三个核心协同阶段。前期阶段，地质勘察与结构设计深度协同，确保设计方案与地质条件精准匹配；施工阶段，设计、施工、支护、监测多要素紧密协同，实现施工过程的安全可控；运营阶段，监测控制与运维管理协同联动，及时发现并处理结构病害，保障隧道长期稳定运营。各生命周期阶段并非孤立存在，前期阶段的成果为施工阶段提供支撑，施工阶段的经验为运营阶段的运维管理提供依据，运营阶段的监测数据与病害分析又反向优化后续工程的勘察与设计方案。全生命周期协同机制确保了隧道工程各阶段的无缝衔接，实现了资源的高效利用与工程价值的最大化。

隧道系统工程由地质勘察、结构设计、支护系统、施工技术、监测控制五大核心要素组成，呈现出系统性、复杂性、风险性、协同性的核心特点。各组成要素通过相互依存、动态适配、闭环优化的协同逻辑，形成完整的系统运行机制，支撑隧道工程全生命周期的安全、高效推进。深入理解隧道系统工程的组成与协同逻辑，对于提升隧道工程的设计水平、施工质量与运维效率具有重要意义，也为应对复杂地质条件下隧道工程的建设挑战提供了核心思路。随着智能化、数字化技术的融入，隧道系统工程的协同机制将不断优化，推动隧道工程向更加安全、高效、智能的方向发展。

第三节 隧道工程的基本分类

隧道工程的类型丰富多样，不同类型的隧道在功能定位、建设条件、技术要求等方面存在显著差异。构建科学合理的分类体系，明确各类隧道的核心特征与适用场景，是隧道工程规划立项、地质勘察、结构设计、施工方法选择及运维管理的重要前提。

一、分类维度构建

隧道工程的分类维度需立足工程实践需求，结合隧道的功能属性、建设环境、实施方式等核心要素构建，确保分类的科学性、合理性与实用性。不同分类维度聚焦隧道的不同核心特征，能够为隧道工程全生命周期的各项工作提供差异化指导。

（一）按功能用途分类

按功能用途分类是隧道最基础、最核心的分类维度，聚焦隧道建设的核心目标与服务领域，直接决定隧道的结构形式、断面尺寸、技术标准等关键参数。该维度以隧道的实际使用功能为划分依据，能够直观反映隧道的核心价值定位，是隧道规划立项阶段的首要分类依据。常见的功能用途类型包括交通隧道、水工隧道、市政隧道、矿山隧道、特种隧道等，各类隧道均对应明确的服务需求与应用场景。

（二）按地质条件分类

按地质条件分类聚焦隧道建设所处的地下地质环境，地质条件是影响隧道建设难度、施工风险及技术方案选择的核心因素。该维度以隧道沿线的地层岩性、地质构造、地下水分布等地质特征为划分依据，能够为隧道地质勘察重点、支护系统设计、施工风险防控提供直接指导。常见的地质条件类型包括硬岩隧道、软土隧道、复合地质隧道、不良地质隧道等，不同地质类型的隧道对技术方案的适配性要求差异显著。

（三）按施工方法分类

按施工方法分类聚焦隧道建设的实施方式，施工方法的选择与地质条件、工程规模、技术水平等因素紧密相关，直接影响工程质量、建设效率与安全风险。该维度以隧道开挖与支护的核心工艺为划分依据，能够直观反映隧道建设的技术

路径，为施工方案制定、施工设备选型、施工组织管理提供指导。常见的施工方法类型包括钻爆法隧道、盾构法隧道、TBM 法隧道、明挖法隧道、沉管法隧道等，各类施工方法均有其适配的地质条件与工程场景。

（四）按埋深分类

按埋深分类聚焦隧道轴线与地表的垂直距离，埋深直接影响隧道所受围岩压力、地下水作用强度及施工通风、排水等技术要求。该维度以隧道埋深大小为划分依据，能够为隧道结构设计、支护参数确定、施工环境控制提供重要参考。常见的埋深类型包括浅埋隧道、深埋隧道，部分规范中还会根据具体工程需求划分出中埋隧道，不同埋深的隧道在受力特征与技术要求上存在明显差异。除上述核心维度外，隧道工程还可根据断面尺寸分为小断面隧道、中等断面隧道、大断面隧道、超大断面隧道；根据线路数量分为单洞单线隧道、单洞双线隧道、双洞双线隧道等。各类分类维度均服务于特定的工程需求，在实际应用中需根据具体场景选择合适的分类维度，或结合多个维度进行综合界定。

二、典型类型解析

结合上述分类维度，聚焦工程实践中应用广泛的典型隧道类型，从功能用途维度切入，结合地质条件、施工方法等维度的关联特征，对交通隧道、水工隧道、市政隧道、矿山隧道等典型类型进行系统解析，明晰各类隧道的核心特征、技术要求与适用场景。

（一）交通隧道

交通隧道是为解决交通出行中地形障碍跨越问题而建设的隧道，是隧道工程中应用最广泛的类型，其核心功能是保障车辆、行人、列车等交通载体的安全、高效通行。根据服务对象的不同，可进一步分为公路隧道、铁路隧道、城市轨道交通隧道、人行隧道等。公路隧道的核心特征是断面尺寸较大，需满足不同车型的通行需求，技术要求聚焦通风、照明、消防等安全保障系统，适配的施工方法包括钻爆法、盾构法、TBM 法等，主要应用于山区公路、跨江跨海公路等线路中。铁路隧道根据列车速度等级分为普速铁路隧道、高速铁路隧道，高速铁路隧道对结构稳定性、沉降控制、防噪声等要求更高，多采用钻爆法或 TBM 法施工，适用于山区铁路、跨区域铁路干线等。城市轨道交通隧道多位于城市地下，受周边构筑物、管线影响较大，多采用盾构法施工，具有施工速度快、对周边环境影响

小的特点，核心功能是保障城市轨道交通的快速通行。人行隧道主要服务于行人跨越道路、河流等障碍，断面尺寸相对较小，施工方法灵活，可采用明挖法、钻爆法等，广泛应用于城市道路交叉口、景区等场景。

（二）水工隧道

水工隧道是为实现水资源开发、利用、调配及防洪排涝等功能而建设的隧道，核心功能与水资源的输送、排泄相关，技术要求聚焦防渗、抗水压、耐久性等核心指标。根据功能差异，可进一步分为引水隧道、排水隧道、导流隧道、发电隧道等。引水隧道的核心功能是将水资源从水源地输送至用水区域，多穿越山岭地带，地质条件以硬岩为主，常采用钻爆法或 TBM 法施工，对防渗性能要求极高，需设置完善的防排水系统。排水隧道主要用于排除地下水、洪水或污水，断面尺寸根据排水量确定，适配的地质条件多样，施工方法包括钻爆法、明挖法等，需具备良好的抗冲刷性能。导流隧道主要应用于水利枢纽工程建设阶段，用于疏导河道水流，保障大坝施工安全，工程规模较大，多采用钻爆法施工，施工完成后部分可改造为永久水工隧道。发电隧道是水电站的核心组成部分，用于将水流引入发电机组发电，对水流流速、压力控制要求严格，多采用硬岩开挖，施工精度要求高。

（三）市政隧道

市政隧道是为保障城市基础设施正常运行而建设的隧道，服务于城市供水、供电、供气、供热、通信等市政管线敷设及城市地下空间开发利用，核心功能是优化城市空间布局，减少地面基础设施建设对城市交通与环境的影响。根据服务对象，可进一步分为管线隧道、地下综合管廊、城市地下道路隧道等。管线隧道专门用于敷设各类市政管线，如供水管道、燃气管道、通信光缆等，断面尺寸根据管线数量与规格确定，多采用盾构法或明挖法施工，施工过程需严格保护周边现有管线，确保城市基础设施的正常运行。地下综合管廊是集多种市政管线于一体的综合性市政隧道，能够实现管线的集中敷设、统一管理与维护，大幅提升管线运维效率，减少路面反复开挖，多采用明挖法或盾构法施工，广泛应用于新建城区或城市更新区域。城市地下道路隧道用于缓解城市地面交通拥堵，多位于城市核心区域，受周边建筑物、地下管线影响大，施工难度高，常采用盾构法或浅埋暗挖法施工，对施工精度与环境控制要求极高。

（四）矿山隧道

矿山隧道是为矿山开采而建设的隧道，核心功能是保障矿山开采过程中的人员通行、设备运输、矿石转运及通风、排水等，技术要求聚焦施工效率与安全风险防控，需适应矿山复杂的地质条件与开采作业需求。根据功能差异，可进一步分为井筒隧道、运输隧道、通风隧道、排水隧道等。井筒隧道是矿山开采的核心入口，垂直或倾斜布置，用于人员、设备与矿石的垂直运输，多采用钻井法或爆破法施工，对结构稳定性要求极高。运输隧道用于矿山内部矿石、设备的水平运输，断面尺寸根据运输设备规格确定，地质条件复杂多变，常采用钻爆法施工，需设置完善的通风与排水系统，保障作业安全。通风隧道用于引入新鲜空气、排出矿山开采过程中产生的有害气体与粉尘，是保障矿山作业人员安全的关键设施，断面尺寸根据通风量需求确定，施工方法以钻爆法为主。排水隧道用于排除矿山开采过程中产生的地下水与生产废水，需具备良好的排水能力与抗腐蚀性能，适配复杂的地质条件。

（五）特种隧道

特种隧道是指服务于特定专项需求的隧道，功能定位特殊，技术要求严苛，应用场景相对小众但具有重要的专项价值。常见的特种隧道包括国防隧道、文物保护隧道、海底隧道、极地隧道等。国防隧道主要用于国防设施建设，如军事指挥、武器储存、人员隐蔽等，对结构抗冲击性、防护性能要求极高，多建设于地质条件稳定的硬岩区域，施工过程具有高度保密性。文物保护隧道用于保护珍贵文物遗迹，施工过程需严格控制对周边文物的扰动，采用精细化施工技术，核心目标是实现文物保护与交通或其他功能的平衡。海底隧道穿越海洋底部，地质条件复杂，受海水压力、潮汐影响大，施工难度极高，常采用盾构法或沉管法施工，对防渗、抗腐蚀、结构稳定性要求严苛，是连接跨海区域的重要交通枢纽。

三、分类应用价值

隧道工程的分类体系并非简单的类型划分，其核心价值在于为隧道工程全生命周期的各项工作提供科学依据，指导地质勘察、结构设计、施工方法选择等关键环节的决策，提升工程建设的科学性、合理性与经济性。不同分类维度的应用价值各有侧重，共同支撑隧道工程的高效推进与高质量建设。

（一）指导地质勘察精准开展

隧道分类能够明确地质勘察的重点方向与技术要求，提升勘察工作的精准性与针对性。按地质条件分类直接决定了勘察的核心内容，如硬岩隧道需重点勘察岩石强度、地质构造发育情况；软土隧道需重点勘察土层分布、含水率、承载力等参数；不良地质隧道需重点识别突泥涌水、岩爆、有害气体等风险源。结合功能用途分类，可进一步细化勘察要求，如交通隧道需重点勘察隧道进出口段的地形地貌与稳定性，保障洞口衔接顺畅；水工隧道需重点勘察地下水分布与补给情况，确保防渗设计合理。通过分类指导，地质勘察能够聚焦核心需求，合理配置勘察资源，提升勘察成果的科学性与实用性，为后续工程环节提供可靠的地质依据。

（二）支撑结构设计科学适配

隧道分类是结构设计方案制定的核心依据，不同类型的隧道对结构形式、断面尺寸、支护参数、材料选型等均有不同要求。按功能用途分类直接决定结构设计的核心目标，如公路隧道需根据通行车型确定断面尺寸与净空要求；水工隧道需根据水压等级确定衬砌厚度与防渗结构；市政管线隧道需根据管线数量与规格设计内部空间布局。按埋深分类影响结构受力分析与支护设计，浅埋隧道受地表荷载与围岩风化影响较大，需强化初期支护与地表沉降控制；深埋隧道围岩压力大，可能面临岩爆风险，需优化衬砌结构强度与抗冲击性能。按地质条件分类决定支护系统的适配性，硬岩隧道可充分利用围岩自身承载能力，采用喷锚支护为主的支护体系；软土隧道需采用刚度更大的管片衬砌或复合支护体系。通过分类支撑，结构设计能够实现与隧道类型的精准适配，保障结构安全、经济合理。

（三）助力施工方法合理选择

隧道分类为施工方法的选择提供明确指引，确保施工技术与隧道类型、地质条件、工程规模等要素的精准匹配，提升施工效率与安全水平。按施工方法分类直接对应各类施工技术的应用边界，如钻爆法适用于硬岩地质条件下的山岭隧道；盾构法适用于软土、砂层等软弱地质条件下的城市隧道或越江隧道；TBM法适用于长距离硬岩隧道；沉管法适用于海底隧道或大型越江隧道。结合功能用途与埋深分类，可进一步优化施工方法选择，如城市轨道交通隧道多位于城市核心区域，周边环境复杂，优先选择对周边扰动小的盾构法；浅埋隧道若周边建筑物密集，可采用浅埋暗挖法；矿山隧道施工需兼顾效率与安全，多采用钻爆法配合快

速支护技术。通过分类助力，能够避免施工方法选择的盲目性，确保施工过程安全可控、高效推进，降低施工风险与工程成本。

（四）优化运维管理精准实施

隧道分类能够明确运维管理的核心重点与技术要求，提升运维工作的针对性与有效性。不同类型的隧道在运维需求上存在显著差异，交通隧道需重点关注通风、照明、消防系统的正常运行，定期开展路面养护与结构病害检测；水工隧道需重点监测防渗性能与结构抗水压能力，定期检查排水系统；市政综合管廊需重点保障各类管线的运行安全，建立常态化的巡检与维护机制。按地质条件与埋深分类，可明确运维过程中的风险防控重点，如不良地质隧道需长期监测地质环境变化，防范突发地质灾害；深埋隧道需监测衬砌结构应力与岩爆风险；浅埋隧道需关注地表沉降与周边构筑物变形。通过分类优化，运维管理能够聚焦核心需求，合理配置运维资源，及时发现并处理潜在问题，保障隧道长期稳定运营。

隧道工程通过功能用途、地质条件、施工方法、埋深等核心维度构建分类体系，各类典型隧道具有明确的特征与适用场景。该分类体系的核心应用价值在于指导地质勘察精准开展、支撑结构设计科学适配、助力施工方法合理选择、优化运维管理精准实施，为隧道工程全生命周期的各项工作提供科学依据。深入理解隧道工程的基本分类，能够提升隧道工程规划、设计、施工与运维的科学性与合理性，有效应对不同类型隧道的建设挑战，推动隧道工程高质量发展。在实际工程应用中，需结合具体需求综合运用各类分类维度，实现隧道工程的精准管控与高效推进。

第四节 隧道开发系统工程的研究方法

隧道开发系统工程的研究是支撑隧道工程高质量建设的核心基础，其研究对象涵盖地质环境演化、结构受力特征、施工过程控制、运维安全保障等多个复杂领域。随着隧道工程向超长、超大断面、复杂地质条件方向发展，对研究方法的科学性、精准性与综合性提出了更高要求。构建系统完善的研究方法体系，明确不同研究阶段的方法适配逻辑，把握前沿技术驱动的研究创新方向，对于揭示隧道工程核心规律、解决工程实践难题、提升工程建设与运维水平具有重要意义。

一、核心研究方法

隧道开发系统工程的核心研究方法以“理论引领、试验支撑、数值验证、实测校准”为核心逻辑，形成理论分析、数值模拟、模型试验、现场实测四大核心研究方法的综合应用体系。各方法既相互独立又紧密协同，分别从理论层面、虚拟层面、物理层面、实际工程层面揭示隧道工程的内在规律，共同构成完整的研究闭环，为隧道工程全生命周期的各项决策提供科学支撑。

（一）理论分析方法

理论分析方法是隧道开发系统工程研究的基础核心方法，通过运用地质学、力学、工程学等多学科理论，建立数学模型与理论公式，揭示隧道工程中地质环境、结构受力、施工过程等核心要素的内在规律。该方法聚焦于问题的本质机理分析，为后续研究提供理论框架与指导方向。核心应用领域包括隧道围岩稳定性分析、支护结构受力计算、地下水渗流规律研究、施工力学响应预测等。在具体研究中，通过采用弹性力学、塑性力学、岩体力学等理论，建立围岩应力与变形的理论计算模型；运用渗流力学理论分析地下水在围岩中的运移规律及对隧道结构的影响；基于结构力学理论开展支护结构的承载力与稳定性计算。理论分析方法具有逻辑严谨、通用性强的特点，能够为隧道工程的关键技术问题提供基础理论支撑，但受假设条件简化等因素影响，对复杂地质与工程条件的适应性需结合其他方法进一步验证。

（二）数值模拟方法

数值模拟方法是依托计算机技术与数值计算理论，对隧道工程复杂问题进行虚拟仿真分析的重要研究方法。该方法能够突破理论分析的假设限制，精准模拟复杂地质条件、施工过程与结构受力的动态演化过程，为工程方案优化与风险预判提供直观、精准的数据分析支撑。核心应用领域包括复杂地质条件下隧道开挖过程的力学响应模拟、支护系统优化设计、施工风险动态预测、大断面隧道结构稳定性分析等。常用的数值模拟软件包括 FLAC3D、ABAQUS、ANSYS、Midas GTS 等，分别适用于不同的工程场景与分析需求。通过构建三维地质与工程数值模型，设定合理的计算参数与边界条件，模拟隧道开挖、支护、衬砌等全过程的力学行为，能够直观呈现围岩变形、结构应力、地下水渗流等关键参数的分布与演化规律。数值模拟方法具有可视化程度高、可重复性强、能够模拟复杂边界条

件的优势，已成为隧道工程研究与实践中不可或缺的核心方法。

（三）模型试验方法

模型试验方法是通过构建与实际工程相似的物理模型，在实验室环境下模拟隧道工程的地质条件与施工过程，研究其力学响应与演化规律的试验研究方法。该方法能够实现对复杂工程问题的物理还原，弥补理论分析与数值模拟的局限性，为理论模型验证与数值计算参数校准提供可靠的物理试验数据。核心应用领域包括隧道围岩与支护结构的协同作用机理研究、不良地质条件下隧道施工灾变机制研究、新型支护结构性能验证等。在试验过程中，需遵循相似原理，确定模型与原型的相似比，合理选取模型材料，模拟实际工程的地质分层、围岩物理力学性质、施工工序等关键要素。通过在模型上布设传感器，监测开挖与支护过程中模型的变形、应力、应变等参数，揭示隧道工程的物理演化规律。模型试验方法具有直观性强、数据可信度高的特点，能够为理论创新与技术突破提供直接的试验支撑，但受试验设备、模型尺寸等限制，难以完全还原实际工程的所有复杂因素。

（四）现场实测方法

现场实测方法是在隧道工程实际建设与运维过程中，通过布设监测设备，对隧道围岩、支护结构、施工环境等关键要素进行实时监测，获取第一手工程数据的研究方法。该方法能够真实反映实际工程条件下的隧道工程演化规律，是验证理论分析、数值模拟与模型试验结果的最终依据，也是指导现场施工调整与运维决策的直接支撑。核心应用领域包括隧道施工过程中的围岩变形监测、支护结构应力监测、地下水压力监测、施工环境参数监测，以及运维阶段的结构病害监测、长期沉降监测等。常用的监测设备包括位移计、应变计、压力传感器、渗压计、全站仪、地质雷达等，通过建立自动化监测系统，实现监测数据的实时采集、传输与分析。现场实测方法获取的数据具有真实性、可靠性强的特点，能够精准反映实际工程的复杂情况，但受现场施工干扰、监测环境限制等因素影响，监测点布设与数据采集需具备科学性与合理性，确保监测数据的连续性与有效性。为清晰呈现四大核心研究方法的核心特征与应用差异，构建如下隧道开发系统工程核心研究方法对比表：

研究方法	核心特征	核心优势	适用领域	局限性
理论分析	基于多学科理论，建立数学模型与公式	逻辑严谨、通用性强、成本低	围岩稳定性分析、结构受力计算、渗流规律研究	假设条件简化，对复杂条件适应性有限
数值模拟	计算机虚拟仿真，模拟复杂动态过程	可视化程度高、可重复性强、能模拟复杂边界	开挖力学响应模拟、施工风险预测、支护优化设计	依赖参数选取，结果需试验或实测验证
模型试验	物理模型还原，实验室模拟工程过程	直观性强、数据可信度高、可验证理论	围岩 - 支护协同机理、灾变机制、新型结构验证	受设备与模型尺寸限制，难以完全还原实际条件
现场实测	实际工程现场监测，获取第一手数据	数据真实可靠、直接反映工程实际	施工过程监测、运维病害监测、长期稳定性监测	受施工干扰大、监测环境复杂、成本较高

二、方法适配场景

隧道开发系统工程的研究方法需与工程全生命周期的不同研究阶段精准适配，根据各阶段的核心研究目标、工程条件与技术需求，科学选择与组合研究方法，实现研究资源的合理配置与研究成效的最大化。隧道工程全生命周期可划分为勘察阶段、设计阶段、施工阶段三大核心研究阶段，各阶段的研究重点与方法适配逻辑存在显著差异，需结合阶段特征进行针对性选择。

（一）勘察阶段的方法适配

勘察阶段的核心研究目标是精准查明隧道沿线的地质条件，识别不良地质风险，为后续设计与施工提供可靠的地质依据。该阶段的研究方法以现场实测为主，结合理论分析与数值模拟，形成“实测探测 + 理论研判 + 数值预测”的综合研究模式。核心适配方法包括地质勘察现场实测方法与理论分析方法。现场实测方面，采用地质钻探、地球物理勘探、遥感监测等实测手段，获取地层岩性、地质构造、地下水分布等基础地质数据；通过现场取样试验，测定围岩物理力学参数。理论分析方面，运用地质学理论对实测地质数据进行综合研判，识别突泥涌水、岩爆、有害气体等不良地质风险源；基于渗流力学理论分析地下水的补给与运移规律，预测地下水对隧道施工的影响。数值模拟方面，可初步构建简化数值模型，预测复杂地质条件下隧道开挖可能面临的围岩稳定性问题，为勘察重点的优化调整提供支撑。勘察阶段的方法选择需突出现场实测的核心地位，确保地质数据的真实性与精准性。

（二）设计阶段的方法适配

设计阶段的核心研究目标是基于勘察成果，优化隧道线路方案、结构形式与支护参数，确保设计方案的科学性、安全性与经济性。该阶段的研究方法以理论分析与数值模拟为主，结合模型试验进行关键技术验证，形成“理论计算+数值优化+试验验证”的综合研究模式。核心适配方法包括理论分析、数值模拟与模型试验方法。理论分析方面，运用岩体力学、结构力学等理论，开展隧道围岩稳定性计算、支护结构承载力分析、防排水系统设计计算等，确定初步设计参数。数值模拟方面，构建精细化三维数值模型，模拟不同设计方案下隧道的力学响应，对比分析不同断面形式、支护参数的优劣，优化设计方案；针对复杂地质条件或特殊结构设计，通过数值模拟预测可能存在的安全风险，提前优化设计对策。模型试验方面，对于新型支护结构、复杂地质条件下的关键设计环节，通过构建物理模型进行试验验证，校准设计参数，确保设计方案的可靠性。设计阶段的方法选择需注重理论与数值模拟的协同优化，结合模型试验提升设计方案的科学性。

（三）施工阶段的方法适配

施工阶段的核心研究目标是监测施工过程中的隧道力学响应，验证施工方案的可行性，及时发现并解决施工过程中的安全隐患，指导现场施工调整。该阶段的研究方法以现场实测与数值模拟为主，结合理论分析进行动态研判，形成“实时监测+数值跟踪+理论研判”的综合研究模式。核心适配方法包括现场实测、数值模拟与理论分析方法。现场实测方面，建立自动化现场监测系统，实时监测围岩变形、支护结构应力、地下水压力等关键参数，及时掌握施工过程中隧道的动态响应；通过地质雷达等实测手段，实时探测掌子面前方地质条件，预判不良地质风险。数值模拟方面，基于现场实测数据校准数值模型参数，开展施工过程的动态数值模拟，跟踪分析隧道力学响应的演化规律，预测后续施工环节可能出现的问题。理论分析方面，结合现场实测与数值模拟结果，运用力学理论进行综合研判，分析异常监测数据的成因，提出针对性的施工调整方案，如优化开挖步距、加强支护措施等。施工阶段的方法选择需突出现场实测的实时性与数值模拟的动态跟踪能力，确保施工过程的安全可控。

三、研究创新方向

随着大数据、人工智能、物联网等新兴技术的快速发展，隧道开发系统工程

的研究方法正迎来深刻变革。未来研究创新将聚焦于新兴技术与传统研究方法的深度融合，突破传统研究方法的局限性，实现研究过程的智能化、精准化与高效化，为复杂隧道工程问题的解决提供全新思路与技术支撑。核心创新方向围绕大数据驱动的研究方法创新、人工智能赋能的研究方法创新，以及多方法融合的协同研究体系构建展开。

（一）大数据驱动的研究方法创新

大数据技术为隧道开发系统工程的研究提供了海量数据处理与深度挖掘的能力，推动研究方法从“经验驱动”向“数据驱动”转型。核心创新点在于构建隧道工程全生命周期大数据平台，整合勘察、设计、施工、运维各阶段的实测数据、数值模拟数据、模型试验数据，通过大数据分析技术挖掘数据背后隐藏的工程规律，为研究与决策提供数据支撑。具体创新应用包括基于大数据的地质条件精准预判、施工风险动态预警与运维病害预测。通过收集整理大量同类隧道工程的地质勘察数据与施工监测数据，运用大数据挖掘算法建立地质条件与工程响应的关联模型，实现新隧道工程地质风险的精准预判；基于施工过程中的实时监测大数据，构建施工风险预警模型，及时识别异常数据特征，提前发出风险预警；整合隧道运维阶段的结构病害监测数据、环境监测数据，通过大数据分析预测隧道结构的长期演化趋势，为运维决策提供科学依据。大数据驱动的研究方法能够充分发挥海量数据的价值，提升研究的精准性与前瞻性。

（二）人工智能赋能的研究方法创新

人工智能技术与隧道开发系统工程研究方法的深度融合，能够实现研究过程的自动化、智能化，突破传统研究方法对人工经验的依赖。核心创新点在于将机器学习、深度学习、计算机视觉等人工智能技术应用于隧道工程的数据分析、模型构建与预测决策，提升研究效率与精度。具体创新应用包括基于机器学习的数值模拟参数优化、基于深度学习的地质图像识别与病害检测、基于人工智能的施工过程智能决策。通过机器学习算法对大量数值模拟数据与实测数据进行训练，构建参数优化模型，实现数值模拟参数的自动校准与优化；利用深度学习算法对地质钻探图像、隧道衬砌图像进行智能识别，自动检测地质缺陷与结构病害，提升检测效率与精度；基于人工智能技术整合施工过程中的多源监测数据，构建智能决策模型，自动生成施工调整方案，实现施工过程的智能化管控。人工智能赋能的研究方法能够大幅提升研究的智能化水平，解决传统研究方法难以处理的复

杂数据与复杂问题。

（三）多方法融合的协同研究体系创新

未来研究方法创新将进一步强化理论分析、数值模拟、模型试验、现场实测四大传统方法的协同融合，同时融入大数据、人工智能等新兴技术，构建“传统方法 + 新兴技术”的多方法协同研究体系，实现各方法优势互补，提升研究的综合效能。核心创新点在于建立多方法数据共享与协同验证机制，通过大数据平台实现不同研究方法数据的互联互通，基于人工智能技术实现各方法研究结果的自动比对与验证。例如，将现场实测数据实时输入数值模拟模型进行动态校准，利用模型试验结果验证理论分析模型的科学性，通过人工智能算法整合多方法研究结果，形成综合研判结论。多方法融合的协同研究体系能够充分发挥各方法的优势，弥补单一方法的局限性，提升研究成果的可靠性与适用性，为复杂隧道开发系统工程问题的系统性解决提供全方位的研究支撑。

（四）智能化监测与远程协同研究创新

结合物联网与远程通信技术，实现隧道工程研究的智能化监测与远程协同，是未来研究方法的重要创新方向。核心创新点在于构建全域感知的智能化监测网络，实现隧道工程全生命周期关键参数的实时、精准监测；依托远程协同平台，实现跨区域、跨学科研究团队的实时协作，提升研究效率。具体创新应用包括基于物联网的智能化监测设备研发、远程实时数据共享与分析平台构建、虚拟仿真协同研究环境搭建。通过研发集成多种传感器的智能化监测设备，实现隧道围岩、结构、环境等参数的全域感知；构建远程数据共享平台，让不同研究团队实时获取监测数据与研究成果，开展协同分析；搭建虚拟仿真协同研究环境，实现多团队远程共同开展数值模拟与模型试验研究，提升研究的协同性与高效性。智能化监测与远程协同研究创新能够突破时空限制，整合研究资源，提升研究的整体效能。

隧道开发系统工程的核心研究方法包括理论分析、数值模拟、模型试验、现场实测四大类，形成相互协同的综合研究体系。各研究方法需根据勘察、设计、施工不同阶段的核心需求精准适配，实现研究成效最大化。未来，随着大数据、人工智能等新兴技术的融入，研究方法将朝着大数据驱动、人工智能赋能、多方法协同融合、智能化监测与远程协同的方向创新发展。深入推进研究方法创新，将有效提升隧道开发系统工程的研究水平，为应对复杂地质条件下的隧道工程挑战提供科学支撑，推动隧道工程向更加安全、高效、智能的方向发展。

第二章 隧道工程地质勘察技术

第一节 地质勘察的基本原理

地质勘察是隧道工程全生命周期的基础性、先导性工作，其成果直接决定隧道工程设计方案的科学性、施工技术的适配性与工程建设的安全性。隧道工程地质勘察以地质学、岩土力学等学科理论为核心支撑，通过系统的勘察手段查明隧道沿线地质条件，为隧道工程的规划、设计、施工与运维提供全面、精准的地质依据。深入理解地质勘察的基本原理，明确其核心内涵、核心目标与应用原则，是规范开展地质勘察工作、提升勘察成果质量的关键。

一、核心原理内涵

隧道工程地质勘察的核心原理以地质学、岩土力学等学科理论为基础，结合工程实践需求，构建“理论指导－现场探测－数据研判－规律揭示”的完整逻辑体系，核心内涵是通过科学的勘察手段与理论分析，精准查明隧道沿线地质条件的分布特征与演化规律，厘清地质要素与隧道工程之间的相互作用关系，为工程决策提供可靠的地质支撑。其核心逻辑贯穿于勘察全过程，体现了理论与实践的深度融合、宏观与微观的协同研判。

（一）地质学理论支撑逻辑

地质学理论是隧道工程地质勘察的核心理论基础，为勘察工作的开展提供宏观指导与理论依据。核心支撑理论包括地层学、构造地质学、水文地质学、工程地质学等分支学科，各学科理论从不同维度支撑勘察工作的实施。地层学理论为查明隧道沿线地层岩性分布提供指导，通过地层划分、地层对比等方法，明确不同地层的岩性组成、厚度分布、接触关系等核心特征，厘清地层的时空演化规律；构造地质学理论用于分析隧道沿线地质构造的发育情况，包括褶皱、断层、节理等构造的分布位置、规模大小、力学性质等，研判地质构造对隧道工程的影响；水文地质学理论支撑地下水分布与运移规律的勘察，通过分析地下水的补给、径

流、排泄条件，明确地下水类型、水位埋深、水压大小等关键参数；工程地质学理论则聚焦于地质条件与工程建设的相互作用，为评价地质条件对隧道工程的适宜性提供理论依据。地质学理论的综合应用，确保了勘察工作能够从宏观层面把握隧道沿线地质条件的整体特征。

（二）岩土力学理论应用逻辑

岩土力学理论是解读岩土体工程特性、分析地质条件对隧道工程影响的核心支撑，为勘察数据的分析研判与工程适宜性评价提供量化依据。核心应用逻辑是通过测定岩土体的物理力学参数，结合力学理论分析岩土体的稳定性与承载能力，预判隧道开挖过程中可能出现的地质问题。基于岩土力学理论，通过现场取样与室内试验，测定岩土体的密度、含水率、孔隙率、抗压强度、抗剪强度等物理力学参数，构建岩土体力学模型；运用弹性力学、塑性力学等理论，分析隧道开挖后围岩的应力重分布特征，评价围岩的稳定性；结合支护结构与岩土体的相互作用机理，预判支护结构的受力状态与承载需求。岩土力学理论的应用，实现了从地质现象描述到工程力学特性量化分析的转变，为隧道工程设计与施工方案的制定提供精准的力学参数支撑。

（三）勘察实施核心逻辑

隧道工程地质勘察的实施核心逻辑是“理论指导实践，实践验证理论”，通过“前期预判－现场探测－数据整理－综合研判”的流程，实现地质条件的精准查明。前期阶段，基于区域地质资料与地质学理论，对隧道沿线地质条件进行初步预判，明确勘察重点区域与关键勘察要素；现场探测阶段，根据前期预判结果，采用针对性的勘察手段开展现场探测，获取第一手地质数据；数据整理阶段，对现场探测获取的数据进行系统整理与分析，剔除无效数据，补充完善关键数据；综合研判阶段，结合地质学、岩土力学等理论，对整理后的地质数据进行综合分析，揭示地质条件的分布规律与演化特征，形成完整的勘察成果。这一核心逻辑贯穿勘察全过程，确保了勘察工作的系统性与科学性。同时，通过现场探测数据对前期理论预判进行验证与修正，实现理论与实践的动态适配，提升勘察成果的精准性与可靠性。

二、勘察核心目标

隧道工程地质勘察的核心目标是全面、精准查明隧道沿线的地质条件，明确

影响隧道工程建设与运营的关键地质要素，为隧道工程的规划、设计、施工与运维提供全面、可靠的地质依据，保障工程建设的安全、高效推进。核心目标围绕地形地貌、地质构造、岩土体特性、地下水等关键地质要素的查明展开，同时兼顾不良地质体的识别与地质风险的预判。

（一）查明地形地貌特征

地形地貌是隧道工程线路规划、洞口选址与施工环境评估的重要依据，查明地形地貌特征是地质勘察的基础目标之一。核心查明内容包括隧道沿线的地形起伏、高程变化、坡体形态、沟谷发育情况等宏观地形特征，以及隧道进出口段的地形条件、边坡稳定性等关键区域特征。通过地形地貌勘察，明确隧道线路所处的地形类型，如山岭、平原、河谷等；分析地形地貌的形成原因与演化规律，研判地形地貌对隧道工程的影响，如陡坡地形对隧道洞口开挖稳定性的影响、沟谷发育区对隧道穿越的影响等；为隧道线路优化、洞口选址、施工场地规划等提供地形依据，避免因地形地貌勘察不足导致工程方案不合理或施工安全风险增加。

（二）查明地质构造特征

地质构造是影响隧道工程稳定性的核心地质要素之一，查明地质构造特征是地质勘察的核心目标。核心查明内容包括隧道沿线褶皱、断层、节理等地质构造的分布位置、规模大小、延伸方向、力学性质、发育程度等关键特征，以及地质构造的组合关系与演化规律。通过地质构造勘察，明确地质构造对隧道工程的影响范围与影响程度，如断层破碎带对隧道开挖稳定性的影响、节理发育区对围岩承载能力的削弱作用等；预判隧道开挖过程中可能因地质构造引发的坍塌、突泥涌水等地质风险；为隧道线路避让不良地质构造、优化支护结构设计等提供地质依据，确保隧道工程结构的长期稳定。

（三）查明岩土体特性

岩土体是隧道工程的直接承载介质，其特性直接决定隧道围岩的稳定性与支护结构的设计参数，查明岩土体特性是地质勘察的关键目标。核心查明内容包括隧道沿线岩土体的岩性组成、分布范围、物理力学性质、风化程度、完整性等关键特征。对于岩体，重点查明岩石类型、矿物成分、结构构造、抗压强度、抗剪强度、风化带厚度、岩体完整性系数等参数；对于土体，重点查明土的类型、颗粒级配、含水率、密度、孔隙比、压缩性、抗剪强度等参数。通过岩土体特性勘察，明确不同区段岩土体的工程特性差异，划分岩土体工程地质分层；为隧道围

岩分级、支护结构设计、施工方法选择等提供精准的岩土体参数支撑，确保设计方案与岩土体特性的精准适配。

（四）查明地下水特征

地下水是影响隧道工程施工安全与长期运营的重要因素，查明地下水特征是地质勘察的重要目标。核心查明内容包括隧道沿线地下水的类型、水位埋深、水压大小、水量大小、补给与排泄条件、动态变化规律，以及地下水与岩土体的相互作用关系。通过地下水勘察，明确地下水对隧道工程的影响，如地下水渗流对围岩稳定性的削弱作用、高水压对隧道衬砌结构的破坏作用、地下水渗漏对隧道运营环境的影响等；预判隧道施工过程中可能出现的突水、涌水等风险；为隧道防排水系统设计、施工排水方案制定等提供地下水参数依据，保障隧道施工安全与运营期间的干燥稳定。

三、原理应用原则

为确保隧道工程地质勘察基本原理的有效应用，提升勘察成果的质量与实用性，勘察工作需严格遵循“全面勘察、重点突出、动态调整”的核心应用原则。这三大原则相互关联、相互补充，共同指导勘察工作的全过程，确保勘察资源的合理配置、勘察重点的精准聚焦与勘察成果的动态优化。

（一）全面勘察原则

全面勘察原则是指地质勘察工作需覆盖隧道工程全线路、全生命周期，全面查明隧道沿线的地质条件，避免因勘察范围不全面、勘察要素遗漏导致地质信息缺失。核心要求包括勘察范围的全面性、勘察要素的完整性与勘察阶段的连贯性。勘察范围的全面性要求勘察工作不仅要覆盖隧道主体工程沿线区域，还需延伸至隧道进出口边坡、施工场地、附属工程等相关区域，确保整体地质条件的全面掌握；勘察要素的完整性要求全面查明地形地貌、地质构造、岩土体特性、地下水等所有关键地质要素，不遗漏影响工程建设的核心地质信息；勘察阶段的连贯性要求勘察工作贯穿隧道工程规划、设计、施工、运维全生命周期，前期勘察为设计提供依据，施工阶段动态勘察验证并补充前期勘察成果，运维阶段长期勘察监测地质环境变化。全面勘察原则确保了勘察成果的系统性与完整性，为工程全生命周期的各项决策提供全面的地质支撑。

（二）重点突出原则

重点突出原则是指在全面勘察的基础上，根据隧道工程的线路特征、地质条件复杂程度，聚焦关键区域与核心地质要素，加大勘察力度，提升勘察精度。核心要求包括重点区域的精准定位、核心要素的深入勘察与勘察手段的针对性选择。重点区域主要包括隧道进出口段、穿越断层破碎带区段、不良地质体发育区段、地下水富集区段等地质条件复杂、对工程影响重大的区域；核心要素主要包括影响隧道稳定性的地质构造、岩土体强度、地下水水压与水量等关键参数。对于重点区域与核心要素，需采用多种勘察手段进行综合探测，增加勘察点密度，延长勘察周期，确保勘察数据的精准性与可靠性；对于地质条件简单、对工程影响较小的区域，则可适当简化勘察工作，合理配置勘察资源。重点突出原则实现了勘察资源的优化配置，提升了勘察工作的效率与针对性。

（三）动态调整原则

动态调整原则是指地质勘察工作需根据勘察过程中获取的新地质信息，实时调整勘察方案，补充完善勘察内容，确保勘察成果能够精准匹配工程实际地质条件。核心要求包括勘察方案的灵活性、勘察数据的实时分析与勘察工作的动态优化。在勘察实施过程中，需对现场获取的地质数据进行实时整理与分析，若发现实际地质条件与前期预判存在差异，或发现新的不良地质体、地质风险，需及时调整勘察范围、勘察重点与勘察手段，补充开展针对性的勘察工作；在施工阶段，需结合施工揭露的地质条件与现场监测数据，对前期勘察成果进行验证与修正，开展动态补充勘察，为施工方案的调整提供实时地质依据；在运维阶段，需根据长期地质监测数据，动态跟踪地质环境变化，为运维决策提供动态地质支撑。动态调整原则确保了勘察成果与工程实际地质条件的精准适配，提升了勘察工作的适应性与可靠性。

隧道工程地质勘察的基本原理以地质学、岩土力学理论为核心支撑，构建了“理论指导－现场探测－数据研判－规律揭示”的核心逻辑体系；其核心目标是全面、精准查明地形地貌、地质构造、岩土体特性、地下水等关键地质要素，识别不良地质体并预判地质风险；勘察工作需严格遵循“全面勘察、重点突出、动态调整”的应用原则，确保勘察成果的全面性、针对性与可靠性。深入践行地质勘察基本原理与应用原则，能够为隧道工程全生命周期的各项工作提供坚实的地质依据，有效规避地质风险，保障隧道工程的安全、高效建设与长期稳定运营。

随着勘察技术的不断创新，地质勘察基本原理的应用将更加精准、高效，为复杂地质条件下隧道工程的建设提供更强有力的支撑。

第二节 地质勘察方法与技术

地质勘察方法与技术是实现勘察目标、保障勘察成果质量的核心支撑。随着隧道工程向复杂地质条件、超长超大断面方向发展，单一勘察方法已难以满足精准查明地质条件的需求。当前，隧道工程地质勘察已形成以常用传统方法为基础、多方法协同组合为核心、新技术创新应用为补充的综合勘察技术体系。科学选择与组合勘察方法，合理应用创新技术，能够有效提升勘察效率与精度，为隧道工程全生命周期提供可靠地质依据。

一、常用勘察方法

隧道工程常用地质勘察方法包括地质测绘、物探、钻探、原位测试四大类，各类方法均有其独特的原理、技术特点与适用场景。在实际勘察工作中，需根据勘察阶段、地质条件复杂程度与勘察目标，选择适配的勘察方法。各类常用勘察方法相互补充，共同构成隧道工程地质勘察的基础技术体系。

（一）地质测绘

地质测绘是隧道工程地质勘察的基础方法，核心原理是通过野外实地调查与测量，系统收集隧道沿线地形地貌、地层岩性、地质构造、不良地质体等地质信息，结合遥感影像等资料进行综合分析，绘制地质图件，为后续勘察工作提供宏观地质依据。地质测绘的核心工作内容包括地形地貌调查、地层岩性识别与划分、地质构造观测、不良地质体调查、水文地质现象记录等。在技术实施上，需遵循“由远及近、由面到点、点线面结合”的原则，先开展区域地质测绘，把握整体地质背景，再聚焦隧道线路沿线开展详细测绘。其适用场景主要为勘察初期阶段，用于初步查明区域地质条件，圈定重点勘察区域，为物探、钻探等后续勘察方法的布置提供指导。地质测绘具有成本低、效率高、覆盖范围广的特点，能够为勘察工作奠定宏观地质基础，但受地形条件与植被覆盖影响较大，难以获取地下深部地质信息。

（二）物探

物探即地球物理勘探，核心原理是利用不同地质体的物理性质差异，通过仪器探测地下地质体的物理场变化，间接推断地质体的分布特征与地质条件。物探方法具有非侵入性、探测范围广、效率高的特点，能够有效弥补地质测绘与钻探在深部地质信息获取上的不足。隧道工程常用的物探方法包括地震波勘探、地质雷达勘探、电法勘探、磁法勘探等。地震波勘探通过激发地震波并接收其反射、折射信号，推断地下地层岩性、地质构造的分布与埋深，适用于深部地质结构探测；地质雷达勘探通过发射高频电磁波并接收反射信号，探测地下浅层地质体的分布，适用于隧道掌子面前方不良地质体超前探测、浅层断层与地下水分布勘察；电法勘探通过测量地下介质的电阻率差异，推断地层岩性、地下水分布与不良地质体范围，适用于软土、含水地层的勘察。物探方法的适用场景广泛，可用于勘察各阶段的补充探测与超前探测，但探测结果易受多种因素干扰，需结合其他勘察方法进行验证。

（三）钻探

钻探是隧道工程地质勘察中获取地下深部真实地质资料的核心方法，核心原理是通过钻探设备向地下钻进，获取岩芯、土样等实物样品，同时测量孔内地质参数，直接查明地下地层岩性、地质构造、地下水等地质条件。钻探方法能够提供直观、可靠的地质数据，是验证物探结果、获取精准地质参数的关键手段。隧道工程常用的钻探方法包括回转钻探、冲击钻探、冲击回转钻探等。回转钻探适用于各类岩土层，能够获取完整的岩芯样品，用于分析地层岩性与结构；冲击钻探适用于坚硬岩层或卵石层，通过冲击作用破碎岩石，实现钻进；冲击回转钻探结合了回转与冲击的优点，适用于复杂岩土层的钻进。钻探的适用场景主要为勘察详细阶段，用于获取深部地层的精准地质资料，验证前期物探推断结果，采集样品进行室内试验。钻探具有数据精准、直观性强的特点，但成本较高、效率较低，且钻探点具有局限性，难以全面覆盖隧道沿线区域。

（四）原位测试

原位测试是在现场原地条件下，对岩土体的物理力学性质进行直接测试的勘察方法，核心原理是通过专用设备对岩土体施加荷载或其他作用，测量其响应参数，进而评价岩土体的工程特性。原位测试能够真实反映岩土体在天然状态下的力学性质，避免了室内试验样品扰动对测试结果的影响。隧道工程常用的原位测

试方法包括静力触探试验、动力触探试验、十字板剪切试验、旁压试验等。静力触探试验适用于软土、粘性土、砂土等土层，通过测量探头贯入阻力，评价土层的承载力与物理力学性质；动力触探试验适用于砂土、碎石土等土层，通过重锤冲击探头，根据贯入度评价土层的密实度与承载力；十字板剪切试验适用于饱和软粘性土，用于测量土的不排水抗剪强度；旁压试验适用于各类岩土层，通过测量钻孔壁的侧向压力与变形，评价岩土体的侧向承载力与变形特性。原位测试的适用场景主要为勘察详细阶段，用于补充室内试验数据，精准评价岩土体工程特性，为隧道围岩分级与支护设计提供参数支撑。

二、技术组合应用

隧道工程地质条件复杂多变，单一勘察方法难以全面、精准查明地质条件。技术组合应用的核心思路是根据不同地质条件的特征，将各类常用勘察方法进行协同搭配，发挥各方法的优势，弥补单一方法的局限性，形成“宏观把控－中深层探测－精准验证－参数获取”的综合勘察技术方案。不同地质条件下的技术组合应用需针对性设计，确保勘察成果能够满足工程需求。

（一）硬岩地质条件下的技术组合

硬岩地质条件下，隧道工程的核心地质问题主要为地质构造发育情况、岩体完整性、岩爆风险等。技术组合应用以“地质测绘＋地震波勘探＋钻探＋原位测试”为核心，实现对硬岩地质条件的全面查明。首先，通过地质测绘开展区域地质调查，圈定硬岩区域的地质构造分布范围，初步判断岩体风化程度；其次，采用地震波勘探对隧道沿线深部地质构造进行探测，查明断层、节理等构造的埋深与延伸情况；然后，在重点区域布置钻探孔，获取岩芯样品，直观验证地质构造与岩体完整性，同时采集样品进行室内试验；最后，结合原位测试中的动力触探试验、旁压试验等，评价岩体的承载力与变形特性。此外，在施工阶段，可采用地质雷达进行掌子面前方岩爆风险超前探测，保障施工安全。该组合方案能够有效查明硬岩地质条件下的核心地质要素，为隧道开挖与支护设计提供可靠依据。

（二）软土地质条件下的技术组合

软土地质条件下，隧道工程的核心地质问题主要为土层分布不均、承载力低、地下水丰富、沉降变形大等。技术组合应用以“地质测绘＋电法勘探＋钻探＋静力触探试验”为核心，实现对软土地质条件的精准勘察。首先，通过地质测绘

查明软土区域的地形地貌特征,判断软土的分布范围与成因;其次,采用电法勘探探测地下软土的厚度分布、地下水水位与富水区段,为钻探布置提供指导;然后,通过钻探获取软土样品,分析软土的颗粒级配、含水率等物理性质;最后,重点开展静力触探试验,结合十字板剪切试验,精准评价软土的承载力、压缩性与抗剪强度。在施工阶段,可采用地质雷达进行浅层不良地质体超前探测,同时结合水位监测掌握地下水动态变化。该组合方案能够全面查明软土地质条件的核心特征,为隧道基础设计、沉降控制与防排水设计提供支撑。

(三) 复合地质条件下的技术组合

复合地质条件即硬岩与软土相间分布、不良地质体发育的复杂地质环境,隧道工程面临的地质风险多样,勘察难度极大。技术组合应用以“多方法协同、分区域施策”为核心,采用“地质测绘+多种物探方法+钻探+原位测试”的综合组合方案。首先,通过地质测绘与遥感影像分析,划分复合地质区域的不同地质区段,明确各区段的地质特征;其次,针对不同区段采用针对性物探方法,硬岩区段采用地震波勘探,软土区段采用电法勘探,不良地质体发育区段采用地质雷达勘探,实现对不同地质条件的精准探测;然后,加密钻探孔布置,覆盖各关键地质区段,获取各类地质体的实物样品与孔内参数;最后,结合多种原位测试方法,全面评价不同地质体的工程特性。在施工阶段,建立“地质雷达+地震波超前探测”的双重超前勘察体系,实时查明掌子面前方地质条件,为施工方案动态调整提供依据。该组合方案能够应对复合地质条件的复杂性,全面查明各类地质要素与地质风险。

三、技术创新应用

随着大数据、人工智能、无人机、高精度传感等技术的快速发展,隧道工程地质勘察技术正朝着智能化、精准化、高效化方向创新发展。新技术的应用有效突破了传统勘察方法的局限性,提升了勘察效率与精度,为复杂地质条件下隧道工程勘察提供了全新技术手段。核心创新技术包括无人机测绘技术、高精度地质雷达技术、智能化钻探技术、大数据与人工智能辅助勘察技术等。

(一) 无人机测绘技术

无人机测绘技术是传统地质测绘的重要创新延伸,核心原理是利用无人机搭载遥感设备、定位设备与成像设备,开展空中航拍与数据采集,结合地理信息系

统技术进行数据处理与分析，生成高精度地质测绘图件。该技术能够突破地形条件限制，实现对复杂地形区域的高效测绘。无人机测绘技术在隧道工程勘察中的应用主要包括区域地形地貌测绘、隧道进出口边坡调查、不良地质体分布范围圈定等。通过无人机航拍获取高分辨率影像，能够清晰识别地形起伏、沟谷发育、边坡裂缝等地质现象；结合激光雷达技术，可生成三维地形模型，精准测量地形高程与坡度；在植被覆盖密集区域，通过穿透式遥感技术，能够识别地下浅层地质构造。无人机测绘技术具有效率高、覆盖范围广、数据精度高、安全性强的优势，大幅降低了传统野外测绘的劳动强度，提升了测绘工作的智能化水平。

（二）高精度地质雷达技术

高精度地质雷达技术是传统地质雷达技术的升级创新，通过提升雷达系统的信号分辨率、探测深度与抗干扰能力，实现对地下地质体的更精准探测。核心原理与传统地质雷达一致，均通过高频电磁波的反射信号分析地质体分布，但在设备性能与数据处理技术上实现了显著提升。高精度地质雷达技术在隧道工程勘察中的核心应用场景为掌子面前方超前探测、隧道周边不良地质体探测与施工质量检测。在超前探测中，能够精准识别掌子面前方数十米范围内的断层破碎带、软弱夹层、地下水富水区等不良地质体，为施工风险预警提供实时数据；在施工质量检测中，可用于隧道衬砌厚度、密实度检测，识别衬砌空洞、裂缝等质量缺陷。与传统地质雷达相比，高精度地质雷达具有探测精度高、抗干扰能力强、数据解读更精准的优势，有效提升了超前勘察与质量检测的可靠性。

（三）智能化钻探技术

智能化钻探技术是传统钻探技术与智能化技术的深度融合，通过在钻探设备上集成高精度传感器、自动控制系统、数据传输系统，实现钻探过程的自动化控制、实时数据采集与远程监控。核心创新点在于提升钻探效率、降低人为干扰、实现钻探数据的精准化与实时化。智能化钻探技术在隧道工程勘察中的应用主要包括自动化钻进、实时数据采集与分析、远程监控与管理。通过自动控制系统，能够实现钻探参数的精准控制，确保钻进过程的稳定性；通过高精度传感器，实时采集钻进速度、钻压、扭矩、孔内水位等参数，结合数据处理系统分析孔内地质条件；通过远程监控系统，实现对钻探现场的远程管理，提升勘察工作的智能化水平。智能化钻探技术能够有效降低钻探过程中的人为误差，提升钻探数据的可靠性，同时提高钻探效率，降低施工成本。

隧道工程地质勘察已形成以地质测绘、物探、钻探、原位测试为核心的常用方法体系，通过针对不同地质条件的技术组合应用，实现了对复杂地质条件的全面精准勘察。随着无人机测绘、高精度地质雷达、智能化钻探、大数据与人工智能等新技术的创新应用，隧道工程地质勘察正朝着智能化、精准化、高效化方向发展。科学应用常用勘察方法，合理组合技术方案，积极引入创新技术，能够有效提升勘察成果质量，为隧道工程全生命周期的各项决策提供可靠地质依据，保障隧道工程的安全、高效建设。未来，随着技术的持续创新，隧道工程地质勘察技术体系将不断完善，为应对更复杂的地质条件挑战提供更强有力的支撑。

第三节 地质参数测试与分析

地质参数是隧道工程地质勘察成果的核心载体，是连接地质条件与工程设计、施工的关键桥梁。精准的地质参数测试与科学的数据分析，能够为隧道围岩分级、结构设计、施工方法选择、风险防控等提供量化依据，直接决定隧道工程建设的安全性及经济性。随着隧道工程向复杂地质条件发展，对地质参数的精准度与可靠性提出了更高要求。构建系统的地质参数测试体系，明确测试方法的适配逻辑，规范参数分析流程，是提升地质勘察成果质量的核心环节。

一、核心参数类型

隧道工程地质参数的核心类型围绕影响隧道工程建设的关键地质要素展开，涵盖岩土体物理力学参数、地下水参数、地质构造参数三大类。各类参数从不同维度反映地质条件的工程特性，相互补充构成完整的地质参数体系。明确各类核心参数的测试内容，是开展精准测试与分析工作的基础。

（一）岩土体物理力学参数

岩土体物理力学参数是评价岩土体工程特性、分析隧道围岩稳定性的核心参数，直接决定支护结构设计参数与施工方案的适配性。该类参数分为物理参数与力学参数两大类，分别反映岩土体的固有物理属性与受力响应特性。核心物理参数包括密度、含水率、孔隙率、孔隙比、液限、塑限、颗粒级配等。密度反映岩土体单位体积的质量，是计算岩土体自重应力的基础；含水率影响土体的抗剪强度与压缩性，是软土、粘性土工程特性评价的关键指标；孔隙率与孔隙比反映岩

土体的孔隙发育程度，直接影响岩土体的渗透性与承载力；液限、塑限用于划分土的塑性状态，判断土体的压实性与变形特性；颗粒级配反映土中不同粒径颗粒的分布比例，是区分土类、评价砂土密实度的重要依据。核心力学参数包括抗压强度、抗剪强度、弹性模量、泊松比、压缩模量、承载力等。抗压强度是岩体抵抗压缩破坏的能力，是硬岩隧道围岩分级的核心指标；抗剪强度包括内摩擦角与粘聚力，反映岩土体抵抗剪切破坏的能力，是分析隧道围岩稳定性、计算边坡抗滑力的关键参数；弹性模量与泊松比反映岩土体的弹性变形特性，用于数值模拟分析与结构力学计算；压缩模量反映土体的压缩变形特性，是预测隧道沉降的重要依据；承载力是岩土体承受外部荷载的能力，直接决定隧道基础设计的合理性。

（二）地下水参数

地下水参数是分析地下水对隧道工程影响、设计防排水系统的核心依据，直接关系到隧道施工过程的安全与运营阶段的环境稳定性。该类参数聚焦于地下水的分布、运动及作用特性，核心测试内容围绕地下水的赋存状态与动态变化展开。

核心地下水参数包括地下水位埋深、地下水水压、渗透系数、涌水量、地下水类型等。地下水位埋深反映地下水的赋存深度，是判断地下水对隧道施工影响程度的基础指标；地下水水压直接作用于隧道衬砌结构，是设计衬砌抗水压强度的核心依据；渗透系数反映岩土体的透水能力，决定地下水的渗流速度与渗流量，是设计排水系统的关键参数；涌水量预测隧道施工过程中可能出现的地下水涌出量，为施工排水方案制定、排水设备选型提供依据；地下水类型（如潜水、承压水、裂隙水、岩溶水）决定地下水的补给与运移规律，影响防排水系统的设计思路。此外，地下水的水质参数（如酸碱度、矿化度）也是重要测试内容，用于评价地下水对衬砌结构的腐蚀性。

（三）地质构造参数

地质构造参数是评价地质构造对隧道工程影响、预判地质风险的核心参数，主要反映褶皱、断层、节理等地质构造的发育特征与工程影响程度。该类参数的测试重点在于明确地质构造的空间分布与力学特性。

核心地质构造参数包括断层产状、断层破碎带宽度、节理密度、节理产状、节理开度、岩体完整性系数等。断层产状（走向、倾向、倾角）明确断层的空间分布姿态，用于判断断层与隧道线路的空间关系；断层破碎带宽度反映断层的发育规模，决定断层对隧道工程的影响范围；节理密度（线密度、面密度）反映岩

体中断裂的发育程度，直接影响岩体的完整性与承载能力；节理产状、开度反映节理的空间形态与连通性，是分析地下水渗流通道、判断岩体稳定性的重要依据；岩体完整性系数通过岩体弹性波速计算得出，综合反映岩体的破碎程度，是隧道围岩分级的核心指标之一。此外，地质构造的力学性质参数（如断层泥的抗剪强度）也是重要测试内容，用于评价地质构造的稳定性。为清晰呈现各类核心地质参数的测试内容与工程意义，构建如下隧道工程核心地质参数体系表：

参数类别	核心参数	测试内容	工程意义
岩土体物理力学参数	物理参数	密度、含水率、孔隙率、孔隙比、液限、塑限、颗粒级配	反映岩土体固有属性，为力学参数分析与工程特性评价奠定基础
	力学参数	抗压强度、抗剪强度、弹性模量、泊松比、压缩模量、承载力	支撑围岩稳定性分析、支护结构设计、施工方案选择
地下水参数	综合参数	地下水位埋深、水压、渗透系数、涌水量、地下水类型、水质	指导防排水系统设计、施工排水方案制定，评价地下水腐蚀性
地质构造参数	综合参数	断层产状、破碎带宽度、节理密度 / 产状 / 开度、岩体完整性系数	评价地质构造影响，预判坍塌、突泥涌水风险，支撑围岩分级

二、测试方法选择

隧道工程地质参数的测试方法主要分为实验室试验与现场原位测试两大类，两类方法各有其技术特点、适用范围与优缺点。测试方法的选择需遵循“精准适配、优势互补”的原则，结合参数类型、地质条件、勘察阶段与工程需求，科学选择单一方法或组合方法，确保测试数据的精准性与可靠性。

（一）实验室试验方法

实验室试验方法是通过采集现场岩土体、地下水样品，在实验室可控环境下开展测试的方法，核心优势是测试条件标准化、测试过程可重复、能够精准控制测试变量，适用于各类基础物理参数与部分力学参数的精准测试。核心适用参数包括岩土体的密度、含水率、孔隙率、颗粒级配、液限、塑限等物理参数，以及抗压强度、抗剪强度、压缩模量等力学参数，同时可用于地下水水质参数的分析。常用试验设备包括电子天平、烘箱、三轴仪、直剪仪、压缩仪、颗粒分析仪等。实验室试验的核心流程为现场取样、样品制备、试验测试、数据记录，其中样品制备需严格遵循规范要求，减少样品扰动对测试结果的影响。该方法的优点是测试精度高、数据重复性好、便于开展对比试验；缺点是样品采集与制备过程中易

产生扰动，难以完全还原岩土体的天然赋存状态，且测试周期较长，难以满足施工阶段实时测试的需求。

（二）现场原位测试方法

现场原位测试方法是在岩土体天然赋存状态下开展测试的方法，核心优势是能够真实反映岩土体的原始状态与环境条件，避免样品扰动带来的误差，适用于力学参数、地下水参数与地质构造参数的现场精准测试。核心适用参数包括岩土体的承载力、抗剪强度、弹性模量、渗透系数等力学与渗透性参数，地下水位埋深、水压、涌水量等地下水参数，以及节理密度、岩体完整性系数等地质构造参数。常用测试方法包括静力触探试验、动力触探试验、十字板剪切试验、旁压试验、现场直剪试验、抽水试验、声波测试等。现场原位测试的核心流程为测试点布置、测试设备安装、现场测试、数据采集，测试过程需严格控制测试条件，确保测试数据的连续性与有效性。该方法的优点是测试结果真实可靠、能够反映岩土体天然状态、测试效率较高，可满足施工阶段实时测试需求；缺点是测试条件受现场环境影响较大、测试范围有限、部分测试方法成本较高。

（三）方法对比与适配选择逻辑

实验室试验与现场原位测试方法的合理适配，是提升地质参数测试质量的核心。通过明确两类方法的核心差异，结合参数类型与工程需求选择适配方法，实现两类方法的优势互补。为清晰呈现两类测试方法的核心差异，构建如下隧道工程地质参数测试方法对比表：

对比维度	实验室试验	现场原位测试
测试环境	实验室可控环境，标准化条件	现场天然环境，真实赋存条件
样品状态	采集后制备的样品，易受扰动	天然赋存状态的岩土体，无扰动
适用参数	以物理参数为主，含部分力学参数、水质参数	以力学参数、地下水参数、地质构造参数为主
测试精度	精度高，数据重复性好	受现场环境影响，精度相对较低但更贴合实际
测试效率	测试周期长，效率较低	测试周期短，效率较高，可实时获取数据
成本投入	单样品测试成本低，批量测试优势明显	设备与现场布置成本高，单次测试投入大

适配选择逻辑需结合勘察阶段、参数类型与地质条件综合判断。勘察初期阶段，以实验室试验为主，快速获取基础物理参数，搭建参数体系框架；勘察详细阶段，需采用“实验室试验 + 现场原位测试”的组合方式，用实验室试验的精准

数据校准现场原位测试结果，用现场原位测试数据弥补实验室试验样品扰动的不足。对于岩土体物理参数，优先选择实验室试验确保精度；对于力学参数、地下水参数与地质构造参数，优先选择现场原位测试反映真实工程条件。复杂地质条件下，需通过多轮测试对比，优化测试方法组合，确保参数数据能够精准匹配工程设计需求。

三、参数分析方法

参数分析是地质参数测试的核心延伸环节，核心目标是通过规范的数据分析流程，对测试获取的原始数据进行整理、优化与解读，剔除无效数据、修正系统误差，挖掘数据背后的地质规律，形成精准、可靠的最终参数成果。参数分析需遵循“标准化流程、精准化处理、合理化解读”的原则，核心流程包括数据整理、误差修正、统计分析三个关键环节，各环节层层递进，共同保障分析成果的科学性。

（一）数据整理

数据整理是参数分析的基础环节，核心是对各类测试原始数据进行系统性梳理、分类与筛选，形成规范的数据集，为后续误差修正与统计分析奠定基础。数据整理需兼顾完整性与有效性，避免因数据混乱或无效数据影响分析结果。核心工作内容包括数据分类归档、数据完整性检查、无效数据剔除。数据分类归档需按参数类型、测试方法、测试区域、测试时间等维度对原始数据进行分类存储，明确数据对应的工程部位与地质单元，建立清晰的数据索引；数据完整性检查需核对各类测试数据的必填项，包括测试参数、测试条件、设备型号、操作人员、测试时间等，补全缺失的关键信息；无效数据剔除需依据测试规范与工程经验，识别并剔除异常数据，如因设备故障导致的突变数据、因操作失误产生的偏差数据、因样品异常导致的不符合地质规律的数据等，剔除过程需做好记录，明确剔除依据。数据整理阶段还需对不同格式的测试数据进行标准化转换，统一数据单位与精度，确保各类数据具备可比性，为后续多源数据融合分析提供条件。

（二）误差修正

误差修正是提升参数精度的关键环节，核心是识别测试过程中产生的系统误差与随机误差，通过科学的方法进行修正与补偿，降低误差对最终参数成果的影响。误差修正需基于对测试原理、设备特性与现场环境的全面分析，确保修正方法的合理性与针对性。核心误差类型包括系统误差与随机误差。系统误差由测试

设备精度不足、测试方法固有缺陷、测试环境恒定干扰等因素导致，具有规律性与可重复性，可通过校准设备、优化测试方法、引入修正系数等方式进行修正。例如，实验室试验中，需定期校准电子天平、三轴仪等设备，对设备精度偏差引入修正值；现场原位测试中，需根据测试深度、地下水埋深等因素，对测试数据进行环境修正。随机误差由测试过程中的偶然因素导致，如环境温度微小波动、操作人员操作细微差异等，无固定规律，可通过增加测试次数、采用统计方法（如多次测量求平均值）降低其影响。误差修正过程中，需建立误差分析记录，明确各类误差的来源、影响程度与修正方法，确保修正过程可追溯，同时保留修正前后的数据对比，为后续成果审核提供依据。

（三）统计分析

统计分析是参数分析的核心环节，核心是运用统计学方法对修正后的有效数据进行深度分析，挖掘数据的分布规律与内在关联，确定代表性参数值，为工程设计提供量化依据。统计分析需结合参数类型与地质条件，选择适配的统计方法，确保分析结果能够真实反映地质条件的实际情况。核心统计分析方法包括描述性统计、差异性分析、相关性分析、概率分布分析等。描述性统计用于总结数据的基本特征，通过计算平均值、中位数、众数、标准差、极差等统计量，明确数据的集中趋势与离散程度，为确定代表性参数值提供基础；差异性分析用于对比不同测试方法、不同测试区域、不同地质单元的参数差异，判断参数分布的合理性，识别参数异常区域；相关性分析用于探究不同参数之间的关联关系，如岩土体含水率与抗剪强度的相关性、孔隙率与渗透系数的相关性等，为参数优化与验证提供依据；概率分布分析用于判断参数的分布类型，如正态分布、对数正态分布等，为基于概率的工程设计与风险评估提供参数支撑。对于隧道工程核心地质参数，通常采用“平均值 + 标准差”或“中位数”作为代表性参数值，同时结合地质单元的均一性，划分参数分区，确保不同区域的参数能够精准匹配实际地质条件。统计分析完成后，需形成详细的统计分析报告，明确统计方法、计算过程与最终参数成果，为参数的工程应用提供完整支撑。

隧道工程地质参数测试与分析需构建“核心参数精准测试 - 适配方法科学选择 - 规范流程分析优化”的完整技术体系。通过明确岩土体物理力学参数、地下水参数、地质构造参数的核心测试内容，科学选择实验室试验与现场原位测试方法并实现优势互补，遵循数据整理、误差修正、统计分析的规范流程，能够确保

地质参数的精准性与可靠性。高质量的地质参数成果能够为隧道工程围岩分级、结构设计、施工方案制定与风险防控提供坚实的量化依据，直接保障隧道工程建设的安全性与经济性。

第四节 地质风险评估与预测

地质风险评估与预测是隧道工程地质勘察的核心目标之一，也是保障隧道工程建设安全的关键环节。隧道工程穿越地下复杂地质环境，受地质构造、岩土体特性、地下水等多种因素影响，易面临塌方、突水突泥、围岩失稳等各类地质风险，这些风险具有突发性、破坏性强的特点，可能导致施工中断、人员伤亡与财产损失。通过系统的风险类型识别，采用科学的评估方法确定风险等级，建立精准的预测预警机制，能够提前规避或有效管控地质风险，为隧道工程施工方案制定、风险防控措施部署提供科学依据。

一、风险类型识别

地质风险类型识别是风险评估与预测的基础，核心是结合隧道工程地质勘察成果，全面梳理可能影响工程建设安全的各类地质风险源，明确不同风险类型的诱发因素、表现形式与危害特征。隧道工程地质风险类型多样，主要围绕岩土体稳定性、地下水作用及地质构造影响展开，核心风险类型包括塌方、突水突泥、围岩失稳，同时涵盖岩爆、有害气体溢出等其他专项风险。

（一）塌方风险

塌方是隧道施工过程中最常见的地质风险之一，核心是指隧道开挖后，围岩在自重或外力作用下发生坍塌破坏的现象。塌方风险的诱发因素主要包括围岩强度不足、地质构造发育、施工扰动过大、支护不及时或支护强度不足等。根据塌方发生的位置与规模，可分为掌子面塌方、边墙塌方、拱顶塌方等类型。掌子面塌方多因前方地质条件突变、岩土体松散破碎或地下水富集导致，表现为掌子面土体或岩体突然坍塌，堵塞开挖断面；边墙塌方多与边墙围岩风化严重、节理发育或支护结构受力不均相关，表现为边墙岩体剥落、开裂甚至整体坍塌；拱顶塌方危害最大，多因拱顶围岩承载力不足、支护不及时导致，易造成隧道结构损毁与施工人员伤亡。塌方风险的危害不仅体现在直接的人员与财产损失，还可能引

发后续的地环境恶化，扩大风险影响范围。

（二）突水突泥风险

突水突泥是隧道工程中危害极为严重的地质风险，核心是指隧道开挖过程中，地下水携带泥砂、碎石等物质突然涌入隧道的现象。该风险的诱发核心因素是隧道穿越地下水富集区或导水地质构造，如断层破碎带、岩溶发育区、裂隙密集带等，开挖扰动破坏了地下水的平衡状态，导致地下水携带松散物质快速涌出。突水突泥风险的表现形式多样，根据涌出物质的不同可分为突水、突泥、突砂等，其中突水突泥因其携带大量固体物质，堵塞能力强、破坏力大，危害最为严重。该风险可能瞬间淹没隧道施工区域，导致施工设备损毁、人员伤亡，同时可能引发区域地下水位下降，破坏周边水文环境。突水突泥风险的发生具有较强的突发性，对隧道施工安全构成重大威胁，是隧道工程风险防控的重点对象。

（三）围岩失稳风险

围岩失稳风险是指隧道开挖后，围岩在应力重分布过程中产生过量变形、开裂，最终丧失稳定性的风险，其与塌方风险的核心区别在于，围岩失稳多表现为渐进式变形破坏，而塌方多为突发性坍塌。诱发因素主要包括围岩岩性差、完整性低、初始应力大、地下水渗透软化作用及施工扰动等。围岩失稳的表现形式包括围岩收敛变形过大、衬砌结构开裂、仰拱隆起等。在软土地质条件下，围岩失稳多表现为持续的沉降与水平位移，易导致衬砌结构受力不均而开裂；在硬岩地质条件下，可能因岩体初始应力释放产生岩爆前兆性变形，进而引发岩爆风险；在破碎带区域，围岩失稳可能表现为渐进式的剥落与塌落。围岩失稳风险若未及时发现与管控，可能逐步发展为塌方等恶性风险，因此需通过持续监测实现早期识别。

二、评估方法应用

地质风险评估的核心目标是通过科学的方法分析各类风险的发生概率与危害程度，确定风险等级，为风险防控决策提供量化依据。隧道工程地质风险评估需遵循“定性与定量相结合、全面评估与重点聚焦相结合”的原则，常用评估方法包括定性评估法、定量评估法及综合评估法，不同方法适用于不同勘察阶段与风险复杂程度。

（一）定性评估方法

定性评估方法是基于勘察人员的经验与专业知识，结合地质勘察成果，对风险发生可能性与危害程度进行定性描述与判断的方法，具有操作简便、效率高的特点，适用于勘察初期阶段或风险因素复杂难以量化的场景。核心应用方法包括专家调查法、风险矩阵法（定性版）、故障树分析法等。专家调查法通过组织地质学、岩土工程、隧道施工等领域专家，结合工程实际地质条件，对各类风险的发生可能性与危害程度进行投票评分，综合形成评估结论；风险矩阵法（定性版）通过构建风险可能性与危害程度二维矩阵，将风险划分为高、中、低三个等级，明确不同等级风险的管控优先级；故障树分析法通过梳理风险发生的因果关系，构建故障树模型，识别导致风险发生的关键诱发因素，为风险防控措施制定提供针对性依据。定性评估方法的优势在于能够快速完成初步风险筛查，但受主观经验影响较大，精准度有限。

（二）定量评估方法

定量评估方法是通过建立数学模型，结合勘察获取的量化参数，对风险发生概率与危害程度进行精准计算的方法，具有客观性强、精准度高的特点，适用于勘察详细阶段或核心风险区域的精准评估。核心应用方法包括风险矩阵法（定量版）、蒙特卡洛模拟法、数值模拟法等。风险矩阵法（定量版）通过对风险发生概率与危害程度进行量化赋值，如将发生概率划分为 0-1 区间的具体数值，将危害程度量化为经济损失、人员伤亡等具体指标，通过矩阵计算确定风险等级；蒙特卡洛模拟法通过随机模拟风险诱发因素的不确定性，多次迭代计算风险发生的概率分布，提升评估结果的可靠性；数值模拟法通过构建地质-工程数值模型，模拟隧道开挖过程中围岩应力、变形的演化规律，量化判断围岩失稳、塌方等风险的发生概率与影响范围。定量评估方法的优势在于评估结果精准量化，但需依赖大量精准的勘察数据，计算过程复杂，耗时较长。

（三）定性与定量结合的综合评估方法

定性与定量结合的综合评估方法是隧道工程地质风险评估的主流方法，核心思路是利用定性评估方法快速筛查风险、锁定重点风险区域，再通过定量评估方法对重点风险进行精准评估，实现“全面覆盖、重点精准”的评估目标。综合评估方法的核心流程包括四个环节：一是通过定性评估方法（如专家调查法）全面识别风险类型，初步判断各类风险的大致等级，筛选出高、中等级核心风险；二

是针对核心风险，收集整理精准的地质勘察数据，如围岩物理力学参数、地质构造参数、地下水参数等；三是采用定量评估方法（如数值模拟法、蒙特卡洛模拟法）对核心风险的发生概率与危害程度进行精准计算；四是结合定性与定量评估结果，综合确定风险等级，形成完整的风险评估报告。该方法既弥补了定性评估主观、精准度低的不足，又解决了定量评估耗时、覆盖范围有限的问题，能够为风险防控提供全面且精准的依据。

（四）风险等级划分与应用

风险等级划分是风险评估的核心输出成果，通常将隧道工程地质风险划分为极高风险、高风险、中风险、低风险四个等级，不同等级对应不同的风险管控策略。极高风险区域需坚决避让，若无法避让需制定专项防控方案并报相关部门审批；高风险区域需优化施工方案，强化支护措施，增加监测频率，配备应急救援设备；中风险区域需常规加强支护与监测，制定风险防控预案；低风险区域可按常规施工方案推进，做好日常监测。风险等级划分结果直接指导隧道工程的线路优化、施工方案制定与资源配置，通过将风险等级与工程区域精准匹配，实现“差异化管控”，提升风险防控的针对性与经济性。

三、预测预警机制

地质风险预测预警机制是实现风险动态管控的核心保障，核心是基于地质勘察数据与施工监测数据，建立风险动态预测模型，实时捕捉风险演化趋势，提前发出预警信号，为风险处置争取时间。完善的预测预警机制应具备数据采集、模型预测、预警发布、应急响应四个核心环节，实现“数据驱动－模型预测－精准预警－快速处置”的闭环管控。

（一）数据采集与整合体系

数据采集与整合是预测预警的基础，核心是构建“勘察数据＋施工监测数据＋实时地质数据”的多源数据采集体系，实现数据的实时采集、传输与整合。数据来源主要包括三个方面：一是前期地质勘察数据，如围岩物理力学参数、地质构造分布、地下水赋存特征等，为预测模型构建提供基础参数；二是施工过程监测数据，如围岩收敛变形、支护结构应力、地下水位变化、爆破振动参数等，通过布设自动化监测设备，实现数据的实时采集与传输；三是施工过程中获取的实时地质数据，如掌子面揭露的地质条件、超前地质探测数据等，为模型动态校准

提供依据。通过构建数据整合平台，对多源数据进行标准化处理、去噪与融合，消除数据冗余与误差，形成统一的风险预测数据库，为后续模型预测提供高质量的数据支撑。

（二）动态预测模型构建

动态预测模型是预测预警的核心，核心是基于多源数据，结合地质学、岩土力学、统计学等理论，构建能够反映风险演化规律的预测模型，实现对风险发展趋势的精准预判。预测模型的构建需遵循“动态校准、实时更新”的原则，根据工程进展与数据积累持续优化模型参数。核心预测模型包括经验公式模型、数值模拟预测模型、机器学习预测模型等。经验公式模型基于大量同类工程的历史数据，建立风险指标与监测数据的经验关联公式，如通过围岩收敛速率预测塌方风险，具有计算简便、响应快速的特点；数值模拟预测模型通过实时整合监测数据校准模型参数，动态模拟隧道开挖过程中风险的演化过程，能够直观呈现风险发展趋势；机器学习预测模型利用大数据与人工智能技术，对多源监测数据进行深度挖掘，识别风险演化的特征规律，实现风险的精准预测，适用于复杂地质条件下的多因素耦合风险预测。

（三）预警等级划分与发布机制

预警等级划分需与风险评估等级相衔接，通常分为四级预警：一级预警（红色）对应极高风险，表明风险即将发生，需立即停止施工，启动应急救援；二级预警（橙色）对应高风险，表明风险大概率发生，需暂停危险区域施工，强化防控措施；三级预警（黄色）对应中风险，表明风险可能发生，需加强监测与巡查，做好防控准备；四级预警（蓝色）对应低风险，表明风险潜在发生可能，需关注监测数据变化。预警发布机制需明确发布主体、发布渠道与响应流程。预警信号由监测中心根据预测模型结果自动生成，经专家复核确认后，通过施工现场广播、手机 APP、预警指示灯等多渠道同步发布；相关责任主体需在规定时间内响应，根据预警等级启动对应的防控预案，如红色预警需立即组织人员撤离、启动应急救援，橙色预警需组织专家研判、优化支护措施。

（四）预警响应与闭环管控

预警响应与闭环管控是确保预警机制有效落地的关键，核心是建立“预警发布－措施实施－效果评估－模型优化”的闭环管理流程。预警发布后，施工单位需立即启动对应的风险防控预案，落实针对性防控措施，如加强支护、调整施工

步距、实施超前注浆加固、排水降压等；监测中心需持续跟踪监测数据变化，评估防控措施的实施效果。若监测数据回归稳定，表明风险得到有效管控，可根据评估结果降低预警等级或解除预警；若监测数据持续恶化，需提升预警等级，调整防控措施。同时，将预警响应过程中的数据与经验反馈至预测模型，优化模型参数，提升后续预测预警的精准度。通过闭环管控，实现风险预测预警与防控措施的动态适配，持续提升风险管控能力。

隧道工程地质风险评估与预测是保障工程建设安全的核心环节，通过全面识别塌方、突水突泥、围岩失稳等核心风险类型，采用定性与定量结合的综合评估方法确定风险等级，构建基于多源数据的动态预测预警机制，能够实现地质风险的精准管控。深入践行地质风险评估与预测的技术体系，能够提前规避或有效应对地质风险，降低工程安全事故发生率，保障隧道工程的安全、高效推进。随着大数据、人工智能等技术的融入，地质风险预测预警机制将朝着更加智能化、精准化的方向发展，为复杂地质条件下隧道工程的风险管控提供更强有力的支撑。

第三章 隧道围岩力学特性研究

第一节 围岩力学性质分析

隧道围岩作为隧道工程的承载主体与环境介质，其力学性质直接决定隧道开挖后的应力重分布规律、围岩稳定性及支护结构的受力状态。深入分析围岩力学性质，明确核心力学指标特征，厘清影响力学性质的关键因素，构建科学的测试方案，是隧道工程设计优化、施工风险防控与长期稳定性保障的核心前提。随着隧道工程向深部、复杂地质区域推进，围岩所处的地质环境与应力条件愈发复杂，对围岩力学性质分析的精准性与系统性提出了更高要求。

一、力学性质核心

围岩力学性质是围岩在受力作用下表现出的变形与破坏响应特征，其核心通过一系列量化的力学指标体现。这些指标相互关联、相互补充，共同构成评价围岩工程特性的力学指标体系，其中抗压强度、抗剪强度、弹性模量是最核心的三大指标，此外还包括泊松比、抗拉强度、变形模量等辅助指标，为隧道工程的力学分析与设计计算提供全面支撑。

（一）抗压强度

抗压强度是指围岩抵抗轴向压力破坏的极限能力，是反映围岩承载能力的核心指标，直接决定隧道围岩的分级标准与支护结构的承载需求。围岩抗压强度的大小取决于岩性类型、岩体完整性、胶结程度等固有属性，不同类型围岩的抗压强度差异显著。对于硬质岩体，如花岗岩、玄武岩等，其抗压强度通常较高，能够承受较大的开挖卸荷应力，围岩稳定性较好；对于软质岩体，如页岩、泥岩、破碎岩体等，抗压强度较低，开挖后易发生压缩变形甚至坍塌破坏。抗压强度不仅是围岩分级的关键依据，也是数值模拟中构建围岩力学模型、计算围岩极限承载力的核心参数。在工程实践中，抗压强度的精准获取的对确定开挖方式、优化支护参数具有直接指导意义。

（二）抗剪强度

抗剪强度是指围岩抵抗剪切破坏的极限能力，是分析隧道围岩滑动失稳、边坡坍塌等风险的核心指标。围岩的抗剪强度通常通过内摩擦角与粘聚力两个参数综合表征，二者共同决定围岩抵抗剪切变形的能力。内摩擦角反映围岩颗粒间的摩擦阻力，主要与围岩的颗粒级配、密实度相关，颗粒级配良好、密实度高的围岩内摩擦角较大，抗剪切滑动能力更强；粘聚力反映围岩颗粒间的胶结与吸附作用，主要与围岩的岩性成分、胶结物类型相关，胶结致密的岩体粘聚力较高，而松散土体的粘聚力较低甚至趋近于零。在隧道开挖过程中，围岩的剪切破坏是最常见的破坏形式，抗剪强度指标直接用于判断围岩是否发生剪切失稳，是支护结构抗滑设计与稳定性验算的关键依据。

（三）弹性模量

弹性模量是指围岩在弹性变形阶段，应力与应变的比值，反映围岩抵抗弹性变形的能力，是分析隧道开挖后瞬时弹性变形、进行结构力学计算与数值模拟的核心参数。弹性模量的大小与围岩的岩性、完整性、风化程度密切相关，岩体越完整、风化程度越低，弹性模量越大，抵抗变形的能力越强。弹性模量直接影响隧道开挖后的变形量计算，弹性模量较小的软质围岩或破碎围岩，开挖后弹性变形量较大，对支护结构的变形适应性要求更高；弹性模量较大的硬质围岩，弹性变形量较小，支护结构主要承受后期的塑性变形压力。此外，弹性模量与泊松比配合使用，可全面反映围岩的弹性力学特性，为支护结构的刚度设计与变形协调分析提供量化依据。

二、影响因素分析

隧道围岩力学性质受多种因素综合影响，这些因素通过改变围岩的内部结构、物质成分或赋存环境，进而影响其力学指标的大小。其中，地质构造、含水率、风化程度是最关键的三大影响因素，此外还包括应力状态、温度环境等次要因素。厘清各影响因素的作用机制，是精准分析围岩力学性质、预判其在工程扰动下变化趋势的核心基础。

（一）地质构造

地质构造是影响围岩力学性质的主导因素，通过破坏围岩的完整性、形成软弱结构面，显著降低围岩的力学强度。常见的地质构造包括断层、节理、褶皱等，

其影响机制主要体现在结构面切割与软弱填充物两个方面。断层与节理的切割作用会将完整岩体分割为多个独立的岩块，破坏岩体的整体性，导致岩体的抗压强度、抗剪强度大幅下降。随着节理密度的增加，岩体的完整性系数降低，力学强度呈显著递减趋势；同时，结构面的存在为围岩的变形与破坏提供了滑动面与渗透通道，进一步加剧围岩力学性质的劣化。此外，断层破碎带或节理裂隙中常填充有泥质、砂质等软弱物质，这些填充物的力学强度远低于母体岩体，会显著降低结构面的抗剪强度，成为围岩失稳的潜在隐患。褶皱构造则通过改变围岩的应力状态与完整性，影响其力学性质，褶皱核部区域岩体挤压破碎，力学强度较低，而翼部区域岩体相对完整，力学强度较高。

（二）含水率

含水率是影响围岩力学性质的重要环境因素，尤其对软质岩体、土体及含粘土矿物的岩体影响更为显著。含水率通过软化作用、孔隙水压力作用改变围岩的内部结构与受力状态，进而降低其力学强度。软化作用是含水率影响围岩力学性质的核心机制，水的渗入会削弱围岩颗粒间的胶结作用与吸附力，导致岩体结构松散，抗压强度、抗剪强度显著下降。对于含蒙脱石、伊利石等亲水粘土矿物的岩体，含水率增加会引发岩体的膨胀变形，进一步劣化其力学性质。孔隙水压力作用则通过改变围岩的有效应力状态影响力学强度，地下水渗入围岩孔隙后产生孔隙水压力，抵消部分有效应力，导致围岩的抗剪强度降低，同时加速围岩的变形与破坏。随着含水率的升高，围岩的弹性模量也会相应减小，变形能力增强，增加隧道开挖后的变形控制难度。

（三）风化程度

风化程度是反映围岩在长期地质作用下劣化程度的指标，风化作用通过物理、化学与生物作用破坏围岩的矿物成分与结构完整性，导致其力学性质逐步衰减。根据风化程度的不同，可将围岩划分为全风化、强风化、中风化、微风化四个等级，不同风化等级的围岩力学性质差异显著。物理风化通过温度变化、水的冻融等作用使岩体产生裂隙，破坏岩体完整性，不改变矿物成分但降低力学强度；化学风化通过溶解、水解、氧化等反应改变围岩的矿物成分，生成强度较低的次生矿物，如粘土矿物，显著降低围岩的承载能力；生物风化则通过植物根系生长、微生物活动等加剧岩体裂隙发育，进一步劣化力学性质。随着风化程度的加深，围岩的抗压强度、抗剪强度、弹性模量均呈递减趋势，全风化围岩的力学性质接

近土体，稳定性极差，而微风化围岩的力学性质接近新鲜岩体，稳定性良好。

三、性质测试方法

围岩力学性质测试是精准获取力学指标的核心手段，其核心思路是采用实验室试验与现场试验相结合的方法，充分发挥两种试验方法的优势，弥补单一方法的局限性，确保测试结果的精准性与可靠性。实验室试验能够在可控条件下实现精准测试，现场试验则能真实反映围岩的天然赋存状态，二者协同配合，为围岩力学性质分析提供全面、可靠的数据支撑。

（一）实验室试验

实验室试验是通过采集现场围岩样品，在实验室标准化环境下开展力学测试的方法，核心优势是测试条件可控、测试精度高、可重复性强，能够精准获取围岩的基础力学指标，适用于各类围岩力学性质的初步测试与对比分析。核心测试项目包括抗压强度试验、抗剪强度试验、弹性模量与泊松比测试等。抗压强度试验通过对标准岩芯样品施加轴向压力，测定其破坏时的极限压力，计算抗压强度，常用试验方法包括单轴抗压试验与三轴抗压试验，三轴抗压试验可模拟不同围压条件下的抗压强度，更贴合深部围岩的应力环境；抗剪强度试验通过对样品施加剪切力，测定其破坏时的剪切应力，获取内摩擦角与粘聚力，常用试验方法包括直剪试验与三轴剪切试验；弹性模量与泊松比测试通过在弹性变形阶段测定样品的应力与应变数据，计算得出弹性模量与泊松比。实验室试验的核心流程包括样品采集、样品制备、试验测试、数据处理，其中样品制备需严格遵循规范要求，保证样品的尺寸精度与完整性，减少样品扰动对测试结果的影响。

（二）现场试验

现场试验是在围岩天然赋存状态下开展力学测试的方法，核心优势是能够真实反映围岩的原始结构、应力状态与环境条件，避免样品采集与制备过程中的扰动影响，测试结果更贴合工程实际，适用于核心区域围岩力学性质的精准测试与验证。核心测试项目包括现场抗压试验、现场抗剪试验、声波测试、旁压试验等。现场抗压试验通过在现场岩体上布设加载装置，直接对岩体施加压力，测定其抗压强度，真实反映岩体的整体承载能力；现场抗剪试验包括现场直剪试验、现场三轴剪切试验，通过对天然岩体结构面或岩体本身施加剪切力，测定抗剪强度指标，尤其适用于测试断层破碎带、节理面等软弱结构面的抗剪性能；声波测试通

过发射与接收弹性波，根据波速传播特性计算岩体完整性系数，间接评价围岩的力学性质，具有非侵入性、效率高的特点；旁压试验通过向钻孔壁施加侧向压力，测定岩体的侧向变形，计算弹性模量、变形模量等力学指标，适用于难以采集完整样品的破碎围岩。

（三）综合测试方案构建

综合测试方案的核心是实现实验室试验与现场试验的协同配合，构建“样品采集－实验室精准测试－现场验证校准－数据综合分析”的完整测试流程。其核心步骤包括三个环节：一是现场采集代表性围岩样品，根据围岩类型与地质条件，合理布设采样点，确保样品能够反映不同区域、不同风化程度围岩的特性；二是开展实验室试验，精准测试各类力学指标，建立初步的力学指标体系，分析围岩力学性质的基本特征；三是在现场关键区域开展针对性的现场试验，验证实验室测试结果的合理性，修正样品扰动带来的误差，同时获取反映围岩天然状态的力学数据；最后对两类试验数据进行综合分析，剔除异常数据，确定最终的围岩力学指标，为隧道工程设计与施工提供可靠依据。在测试方案实施过程中，需根据围岩的复杂程度调整试验项目与测试精度，对于简单地质条件下的均质围岩，可适当简化测试流程；对于复杂地质条件下的非均质围岩、破碎围岩，需增加测试点密度，丰富测试项目，确保测试结果能够全面反映围岩力学性质的空间分布差异。

隧道围岩力学性质分析的核心在于明确抗压强度、抗剪强度、弹性模量等核心力学指标的特征，厘清地质构造、含水率、风化程度等关键因素的影响机制，构建实验室试验与现场试验相结合的综合测试方案。精准的围岩力学性质分析能够为隧道围岩分级、支护结构设计、施工方法选择、稳定性评估提供科学的力学依据，直接保障隧道工程的安全与高效建设。随着测试技术的不断创新，围岩力学性质测试的精准性与效率将持续提升，为复杂地质条件下隧道工程的力学分析提供更强有力的支撑。

第二节 围岩应力状态研究

围岩应力状态是隧道工程力学分析的核心研究对象，直接决定隧道开挖后的围岩稳定性、支护结构受力特征与工程风险等级。隧道围岩在天然状态下处于稳定的应力平衡状态，隧道开挖打破这一平衡，引发围岩应力重分布，若应力超过围岩承载能力，将导致围岩变形、破坏等工程问题。深入研究围岩应力类型构成、精准掌握应力计算方法、厘清应力演化规律，是优化隧道设计方案、制定科学施工策略、防控地质风险的核心前提。随着隧道工程向深埋、长距离、复杂地质区域发展，围岩应力环境愈发复杂，对 stress 状态研究的精准性与系统性提出了更高要求。

一、应力类型划分

隧道围岩应力体系由天然应力与工程扰动应力共同构成，根据应力形成的成因与阶段，可划分为自重应力、构造应力、开挖扰动应力三大核心类型。各类应力在分布特征、影响范围与作用机制上存在显著差异，共同决定围岩的整体应力状态。明确各类应力的构成与分布规律，是开展应力计算与演化分析的基础。

（一）自重应力

自重应力是指由围岩自身重量产生的应力，是天然应力体系的基础组成部分，广泛分布于各类地质环境的围岩中，其分布规律主要与埋深、围岩密度相关。自重应力的形成无需地质构造运动参与，是地球重力场作用下的固有应力状态。自重应力的核心构成包括竖向自重应力与水平向自重应力。竖向自重应力随埋深呈线性递增趋势，计算公式为竖向应力等于围岩密度、重力加速度与埋深的乘积，埋深越大，竖向自重应力越大；水平向自重应力由竖向自重应力派生形成，其大小与围岩的泊松比相关，通常采用侧压力系数表征水平向与竖向自重应力的比值，侧压力系数取值范围一般在 0.2 ~ 0.8 之间，具体取决于围岩的岩性与受力历史。自重应力的分布具有显著的层状特征，在水平方向上分布相对均匀，在垂直方向上随埋深线性变化，无明显方向性差异，属于各向同性应力分量。

（二）构造应力

构造应力是指由地质构造运动（如地壳升降、板块挤压、褶皱断裂等）产生的应力，是天然应力体系中影响显著的应力分量，尤其在构造运动活跃区域，构

造应力可能成为天然应力的主导成分。构造应力的形成与地质历史时期的构造活动密切相关，具有明显的方向性与区域性。构造应力的核心特征包括方向性、区域性与残余性。方向性体现为构造应力存在明显的主应力方向，通常与区域构造运动方向一致，如板块挤压区域的构造应力主方向平行于挤压方向；区域性体现为构造应力的分布受区域地质构造控制，在同一构造单元内应力分布具有相似性，不同构造单元间应力特征差异显著；残余性体现为构造应力可在地质构造稳定后长期保留在围岩中，形成残余构造应力，持续影响围岩的应力状态。构造应力的
大小通常与构造活动强度相关，在深埋隧道、板块交界区域或断裂带附近，构造应力可能远大于自重应力，成为控制围岩稳定性的主导应力。

（三）开挖扰动应力

开挖扰动应力是指隧道开挖施工打破天然应力平衡后，围岩应力重分布过程中产生的附加应力，是工程扰动引发的次生应力，仅分布于隧道周边的一定范围内，其分布规律与隧道断面形状、开挖方式、支护时机密切相关。开挖扰动应力的核心特征包括局部性、动态性与复杂性。局部性体现为开挖扰动应力仅影响隧道周边的围岩区域，该区域称为扰动区，扰动区范围一般为隧道半径的 3 ~ 5 倍，超出该范围后，围岩应力基本恢复至天然应力状态；动态性体现为开挖扰动应力随施工进程动态变化，隧道开挖初期，扰动应力快速调整，随着支护结构的施作与围岩的变形稳定，扰动应力逐渐趋于稳定；复杂性体现为开挖扰动应力的分布受隧道断面形状影响显著，在拱顶、边墙、拱脚等部位易形成应力集中，应力集中系数可能达到 2 ~ 5 倍，是引发围岩局部破坏的主要诱因。为清晰呈现三类核心应力的特征差异，构建如下隧道围岩应力类型特征对比表：

应力类型	形成成因	分布特征	核心影响因素	力学特性
自重应力	围岩自身重量	水平均匀分布，垂直随埋深线性递增	埋深、围岩密度、泊松比	各向同性，应力大小可精准计算
构造应力	地质构造运动	区域性分布，存在明显主应力方向	区域构造活动强度、地质构造类型	各向异性，具有残余性，大小波动较大
开挖扰动应力	隧道开挖打破应力平衡	局部分布于隧道周边扰动区，存在应力集中	断面形状、开挖方式、支护时机	动态变化，分布复杂，与施工进程密切相关

二、应力计算方法

围岩应力计算是量化分析应力状态的核心手段，其核心思路是基于弹性力学、

塑性力学等理论，结合围岩力学参数与工程条件，构建针对性的应力计算模型，实现对各类应力的精准量化。根据围岩受力状态的不同，可选择弹性力学模型或塑性力学模型，其中弹性力学模型适用于应力未超过围岩弹性极限的情况，塑性力学模型适用于应力超过弹性极限、围岩产生塑性变形的情况。

（一）基于弹性力学理论的计算模型

弹性力学理论是围岩应力计算的基础理论，其核心假设是围岩为连续、均质、各向同性的弹性体，应力与应变成正比，适用于浅埋隧道、硬质完整围岩或开挖初期围岩未产生塑性变形的场景。基于弹性力学理论的计算模型能够快速实现应力的精准计算，为工程初步设计提供依据。核心计算模型包括平面应变模型、轴对称模型等。平面应变模型适用于长隧道的应力计算，假设隧道长度远大于断面尺寸，围岩变形仅发生在垂直于隧道轴线的平面内，通过求解弹性力学平衡方程，可计算隧道周围围岩的径向应力、环向应力与切向应力；轴对称模型适用于圆形断面隧道的应力计算，假设隧道断面为圆形，应力分布关于隧道轴线对称，可大幅简化计算过程，通过极坐标下的弹性力学方程求解，快速获取围岩应力分布规律。此外，对于复杂断面隧道，可采用弹性力学叠加原理，将复杂断面分解为简单几何单元，通过各单元应力计算结果的叠加，得到整体应力分布。基于弹性力学理论的计算方法具有计算简便、效率高的优势，但受弹性假设限制，在围岩产生塑性变形的场景下计算精度会显著降低。

（二）基于塑性力学理论的计算模型

塑性力学理论适用于围岩应力超过弹性极限、产生塑性变形的场景，如深埋隧道、软质围岩或破碎围岩区域。其核心思路是考虑围岩的塑性变形特性，通过建立塑性屈服准则，判断围岩的塑性屈服区域，进而计算塑性区的应力分布，更贴合工程实际的应力状态。核心计算模型包括摩尔-库仑屈服准则模型、德鲁克-普拉格屈服准则模型等。摩尔-库仑屈服准则模型基于围岩的抗剪强度指标（内摩擦角、粘聚力），判断围岩是否达到剪切屈服，通过求解塑性力学平衡方程，计算塑性区的范围与应力分布，是隧道工程中应用最广泛的塑性力学计算模型；德鲁克-普拉格屈服准则模型是摩尔-库仑屈服准则的简化形式，适用于三维应力状态的计算，能够克服摩尔-库仑准则在三维应力分析中的局限性。基于塑性力学理论的计算过程相对复杂，需通过数值计算方法求解，但计算结果更贴合围岩的实际受力状态，尤其适用于复杂地质条件下的应力精准计算。

（三）计算模型的适配选择

计算模型的选择需结合工程条件、地质条件与计算需求综合判断，核心适配逻辑如下：浅埋隧道、硬质完整围岩且开挖扰动较小的场景，优先选择弹性力学模型，快速获取应力分布的初步结果；深埋隧道、软质围岩、破碎围岩或开挖扰动较大的场景，需选择塑性力学模型，精准计算塑性区范围与应力分布；对于圆形断面隧道，可优先选择轴对称模型简化计算；对于非圆形断面隧道，需选择平面应变模型或三维弹性/塑性模型，确保计算结果的准确性。在实际工程应用中，可采用“初步计算-精准验证”的思路，先通过弹性力学模型进行初步计算，再结合围岩力学性质与工程经验，判断是否需要采用塑性力学模型进行精准计算，必要时可借助数值模拟软件（如 FLAC3D、ABAQUS 等）实现复杂条件下的应力计算。

三、应力演化规律

隧道开挖过程中，围岩应力经历“天然平衡-平衡打破-应力重分布-新平衡建立”的完整演化过程，其演化规律与开挖方式、支护时机、围岩力学性质密切相关。厘清应力演化特征，掌握不同施工阶段的应力变化规律，是制定科学施工策略、优化支护时机的核心依据。

（一）开挖前的天然应力平衡阶段

开挖前，围岩处于天然应力平衡状态，应力由自重应力与构造应力共同构成，其分布规律稳定。此时，围岩内部的应力大小与方向保持恒定，不存在应力集中现象，围岩颗粒间的作用力相互平衡，整体处于稳定状态。天然应力平衡状态的稳定性取决于地质构造的稳定性，若区域地质构造活跃，构造应力可能发生缓慢变化，导致天然应力平衡状态处于动态调整中；若区域地质构造稳定，天然应力平衡状态可长期保持稳定。开挖前的天然应力状态是后续应力演化的初始状态，其精准量化是分析应力演化规律的基础。

（二）开挖过程中的应力重分布阶段

隧道开挖施工打破了天然应力平衡，围岩内部的应力开始重新调整，进入应力重分布阶段，该阶段是应力变化最剧烈、最复杂的阶段，其持续时间与开挖速度、围岩力学性质相关。应力重分布的核心特征是应力的转移与集中，具体表现为开挖面周边围岩的应力释放与隧道周边特定部位的应力集中。开挖初期，开挖

面处的围岩失去约束，应力快速释放，导致开挖面周边围岩产生弹性回弹变形；随着开挖进程的推进，应力逐渐向隧道周边未开挖的围岩转移，在拱顶、边墙、拱脚等部位形成应力集中。应力集中的程度与隧道断面形状相关，圆形断面的应力集中程度最低，矩形、马蹄形等非圆形断面的应力集中程度较高，拱脚与边墙墙角部位易形成高应力集中区。在软质围岩或破碎围岩中，应力集中可能导致围岩快速达到屈服极限，形成塑性区，塑性区的发展会进一步改变应力分布，使应力向塑性区外侧的弹性区转移。

（三）支护后的新平衡建立阶段

支护结构的施作是引导围岩应力建立新平衡的关键手段，通过支护结构的约束作用，限制围岩的过度变形，承担部分围岩应力，使围岩与支护结构共同形成新的承载体系，最终建立稳定的新平衡状态。支护结构施作后，其应力演化特征分为两个阶段：一是应力快速增长阶段，支护结构施作初期，围岩仍处于变形发展阶段，支护结构快速承担围岩传递的应力，应力呈快速增长趋势；二是应力稳定阶段，随着围岩变形的逐渐收敛，支护结构承担的应力趋于稳定，围岩与支护结构的受力达到平衡，此时的应力状态即为新的稳定应力状态。新平衡状态的稳定性取决于支护结构的刚度与强度，若支护结构刚度不足或强度不够，可能导致应力再次调整，引发支护结构破坏或围岩失稳；若支护结构设计合理，新平衡状态可长期保持稳定，保障隧道的长期运营安全。

（四）应力演化的关键影响因素

除开挖方式与支护时机外，围岩力学性质、埋深、地质构造等也是影响应力演化规律的关键因素。围岩力学强度越高，应力重分布过程越平缓，塑性区范围越小，新平衡状态越稳定；埋深越大，天然应力越大，应力重分布过程中的应力集中程度越高，塑性区范围越大；地质构造发育区域，构造应力的存在会改变应力演化的方向与强度，使应力分布更复杂，新平衡状态的稳定性更差。

隧道围岩应力状态研究的核心在于明确自重应力、构造应力、开挖扰动应力的构成与分布特征，采用弹性力学、塑性力学理论构建适配的应力计算模型，厘清开挖全过程的应力演化规律。精准的应力状态研究能够为隧道支护结构设计、施工时机优化、风险防控措施制定提供科学的量化依据，直接保障隧道工程的施工安全与长期稳定性。随着数值模拟技术与现场监测技术的不断发展，围岩应力状态的研究将更加精准、全面，为复杂地质条件下隧道工程的建设提供更强有力

的技术支撑。

第三节 围岩变形特征分析

围岩变形是隧道开挖过程中应力重分布的直接体现，其变形特征与演化规律直接反映围岩的稳定性状态，是判断支护结构合理性、防控工程风险的核心依据。隧道开挖打破天然应力平衡后，围岩在应力作用下会产生不同类型的变形，若变形量超过允许范围或变形速率过快，将导致围岩失稳、支护结构破坏等工程问题。深入识别围岩变形类型，厘清变形影响因素，掌握变形演化规律，能够为优化开挖方案、确定合理支护时机、制定变形控制措施提供科学支撑。随着隧道工程向复杂地质条件与深埋方向发展，围岩变形机制愈发复杂，对变形特征分析的精准性与系统性提出了更高要求。

一、变形类型识别

隧道围岩变形类型依据变形机制、时间效应与可逆性特征，可划分为弹性变形、塑性变形、creep 变形三大核心类型。各类变形在产生机理、表现形式与工程影响上存在显著差异，共同构成围岩的整体变形特征。精准识别变形类型，是分析变形成因、预判变形发展趋势的基础。

（一）弹性变形

弹性变形是指围岩在应力作用下产生的可逆性变形，其核心特征是当应力解除后，变形能够完全恢复，不会在围岩内部残留永久变形。该类变形的产生源于围岩颗粒间的弹性作用，未破坏围岩的内部结构与颗粒连接，是开挖初期最先产生的变形类型。弹性变形的表现形式具有瞬时性与对称性特点。瞬时性体现为弹性变形在开挖卸荷后快速产生，通常在开挖面暴露后的短时间内完成，变形速率随时间快速衰减并趋于稳定；对称性体现为在均质围岩与对称开挖条件下，弹性变形在隧道断面周边呈对称分布，变形量大小与应力大小呈正比，符合胡克定律。弹性变形量的大小主要取决于围岩的弹性模量与泊松比，弹性模量越大，弹性变形量越小；泊松比越大，横向弹性变形越显著。弹性变形本身不会对隧道稳定性产生危害，但弹性变形的快速释放可能引发开挖面的瞬时回弹，需通过及时的初期支护约束变形发展。

（二）塑性变形

塑性变形是指围岩应力超过弹性极限后产生的不可逆性变形，其核心特征是应力解除后，变形无法完全恢复，会在围岩内部残留永久变形。该类变形的产生源于围岩内部颗粒的相对滑动、结构面的剪切错动或岩体的破碎，已破坏围岩的原有结构完整性。塑性变形的表现形式具有渐进性与非对称性特点。渐进性体现为塑性变形随时间逐步发展，变形速率虽低于 creep 变形，但持续时间较长，直至围岩达到新的应力平衡或发生失稳破坏；非对称性体现为塑性变形受地质构造、围岩非均质性、开挖方式等因素影响，在隧道断面周边呈现非对称分布，拱顶沉降、边墙内鼓是最典型的塑性变形表现形式。塑性变形量的大小主要取决于围岩的抗剪强度、应力状态与开挖扰动程度，抗剪强度越低、应力越大、开挖扰动越剧烈，塑性变形量越大。塑性变形是引发围岩失稳的主要诱因，过大的塑性变形会导致支护结构承受超额应力，引发结构开裂或破坏。

（三）creep 变形

creep 变形即蠕变变形，是指围岩在恒定应力作用下，变形随时间持续增长的变形类型，其核心特征是应力未超过弹性极限时仍可能发生，且变形具有明显的时间效应与不可逆性。该类变形的产生源于围岩内部的粘性流动、颗粒重组或结构面的缓慢滑移，是软质围岩、破碎围岩中最显著的变形类型之一。creep 变形的表现形式具有阶段性与持续性特点。根据变形速率的变化，creep 变形通常分为三个阶段：初始蠕变阶段，变形速率随时间快速衰减，变形量增长缓慢；稳态蠕变阶段，变形速率趋于恒定，变形量随时间线性增长，是 creep 变形的主要发展阶段；加速蠕变阶段，变形速率随时间快速增大，变形量急剧增长，直至围岩发生失稳破坏。creep 变形量的大小主要取决于围岩的粘性特性、应力水平与时间，软质围岩的 creep 变形更显著，应力水平越高、时间越长，creep 变形量越大。creep 变形对隧道长期稳定性影响显著，即使施工阶段变形稳定，运营过程中仍可能因 creep 变形累积导致结构病害。

二、变形影响因素

隧道围岩变形是地质条件、工程技术与施工过程等多因素综合作用的结果。其中，地质条件是决定围岩变形的内在核心因素，开挖方法与支护时机是影响变形发展的外在关键因素。厘清各因素的影响机制与作用程度，能够为变形控制措

施的制定提供针对性依据。

（一）地质条件

地质条件是影响围岩变形的根本因素，通过决定围岩的力学性质、应力状态与结构完整性，直接控制变形的类型、大小与发展趋势。核心影响因素包括围岩岩性、地质构造与地下水状态。围岩岩性直接决定其承载能力与变形特性，硬质完整围岩如花岗岩、玄武岩，力学强度高、弹性模量大地质条件，变形以弹性变形为主，变形量小且稳定快；软质围岩如页岩、泥岩、粉质粘土，力学强度低、粘性特性显著，变形以塑性变形与 creep 变形为主，变形量大且持续时间长。地质构造通过破坏围岩完整性加剧变形，断层破碎带、节理密集带等区域的围岩，因结构面切割形成松散块体，变形量远大于完整岩体，且易发生不均匀变形；构造应力的存在会改变变形方向与大小，使变形呈现明显的方向性。地下水通过软化围岩、降低力学强度、产生孔隙水压力等机制加剧变形，尤其对软质围岩与破碎围岩，地下水的渗入会显著增大塑性变形与 creep 变形量，甚至引发突水突泥伴随的大幅变形。

（二）开挖方法

开挖方法通过改变围岩的扰动程度、应力释放速率与应力分布状态，影响变形的发展过程。核心影响体现在开挖断面形状、开挖步距、开挖顺序与爆破参数四个方面。开挖断面形状决定应力集中程度，圆形断面应力集中程度最低，变形量最小；矩形、马蹄形等非圆形断面，拱脚、边墙墙角等部位易形成高应力集中，变形量更大且易发生局部变形。开挖步距越大，单次开挖扰动范围越广，应力释放越剧烈，变形量越大；合理减小开挖步距，能够分阶段释放应力，降低单次变形量，控制变形发展。开挖顺序影响应力重分布的均匀性，对称开挖能够使应力均匀释放，变形分布对称稳定；非对称开挖会导致应力分布不均，引发不均匀变形。爆破参数通过控制爆破振动强度影响变形，爆破振动过大可能加剧围岩破碎，增大变形量；采用光面爆破、预裂爆破等控制爆破技术，能够减少爆破对围岩的扰动，降低变形量。

（三）支护时机

支护时机是控制围岩变形的关键工程因素，通过调节围岩应力释放与支护约束的时间匹配关系，直接影响变形量的大小与稳定性。支护时机过早或过晚，均会对变形控制与工程经济性产生不利影响。支护时机过早，围岩应力未充分释放，

支护结构将承担过多的围岩应力，导致结构受力过大，增加支护成本；同时可能限制围岩的自身承载能力发挥，不利于形成围岩与支护结构的协同承载体系。支护时机过晚，围岩应力过度释放，塑性变形与 creep 变形充分发展，变形量超出允许范围，可能导致围岩失稳，后续需投入更多资源进行加固处理，甚至影响工程进度。合理的支护时机应把握在围岩弹性变形基本完成、塑性变形刚开始发展的阶段，此时施作支护能够有效约束塑性变形与 creep 变形发展，充分发挥围岩自身承载能力，实现变形控制与工程经济性的平衡。支护时机的选择需结合围岩岩性、变形监测数据与工程经验综合判断。

三、变形规律研究

围岩变形规律研究的核心是揭示变形的时间演化规律与空间分布规律，其核心技术手段是现场监测与数值模拟的协同应用。通过现场监测获取真实的变形数据，结合数值模拟分析变形机理与发展趋势，能够实现对变形规律的精准掌握，为变形控制与工程决策提供科学依据。

（一）现场监测揭示变形规律

现场监测是获取围岩真实变形数据的直接手段，通过在隧道周边布设监测点，持续采集变形数据，能够直观反映变形的时间演化与空间分布特征。核心监测项目包括拱顶沉降监测、边墙收敛监测、围岩深部位移监测等。时间演化规律通过变形-时间曲线体现，不同变形类型的时间演化特征存在差异。弹性变形主要发生在监测初期，变形量随时间快速增长后迅速稳定，曲线呈快速上升后趋于平缓的特征；塑性变形发生在弹性变形之后，变形量随时间持续增长，增长速率逐渐衰减，曲线呈缓慢上升后趋于稳定的特征；creep 变形的时间演化曲线则呈现明显的阶段性，依次经历初始蠕变的快速衰减阶段、稳态蠕变的线性增长阶段与加速蠕变的急剧增长阶段。空间分布规律通过不同断面、不同部位的变形量对比体现，在水平方向上，边墙收敛变形量通常大于拱顶沉降变形量；在垂直方向上，拱顶沉降变形量从拱顶向边墙逐渐减小；在隧道轴线方向上，变形量从开挖面向后逐渐减小，影响范围通常为隧道直径的 3 ~ 5 倍。现场监测数据需进行实时分析，当变形量或变形速率超过预警阈值时，需及时采取加固措施。

（二）数值模拟揭示变形规律

数值模拟是深入分析变形机理与预测变形发展趋势的有效手段，通过构建地

质-工程数值模型,模拟隧道开挖与支护全过程,能够量化分析不同因素对变形的影响,揭示变形的内在规律。核心数值模拟方法包括有限元法、离散元法、有限差分法等。数值模拟在时间演化规律研究中的应用,主要通过模拟不同施工阶段的变形发展过程,再现弹性变形、塑性变形与 creep 变形的演化历程,分析变形速率与时间的关系,预测长期 creep 变形量。在空间分布规律研究中的应用,主要通过模拟隧道断面不同部位、不同埋深、不同地质单元的变形分布特征,揭示应力分布与变形分布的对应关系,明确变形集中区域。此外,数值模拟还可通过参数敏感性分析,量化评价围岩力学参数、开挖步距、支护时机等因素对变形的影响程度,为优化工程方案提供量化依据。数值模拟结果需结合现场监测数据进行校准,通过调整模型参数使模拟结果与监测数据吻合,提升模拟的可靠性。

(三) 现场监测与数值模拟的协同应用

现场监测与数值模拟的协同应用是变形规律研究的最优技术路径,能够实现“数据验证-模型优化-规律揭示-预测预警”的闭环分析。其核心思路是将现场监测获取的真实数据作为数值模拟的输入与验证依据,通过数值模拟深入挖掘变形机理,预测变形发展趋势,指导现场监测方案的优化。协同应用的核心流程包括三个环节:一是通过现场监测获取初始变形数据,明确变形的初始特征与发展趋势;二是基于监测数据构建数值模型,校准模型参数,使模拟结果与监测数据保持一致;三是利用校准后的数值模型,分析变形的时间与空间演化规律,预测后续变形发展趋势,若预测变形量超过允许范围,及时调整支护方案并优化监测点布置。通过协同应用,既能发挥现场监测的真实性优势,又能发挥数值模拟的机理分析与预测优势,实现对变形规律的全面、精准掌握,为隧道工程的变形控制提供强有力的技术支撑。

隧道围岩变形特征分析的核心在于精准识别弹性变形、塑性变形、creep 变形的类型特征,厘清地质条件、开挖方法、支护时机的影响机制,通过现场监测与数值模拟的协同应用揭示变形的时间与空间演化规律。深入的变形特征分析能够为优化开挖方案、确定合理支护时机、制定变形控制措施提供科学依据,直接保障隧道工程的施工安全与长期稳定性。随着监测技术与数值模拟技术的不断创新,变形特征分析将朝着智能化、精准化、实时化方向发展,为复杂地质条件下隧道工程的变形控制提供更强有力的支撑。

第四节 围岩稳定性评价方法

围岩稳定性评价是隧道工程力学特性研究的核心落脚点，也是连接理论分析与工程实践的关键环节。隧道开挖后，围岩稳定性直接决定工程施工安全、支护结构合理性与长期运营可靠性。通过构建科学的评价指标体系，选用适配的评价方法，精准判定围岩稳定性状态，能够为支护系统设计优化、施工方法调整、风险防控措施制定提供量化依据。随着隧道工程向深埋、复杂地质区域推进，围岩稳定性影响因素愈发多元，对评价方法的系统性与精准性提出了更高要求。

一、评价指标体系

围岩稳定性评价指标体系是量化判定稳定性状态的基础，核心是选取能够全面、精准反映围岩力学特性与变形演化规律的关键指标，构建“力学特性－变形响应－应力状态”三位一体的综合评价体系。评价指标需具备可量化、易获取、强关联性的特征，能够客观表征围岩从稳定到失稳的演化过程。核心评价指标包括稳定系数、变形速率、应力状态三大类，同时涵盖辅助指标，共同构成完整的评价指标体系。

（一）稳定系数

稳定系数是评价围岩稳定性的核心力学指标，定义为围岩极限承载能力与实际承受应力的比值，直接反映围岩抵抗破坏的安全储备程度。稳定系数大于1时，表明围岩承载能力大于承受应力，处于稳定状态；稳定系数小于1时，表明围岩承载能力不足，存在失稳风险；稳定系数等于1时，围岩处于临界稳定状态。稳定系数的计算核心是精准获取围岩极限承载能力与实际应力。围岩极限承载能力主要取决于岩土体物理力学参数，如抗压强度、抗剪强度等；实际承受应力包括天然应力与开挖扰动应力的叠加值。根据评价对象的不同，稳定系数可分为整体稳定系数与局部稳定系数。整体稳定系数用于评价隧道周边围岩整体的稳定性，反映围岩整体抵抗破坏的能力；局部稳定系数用于评价拱顶、边墙、拱脚等应力集中部位的稳定性，精准识别局部失稳隐患。稳定系数的优势是物理意义明确、计算逻辑清晰，是工程实践中应用最广泛的稳定性评价指标之一。

（二）变形速率

变形速率是评价围岩稳定性的动态响应指标，定义为单位时间内围岩的变形

量，能够实时反映围岩变形的发展趋势，精准捕捉稳定性状态的动态变化。变形速率的大小与变化趋势直接关联围岩稳定性，是判断围岩是否趋于稳定或临近失稳的关键依据。核心变形速率指标包括瞬时变形速率、累计变形速率与变形速率衰减系数。瞬时变形速率反映某一时刻围岩的变形发展强度，开挖初期瞬时变形速率较大，随着围岩逐渐稳定，速率快速衰减；累计变形速率反映一定时间段内的变形累积程度，用于判断变形是否超出允许范围；变形速率衰减系数反映变形速率的变化趋势，衰减系数大于 0 时，变形速率逐渐减小，围岩趋于稳定；衰减系数小于 0 时，变形速率逐渐增大，围岩存在失稳风险。变形速率指标主要通过现场实时监测获取，如拱顶沉降速率、边墙收敛速率等，具有实时性强、灵敏度高的特点，能够及时预警潜在的失稳风险。

（三）应力状态

应力状态是评价围岩稳定性的本质指标，直接决定围岩的变形与破坏趋势。应力状态评价主要通过分析围岩的应力分布特征、应力集中程度与应力水平，判断围岩是否超过弹性极限进入塑性状态，进而判定稳定性。核心应力评价指标包括最大主应力、最小主应力、应力集中系数与塑性区范围。最大主应力与最小主应力的比值反映应力的各向异性程度，比值越大，围岩越易发生剪切破坏；应力集中系数反映隧道周边应力集中的程度，系数越大，局部围岩承受的应力越大，失稳风险越高；塑性区范围反映围岩因应力超过弹性极限产生塑性变形的区域大小，塑性区范围越大，围岩稳定性越差，若塑性区贯通则可能导致整体失稳。应力状态指标需通过应力计算或现场应力监测获取，能够从本质上揭示围岩稳定性的内在机理。

（四）辅助评价指标

除核心指标外，辅助评价指标包括围岩完整性系数、地下水渗流量、支护结构应力等，用于补充完善评价体系，提升评价结果的全面性。围岩完整性系数反映围岩的破碎程度，系数越大，围岩越完整，稳定性越好；地下水渗流量反映地下水对围岩的软化与渗透作用，渗流量越大，围岩力学性质劣化越严重，稳定性越差；支护结构应力反映支护与围岩的协同承载状态，若支护结构应力接近或超过设计强度，表明围岩稳定性不足，需及时调整支护方案。

二、评价方法应用

围岩稳定性评价方法需结合工程条件、地质复杂程度与评价精度要求合理选用，核心思路是根据不同评价阶段的需求，选择单一方法或组合方法开展评价。目前主流的评价方法包括极限平衡法、数值分析法、模糊综合评价法，各类方法在原理、适用场景与精度上存在差异，需精准匹配工程实际需求。

（一）极限平衡法

极限平衡法是基于刚体平衡原理的稳定性评价方法，核心思路是将围岩划分为若干刚性块体，通过分析块体在重力、应力、支护力等作用下的平衡状态，判断块体是否发生滑动或坍塌，进而评价围岩稳定性。该方法假设块体间无相对变形，仅考虑整体平衡，计算逻辑简便直观。极限平衡法的适用场景包括浅埋隧道、地质构造简单的隧道，尤其适用于评价断层破碎带、节理密集带等由离散块体构成的围岩稳定性。常用的极限平衡法包括块体平衡法、楔体平衡法等，块体平衡法适用于评价单个离散块体的稳定性，楔体平衡法适用于评价由两个或多个结构面切割形成的楔形体稳定性。该方法的优点是计算简便、效率高、无需复杂的数值计算，适用于工程初步设计阶段的快速稳定性筛查；缺点是未考虑围岩的变形特性与应力重分布过程，评价精度相对较低，不适用于复杂地质条件或深埋隧道的精准评价。

（二）数值分析法

数值分析法是基于连续介质力学或离散介质力学理论，通过构建数值模型模拟隧道开挖与支护全过程，分析围岩的应力、变形与塑性区分布，进而评价稳定性的方法。该方法能够充分考虑围岩的非均质性、非线性变形特性与应力重分布过程，评价精度高，适用于复杂地质条件下的精准评价。数值分析法的适用场景包括深埋隧道、复杂地质条件隧道（如含多条断层、软质围岩、非均质围岩），以及工程详细设计阶段的精准稳定性评价。常用的数值分析方法包括有限元法、有限差分法、离散元法等。有限元法适用于模拟连续介质围岩的应力与变形，精度高，应用范围广；有限差分法适用于模拟大变形与动态施工过程，计算效率高；离散元法适用于模拟离散块体围岩的滑动与坍塌，能够精准反映块体间的相互作用。数值分析法的优点是评价精度高、能够揭示稳定性的内在机理、可预测长期稳定性；缺点是计算过程复杂、对参数选取敏感、需专业技术人员操作，计算成

本相对较高。

（三）模糊综合评价法

模糊综合评价法是基于模糊数学理论的综合评价方法，核心思路是针对围岩稳定性影响因素的模糊性与不确定性，通过建立评价指标体系，确定各指标的权重，运用模糊集合理论对围岩稳定性进行综合判定。该方法能够有效处理定性指标与定量指标的融合问题，提升评价结果的全面性。模糊综合评价法的适用场景包括地质条件复杂、影响因素多元的隧道，尤其适用于需综合考虑定性指标的综合稳定性评价，如隧道围岩分级配套的稳定性评价、复杂地质区域的多因素稳定性判定。该方法的核心流程包括建立评价指标体系、确定指标权重、构建模糊评价矩阵、进行模糊合成与结果判定。优势是能够综合考虑多因素的影响，有效处理不确定性问题，评价结果更全面；缺点是指标权重的确定受主观经验影响较大，评价精度依赖于指标体系的合理性与数据的可靠性，不适用于单一因素主导的稳定性评价。

（四）评价方法的适配选择逻辑

评价方法的选择需遵循“阶段适配、精度匹配、经济高效”的原则。工程初步设计阶段，优先选用极限平衡法进行快速稳定性筛查，锁定重点风险区域；工程详细设计阶段，针对重点风险区域采用数值分析法进行精准评价，获取详细的应力、变形数据；对于地质条件复杂、多因素影响的隧道，可采用模糊综合评价法进行综合判定，结合极限平衡法与数值分析法的结果提升评价可靠性。在实际工程应用中，可采用“初步评价－精准验证－综合判定”的思路，通过多种方法的协同应用，确保评价结果的精准性与全面性。

三、评价结果应用

围岩稳定性评价结果的核心应用价值是为隧道工程的支护系统设计、施工方法优化与风险防控提供科学依据，实现“评价－设计－施工”的闭环管控。评价结果需结合工程实际需求进行针对性应用，确保将理论评价转化为切实可行的工程措施，保障工程安全与经济高效。

（一）支护系统设计优化

稳定性评价结果是支护系统设计的核心依据，通过明确围岩的稳定性等级，精准匹配支护结构的类型、强度与刚度，实现支护设计的差异化与合理化。不同

稳定性等级对应不同的支护方案，避免过度支护或支护不足。对于稳定性等级高的区域，围岩自身承载能力强，可采用简易支护或局部支护，如喷射混凝土 + 锚杆的浅埋支护，减少支护成本；对于稳定性等级中等的区域，需采用常规支护方案，如喷射混凝土 + 锚杆 + 钢筋网的组合支护，确保围岩与支护的协同承载；对于稳定性等级低的区域，需采用强化支护方案，如管棚超前支护 + 二次衬砌 + 钢架的复合支护，必要时增设注浆加固措施，提升围岩承载能力。此外，评价结果中的塑性区范围、应力集中部位等数据，可指导支护结构的重点布设，如在应力集中的拱脚、边墙部位加强支护强度，提升支护的针对性。

（二）施工方法优化调整

稳定性评价结果能够指导施工方法的优化调整，通过匹配围岩稳定性状态，选择合理的开挖方式、开挖步距与施工顺序，减少施工对围岩的扰动，控制稳定性风险。对于稳定性差的破碎围岩或断层区域，需采用分步开挖方法，如 CD 法、CRD 法，减小单次开挖扰动范围，分阶段释放应力；对于稳定性中等的围岩，可采用台阶法开挖，平衡施工效率与稳定性；对于稳定性高的完整围岩，可采用全断面开挖，提升施工效率。同时，评价结果中的变形速率与应力演化规律，可指导开挖步距的调整，稳定性差的区域需减小开挖步距，缩短围岩暴露时间；稳定性高的区域可增大开挖步距，提升施工效率。施工顺序的优化需结合应力分布特征，采用对称开挖减少应力分布不均，避免引发不均匀变形。

（三）风险防控与施工监测方案制定

稳定性评价结果能够精准识别高风险区域，为风险防控措施制定与施工监测方案优化提供依据，实现风险的提前规避与实时管控。针对评价识别的高失稳风险区域，需制定专项风险防控预案，如超前地质探测、超前注浆加固、应急撤离方案等，提前规避风险；在施工过程中，需基于评价结果优化监测方案，在高风险区域加密监测点、提高监测频率，重点监测变形速率与应力变化，确保及时捕捉风险预警信号。对于评价结果为临界稳定的区域，需建立动态管控机制，实时分析监测数据与评价结果的匹配性，若监测数据异常需及时调整支护方案与施工方法，确保工程安全。

（四）工程运营阶段的稳定性管控

围岩稳定性评价结果不仅适用于施工阶段，还可为运营阶段的稳定性管控提供依据。通过施工阶段的稳定性评价，预判运营阶段可能出现的长期变形（如蠕

变变形)与稳定性隐患,制定运营阶段的长期监测方案与维护措施。对于存在长期蠕变风险的软质围岩区域,运营阶段需持续监测变形发展,若变形量累积超过允许范围,需及时采取加固维护措施;对于地下水富集区域,需基于评价结果优化排水系统,控制地下水渗流量,避免长期渗透作用导致围岩稳定性劣化。此外,评价结果可指导运营阶段的病害防治,提前识别可能出现的衬砌开裂、围岩剥落等病害区域,制定针对性的维护策略,保障隧道长期运营安全。

隧道围岩稳定性评价方法的核心在于构建“核心指标+辅助指标”的综合评价体系,精准选用极限平衡法、数值分析法、模糊综合评价法等适配方法,将评价结果有效应用于支护系统设计、施工方法优化与运营阶段管控。科学的稳定性评价能够实现隧道工程的精细化管控,平衡工程安全与经济性,为复杂地质条件下隧道工程的建设与运营提供强有力的技术支撑。随着评价技术与监测技术的不断创新,稳定性评价将朝着智能化、实时化、精准化方向发展,进一步提升隧道工程的安全管控水平。

第四章 隧道结构设计理论

第一节 隧道结构设计原则

隧道结构设计是隧道工程建设的核心环节，其设计质量直接决定工程的安全性、经济性、适用性与耐久性。隧道结构作为承受围岩压力、传递荷载、保障通行安全的核心载体，需在复杂地质环境与长期运营荷载作用下保持稳定可靠。隧道结构设计原则是指导设计工作开展的核心准则，明确设计的核心目标、关键维度与实施路径，为设计方案的制定、优化与验证提供根本遵循。随着隧道工程向深埋、长距离、大断面、复杂地质区域发展，以及对工程功能、环境效益要求的不断提升，隧道结构设计面临更多挑战，对设计原则的系统性与适配性提出了更高要求。

一、核心设计原则

核心设计原则是隧道结构设计的根本遵循，明确设计工作的核心目标与价值导向，贯穿设计全过程。隧道结构设计需以核心设计原则为统领，统筹平衡安全、技术、经济、环境四大核心维度，确保设计成果既满足工程安全需求，又具备技术可行性与经济合理性，同时兼顾环境友好性。核心设计原则包括安全可靠、技术先进、经济合理、环境友好四个关键方面，各方面相互关联、相互制约，共同构成隧道结构设计的核心价值体系。

（一）安全可靠原则

安全可靠是隧道结构设计的首要原则，核心要求是隧道结构在施工阶段、运营阶段及极端工况下，均能有效承受各类荷载作用，保持结构完整性与稳定性，保障人员、设备与通行安全。安全可靠原则是设计工作的底线要求，任何设计方案均不得突破安全红线。

安全可靠原则的核心实施要求体现在荷载取值、结构强度与刚度设计、稳定性保障三个方面。荷载取值需全面覆盖各类作用荷载，包括围岩压力、地下水压

力、施工荷载、运营荷载、地震荷载、温度荷载等，确保荷载取值的全面性与精准性，避免因荷载遗漏或取值不足导致结构安全隐患；结构强度与刚度设计需满足规范要求的安全储备，通过精准的力学计算，确保结构各部位的应力、应变均控制在允许范围内，避免出现结构开裂、变形过大或失稳破坏；稳定性保障需兼顾整体稳定与局部稳定，针对隧道拱顶、边墙、拱脚、仰拱等关键部位，强化结构设计，同时采取合理的支护措施与加固方案，提升围岩与结构的协同承载能力。此外，安全可靠原则还要求设计方案具备一定的抗风险能力，能够应对地质条件突变、荷载异常等突发情况，确保隧道结构在极端工况下仍能保障基本安全。

（二）技术先进原则

技术先进原则要求隧道结构设计紧跟行业技术发展趋势，合理采用成熟、先进的设计理念、技术方法与材料设备，提升设计质量与工程效益。技术先进并非盲目追求前沿技术，而是在保障安全可靠的基础上，通过技术创新与优化，解决复杂地质条件与工程需求带来的设计难题，提升隧道结构的耐久性、适用性与可维护性。

技术先进原则的核心实施要求包括设计理念创新、技术方法优化、材料设备升级三个方面。设计理念创新需突破传统设计思维的局限，采用协同承载理念，充分发挥围岩的自身承载能力，实现围岩与支护结构的协同工作；采用数字化设计理念，借助 BIM 技术构建三维设计模型，实现设计过程的可视化、协同化与精细化。技术方法优化需合理采用先进的力学计算模型与数值模拟技术，精准分析隧道结构的受力与变形特征，提升设计计算的精准度；采用信息化监测与反馈设计方法，结合施工过程中的监测数据，动态优化设计方案，实现设计与施工的动态适配。材料设备升级需选用高性能、耐久性强的新型材料，如高强度混凝土、纤维增强复合材料等，提升结构的抗裂性与耐久性；采用先进的施工设备与工艺，如智能化衬砌台车、自动化喷射混凝土设备等，保障设计方案的有效实施。

（三）经济合理原则

经济合理原则要求隧道结构设计在保障安全可靠与技术先进的前提下，统筹考虑工程投资、施工成本、运营维护成本等全周期经济费用，优化设计方案，实现工程效益的最大化。经济合理并非单纯追求成本最低，而是通过方案优化，在满足工程需求的基础上，平衡前期投资与后期运营维护成本，避免因过度设计导致投资浪费，或因设计不足导致后期维护成本激增。

经济合理原则的核心实施要求体现在方案优化、成本控制、效益平衡三个方面。方案优化需通过多方案比选，从地质条件适配性、施工可行性、经济成本等多个维度，筛选最优设计方案，如合理选择隧道断面形状、支护结构类型与参数，优化施工步距与工序；采用差异化设计策略，针对不同地质区域与工程部位，制定精准的设计方案，避免全域统一设计导致的成本浪费。成本控制需精准计算工程投资，严格控制设计变更，避免因设计失误或考虑不周导致的额外投资；合理选用材料与设备，在满足性能要求的前提下，优先选用性价比高的材料与设备，降低施工成本。效益平衡需兼顾前期投资与后期运营维护成本，如通过提升结构耐久性设计，减少运营阶段的维修加固费用；采用便于维护的结构设计，降低运营维护的难度与成本，实现工程全周期的经济合理性。

（四）环境友好原则

环境友好原则要求隧道结构设计充分考虑工程建设与运营对周边自然环境、生态环境与社会环境的影响，采取针对性措施减少负面影响，实现工程建设与环境的和谐共生。随着环保要求的不断提高，环境友好已成为隧道结构设计的重要考量因素，设计方案需符合国家环保法规与政策要求，兼顾生态保护与社会影响。

环境友好原则的核心实施要求包括生态保护、污染控制、社会影响协调三个方面。生态保护需充分调研隧道沿线的生态环境敏感区域，如自然保护区、水源涵养地、珍稀动植物栖息地等，优化隧道线路与洞口位置，避免破坏生态环境；采用环保型施工方法与材料，减少施工过程中对土壤、水体与大气的污染，保护生态平衡。污染控制需针对施工过程中的粉尘、噪声、废水、废渣等污染物，设计合理的处理方案，如设置粉尘净化设备、噪声屏障、废水处理系统等，降低污染物排放；针对运营阶段的车辆尾气、噪声等，设计合理的通风与降噪系统，减少对周边环境的影响。社会影响协调需充分考虑隧道建设对周边居民生活、交通出行、文化古迹等的影响，优化洞口设计与施工组织方案，减少施工对周边居民生活的干扰；针对文化古迹区域，采取避让或保护措施，确保文化遗产的安全。

二、适配性设计原则

适配性设计原则是隧道结构设计的关键准则，核心要求是设计方案需与工程所处的地质条件、功能需求、施工工艺等具体工程条件精准匹配，确保设计方案的可行性与有效性。隧道工程具有显著的个性化特征，不同工程的地质条件、功

能定位与施工能力存在差异，照搬套用现有设计方案难以满足实际需求。适配性设计原则强调设计的针对性与灵活性，通过精准分析工程具体条件，制定差异化的设计方案，实现设计与工程实际的精准对接。

（一）与地质条件适配

地质条件是影响隧道结构设计的核心因素，适配性设计首先要求设计方案与地质条件精准匹配，根据不同的地质类型、围岩等级、地质构造与地下水状态，制定差异化的结构设计方案。地质条件的复杂性直接决定设计方案的难度与安全性，设计需充分利用有利地质条件，规避或克服不利地质因素。

与地质条件适配的核心实施要求包括围岩分级适配、地质构造应对、地下水处理三个方面。围岩分级适配需根据围岩的力学性质、完整性与稳定性，划分不同的围岩等级，针对不同等级的围岩制定差异化的支护结构方案，如硬质完整围岩可采用简易支护，软质破碎围岩需采用强化支护，断层破碎带需采用超前加固与复合支护相结合的方案；地质构造应对需针对隧道穿越的断层、节理、褶皱等地质构造，优化结构设计，如在断层破碎带增大支护结构强度，采用柔性支护适应结构变形，避免地质构造运动导致结构破坏；地下水处理需根据地下水的赋存状态与渗流量，设计合理的排水与堵水方案，如富水区域采用“以堵为主、堵排结合”的策略，减少地下水对结构的侵蚀与压力，确保结构稳定。

（二）与功能需求适配

功能需求是隧道结构设计的核心导向，适配性设计要求设计方案充分满足隧道的使用功能要求，根据隧道的类型、通行对象、运营标准等功能定位，制定针对性的结构设计方案。不同类型的隧道具有不同的功能需求，如公路隧道需满足车辆通行的净空、视野与安全要求，铁路隧道需满足列车运行的平顺性与安全性要求，市政隧道需兼顾管线敷设与通行功能，功能需求的差异直接决定结构设计的核心参数与方案。

与功能需求适配的核心实施要求包括断面尺寸适配、净空标准满足、附属设施配套三个方面。断面尺寸适配需根据通行对象的类型与流量，确定合理的隧道断面形状与尺寸，如公路隧道需根据设计车速与车道数量确定断面宽度与高度，铁路隧道需根据列车类型确定断面尺寸与限界；净空标准满足需严格遵循相关规范要求，确保隧道内部净空能够满足通行对象的安全通行需求，避免因净空不足导致通行安全隐患；附属设施配套需根据功能需求配置合理的通风、照明、排水、

消防、监控等附属设施，如长距离公路隧道需设计机械通风系统，市政隧道需预留管线敷设空间，确保隧道功能的全面实现。

（三）与施工工艺适配

施工工艺是设计方案落地实施的关键保障，适配性设计要求设计方案与现场施工工艺、设备能力与技术水平精准匹配，确保设计方案能够通过现有施工技术实现，同时兼顾施工效率与质量控制。设计方案若脱离施工实际，将导致施工难度增加、质量难以保障，甚至无法实施，因此设计需充分考虑施工可行性，实现设计与施工的协同优化。

与施工工艺适配的核心实施要求包括施工方法适配、设备能力匹配、施工质量保障三个方面。施工方法适配需根据隧道的地质条件、断面尺寸与长度，选择合理的施工方法，如全断面开挖法适用于硬质完整围岩与大断面隧道，分步开挖法适用于软质破碎围岩，设计方案需与选定的施工方法相适配，优化结构分段与支护时机；设备能力匹配需考虑现场施工设备的技术参数与性能，如衬砌台车的尺寸与承载能力、钻机的钻孔深度与精度等，确保设计方案中的结构参数能够通过现有设备实现；施工质量保障需设计便于质量控制的构造形式与施工工序，如采用标准化的衬砌模板，优化钢筋布置与混凝土浇筑工艺，减少施工质量隐患，确保设计要求的结构强度与耐久性能够实现。

三、全生命周期原则

全生命周期原则要求隧道结构设计统筹考虑隧道从施工阶段、运营阶段到维护阶段的全周期需求，实现设计方案的全周期适配与优化，提升隧道工程的全生命周期效益。隧道工程作为大型永久性基础设施，其生命周期长达数十年甚至上百余年，不同阶段的需求与挑战存在差异，设计若仅关注单一阶段，将导致全生命周期内的效益失衡。全生命周期原则强调设计的系统性与前瞻性，通过全周期考量，平衡各阶段的需求与成本，确保隧道工程在全生命周期内保持安全、稳定、高效的运行状态。

（一）施工阶段的设计考量

施工阶段是隧道结构形成的关键阶段，全生命周期设计要求设计方案充分考虑施工阶段的可行性、安全性与经济性，为施工过程提供科学指导，减少施工风险与成本。施工阶段的设计考量需聚焦于施工过程中的荷载作用、结构受力特征

与施工安全保障，确保设计方案与施工过程精准适配。

施工阶段设计考量的核心实施要求包括施工荷载适配、临时支护设计、施工监测与反馈三个方面。施工荷载适配需充分考虑施工过程中产生的各类临时荷载，如施工设备重量、材料堆放荷载、爆破振动荷载等，在设计中预留合理的安全储备，避免临时荷载导致结构损坏；临时支护设计需针对施工过程中围岩的临时稳定需求，设计合理的临时支护结构与参数，如超前支护、临时钢架等，保障施工过程中的围岩稳定与人员安全；施工监测与反馈需设计完善的施工监测方案，明确监测指标、监测频率与预警阈值，通过监测数据实时掌握围岩与结构的受力变形状态，及时优化调整设计方案，实现设计与施工的动态适配。

（二）运营阶段的设计考量

运营阶段是隧道结构发挥功能的核心阶段，全生命周期设计要求设计方案充分满足运营阶段的使用功能、安全保障与耐久性需求，确保隧道在长期运营荷载作用下保持稳定可靠。运营阶段的设计考量需聚焦于长期荷载作用下的结构性能演化、运营安全保障与功能优化，提升隧道的运营效益与安全性。

运营阶段设计考量的核心实施要求包括长期荷载适配、耐久性设计、运营安全保障三个方面。长期荷载适配需充分考虑运营过程中的各类长期荷载，如车辆荷载、列车荷载、温度变化荷载、地下水长期作用等，精准分析长期荷载对结构的影响，确保结构在长期荷载作用下不出现过度变形或损坏；耐久性设计需针对运营阶段的环境因素，如湿度、温度、有害物质侵蚀等，采用高性能耐久材料与防护措施，提升结构的抗裂性、抗渗性与抗侵蚀能力，减少运营阶段的维修成本；运营安全保障需设计完善的运营安全防护系统，如消防系统、应急疏散系统、监控系统等，确保隧道在运营过程中能够及时应对各类安全事故，保障通行安全。

（三）维护阶段的设计考量

维护阶段是保障隧道结构长期稳定与功能持续发挥的关键阶段，全生命周期设计要求设计方案充分考虑维护阶段的便利性、经济性与有效性，减少维护难度与成本，提升维护效率。维护阶段的设计考量需聚焦于结构维护的可达性、可检测性与可修复性，为维护工作提供便利条件。

维护阶段设计考量的核心实施要求包括维护可达性设计、检测便利性设计、可修复性设计三个方面。维护可达性设计需在隧道结构设计中预留合理的维护通道与作业空间，如设置检修平台、预留设备安装空间等，确保维护人员与设备能

够便捷到达维护部位；检测便利性设计需考虑结构检测的需求，在关键部位设置检测孔、观测点等，便于采用先进的检测技术对结构性能进行实时监测与评估；可修复性设计需采用便于修复的结构形式与材料，避免采用难以更换或修复的结构构件，减少维护过程中的拆除与重建工作，降低维护成本与对运营的影响。

（四）全生命周期的协同优化

全生命周期原则的核心目标是实现各阶段的协同优化，避免单一阶段的需求优先导致全生命周期效益失衡。协同优化需通过全生命周期成本分析，平衡施工阶段的投资成本、运营阶段的能耗成本与维护阶段的维修成本，筛选全生命周期效益最优的设计方案；同时，建立设计、施工、运营、维护全流程的协同机制，确保各阶段的信息有效传递，设计方案能够根据施工、运营与维护过程中的实际情况进行动态优化，提升隧道工程的全生命周期价值。

隧道结构设计原则是指导隧道结构设计工作的核心准则，核心设计原则明确了安全、技术、经济、环境的核心价值导向，适配性设计原则确保了设计方案与地质条件、功能需求、施工工艺的精准匹配，全生命周期原则实现了各阶段需求的协同优化。三大设计原则相互支撑、有机融合，共同构成隧道结构设计的完整准则体系。在实际工程设计中，需以核心设计原则为统领，结合适配性设计原则与全生命周期原则，制定科学合理的设计方案，确保隧道工程既满足安全可靠的核心要求，又具备良好的技术经济性与环境适应性，同时实现全生命周期的效益最大化。随着隧道工程技术的不断发展与设计理念的持续创新，隧道结构设计原则将不断丰富完善，为复杂地质条件与高要求下的隧道工程设计提供更强有力的指导。

第二节 荷载分析与计算

荷载分析与计算是隧道结构设计的核心前提与基础，直接决定隧道结构的选型、尺寸参数与安全储备。隧道结构在全生命周期内承受多种荷载的综合作用，荷载的大小、分布与作用方式直接影响结构的受力状态与稳定性。精准完成荷载类型划分、科学选用荷载计算方法、严格遵循荷载组合原则，能够为隧道结构设计提供精准的荷载输入，确保设计成果的安全可靠与经济合理。随着隧道工程向深埋、复杂地质区域发展，荷载环境愈发复杂，对荷载分析与计算的精准性、系

统性提出了更高要求。

一、荷载类型划分

隧道结构承受的荷载类型多样，根据荷载的来源、性质与作用阶段，可划分为永久荷载、可变荷载与偶然荷载三大类别。各类荷载在作用时间、影响范围与不确定性上存在显著差异，明确荷载类型划分是开展荷载计算与组合的基础。核心荷载类型包括围岩压力、地下水压力、结构自重、运营荷载等，不同荷载类型的作用机制与影响程度需精准识别，为后续计算工作提供清晰导向。

（一）永久荷载

永久荷载是指在隧道全生命周期内持续作用、大小与方向基本保持不变的荷载，是隧道结构设计的主要荷载，直接决定结构的长期受力状态。永久荷载的计算精度对结构设计的安全性与经济性具有决定性影响，需全面覆盖各类核心永久荷载类型。核心永久荷载包括围岩压力、地下水压力与结构自重。围岩压力是隧道结构承受的最主要永久荷载，是围岩因开挖卸荷产生变形或破坏时作用于支护结构的压力，其大小与围岩等级、地质构造、开挖方式密切相关，分为松动压力、形变压力、冲击压力等形式；地下水压力是地下水作用于隧道结构表面的静水压力或动水压力，其大小取决于地下水埋深、渗流量与渗透路径，分为全水头压力与部分水头压力，对结构的抗渗性与稳定性影响显著；结构自重是隧道衬砌、仰拱等主体结构自身重量产生的荷载，其大小由结构尺寸与材料密度决定，均匀分布于结构自身，是结构竖向受力的重要组成部分。此外，永久荷载还包括长期作用于结构的温度应力荷载，由隧道内外环境温度差异或混凝土水化热产生，在寒区或温差较大区域对结构的影响尤为突出。

（二）可变荷载

可变荷载是指在隧道全生命周期内作用时间不固定、大小与方向可能随时变化的荷载，其作用具有随机性与周期性，需结合运营需求与环境条件合理取值。可变荷载虽不持续作用，但部分荷载的峰值较大，可能对结构安全产生显著影响，需精准识别其作用特征。核心可变荷载包括运营荷载、施工荷载与环境荷载。运营荷载是隧道运营阶段产生的荷载，根据隧道类型不同分为公路隧道的车辆荷载、铁路隧道的列车荷载、市政隧道的人群与管线荷载等，其大小与分布取决于通行能力与运营标准；施工荷载是隧道施工阶段产生的临时荷载，包括施工设备重量、

材料堆放荷载、爆破振动荷载、临时支撑反力等，作用时间较短但不确定性较大，需结合施工方案合理预判；环境荷载是由自然环境变化产生的可变荷载，包括风荷载、积雪荷载等，主要作用于隧道洞口及浅埋段结构，其大小与区域气候条件相关。可变荷载的取值需遵循相关规范要求，结合工程实际情况确定荷载标准值与组合值。

（三）偶然荷载

偶然荷载是指在隧道全生命周期内发生概率极低，但一旦发生将产生极大破坏作用的荷载。偶然荷载的作用具有突发性与破坏性，需在设计中预留足够的安全储备，避免因偶然荷载作用导致结构失效。核心偶然荷载包括地震荷载、地质灾害荷载与爆炸荷载等。地震荷载是地震活动产生的惯性力与地震波作用，其大小取决于地震烈度、场地类别与结构自振特性，可能导致隧道结构开裂、坍塌或围岩失稳；地质灾害荷载包括滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害对隧道结构的冲击作用，主要影响隧道洞口及山体边坡附近段落；爆炸荷载是隧道内发生爆炸事故时产生的瞬时冲击波压力，作用时间极短但峰值极高，对结构的破坏具有突发性与毁灭性。偶然荷载的取值需结合工程所处区域的风险等级，遵循规范要求确定荷载代表值，确保结构具备一定的抗偶然荷载能力。

二、荷载计算方法

荷载计算方法的核心目标是基于围岩分级、地质参数与工程条件，构建科学的量化计算模型，精准确定各类荷载的大小与分布。不同荷载类型的计算原理与方法存在差异，需结合荷载特性与工程实际选用适配的计算方法。荷载计算需以地质勘察数据为基础，确保计算参数的精准性，同时遵循相关规范要求，保障计算结果的可靠性与适用性。

（一）围岩压力计算方法

围岩压力计算是荷载计算的核心内容，核心思路是基于围岩分级与地质参数，通过理论模型或经验公式量化围岩压力大小。常用的围岩压力计算方法包括理论分析法与经验公式法，需根据围岩类型与工程条件合理选用。理论分析法基于岩土力学理论，通过分析围岩的应力重分布与变形特征，推导围岩压力计算模型。常用的理论模型包括松动压力理论、形变压力理论与弹性地基梁理论。松动压力理论假设围岩开挖后形成松动体，围岩压力为松动体自重，适用于松散破碎围岩；

形变压力理论假设围岩为弹性或塑性体，围岩压力为围岩变形产生的挤压压力，适用于完整或中等完整围岩；弹性地基梁理论将隧道衬砌视为弹性地基上的梁，通过分析梁的受力与变形，反算围岩的弹性抗力，适用于硬质完整围岩。经验公式法基于大量工程实践数据总结，通过围岩分级确定计算参数，代入规范推荐的经验公式计算围岩压力，具有计算简便、适用性强的特点，是工程实践中应用最广泛的方法。经验公式的选用需严格匹配工程的围岩分级与地质条件，确保计算结果的精准性。

（二）地下水压力计算方法

地下水压力计算需基于地下水勘察数据，结合隧道结构的防水设计方案，量化地下水对结构的作用压力。核心计算方法包括静水压力计算法与动水压力计算法，分别适用于不同的地下水渗流状态。静水压力计算法适用于地下水渗流缓慢、基本处于静止状态的场景，地下水压力为计算点至地下水位的水头高度与水的重度的乘积。计算过程中需明确地下水位高程与结构各计算点的深度，根据地下水的赋存状态确定是否考虑浮力作用，对于仰拱及结构底部，需计入地下水浮力对结构的影响。动水压力计算法适用于地下水渗流速度较快的场景，如富水断层破碎带、岩溶发育区域，动水压力大小与渗流速度、水的重度及渗透系数相关，需通过渗流场分析确定渗流速度分布，进而计算动水压力。地下水压力计算还需结合防水设计方案，若采用“以堵为主”的防水策略，需考虑防水衬砌的阻水作用，对地下水压力进行折减；若采用“以排为主”的防水策略，需按排水后降低的地下水位计算地下水压力。

（三）其他荷载计算方法

结构自重计算采用体积加权法，通过计算结构各组成部分的体积与对应材料的重度，累加得到结构总自重。计算过程中需精准划分结构构件，明确各构件的尺寸与材料参数，确保体积计算的精准性，常用材料重度可参考规范推荐值，特殊材料需结合试验数据确定。运营荷载计算需根据隧道类型与运营标准，选用规范规定的荷载标准值与计算模型。公路隧道车辆荷载采用车道荷载与车辆荷载组合的方式，通过影响线方法计算荷载对结构的最不利作用；铁路隧道列车荷载采用规范规定的列车荷载图式，结合列车运行速度与轨道类型，计算列车荷载对隧道结构的动力作用；市政隧道人群荷载与管线荷载根据使用功能确定，人群荷载按人均重量与人群密度计算，管线荷载按管线自重与介质重量累加计算。偶然荷

载计算需结合工程所处区域的风险等级，遵循规范要求确定荷载代表值。地震荷载计算采用反应谱法或时程分析法，根据工程区域的地震烈度、场地类别与结构自振周期，计算结构的地震惯性力；地质灾害荷载与爆炸荷载根据风险评估结果，采用等效静载法将其转化为静力荷载，确保结构具备足够的抗破坏能力。

三、荷载组合原则

荷载组合原则的核心是根据隧道结构的受力状态与设计要求，将不同类型的荷载按一定逻辑组合，确定结构在不同极限状态下的最不利荷载组合，为结构强度、刚度与稳定性计算提供依据。荷载组合需遵循“安全可靠、经济合理”的原则，既要确保结构在最不利荷载作用下具备足够的安全储备，又要避免过度组合导致设计浪费。核心组合逻辑按承载能力极限状态与正常使用极限状态划分，不同极限状态的荷载组合方法与目标存在差异。

（一）承载能力极限状态荷载组合

承载能力极限状态是指结构达到最大承载能力或发生不适于继续承载的变形，其荷载组合的目标是确保结构在最不利荷载组合作用下，不发生破坏或失稳。该组合需考虑永久荷载、可变荷载与偶然荷载的最不利组合，采用荷载设计值进行计算，荷载设计值为荷载标准值乘以相应的荷载分项系数。承载能力极限状态荷载组合分为基本组合与偶然组合。基本组合用于计算结构在正常使用过程中可能遇到的最不利荷载组合，由永久荷载与可变荷载组合而成，组合表达式为永久荷载设计值与可变荷载设计值的累加。永久荷载分项系数根据其结构的有利或不利作用确定，不利作用时取较大值，有利作用时取较小值；可变荷载分项系数根据荷载类型与作用程度确定，运营荷载、施工荷载等主要可变荷载取规范推荐的标准值。偶然组合用于计算结构在偶然荷载作用下的承载能力，由永久荷载、可变荷载与偶然荷载组合而成，组合表达式为永久荷载设计值、可变荷载设计值与偶然荷载设计值的累加。偶然荷载分项系数取规范规定的专用系数，同时需对可变荷载进行适当折减，确保组合结果的合理性。

（二）正常使用极限状态荷载组合

正常使用极限状态是指结构达到正常使用或耐久性能的某项规定限值，其荷载组合的目标是确保结构在使用过程中不产生影响正常使用的变形、裂缝或渗漏。该组合需考虑永久荷载与可变荷载的长期作用与短期作用组合，采用荷载标准值

或组合值进行计算，无需考虑偶然荷载。正常使用极限状态荷载组合分为长期组合与短期组合。长期组合用于计算结构在长期荷载作用下的变形与耐久性，由永久荷载标准值与可变荷载长期值组合而成，可变荷载长期值为可变荷载标准值乘以长期系数，适用于结构长期变形、混凝土徐变、钢筋锈蚀等耐久性计算。短期组合用于计算结构在短期荷载作用下的瞬时变形与裂缝宽度，由永久荷载标准值与可变荷载标准值组合而成，适用于结构裂缝宽度验算、短期位移控制等计算。荷载组合过程中需根据结构的使用功能与设计要求，选择对应的组合形式，确保结构的正常使用性能。

（三）荷载组合的适配性要求

荷载组合需结合隧道结构的类型、部位与设计阶段，进行针对性组合，确保组合结果的适配性。对于隧道衬砌、仰拱等主体结构，需同时进行承载能力极限状态与正常使用极限状态组合计算；对于临时支护结构，仅需进行承载能力极限状态基本组合计算，重点考虑施工荷载的作用。设计阶段不同，荷载组合的精度要求也不同。初步设计阶段可采用简化组合方法，选用规范推荐的典型荷载组合，快速完成结构初步设计；详细设计阶段需采用精准组合方法，结合工程实际的荷载分布与作用方式，进行精细化的荷载组合计算，确保设计成果的精准性。此外，荷载组合还需考虑荷载的作用位置与方向，通过最不利荷载布置，确定结构各部位的最大受力，为结构各构件的精准设计提供依据。荷载组合过程中需严格遵循相关规范要求，确保荷载分项系数、组合系数的选用符合规范规定，同时结合工程实际的地质条件、运营需求与施工方案，对组合结果进行合理性验证。若组合结果出现异常，需重新核查荷载计算方法与参数取值，确保荷载组合的可靠性。

隧道结构荷载分析与计算的核心在于精准划分荷载类型，明确各类荷载的作用机制与特征；科学选用荷载计算方法，基于地质参数与工程条件实现荷载的量化计算；严格遵循荷载组合原则，按不同极限状态构建最不利荷载组合。精准的荷载分析与计算能够为隧道结构设计提供可靠的荷载输入，确保结构设计的安全可靠、技术先进与经济合理。随着地质勘察技术、数值计算技术的不断发展，荷载分析与计算将朝着精准化、精细化、智能化方向发展，为复杂地质条件下隧道工程的结构设计提供更强有力的技术支撑。

第三节 结构内力分析方法

结构内力分析是隧道结构设计的核心环节，其核心目标是精准计算隧道结构在各类荷载作用下产生的轴力、弯矩、剪力等内力，明确内力分布规律，为结构截面设计、强度验算与稳定性评估提供量化依据。隧道结构作为复杂的地下工程结构，其内力分布受荷载类型、结构形式、地质条件等多重因素影响，精准的内力分析是保障结构设计安全可靠、经济合理的关键前提。随着隧道工程向大断面、复杂地质、深埋方向发展，结构形式愈发多样，荷载环境愈发复杂，对内力分析方法的精准性、适应性提出了更高要求。

一、常用分析方法

隧道结构内力分析方法基于不同的力学理论基础，形成了各具特色的技术体系，适用于不同地质条件、结构类型与设计精度要求。常用的分析方法包括结构力学法、弹性力学法、数值分析法，各类方法在原理、计算精度、适用场景上存在显著差异，需根据工程实际需求合理选用。明确各类方法的核心原理与适用边界，是实现内力精准分析的基础。

（一）结构力学法

结构力学法是基于结构力学理论的简化分析方法，核心思路是将隧道结构离散为梁、拱、刚架等基本结构单元，通过建立静力平衡方程或位移协调方程，求解结构在荷载作用下的内力。该方法通过简化结构形式与荷载分布，降低计算复杂度，具备计算简便、效率高的特点，是隧道结构初步设计阶段的常用分析方法。结构力学法的核心原理是基于静力平衡与变形协调，将复杂的隧道结构简化为可求解的基本力学模型。常用的简化模型包括弹性地基梁模型、两铰拱模型、三铰拱模型等。弹性地基梁模型将隧道衬砌视为支撑在弹性地基上的梁，通过地基系数反映围岩对结构的约束作用，适用于浅埋隧道或围岩较弱的场景；两铰拱模型将隧道衬砌视为超静定的两铰拱结构，忽略结构的轴向变形，仅考虑弯曲变形，适用于圆形、马蹄形等拱形断面隧道；三铰拱模型将隧道衬砌视为静定的三铰拱结构，通过三个铰点释放弯矩，计算过程更为简便，适用于地质条件较好、围岩约束较强的隧道。结构力学法的适用场景主要为初步设计阶段的快速内力估算、简单断面隧道的内力分析，以及地质条件相对简单、荷载分布均匀的工程场景。

其局限性在于简化假设较多，难以精准反映复杂地质条件下围岩与结构的协同作用，计算精度相对有限。

（二）弹性力学法

弹性力学法是基于弹性力学理论的精准分析方法，核心思路是将隧道结构与围岩视为连续的弹性介质，通过求解弹性力学基本方程，获取结构与围岩的应力、应变分布，进而推导结构内力。该方法突破了结构力学法的简化假设，能够更真实地反映结构与围岩的协同受力特征，计算精度更高。弹性力学的核心原理是基于连续介质力学的平衡方程、几何方程与物理方程，结合边界条件求解结构内力。对于圆形断面隧道，可采用极坐标下的解析解法，通过求解拉梅方程得到结构与围岩的应力分布，进而计算结构的轴力、弯矩与剪力；对于非圆形断面隧道，解析解法难度较大，需采用复变函数法、有限差分法等半解析方法。弹性力学法能够精准考虑围岩的弹性抗力作用，反映结构与围岩的协同承载机制，适用于中深埋隧道、硬质完整围岩隧道的精准内力分析，以及详细设计阶段的结构强度验算。其局限性在于计算过程复杂，对非圆形断面、复杂荷载条件的适应性较差，难以处理围岩的非线性变形与塑性破坏问题。

（三）数值分析法

数值分析法是基于数值计算理论的综合分析方法，核心思路是将隧道结构与围岩体系离散为有限个单元，通过建立单元的力学方程，组装形成整体方程组，求解得到结构的内力与变形分布。该方法能够突破解析方法的局限，灵活处理复杂结构形式、非均质地质条件与非线性力学行为，是当前复杂隧道工程内力分析的主流方法。常用的数值分析方法包括有限元法、有限差分法、离散元法等。有限元法通过将分析区域离散为三角形、四边形等单元，能够精准模拟复杂断面结构与非均质地质条件，适用于各类隧道结构的内力分析，应用最为广泛；有限差分法通过将微分方程转化为差分方程，计算效率高，适用于大变形问题与动态施工过程的内力分析；离散元法将围岩视为离散的块体单元，适用于破碎围岩隧道的内力分析，能够精准反映块体围岩与结构的相互作用。数值分析法的适用场景包括复杂断面隧道、深埋隧道、复杂地质条件隧道的精准内力分析，以及施工过程中结构内力的动态演化分析。其优势是计算精度高、适应性强，能够全面考虑各类复杂因素的影响；局限性在于计算过程复杂，对计算参数、单元划分的依赖性较强，需专业技术人员操作。为清晰呈现各类常用内力分析方法的特征差异，

构建如下隧道结构常用内力分析方法对比表：

分析方法	核心原理	适用场景	优势	局限性
结构力学法	将结构离散为基本单元，基于静力平衡与位移协调求解内力	初步设计阶段、简单断面隧道、地质条件简单场景	计算简便、效率高、易于掌握	简化假设多，难以反映复杂协同作用，精度有限
弹性力学法	将结构与围岩视为连续弹性介质，求解弹性力学基本方程	中深埋隧道、硬质完整围岩隧道、详细设计阶段	精度高，能真实反映结构与围岩协同受力	计算复杂，对非圆形断面、复杂荷载适应性差
数值分析法	将分析区域离散为单元，通过数值计算求解整体方程组	复杂断面隧道、深埋隧道、复杂地质条件、动态施工分析	精度高、适应性强，可处理非线性与复杂因素	计算复杂、对参数与单元划分敏感，需专业人员操作

二、分析模型构建

分析模型构建是隧道结构内力分析的关键步骤，核心要求是基于隧道结构类型，结合地质条件与荷载特征，构建能够真实反映结构受力状态的力学模型。隧道结构类型主要分为圆形、矩形、马蹄形三大类，不同结构类型的几何特征、受力性能存在显著差异，需构建针对性的分析模型。模型构建的合理性直接决定内力分析结果的精准性，需兼顾模型的真实性与计算的可行性。

（一）圆形断面隧道分析模型

圆形断面隧道具有受力均匀、应力集中程度低的显著优势，是隧道工程中应用广泛的结构形式，尤其适用于软质围岩、深埋隧道与盾构法施工隧道。圆形断面隧道分析模型的构建需充分利用其几何对称性，简化计算过程。圆形断面隧道常用的分析模型包括弹性地基圆环模型、弹性力学平面应变模型。弹性地基圆环模型将圆形衬砌视为支撑在弹性地基上的圆环结构，通过地基系数表征围岩对衬砌的弹性约束作用，基于结构力学理论建立平衡方程，求解衬砌的内力，适用于初步设计阶段与简单地质条件；弹性力学平面应变模型将圆形隧道视为无限长圆柱体的一部分，采用极坐标下的解析解法求解衬砌与围岩的应力分布，进而推导内力，适用于详细设计阶段与硬质完整围岩条件；对于复杂地质条件或盾构法施工隧道，可采用数值分析模型，将衬砌、围岩、注浆层等纳入模型，精准模拟各部分的协同受力。模型构建过程中需重点考虑荷载的对称性，利用对称性简化计算边界条件，提升计算效率。

（二）矩形断面隧道分析模型

矩形断面隧道具有空间利用率高的优势，广泛应用于城市地铁隧道、市政综合管廊等工程场景。矩形断面隧道的几何形状不对称，角部易产生应力集中，受力状态相对复杂，分析模型的构建需重点关注角部应力集中问题与结构整体稳定性。矩形断面隧道常用的分析模型包括刚架模型、弹性地基梁-柱模型与数值分析模型。刚架模型将矩形衬砌视为由顶拱、边墙、底板组成的刚架结构，忽略围岩的弹性约束作用，基于结构力学理论计算内力，适用于浅埋隧道、围岩约束较弱或临时支护结构的内力分析；弹性地基梁-柱模型将矩形衬砌的顶拱、边墙、底板视为支撑在弹性地基上的梁-柱构件，考虑围岩的弹性约束作用，通过位移协调方程求解内力，适用于围岩条件较好的矩形隧道；数值分析模型可精准模拟矩形断面的几何特征与复杂荷载作用，将衬砌、围岩、防水层等纳入模型，采用平面应变或三维建模方式，精准计算角部应力集中区域的内力分布，适用于复杂地质条件与详细设计阶段。模型构建过程中需重点强化角部构件的建模精度，合理设置单元类型与网格密度，确保角部内力计算的精准性。

（三）马蹄形断面隧道分析模型

马蹄形断面隧道结合了圆形断面与矩形断面的优势，既具备较好的受力性能，又具有较高的空间利用率，广泛应用于公路隧道、铁路隧道等工程场景。马蹄形断面的几何形状复杂，由顶拱、边墙、仰拱等部分组成，受力状态兼具拱形结构与矩形结构的特征，模型构建难度相对较大。马蹄形断面隧道常用的分析模型包括修正拱架模型、弹性地基组合模型与数值分析模型。修正拱架模型将马蹄形衬砌的顶拱视为拱结构，边墙与仰拱视为梁结构，通过节点连接形成组合拱架，基于结构力学理论计算内力，适用于初步设计阶段的快速内力估算；弹性地基组合模型将顶拱、边墙、仰拱分别视为支撑在弹性地基上的拱或梁构件，考虑各构件之间的协同作用与围岩的弹性约束，通过位移协调方程求解整体内力，适用于中等复杂程度的地质条件；数值分析模型是马蹄形断面隧道精准内力分析的主要方法，采用平面应变建模方式，精准拟合马蹄形的复杂几何轮廓，将围岩、衬砌、支护结构等纳入模型，全面考虑各类荷载的综合作用，精准计算各部位的内力分布，适用于复杂地质条件与详细设计阶段。模型构建过程中需重点关注顶拱与边墙、边墙与仰拱的连接部位，确保节点刚度的合理模拟，避免因节点建模不当导致内力计算偏差。

三、内力分布规律

隧道结构内力分布规律是结构设计的核心依据，其核心特征受荷载类型、结构形式、地质条件等因素综合影响。通过内力分析揭示轴力、弯矩、剪力的分布与变化特征，明确内力最大值的位置与大小，能够为结构截面优化、钢筋配置与强度验算提供针对性依据。掌握内力分布规律，可实现结构设计的精准化与差异化，提升设计的安全性与经济性。

（一）不同荷载作用下的内力分布特征

隧道结构承受的荷载类型多样，不同荷载作用下的内力分布特征存在显著差异，需分别明确各类荷载的内力贡献规律。围岩压力作用下，圆形断面隧道的内力以轴力为主，弯矩较小，轴力沿衬砌圆周均匀分布，最大值出现在水平直径处；矩形断面隧道的内力分布不均匀，顶拱产生负弯矩，边墙产生正弯矩，角部产生较大的剪力与弯矩，存在明显的应力集中；马蹄形断面隧道的顶拱以受压为主，产生较小的负弯矩，边墙下部与仰拱产生正弯矩，内力最大值出现在边墙与仰拱的连接部位。地下水压力作用下，内力分布呈现明显的水压力荷载特征，圆形断面隧道的轴力沿圆周均匀分布，大小与水压力成正比；矩形与马蹄形断面隧道的边墙承受较大的水平水压力，产生较大的轴力与弯矩，底板承受浮力作用，产生向上的弯矩。运营荷载作用下，内力主要集中在顶拱与底板，顶拱承受运营荷载产生的压力，产生负弯矩，底板承受向上的反力，产生正弯矩，边墙的内力变化相对较小。地震荷载作用下，内力分布具有显著的动态特征，水平地震荷载导致边墙产生较大的水平剪力与弯矩，竖向地震荷载导致顶拱与底板产生较大的轴力与弯矩，内力最大值可能出现在边墙中部或顶拱部位。

（二）结构形式对内力分布的影响规律

结构形式是决定内力分布的核心因素，不同结构形式的几何特征直接导致内力分布规律的差异。圆形断面隧道的几何对称性使其内力分布最为均匀，轴力占主导，弯矩较小，应力集中程度低，能够充分发挥混凝土的抗压性能，适用于荷载分布均匀的场景；矩形断面隧道的几何不对称性导致内力分布极不均匀，角部存在显著的应力集中，弯矩与剪力较大，需强化角部的结构设计，适用于空间利用率要求高的场景；马蹄形断面隧道的内力分布介于圆形与矩形断面之间，顶拱的内力分布接近圆形断面，以轴力为主，边墙与仰拱的内力分布接近矩形断面，存在一定的弯矩与剪力，兼具受力性能好与空间利用率高的优势，适用于多数公

路、铁路隧道场景。结构形式对内力分布的影响本质上是几何形状对荷载传递路径的改变，合理的结构形式可优化荷载传递，降低内力集中程度。

（三）地质条件对内力分布的影响规律

地质条件通过改变围岩对结构的约束作用，间接影响内力分布规律，不同地质条件下的内力分布特征存在显著差异。硬质完整围岩条件下，围岩的弹性抗力作用显著，能够有效约束结构变形，降低结构的弯矩与剪力，轴力占比提升，内力分布更均匀；软质破碎围岩条件下，围岩的弹性抗力作用较弱，难以有效约束结构变形，导致结构的弯矩与剪力增大，轴力占比降低，内力分布更不均匀，最大值显著增大。深埋隧道条件下，围岩压力较大，结构的轴力与弯矩均较大，内力分布受初始地应力影响显著，水平方向的内力可能大于竖向内力；浅埋隧道条件下，围岩压力相对较小，内力分布主要受竖向荷载控制，顶拱与底板的内力相对较大。地质构造发育区域，如断层破碎带，围岩的约束作用不均匀，导致内力分布呈现明显的非对称特征，局部区域可能出现内力突变，需通过差异化设计强化该区域的结构强度。

（四）内力分布的关键控制部位

隧道结构的内力最大值通常集中在特定部位，这些部位是结构设计的关键控制部位，需重点进行强度验算与钢筋配置。圆形断面隧道的关键控制部位为水平直径处与竖向直径处，水平直径处的轴力最大，竖向直径处的弯矩相对较大；矩形断面隧道的关键控制部位为四个角部、顶拱中部与边墙中部，角部的弯矩与剪力最大，顶拱中部的负弯矩最大，边墙中部的正弯矩最大；马蹄形断面隧道的关键控制部位为边墙与仰拱的连接部位、顶拱中部与边墙下部，边墙与仰拱的连接部位产生最大的正弯矩与剪力，顶拱中部产生最大的负弯矩。设计过程中需针对关键控制部位优化截面尺寸与钢筋配置，确保其强度与刚度满足要求，同时采取必要的构造措施，降低应力集中程度，提升结构的耐久性。

隧道结构内力分析方法的核心在于合理选用结构力学法、弹性力学法、数值分析法，基于圆形、矩形、马蹄形等结构类型构建针对性的分析模型，通过内力分析揭示不同荷载、结构形式、地质条件下的内力分布规律。精准的内力分析能够为结构设计提供量化的内力数据，明确关键控制部位，实现结构设计的精准化与差异化。随着数值计算技术、建模技术的不断发展，内力分析方法将朝着精细化、智能化、三维化方向发展，为复杂地质条件与大断面隧道工程的结构设计提

供更强有力的技术支撑。

第四节 结构稳定性设计

结构稳定性设计是隧道结构设计的核心目标与最终落脚点，其核心任务是基于荷载分析与内力计算结果，通过合理的结构参数选取、构造设计与优化调整，确保隧道结构在施工与运营全生命周期内，强度、刚度与稳定性均满足规范要求，有效抵御各类荷载作用与环境影响，保障工程安全可靠。隧道结构作为地下工程的核心承载体系，其稳定性直接决定工程的施工安全、运营质量与耐久性。随着隧道工程向大断面、深埋、复杂地质区域发展，结构承受的荷载愈发复杂，稳定性风险因素增多，对稳定性设计的系统性与精准性提出了更高要求。

一、稳定性设计目标

隧道结构稳定性设计目标需贯穿施工与运营全生命周期，明确结构在不同阶段的稳定性要求，统筹平衡强度、刚度与稳定性三大核心性能，同时兼顾耐久性与经济性。设计目标的制定需严格遵循相关规范标准，结合工程地质条件、结构类型与功能需求，形成针对性的稳定性控制指标，为后续设计工作提供清晰导向。

（一）施工阶段稳定性目标

施工阶段是隧道结构形成的关键过程，围岩开挖卸荷导致应力重分布，结构处于临时受力状态，稳定性风险较高。施工阶段稳定性设计目标核心是确保结构在临时荷载作用下不发生破坏、失稳或过大变形，保障施工人员与设备安全，为结构成型提供稳定条件。施工阶段稳定性目标具体包括三个方面：一是确保临时支护结构的强度与稳定性，临时支护作为施工阶段的核心承载构件，需能够有效约束围岩变形，承受施工荷载与初期围岩压力，避免出现支护结构开裂、滑移或坍塌；二是控制结构成型过程中的变形速率与累计变形量，变形需控制在规范允许范围内，避免过大变形导致围岩失稳或结构成型后出现不可逆损伤；三是保障结构施工过程中的整体稳定性，避免因施工工序不当、荷载分布不均导致结构出现局部或整体失稳风险。施工阶段稳定性目标的实现需结合施工方案，通过合理的临时支护参数设计、施工步距控制与监测预警机制，动态保障施工过程稳定。

（二）运营阶段稳定性目标

运营阶段是隧道结构发挥功能的核心时期，结构承受长期稳定的运营荷载与环境荷载，稳定性目标核心是确保结构长期安全可靠，保持良好的使用性能，满足运营功能要求，同时具备足够的耐久性，减少运营阶段的维修加固成本。运营阶段稳定性目标具体包括三个方面：一是确保结构强度满足长期荷载作用要求，结构各部位内力不超过材料强度限值，避免出现结构开裂、破损或承载力下降；二是控制结构长期变形，避免变形过大影响通行安全与使用功能，如路面沉降、衬砌变形导致净空不足等；三是保障结构耐久性，抵御地下水侵蚀、温度变化、有害物质作用等环境影响，防止结构材料老化、锈蚀，确保结构长期稳定性能。运营阶段稳定性目标的实现需通过精准的荷载计算、合理的结构设计与有效的耐久性防护措施，构建长期稳定的结构体系。

（三）核心性能控制目标

隧道结构稳定性设计的核心性能控制目标包括强度、刚度与稳定性三个维度，三者相互关联、相互制约，共同构成结构稳定的核心保障体系。强度控制目标是确保结构材料的应力不超过允许应力，避免材料发生屈服、断裂或破坏，核心是通过合理的截面尺寸与配筋设计，保证结构具备足够的承载能力；刚度控制目标是确保结构的变形不超过允许限值，避免变形过大影响使用功能或导致二次受力破坏，核心是通过合理的结构形式与截面参数，提升结构的抗变形能力；稳定性控制目标是确保结构在荷载作用下不发生整体或局部失稳，如衬砌坍塌、边墙滑移等，核心是通过合理的构造设计与支撑体系，保障结构的整体平衡与稳定。核心性能控制目标的制定需结合工程实际与规范要求，形成量化的控制指标，指导后续设计工作开展。

二、关键设计内容

隧道结构稳定性设计的关键内容围绕结构参数与构造细节展开，核心包括结构厚度设计、配筋设计与节点构造设计三个方面。这些内容直接决定结构的承载能力、抗变形能力与整体稳定性，需基于内力分析结果，结合材料性能与规范要求，进行精准设计。

（一）结构厚度设计

结构厚度是决定隧道结构承载能力与刚度的核心参数，直接影响结构的强度

与抗变形性能。结构厚度设计需基于内力计算结果，结合材料强度、荷载大小与分布特征，通过强度验算与刚度验算确定合理的厚度值，同时兼顾施工可行性与经济性。结构厚度设计的核心原则是确保结构在最不利荷载组合作用下，截面应力满足规范要求，变形控制在允许范围内。对于混凝土衬砌结构，厚度设计需考虑混凝土的抗压强度与抗剪强度，避免出现受压破坏或剪切破坏；对于不同断面类型的隧道，结构厚度设计需针对性调整，圆形断面隧道因受力均匀，厚度可相对均匀分布，重点保障水平与竖向直径处的厚度；矩形断面隧道需重点强化角部厚度，应对角部应力集中问题；马蹄形断面隧道需重点优化边墙与仰拱连接部位的厚度，提升该区域的承载能力。结构厚度设计还需考虑施工误差与耐久性要求，预留合理的厚度余量，避免因施工偏差或材料老化导致结构性能下降。

（二）配筋设计

配筋设计是提升隧道结构抗拉能力与延性的关键措施，混凝土材料抗压性能强但抗拉性能弱，通过配置钢筋可有效弥补混凝土的抗拉短板，避免结构因受拉产生裂缝，提升结构的承载能力与耐久性。配筋设计需基于内力计算得到的弯矩、剪力分布结果，结合钢筋与混凝土的材料性能，遵循“按需配筋”原则，进行精准设计。配筋设计的核心内容包括纵向钢筋设计与横向钢筋设计。纵向钢筋主要承受结构纵向的拉力与弯矩，提升结构的纵向抗裂性与承载能力，需根据纵向内力分布确定钢筋的直径、间距与数量，重点布置在纵向拉力较大的区域；横向钢筋主要承受结构横向的弯矩与剪力，提升结构的横向抗裂性与抗剪能力，需根据横向内力分布，在弯矩较大的受拉区加密布置，在剪力较大的区域设置箍筋或弯起钢筋，增强抗剪性能。配筋设计需严格遵循规范要求，确保钢筋的保护层厚度满足耐久性要求，避免钢筋锈蚀影响结构性能；同时需控制钢筋的间距与布置密度，保障混凝土浇筑质量，确保钢筋与混凝土协同工作。

（三）节点构造设计

节点构造是隧道结构的薄弱环节，也是稳定性设计的关键控制点。隧道结构的节点主要包括顶拱与边墙连接节点、边墙与仰拱连接节点、衬砌环间连接节点等，这些节点部位应力集中现象显著，易出现开裂或破坏，需通过合理的构造设计提升其承载能力与整体性。节点构造设计的核心原则是减少应力集中，提升节点的整体性与抗裂性。对于顶拱与边墙连接节点、边墙与仰拱连接节点，可通过设置过渡圆弧、增加节点厚度、加密配筋等措施，分散节点处的应力，避免应力

集中导致开裂；对于衬砌环间连接节点，需采用可靠的连接方式，如设置连接钢筋、采用螺栓连接等，确保环间传力顺畅，提升结构的整体协同性；节点构造设计还需考虑防水要求，设置合理的密封构造，避免地下水通过节点缝隙渗入结构内部，侵蚀钢筋与混凝土，影响结构稳定性。此外，节点构造设计需兼顾施工可行性，确保构造细节能够通过施工有效实现，保障施工质量。

三、设计优化方法

隧道结构稳定性设计优化是提升结构性能、降低工程成本的关键环节，核心思路是基于内力分析与稳定性评价结果，通过调整结构参数、优化构造设计、改进设计方案等路径，实现结构稳定性与经济性的平衡。设计优化需贯穿设计全过程，形成“分析－设计－评价－优化”的闭环管控机制。

（一）基于内力分析的参数优化

基于内力分析的参数优化是设计优化的核心路径，核心是通过调整结构厚度、截面形状、材料参数等设计参数，优化结构内力分布，提升结构稳定性，降低工程成本。该优化方法需以精准的内力分析结果为基础，明确内力分布的薄弱环节与优化方向。参数优化的具体内容包括：针对内力集中区域，适当增加结构厚度或加密配筋，提升该区域的承载能力；针对内力分布均匀的区域，在满足稳定性要求的前提下，适当减小结构厚度，降低工程成本；通过优化截面形状，如将矩形断面优化为马蹄形断面，改善内力分布，减少应力集中；合理选用高性能材料，如采用高强度混凝土、高性能钢筋，在保证结构稳定性的前提下，减小结构尺寸，提升经济性。参数优化过程中需进行多方案比选，通过对比不同参数组合下的结构内力、稳定性与工程成本，筛选最优设计方案。

（二）基于稳定性评价的方案优化

基于稳定性评价的方案优化是设计优化的重要补充，核心是通过稳定性评价结果，识别结构设计中的薄弱环节，调整结构形式、支护体系或施工方案，提升整体稳定性。该优化方法需结合现场监测数据与数值模拟结果，确保优化方案的合理性与可行性。方案优化的具体内容包括：若稳定性评价结果显示结构局部稳定性不足，可调整局部构造设计，如强化节点构造、增加局部支护措施；若整体稳定性不足，可优化结构形式，如采用受力性能更优的断面类型，或增加支撑结构；若施工阶段稳定性风险较高，可优化施工方案，如调整开挖步距、提前

施作支护结构；若运营阶段稳定性存在隐患，可增加耐久性防护措施，如优化防水设计、采用防腐钢筋。方案优化过程中需重新进行内力分析与稳定性评价，验证优化方案的有效性，确保优化后的方案满足稳定性要求。

（三）全生命周期视角下的综合优化

全生命周期视角下的综合优化是设计优化的高级阶段，核心是统筹考虑施工阶段、运营阶段与维护阶段的需求，平衡各阶段的稳定性与经济性，实现隧道工程全生命周期效益最大化。该优化方法需突破单一阶段的设计局限，综合考量工程全生命周期的成本与风险。综合优化的具体内容包括：在设计阶段充分考虑施工可行性，优化结构构造，降低施工难度与风险，减少施工阶段的额外成本；通过提升结构耐久性设计，减少运营阶段的维修加固成本；采用便于维护的结构设计，降低维护阶段的难度与成本。综合优化过程中需进行全生命周期成本分析，量化各阶段的成本与风险，通过多目标优化模型，实现稳定性、经济性与耐久性的协同优化。此外，综合优化还需结合工程实际需求与环境条件，确保优化方案具备良好的适用性与可操作性。

（四）优化验证与动态调整

设计优化并非一次性完成，需通过优化验证与动态调整，确保优化方案的可靠性与精准性。优化验证的核心是通过数值模拟、模型试验或现场监测数据，验证优化方案的内力分布、稳定性与经济性是否满足要求；动态调整的核心是结合施工过程中的实际情况与监测数据，实时调整设计参数，实现设计与施工的动态适配。优化验证的具体方法包括：采用数值模拟方法，对比优化前后的结构内力与稳定性，验证优化效果；对于复杂工程，可通过模型试验，直观验证结构的承载能力与稳定性；施工过程中，通过现场监测数据，实时反馈结构的变形与受力状态，若监测数据与设计预期存在偏差，及时调整设计参数，确保结构稳定性。优化验证与动态调整形成了设计优化的闭环机制，能够有效提升设计方案的精准性与可靠性。

隧道结构稳定性设计的核心在于明确施工与运营阶段的稳定性目标，精准完成结构厚度、配筋、节点构造等关键设计内容，通过基于内力分析与稳定性评价的设计优化方法，实现结构稳定性与经济性的平衡。科学的稳定性设计能够保障隧道结构在全生命周期内安全可靠，有效抵御各类荷载与环境影响。随着设计理论、数值模拟技术与监测技术的不断发展，隧道结构稳定性设计将朝着精细化、智能化、全生命周期化方向发展，为复杂地质条件与大断面隧道工程提供更强有力的技术支撑。

第五章 隧道支护系统设计

第一节 支护系统类型与选择

隧道支护系统是保障隧道施工与运营安全的核心支撑体系，其核心功能是约束围岩变形、传递与分担围岩压力，与围岩协同承载，提升隧道整体稳定性。隧道开挖后，围岩应力重分布易导致变形甚至失稳，支护系统通过及时施加约束作用，能够有效控制围岩塑性发展，充分发挥围岩自身承载能力，实现“围岩－支护”协同工作的核心目标。支护系统的类型选择与组合设计直接决定支护效果与工程经济性，需结合围岩分级、地质风险、施工条件等多重因素综合判定。随着隧道工程向复杂地质、深埋、大断面方向发展，支护系统的适配性与协同性要求不断提升。

一、支护类型划分

隧道支护系统根据支护功能、材料特性与施工方式，可划分为单一支护类型与组合支护类型两大类。单一支护类型指采用单一材料或结构形式的支护方式，具备特定的支护功能；组合支护类型指将多种单一支护类型协同搭配，形成优势互补的复合支护体系。不同支护类型的力学性能、适用范围与施工要求存在显著差异，明确支护类型划分是实现精准选型的基础。

（一）单一支护类型

单一支护类型是隧道支护系统的基础组成单元，各类型具备独特的支护机理与适用场景，根据材料与结构形式可分为喷射混凝土支护、锚杆支护、钢拱架支护、二次衬砌支护等核心类型。喷射混凝土支护是通过混凝土喷射设备将混凝土高速喷射至围岩表面形成的支护结构，核心功能是封闭围岩、防止围岩风化剥落，同时传递围岩压力，约束围岩表层变形。其优势是施工便捷、及时性强，能够快速与围岩贴合，形成早期支护强度，适用于各类围岩条件的初期支护。锚杆支护是将锚杆植入围岩内部形成的支护结构，通过锚杆的锚固力将围岩浅层与深层稳

定岩体连接，提升围岩整体性，抑制围岩裂隙发展与松动变形。根据锚固方式可分为全长粘结式、端头锚固式等，核心优势是能够深入围岩内部发挥支护作用，适用于裂隙发育、破碎程度中等的围岩。

钢拱架支护是采用型钢或钢筋加工形成的拱形支护结构，核心功能是承受较大围岩压力，控制围岩大变形，提升支护系统的刚性与抗变形能力。其优势是承载能力强、支护刚度大，能够快速形成支护框架，适用于软质围岩、破碎围岩、大断面隧道等围岩压力较大的场景。二次衬砌支护是隧道施工后期施作的永久性支护结构，通常采用模筑混凝土，核心功能是承担后期围岩压力、运营荷载，保障隧道长期稳定性与耐久性。其优势是结构整体性好、耐久性强，是隧道永久支护的核心组成部分，适用于各类围岩条件的永久支护。

（二）组合支护类型

组合支护类型是基于“优势互补、协同增效”的原则，将两种及以上单一支护类型组合形成的复合支护体系。通过不同支护类型的协同作用，能够弥补单一支护类型的功能短板，提升整体支护效果，适用于复杂地质条件或高风险隧道工程。常见的组合支护类型包括喷射混凝土+锚杆组合、喷射混凝土+锚杆+钢拱架组合、初期支护+二次衬砌组合等。喷射混凝土+锚杆组合通过喷射混凝土封闭表层与锚杆深层锚固的协同作用，兼顾表层防护与深层稳定，适用于中等破碎围岩；喷射混凝土+锚杆+钢拱架组合在深层锚固与表层封闭的基础上，通过钢拱架提升支护刚性，增强抗大变形能力，适用于软质破碎、高应力围岩；初期支护+二次衬砌组合是隧道支护的经典组合形式，初期支护承担施工阶段的主要围岩压力，控制早期变形，二次衬砌承担后期永久荷载，保障长期稳定，适用于各类等级围岩的永久性支护。此外，根据工程需求，还可增设超前支护类型，如管棚、小导管等，形成“超前支护+初期支护+二次衬砌”的全流程支护组合，适用于地质风险较高的断层破碎带、富水围岩等场景。

二、类型选择原则

隧道支护类型选择需遵循“因地制宜、精准适配、安全可靠、经济合理”的核心原则，以围岩分级为基础，结合地质风险、施工条件、工程成本等多重因素综合判定。支护类型的选择直接决定支护效果与工程效益，需避免盲目选用高强度支护导致成本浪费，或支护强度不足引发安全风险。核心选择原则围绕围岩分

级适配、地质风险应对、施工条件匹配三个关键维度展开。

（一）围岩分级适配原则

围岩分级是支护类型选择的核心依据，不同围岩等级的力学性能、稳定性差异显著，需针对性匹配支护类型与参数。围岩分级越高，岩体完整性越好、承载能力越强，支护要求越低；围岩分级越低，岩体破碎程度越高、稳定性越差，支护要求越高。对于高等级完整围岩，围岩自身承载能力强，变形量小，可选用简单支护类型，如喷射混凝土支护或局部锚杆支护，仅需满足封闭围岩、防止风化的基本要求；对于中等级中等破碎围岩，需选用组合支护类型，如喷射混凝土+锚杆组合，兼顾表层封闭与深层锚固，控制围岩变形；对于低等级软质破碎围岩，需选用高强度组合支护类型，如喷射混凝土+锚杆+钢拱架组合，并配合超前支护，强化支护刚性与抗变形能力，确保施工过程稳定；对于极破碎或富水围岩，需采用全流程复合支护组合，通过超前注浆加固围岩，再施作高强度初期支护与二次衬砌，全面提升支护系统的承载与抗渗能力。

（二）地质风险应对原则

地质风险是支护类型选择的重要考量因素，隧道工程常见的地质风险包括断层破碎带、富水围岩、岩爆、岩溶等，不同地质风险需针对性选用具备特定功能的支护类型，实现风险精准防控。针对断层破碎带风险，围岩完整性极差、承载力低，需选用具备强锚固、高刚性的组合支护类型，同时增设超前管棚或小导管支护，提前加固围岩，防止破碎岩体坍塌；针对富水围岩风险，需选用具备抗渗功能的支护类型，如喷射混凝土配合防水板、模筑防水混凝土二次衬砌，同时增设排水系统，实现“堵排结合”，避免地下水侵蚀导致支护结构失效；针对岩爆风险，需选用具备柔性与缓冲能力的支护类型，如喷射混凝土+预应力锚杆组合，通过预应力约束围岩裂隙发展，同时避免刚性支护引发岩爆能量集中释放；针对岩溶风险，需先对岩溶区域进行注浆填充加固，再选用高强度组合支护类型，保障支护系统与加固后的围岩协同承载。

（三）施工条件匹配原则

支护类型选择需与现场施工条件相匹配，施工条件包括施工设备能力、施工工艺水平、施工工期要求等，确保支护类型能够顺利实施，同时兼顾施工效率与质量控制。脱离施工实际的支护类型易导致施工难度增加、质量难以保障，甚至延误工期。施工设备能力方面，选用喷射混凝土支护需具备相应的喷射设备与搅

拌系统，选用钢拱架支护需具备型钢加工与安装设备；施工工艺水平方面，复杂组合支护类型对施工人员技术水平要求较高，需确保施工人员能够掌握各支护类型的施工要点，如锚杆锚固质量、钢拱架安装精度等；施工工期要求方面，若工期紧张，需选用施工便捷、速度快的支护类型，如喷射混凝土+锚杆组合，避免选用施工周期长的支护形式；此外，还需考虑施工环境条件，如高地温、有毒有害气体区域，需选用适应性强的支护材料与施工工艺，保障施工安全。

三、组合支护逻辑

组合支护逻辑的核心是实现不同支护类型的协同工作与优势互补，通过科学的组合设计，构建“时序协同、功能互补、承载均衡”的支护体系，充分发挥各支护类型的核心功能，提升整体支护效果。组合支护并非单一支护类型的简单叠加，而是基于围岩变形规律与支护功能需求，进行时序与空间上的精准匹配。

（一）时序协同逻辑

时序协同逻辑指根据隧道施工流程与围岩变形时序特征，合理安排不同支护类型的施作时机，实现“及时支护、分步强化”的支护效果。围岩变形具有显著的时序性，开挖初期变形速率快，后期逐渐衰减，需结合变形时序规律匹配支护施作时机。时序协同的核心思路是“先快后强、循序渐进”。开挖后需及时施作初期支护，如喷射混凝土、锚杆等，快速封闭围岩，约束初期变形，防止围岩松动；对于变形量较大的围岩，在初期支护施作后，需及时跟进钢拱架安装，进一步强化支护刚性，控制变形发展；待围岩变形趋于稳定后，施作二次衬砌，形成永久性支护，承担后期荷载。对于高风险地质区域，需提前施作超前支护，如管棚、小导管注浆等，在开挖前对围岩进行预加固，为后续开挖与支护创造稳定条件。时序协同的关键是把握各支护类型的施作时机，过早施作易导致支护承受过大应力，过晚施作则无法有效控制围岩变形。

（二）功能互补逻辑

功能互补逻辑指通过不同支护类型的功能搭配，弥补单一支护类型的功能短板，实现“封闭-锚固-承载-抗渗”等多重功能的协同覆盖。不同支护类型具备独特的核心功能，通过功能互补可全面提升支护系统的综合性能。功能互补的核心体现为多维度功能覆盖：一是表层封闭与深层锚固的互补，喷射混凝土承担表层封闭与浅层约束功能，防止围岩风化剥落，锚杆承担深层锚固功能，将浅层

围岩与深层稳定岩体连接,提升围岩整体性;二是柔性支护与刚性支护的互补,锚杆、喷射混凝土具备一定的柔性,能够适应围岩小幅变形,钢拱架具备强刚性,能够控制大变形,两者组合可兼顾变形适应性与抗变形能力;三是初期承载与永久防护的互补,初期支护承担施工阶段的主要围岩压力,控制初期变形,二次衬砌承担永久承载与耐久性防护功能,保障长期运营安全;四是支护与抗渗的互补,在富水区域,支护系统需兼顾承载与抗渗功能,通过喷射混凝土+防水板+防水二次衬砌的组合,实现承载与抗渗的双重保障。

(三) 承载均衡逻辑

承载均衡逻辑指通过组合设计,使各支护类型均匀分担围岩压力,避免局部支护受力集中导致失效,实现“围岩-支护”协同承载的均衡性。组合支护系统的承载能力并非各单一支护类型承载能力的简单叠加,而是通过合理匹配,使压力均匀传递与分担。承载均衡的核心设计思路包括两个方面:一是空间上的压力均匀分布,通过合理布置支护构件,如锚杆的间距与深度、钢拱架的间距等,使围岩压力均匀传递至各支护构件,避免局部区域受力过大;二是“围岩-支护”的荷载分担均衡,通过精准的支护参数设计,充分发挥围岩自身承载能力,使支护系统仅承担合理的荷载份额,实现两者协同承载。例如,通过锚杆的锚固作用提升围岩整体性,使围岩自身承担部分压力,减少支护系统的荷载;通过钢拱架与喷射混凝土的协同作用,均匀传递压力至整个支护体系。承载均衡逻辑能够有效提升支护系统的整体稳定性,降低局部支护失效风险,同时提升工程经济性。

(四) 组合支护的适配调整

组合支护设计需根据工程实际情况进行适配调整,结合现场监测数据与地质条件变化,动态优化组合方案。隧道施工过程中,地质条件可能存在不确定性,需通过现场监测数据实时掌握围岩变形与支护受力状态,若监测数据显示变形速率过大或支护应力超过预警值,需及时调整组合方案,如加密钢拱架间距、增设锚杆、强化超前支护等。适配调整的核心是建立“监测-反馈-优化”的闭环机制,通过现场变形监测、应力监测等数据,验证组合支护方案的有效性,针对存在的问题及时优化。例如,在软质围岩施工中,若初期支护施作后变形仍持续增大,需及时增设临时仰拱或横撑,强化支护刚性;若发现局部区域围岩破碎程度超出预期,需针对性加密该区域的锚杆与喷射混凝土厚度。适配调整能够确保组合支护方案始终与实际地质条件和受力状态相匹配,提升支护系统的可靠性。

隧道支护系统类型与选择的核心在于明确单一与组合支护类型的特征的，遵循围岩分级适配、地质风险应对、施工条件匹配的选择原则，基于时序协同、功能互补、承载均衡的组合逻辑，构建科学合理的支护体系。精准的支护类型选择与组合设计能够充分发挥“围岩－支护”协同承载作用，有效控制围岩变形，保障隧道施工与运营安全。随着支护技术与监测技术的不断发展，支护系统的选择将朝着精准化、智能化、动态化方向发展，为复杂地质条件下隧道工程提供更强有力的安全保障。

第二节 初期支护设计

初期支护是隧道施工阶段的核心支护体系，直接承接隧道开挖后的初期围岩压力，其设计质量直接决定施工过程的安全性及围岩变形的可控性。隧道开挖卸荷后，围岩应力重分布引发的早期变形速率快、变形量大，若未能及时通过初期支护施加有效约束，易导致围岩松动、坍塌等失稳风险。初期支护设计需以控制围岩早期变形、保障施工安全为核心目标，结合围岩分级、地质条件与施工工况，精准确定关键设计参数，同时建立基于实时监测数据的动态调整机制，实现支护与围岩变形的精准适配。随着隧道工程向复杂地质、大断面方向发展，初期支护的承载要求与适配性要求不断提升，科学的初期支护设计已成为保障隧道施工顺利推进的关键技术支撑。

一、设计核心目标

初期支护设计的核心目标围绕施工阶段围岩稳定与施工安全展开，通过及时施加约束作用，控制围岩早期变形、防止围岩失稳，同时为二次衬砌施作创造稳定条件，实现“初期控稳、后期衔接”的支护效果。核心目标的制定需兼顾围岩变形控制、施工安全保障与支护协同衔接三大维度，形成针对性的设计导向。

（一）控制围岩早期变形

控制围岩早期变形是初期支护设计的首要目标。隧道开挖后，围岩处于不稳定的应力调整阶段，早期变形若不受控，将导致围岩裂隙持续发育、岩体完整性破坏，进而降低围岩自身承载能力，增加后期支护负担。初期支护通过快速形成支护强度，约束围岩表层变形，抑制塑性区扩展，使围岩应力重分布趋于稳定，

避免变形累积引发的失稳风险。该目标的核心要求是将围岩早期变形速率与累计变形量控制在规范允许范围内。通过合理的支护参数设计,使初期支护具备足够的刚性与抗变形能力,能够有效承接初期围岩压力,阻止围岩变形的无序发展;同时,初期支护需具备一定的柔性,适应围岩的小幅可控变形,避免刚性过强导致支护结构受力集中而破坏。变形控制需兼顾时效性与有效性,确保初期支护在开挖后及时施作,抓住变形控制的关键窗口期,最大限度发挥支护约束作用。

(二) 保障施工安全

保障施工安全是初期支护设计的核心导向。施工阶段是隧道工程安全风险的高发期,围岩失稳、支护结构破坏等风险直接威胁施工人员与设备安全。初期支护作为施工阶段的主要承载结构,需具备足够的承载能力与稳定性,能够抵御初期围岩压力、施工荷载等综合作用,为施工作业营造安全的作业空间。该目标的核心要求是初期支护结构自身具备足够的强度与稳定性,避免因支护失效引发安全事故。设计需充分考虑施工过程中的各类荷载,如围岩松动压力、施工设备重量、材料堆放荷载等,确保支护结构在最不利荷载组合作用下不发生开裂、滑动或坍塌;同时,初期支护需快速形成支护体系,缩短围岩暴露时间,减少施工过程中的风险暴露窗口,为开挖、出渣、衬砌等后续施工工序的顺利开展提供安全保障。

(三) 衔接二次衬砌协同承载

初期支护设计需兼顾与二次衬砌的协同承载衔接,形成“初期支护承力为主、二次衬砌永久保障”的协同支护体系。初期支护不仅要承担施工阶段的主要围岩压力,还需为二次衬砌施作提供稳定的受力环境,确保二次衬砌能够顺利参与后期承载,提升隧道整体支护系统的长期稳定性。该目标的核心要求是初期支护与二次衬砌在受力与变形上实现平稳衔接。初期支护需控制围岩变形至稳定状态,避免二次衬砌施作后因围岩持续变形导致衬砌受力集中;同时,初期支护的结构形式与参数设计需为二次衬砌施工预留合理空间,确保衬砌厚度、钢筋布置等后续设计能够顺利实施。通过协同设计,使初期支护与二次衬砌共同承担围岩压力与运营荷载,充分发挥复合支护体系的协同增效作用。

二、关键设计参数

初期支护的关键设计参数直接决定支护效果与承载能力,核心包括喷射混凝土厚度、锚杆长度与间距、钢拱架型号三大类。参数设计需以围岩分级为基础,

结合地质条件、隧道断面尺寸与施工工艺，通过力学计算与规范验算确定，确保参数的精准性与适配性。不同围岩等级对应的关键设计参数存在显著差异，需形成差异化的参数设计体系。

（一）喷射混凝土厚度

喷射混凝土是初期支护的基础构件，其厚度直接决定表层支护的强度与抗变形能力。喷射混凝土厚度设计需满足封闭围岩、传递荷载与约束表层变形的核心需求，同时兼顾材料性能与施工可行性。厚度不足将导致支护强度不足，无法有效约束变形；厚度过大则增加工程成本，且可能因混凝土收缩产生裂缝。喷射混凝土厚度设计需基于围岩分级与力学计算结果确定。高等级完整围岩，围岩自身承载能力强，喷射混凝土厚度可控制在较薄范围，主要满足封闭围岩、防止风化的需求；中等级中等破碎围岩，需增加厚度以提升支护强度，兼顾表层约束与荷载传递；低等级软质破碎围岩，需采用较大厚度，确保能够有效承接围岩压力，控制大变形。设计过程中需通过强度验算与抗裂验算验证厚度合理性，同时考虑施工误差，预留合理的厚度余量。此外，喷射混凝土的强度等级需与厚度适配，确保材料性能能够支撑支护功能的实现。

（二）锚杆长度与间距

锚杆是初期支护中实现深层锚固的核心构件，其长度与间距直接决定锚固效果与围岩整体性提升程度。锚杆长度需确保能够深入稳定围岩层，通过锚固力将浅层松动围岩与深层稳定岩体连接；锚杆间距需保证锚固范围能够全面覆盖围岩松动区域，形成有效的锚固网络，抑制围岩裂隙发展。锚杆长度设计需结合围岩分级与围岩破碎程度确定。高等级完整围岩，围岩裂隙不发育，锚杆长度可较短，仅需锚固表层围岩；中等级中等破碎围岩，锚杆长度需适中，确保深入稳定围岩层，形成有效锚固；低等级软质破碎围岩，需采用较长锚杆，穿透破碎带至深层稳定岩体，提升锚固可靠性。锚杆间距设计需与长度协同匹配，高等级围岩可采用较大间距，中低等级围岩需减小间距，加密锚固点，形成密集的锚固网络。设计过程中需通过锚固力验算，确保锚杆能够有效传递荷载，避免因间距过大或长度不足导致锚固失效。

（三）钢拱架型号

钢拱架是提升初期支护刚性与抗大变形能力的关键构件，其型号选择需基于围岩压力大小、隧道断面尺寸与变形控制要求，确保钢拱架具备足够的承载能力

与刚度。钢拱架型号主要通过型钢类型、截面尺寸等参数体现，不同型号的钢拱架在承载能力与适用场景上存在显著差异。钢拱架型号选择需与围岩分级精准适配。高等级完整围岩，围岩压力小，变形量小，可无需设置钢拱架或选用小型型钢；中等级中等破碎围岩，需选用中型型钢钢拱架，提升支护刚性，控制变形发展；低等级软质破碎围岩、大断面隧道或高应力围岩区域，需选用大型型钢钢拱架，增强承载能力与抗变形能力，必要时采用格栅钢拱架与型钢钢拱架组合形式。设计过程中需通过力学计算，验算钢拱架的强度与刚度，确保其能够有效承接围岩压力，避免出现弯曲、变形或破坏。同时，钢拱架的间距需与型号协同设计，型号越大，间距可适当增大，反之则需减小间距。为清晰呈现不同围岩等级下初期支护关键设计参数的适配关系，构建如下隧道初期支护关键设计参数适配表：

围岩等级	喷射混凝土厚度（cm）	锚杆长度（m）	锚杆间距（m）	钢拱架型号	钢拱架间距（m）
高等级（Ⅰ - Ⅱ级）	5-8	2.0-2.5	1.5-2.0	可不设或轻型型钢（如 $\angle 100 \times 10$ ）	可不设或 2.0-2.5
中等级（Ⅲ级）	8-12	2.5-3.0	1.2-1.5	中型型钢（如 I14-I16）	1.5-2.0
低等级（Ⅳ - Ⅴ级）	12-20	3.0-4.0	0.8-1.2	大型型钢（如 I18-I22）	0.8-1.2
极破碎 / 富水（Ⅵ级）	20-25	4.0-5.0	0.6-0.8	重型型钢（如 I25 及以上）或格栅 + 型钢组合	0.5-0.8

二、设计适配调整

初期支护设计并非一成不变的静态过程，由于隧道地质条件的复杂性与不确定性，仅依靠前期地质勘察数据进行的静态设计难以完全适配实际围岩状况。设计适配调整的核心是建立基于围岩实时变形监测数据的动态调整机制，通过实时捕捉围岩变形特征，验证初期支护设计的合理性，及时优化调整支护参数，实现支护与围岩的精准适配，保障施工安全与支护效果。

（一）监测数据采集与分析

监测数据采集与分析是设计适配调整的基础，需建立覆盖全施工过程的围岩变形监测体系，明确监测指标、监测频率与监测范围，确保数据能够真实反映围岩变形状态与初期支护受力情况。核心监测指标包括围岩周边位移、拱顶下沉、锚杆轴力、喷射混凝土应力等。围岩周边位移与拱顶下沉直接反映围岩变形程度，

是判断围岩稳定性的核心指标；锚杆轴力与喷射混凝土应力反映初期支护的受力状态，是验证支护参数合理性的关键依据。监测频率需结合施工阶段与变形速率动态调整，开挖初期变形速率快，需提高监测频率；变形趋于稳定后，可降低监测频率。监测数据分析需建立趋势分析与阈值预警机制，通过绘制变形-时间曲线、应力-时间曲线，预判变形发展趋势，若监测数据达到或超过预警阈值，需及时启动设计调整流程。

（二）参数调整的核心逻辑与方法

设计适配调整的核心逻辑是“以监测数据为依据、以变形控制为目标”，针对不同的监测数据异常情况，采取针对性的参数调整方法，确保调整后的初期支护能够有效控制围岩变形。参数调整需遵循“局部优化、分级调整”的原则，避免盲目加大支护强度导致成本浪费，同时确保调整方案具备施工可行性。若监测数据显示围岩变形速率过快但未超过预警阈值，可采用小幅调整措施，如加密锚杆间距、增加喷射混凝土厚度；若变形速率持续增大并接近预警阈值，需强化支护参数，如增大钢拱架型号、加密钢拱架间距，或增设临时仰拱、横撑等辅助支护构件；若变形超过预警阈值，需采取紧急调整措施，暂停开挖作业，及时施作补强支护，如超前注浆加固围岩、增设套拱等，待变形稳定后再恢复施工。对于局部区域围岩破碎程度超出预期的情况，需进行局部针对性调整，如该区域加密锚杆与钢拱架，避免全域调整导致的成本浪费。参数调整后，需重新验算支护强度与稳定性，确保调整方案的合理性。

（三）动态调整的闭环管理机制

设计适配调整需建立“监测-分析-调整-验证”的闭环管理机制，确保调整方案的有效性与持续性。闭环管理机制能够实现初期支护设计与施工过程的动态协同，及时响应地质条件变化与围岩变形特征，提升支护设计的精准性与适应性。闭环管理的核心流程包括四个环节：一是监测数据采集与初步分析，实时获取围岩变形与支护受力数据，判断数据是否异常；二是异常原因分析与方案制定，结合地质勘察资料与施工记录，分析数据异常的原因，制定针对性的参数调整方案；三是调整方案实施与过程监测，组织施工单位实施调整方案，同时加强过程监测，跟踪变形与应力变化情况；四是效果验证与持续优化，通过监测数据验证调整方案的有效性，若变形得到有效控制，可维持调整后的参数；若变形仍未稳定，需再次优化调整方案，直至围岩变形趋于稳定。此外，闭环管理机制需明确

各参与方的职责，确保监测、分析、调整、验证各环节高效衔接，保障动态调整工作的顺利推进。

初期支护设计的核心在于明确控制围岩早期变形、保障施工安全、衔接二次衬砌协同承载的核心目标，精准确定喷射混凝土厚度、锚杆长度与间距、钢拱架型号等关键设计参数，建立基于实时监测数据的动态适配调整机制。科学的初期支护设计能够有效控制施工阶段的围岩失稳风险，为隧道施工安全提供核心保障。随着监测技术与数值模拟技术的不断发展，初期支护设计将朝着智能化、精准化的动态设计方向发展，通过融合实时监测数据与数值模拟分析，实现初期支护参数的精准优化与动态适配，为复杂地质条件下隧道工程的施工安全提供更强有力的技术支撑。

第三节 永久支护设计

永久支护是隧道全生命周期安全保障的核心体系，作为隧道的最终承载与防护结构，直接承担运营阶段的长期荷载与环境作用，其设计质量决定隧道的长期稳定性、耐久性与使用功能。永久支护与初期支护共同构成隧道的复合支护体系，两者协同承载、变形协调，形成“初期控稳、永久保障”的支护格局。相较于初期支护侧重施工阶段的短期稳定性控制，永久支护更聚焦长期运营需求，需兼顾承载性能、耐久性与防水性等多重核心要求。随着隧道工程运营年限要求的提升与复杂运营环境的增多，永久支护设计的系统性与精准性要求不断提高。

一、设计核心要求

永久支护设计的核心要求围绕长期运营需求展开，以保障隧道全生命周期安全可靠为目标，明确长期运营稳定性、耐久性、防水性三大核心导向，同时兼顾使用功能与经济性。核心要求的制定需充分考虑运营阶段的荷载特征、环境影响与使用需求，形成全方位的设计管控体系，为后续设计内容的开展提供清晰指引。

（一）长期运营稳定性要求

长期运营稳定性是永久支护设计的首要要求，核心是确保永久支护结构在长期运营荷载与环境荷载作用下，始终保持足够的承载能力与刚度，不发生过度变形、开裂或破坏，保障隧道通行安全与结构整体稳定。运营阶段的荷载具有长期

性、重复性特征，需通过精准设计确保结构具备充足的安全储备。该要求的核心内涵包括两个方面：一是承载能力适配长期荷载，永久支护需有效承接运营荷载、后期围岩压力、温度变化荷载等长期作用荷载，通过力学计算确保结构在最不利荷载组合下，强度与刚度满足规范要求，避免因长期受力导致结构疲劳破坏；二是变形控制满足使用需求，需将长期变形量控制在允许范围内，防止变形过大导致隧道净空不足、路面沉降、管线破损等问题，保障隧道正常使用功能。长期运营稳定性要求需贯穿设计全过程，通过合理的结构形式与参数设计，提升结构的长期承载性能。

（二）耐久性要求

耐久性是永久支护设计的关键要求，核心是确保永久支护结构能够抵御运营阶段的各类环境侵蚀作用，减缓材料老化速度，延长结构使用寿命，减少运营阶段的维修加固成本。隧道运营环境复杂，地下水侵蚀、温度变化、有害物质渗透等因素均会影响结构耐久性，需通过针对性设计提升结构的抗侵蚀能力。该要求的核心内涵包括三个方面：一是材料抗侵蚀能力适配环境特征，需根据隧道所处区域的环境条件，选用具备相应抗侵蚀性能的材料，抵御地下水、二氧化碳、氯离子等有害物质的侵蚀；二是结构构造优化提升防护效果，通过合理的构造设计减少环境侵蚀介质的渗透路径，避免结构薄弱部位出现耐久性隐患；三是长期性能稳定可控，需确保结构在设计使用年限内，材料性能与结构性能不发生显著衰减，始终维持足够的承载与防护能力。耐久性要求需与材料选择、构造设计紧密结合，形成全方位的耐久性防护体系。

（三）防水性要求

防水性是永久支护设计的重要要求，核心是通过永久支护结构与防水系统的协同设计，有效阻隔地下水渗透，避免地下水进入隧道内部影响运营安全与结构耐久性。地下水渗透不仅会导致路面湿滑、影响通行安全，还会侵蚀支护结构材料，加速结构老化，降低结构稳定性。该要求的核心内涵包括两个方面：一是结构自身抗渗能力保障，永久支护结构需具备足够的抗渗性能，通过材料选择与参数设计，减少结构裂缝产生，避免地下水通过结构裂缝渗透；二是防水系统协同防护，需将永久支护结构与防水板、止水带等防水构件有效衔接，形成完整的防水体系，阻断地下水渗透路径。防水性要求需遵循“防排结合、刚柔并济”的原则，既要通过永久支护结构实现刚性防水，又要依托防水系统实现柔性防水，确

保隧道内部干燥、安全的运营环境。

二、主要设计内容

永久支护的主要设计内容以二次衬砌为核心，围绕二次衬砌的结构形式、材料选择、厚度设计三大关键环节展开。设计内容需基于长期运营稳定性、耐久性、防水性的核心要求，结合围岩分级、隧道类型、运营需求等因素，通过力学计算与规范验算确定，确保设计成果的精准性与适配性。二次衬砌作为永久支护的核心载体，其设计质量直接决定永久支护的综合性能。

（一）结构形式设计

二次衬砌的结构形式设计需结合隧道断面类型、地质条件与受力特征，选择能够有效传递荷载、均匀分布内力的结构形式，同时兼顾施工可行性与使用功能。不同隧道类型与地质条件对结构形式的适配性要求不同，需形成针对性的结构形式设计方案。常见的二次衬砌结构形式包括圆形、马蹄形、矩形等。圆形结构形式受力均匀，应力集中程度低，能够有效承接径向荷载，适用于软质围岩、深埋隧道等围岩压力较大的场景；马蹄形结构形式结合了圆形与矩形的优势，既具备较好的受力性能，又具有较高的空间利用率，适用于公路隧道、铁路隧道等多数工程场景；矩形结构形式空间利用率高，适用于城市地铁隧道、市政综合管廊等对空间使用有明确要求的场景。结构形式设计需重点考虑内力分布特征，通过优化结构轮廓减少应力集中，提升结构承载性能；同时需为通风、照明、消防等附属设施预留合理空间，保障隧道使用功能的实现。

（二）材料选择

材料选择是保障永久支护耐久性与承载性能的核心基础，需结合设计核心要求与运营环境特征，选用强度高、耐久性好、抗渗性强的材料，同时兼顾材料的经济性与施工适应性。二次衬砌的核心材料包括混凝土、钢筋等，各类材料的性能需精准适配设计要求。混凝土材料的选择需重点关注强度等级、耐久性指标与抗渗等级。根据承载要求选用合适的强度等级，确保混凝土具备足够的抗压、抗拉性能；针对运营环境选择具备相应耐久性的混凝土，如在地下水富含氯离子的区域选用海工混凝土，在冻融环境区域选用抗冻混凝土；根据防水要求确定合理的抗渗等级，避免地下水渗透。钢筋材料的选择需确保其强度与延性满足设计要求，同时选用具备抗锈蚀性能的钢筋，如普通热轧钢筋、环氧树脂涂层钢筋等，

在腐蚀性较强的环境中可采用不锈钢钢筋，提升结构耐久性。此外，材料选择还需考虑施工可行性，确保选用的材料能够适应隧道施工环境，便于搅拌、运输与浇筑施工。

（三）厚度设计

二次衬砌厚度是决定永久支护承载能力与刚度的关键参数，直接影响结构的长期稳定性与耐久性。厚度设计需基于内力计算结果，结合材料性能、荷载特征与施工误差，通过强度验算、刚度验算与抗裂验算确定，确保厚度参数的精准性与合理性。厚度不足会导致结构承载能力不足，难以满足长期运营要求；厚度过大则会增加工程成本，且可能因混凝土收缩产生裂缝。厚度设计的核心思路是基于“荷载适配、性能保障”。需结合围岩分级与后期围岩压力大小，精准计算结构内力，确定满足强度要求的最小厚度；同时考虑长期变形控制需求，通过刚度验算验证厚度是否能够有效约束长期变形；针对防水与耐久性要求，通过抗裂验算确保厚度能够减少混凝土裂缝产生，提升结构抗渗性能。不同围岩等级对应的二次衬砌厚度存在显著差异，高等级完整围岩区域，后期围岩压力小，厚度可相对较小；低等级软质破碎围岩区域，后期围岩压力大，需采用较大厚度，确保结构承载性能。此外，厚度设计需预留合理的施工误差余量，避免因施工偏差导致结构性能下降。

三、与初期支护协同设计

永久支护与初期支护作为隧道复合支护体系的核心组成部分，协同设计的核心目标是实现两者的受力协同与变形协调，充分发挥复合支护体系的整体承载优势，避免单一结构过度受力，提升隧道整体支护效果与经济性。协同设计需突破单一结构设计的局限，从复合支护体系的整体视角出发，统筹考虑两者的参数匹配、受力分配与变形衔接。

（一）受力协同设计

受力协同设计是协同设计的核心内容，核心是通过合理的参数匹配，明确永久支护与初期支护的荷载分担比例，实现两者均匀承载、协同受力，避免局部结构受力集中。受力协同设计需基于复合支护体系的力学特性，结合不同阶段的荷载特征，精准分配荷载份额。受力协同设计的核心思路是“阶段适配、比例合理”。施工阶段以初期支护承载为主，永久支护施作后，通过两者的刚度匹配实现荷载

的合理传递与分担。设计过程中需通过力学计算明确初期支护与永久支护的刚度比,确保荷载能够按预期比例分担;针对不同荷载类型合理分配承载责任,初期支护主要承担施工阶段残留的围岩压力,永久支护主要承担运营阶段的长期荷载与后期围岩压力;同时需考虑荷载的长期演化特征,确保在运营年限内,两者的受力状态始终处于安全范围内。受力协同设计需避免出现永久支护受力不足导致初期支护过度承载,或永久支护过早承担过多荷载导致结构提前老化的问题。

（二）变形协调设计

变形协调设计是保障复合支护体系整体稳定性的关键,核心是确保永久支护与初期支护的变形规律保持一致,避免因变形差异导致结构间产生附加应力,引发裂缝或破坏。变形协调设计需结合两者的结构特性与变形时序特征,实现变形过程的平稳衔接。变形协调设计的核心思路是“时序匹配、变形同步”。需合理控制永久支护的施作时机,确保在初期支护变形趋于稳定后再施作永久支护,避免永久支护施作后因初期支护持续变形产生附加应力;通过参数设计匹配两者的刚度,使两者在荷载作用下的变形速率与变形量保持协调,避免出现相对变形过大的情况;针对软质围岩等变形量较大的区域,需在设计中考虑结构的柔性适配,通过合理的材料选择与构造设计,提升结构的变形适应能力,实现两者的变形协调。变形协调设计需通过数值模拟或力学计算验证两者的变形协调性,确保复合支护体系在全生命周期内不出现因变形不协调导致的结构损伤。

（三）参数匹配与优化

参数匹配与优化是实现协同设计的重要保障,核心是通过调整永久支护与初期支护的关键设计参数,确保两者在刚度、强度、变形性能等方面精准匹配,提升复合支护体系的整体性能。参数匹配与优化需基于力学计算与工程实践经验,形成动态调整机制。参数匹配的核心内容包括刚度匹配、强度匹配与变形性能匹配。刚度匹配需通过调整两者的厚度、材料强度等参数,使复合支护体系的刚度分布合理,荷载传递顺畅;强度匹配需确保两者的强度均能满足各自的承载需求,避免单一结构强度不足影响整体稳定性;变形性能匹配需确保两者的弹性模量、泊松比等参数适配,实现变形协调。参数优化需结合工程实际情况,通过多方案比选,筛选出既能满足安全要求,又能提升经济性的参数组合。若监测数据显示两者协同效果不佳,需及时调整相关参数,如优化永久支护厚度、调整初期支护的锚杆间距或钢拱架型号等,确保协同效果符合设计要求。

（四）构造衔接设计

构造衔接设计是实现协同设计的细节保障，核心是通过合理的构造措施，确保永久支护与初期支护之间的连接可靠，实现力的有效传递，同时避免衔接部位出现漏水、漏气等问题。衔接部位作为复合支护体系的薄弱环节，需通过针对性的构造设计提升其可靠性。构造衔接设计的核心内容包括界面连接、防水衔接与附属构件衔接。界面连接需确保永久支护与初期支护紧密贴合，可通过清理初期支护表面、设置界面剂等措施，提升两者的粘结力，实现力的有效传递；防水衔接需确保防水系统在衔接部位的连续性，通过设置止水带、密封胶等构件，避免地下水通过衔接部位渗透；附属构件衔接需确保通风、照明、消防等附属设施在两者衔接部位的安装牢固，避免因结构变形导致附属设施损坏。构造衔接设计需兼顾施工可行性，确保构造细节能够通过施工有效实现，保障衔接质量。

永久支护设计的核心在于明确长期运营稳定性、耐久性、防水性的核心要求，精准完成二次衬砌的结构形式、材料选择、厚度设计等主要设计内容，实现与初期支护的受力协同、变形协调与构造衔接。科学的永久支护设计能够保障隧道全生命周期的安全可靠，提升隧道的使用性能与耐久性。随着隧道工程长期运营需求的提升与设计技术的不断发展，永久支护设计将朝着全生命周期精细化、协同化方向发展，为隧道工程的长期安全运营提供更强有力的技术支撑。

第四节 支护结构受力分析

支护结构受力分析是隧道支护系统设计的核心技术环节，其核心任务是揭示支护结构与围岩协同作用下的受力规律，明确结构在各类荷载作用下的受力特征，为支护参数优化、强度与稳定性验算提供量化依据。隧道支护结构的受力状态受围岩条件、荷载类型、结构形式等多重因素影响，呈现显著的复杂性与耦合性。不同于地面结构仅承受自身荷载与外部荷载，支护结构需与围岩形成协同承载体系，围岩的力学特性直接决定支护结构的受力分布。科学的受力分析能够精准识别支护结构的薄弱环节，确保支护设计既满足安全要求，又具备经济性。

一、受力分析模型

受力分析模型是开展支护结构受力分析的基础载体，核心是通过简化与抽象，

构建能够真实反映支护结构与围岩共同作用机制的力学模型。模型构建需兼顾真实性与可行性，既要精准刻画支护与围岩的协同受力特征，又要简化复杂的地质与荷载条件，降低计算难度。合理的受力分析模型能够有效提升受力分析结果的可靠性，为后续设计提供精准的力学输入。

（一）模型构建核心原则

受力分析模型构建需遵循协同作用、等效简化、工况适配三大核心原则。协同作用原则要求模型必须体现支护结构与围岩的共同承载关系，不能孤立分析支护结构的受力状态，需精准刻画两者之间的力传递路径与变形协调关系；等效简化原则要求在保证分析精度的前提下，对复杂的地质条件、结构细节与荷载分布进行合理简化，如将非均质围岩等效为均质材料、将复杂荷载等效为均布荷载或集中荷载，降低计算复杂度；工况适配原则要求模型需根据隧道施工与运营的不同阶段，适配对应的受力工况，如施工阶段需考虑初期支护的单独受力，运营阶段需考虑初期支护与永久支护的协同受力。模型构建过程中需平衡模型精度与计算效率。过度简化会导致模型与实际工况偏差过大，分析结果失去参考价值；过度复杂则会增加计算成本，降低设计效率。需结合工程设计阶段的精度要求，针对性选择模型简化程度，初步设计阶段可采用简化模型快速获取受力趋势，详细设计阶段需采用精细化模型提升分析精度。

（二）典型受力分析模型

根据支护结构与围岩的作用机制，常用的受力分析模型包括弹性地基梁模型、弹性地基圆环模型、连续介质模型三大类，各类模型适用于不同的结构形式与地质条件。弹性地基梁模型将支护结构简化为支撑在弹性地基上的梁构件，通过地基系数表征围岩对支护结构的约束作用与承载能力。该模型适用于矩形断面隧道的边墙、底板等线性构件的受力分析，能够有效反映支护结构在横向荷载作用下的弯曲变形与受力分布。弹性地基圆环模型将圆形断面隧道的支护结构简化为支撑在弹性地基上的圆环，适用于圆形衬砌的受力分析，能够精准刻画圆环在径向均布荷载或非均布荷载作用下的轴力与弯矩分布，充分体现围岩对衬砌的弹性抗力作用。连续介质模型将支护结构与围岩视为一个连续的整体，通过数值计算方法模拟两者的协同受力与变形，适用于复杂断面、非均质围岩或复杂荷载条件下的受力分析，能够全面反映支护与围岩的相互作用机制，分析精度较高。

（三）模型参数确定

模型参数的精准确定是保障受力分析结果可靠性的关键，核心参数包括围岩力学参数、支护材料参数、荷载参数三大类。围岩力学参数主要包括弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角等，需通过现场地质勘察、室内试验或经验类比确定，对于复杂地质条件，需结合现场监测数据进行反演优化；支护材料参数主要包括混凝土的弹性模量、抗压强度，钢筋的抗拉强度、弹性模量等，需根据材料试验报告或规范标准取值，确保参数能够真实反映材料的力学性能；荷载参数主要包括围岩压力、地下水压力、运营荷载等，需通过荷载计算方法确定，明确荷载的大小、分布形式与作用方向。模型参数确定需遵循“试验为主、经验为辅”的原则，对于关键参数需通过现场试验获取第一手数据，避免单纯依赖经验值导致参数偏差。同时，需考虑参数的变异性，通过敏感性分析验证参数变化对受力分析结果的影响，确保设计成果的稳定性。

二、关键受力特征

支护结构的关键受力特征取决于荷载类型、结构形式与围岩条件的综合作用，核心是明确结构在围岩压力、地下水压力等主要荷载作用下的内力分布规律，识别受力集中区域与薄弱环节。不同荷载作用下的受力特征存在显著差异，需分别开展分析，同时考虑各类荷载的耦合作用效应。

（一）围岩压力作用下的受力特征

围岩压力是支护结构的主要荷载，其作用下的受力特征呈现显著的断面依赖性与围岩等级相关性。对于圆形断面支护结构，围岩压力以径向均布荷载为主，结构内力以轴力为主，弯矩较小，内力分布均匀，能够充分发挥混凝土的抗压性能，受力集中现象不明显；对于马蹄形断面，围岩压力呈现非均布分布，顶拱承受较大的竖向压力，边墙承受水平压力，仰拱承受竖向反力，内力分布呈现顶拱负弯矩、边墙正弯矩、仰拱正弯矩的特征，边墙与仰拱连接部位易出现受力集中；对于矩形断面，围岩压力作用下的角部应力集中现象最为显著，顶拱与边墙、边墙与底板的连接部位产生较大的弯矩与剪力，是结构的薄弱环节。围岩等级对受力特征影响显著。高等级完整围岩条件下，围岩自身承载能力强，作用于支护结构的围岩压力较小，结构内力整体较小；低等级软质破碎围岩条件下，围岩压力较大，结构内力显著增大，且内力分布不均匀性加剧，受力集中区域的内力峰值

明显提升，需通过强化支护参数提升结构承载能力。

（二）地下水压力作用下的受力特征

地下水压力是支护结构的重要荷载，尤其在富水围岩区域，其对支护结构受力的影响不可忽视。地下水压力作用下的受力特征主要表现为径向均布压力作用，受力分布相对均匀，但对结构的抗裂性与抗渗性要求较高。对于圆形断面支护结构，地下水压力呈均匀径向分布，结构内力以轴力为主，与围岩压力作用下的受力特征类似，但轴力大小与水压力成正比；对于非圆形断面，地下水压力同样呈现径向作用特征，但由于断面形状不规则，局部区域会出现受力集中，如矩形断面的角部、马蹄形断面的边墙中部。地下水压力不仅会使支护结构产生受压内力，还会渗透至支护结构内部，加速材料老化，降低结构耐久性。因此，在地下水压力作用下，支护结构的受力分析需兼顾承载能力与抗渗性能，确保结构既能够承受水压力作用，又能够有效阻隔地下水渗透。

（三）多荷载耦合作用下的受力特征

实际工程中，支护结构往往同时承受围岩压力、地下水压力、运营荷载等多重荷载的耦合作用，其受力特征并非单一荷载作用下的简单叠加，而是呈现复杂的耦合效应。多荷载耦合作用下的内力分布更不均匀，受力集中现象更显著，需重点关注荷载组合后的最不利受力状态。耦合作用的核心影响体现为荷载之间的相互叠加与制约。例如，围岩压力与地下水压力共同作用时，两者的径向压力叠加会使支护结构的轴力显著增大；运营荷载与围岩压力耦合作用时，运营荷载会在顶拱与底板产生局部附加内力，加剧顶拱负弯矩与底板正弯矩的发展。不同荷载组合形式会导致支护结构的最不利受力部位发生变化，需通过荷载组合分析确定最不利工况，确保支护结构在各类耦合荷载作用下均具备足够的安全储备。

三、强度与稳定性验算

强度与稳定性验算是支护结构受力分析的最终目的，核心是基于受力分析结果，验证支护结构在最不利荷载组合作用下的强度、刚度与稳定性是否满足规范要求，确保结构不发生强度破坏或失稳。验算过程需严格遵循相关规范标准，结合支护材料的性能与结构形式，采用针对性的验算方法，确保验算结果的可靠性与准确性。

（一）强度验算

强度验算是验证支护结构在荷载作用下的内力是否超过材料的强度限值，避免结构发生拉伸、压缩或剪切破坏。强度验算需针对不同的支护材料与结构形式，采用对应的验算方法与强度指标。混凝土支护结构的强度验算主要包括抗压强度验算与抗拉强度验算。抗压强度验算需确保混凝土的实际压应力不超过混凝土的轴心抗压强度设计值，重点验算顶拱、边墙等受压区域；抗拉强度验算需确保混凝土的实际拉应力不超过混凝土的轴心抗拉强度设计值，重点验算顶拱、底板等受拉区域与角部受力集中区域。钢筋混凝土支护结构的强度验算需考虑钢筋与混凝土的协同作用，验算钢筋的拉应力是否超过钢筋的抗拉强度设计值，确保钢筋能够有效承担结构受拉区的内力。钢支撑结构的强度验算需验证型钢的应力是否超过钢材的强度设计值，重点验算钢支撑的翼缘与腹板连接部位、节点部位的应力分布。

（二）稳定性验算

稳定性验算是验证支护结构在荷载作用下是否发生整体或局部失稳，避免出现结构坍塌、滑移等安全事故。稳定性验算需结合结构形式、荷载分布与围岩条件，采用针对性的验算方法。整体稳定性验算主要针对支护结构与围岩组成的协同体系，验证其在荷载作用下是否能够保持整体平衡。常用的验算方法包括极限平衡法与数值模拟法，极限平衡法通过分析支护结构与围岩的受力平衡条件，判断是否存在整体失稳风险；数值模拟法通过模拟结构与围岩的变形与破坏过程，预测整体稳定性。局部稳定性验算主要针对支护结构的薄弱部位，如节点连接部位、角部区域等，验证这些部位是否发生局部破坏。例如，钢支撑节点的稳定性验算需验证节点的抗滑移与抗转动能力；混凝土支护角部的稳定性验算需验证角部是否发生剪切破坏或受压破坏。

（三）验算标准与调整优化

强度与稳定性验算需严格遵循国家与行业相关规范标准，明确验算指标的限值要求。规范标准对不同类型支护材料的强度设计值、稳定性验算方法均有明确规定，验算过程中需精准选用规范参数，确保验算结果符合设计要求。若验算结果不满足规范要求，需及时进行设计调整优化。调整优化的核心思路是针对薄弱环节提升支护强度，如增加支护厚度、加密钢筋配置、增大钢支撑型号等；同时可优化结构形式，减少受力集中现象，如将矩形断面优化为马蹄形断面、在角部

设置过渡圆弧等。调整优化后需重新开展受力分析与验算，直至满足规范要求。此外，验算过程中需考虑施工误差与材料性能的变异性，预留合理的安全储备，确保支护结构的实际性能能够满足设计要求。

支护结构受力分析的核心在于构建能够真实反映支护与围岩协同作用的受力分析模型，精准揭示结构在围岩压力、地下水压力等荷载作用下的关键受力特征，通过科学的强度与稳定性验算验证设计的合理性。科学的受力分析能够为支护系统设计提供精准的力学依据，有效提升支护设计的安全性与经济性。随着数值计算技术、地质勘察技术的不断发展，支护结构受力分析将朝着精细化、智能化、三维化方向发展，能够更精准地刻画复杂地质条件下的受力规律，为复杂隧道工程的支护设计提供更强有力的技术支撑。

第六章 隧道施工方法选择

第一节 施工方法分类与特点

隧道施工方法选择是隧道工程建设的核心决策环节,直接决定工程建设效率、施工安全、工程成本与质量控制。不同隧道工程的地质条件、规模参数、功能需求存在显著差异,适配的施工方法也各不相同。科学的施工方法分类能够为方法选择提供清晰指引,明确各类方法的技术特点与适用边界,是实现施工方案精准适配的基础。随着隧道工程向复杂地质、大断面、长距离方向发展,施工技术不断创新,施工方法体系日趋完善。

一、分类维度构建

隧道施工方法分类需遵循“维度清晰、逻辑严谨、适配实用”的核心原则,结合隧道施工的核心特征与工程实际需求,构建多维度的分类体系。不同分类维度能够从不同视角揭示施工方法的核心属性,为工程技术人员根据项目具体条件筛选适配方法提供依据。核心分类维度包括开挖方式、机械化程度、地质适应性三大类,各类维度相互补充、协同覆盖,形成完整的分类框架。

(一) 按开挖方式分类

按开挖方式分类是隧道施工方法最基础的分类维度,核心依据是隧道开挖过程中围岩破碎与成型的方式差异。该维度能够直观反映施工方法的核心作业特征,明确开挖作业对围岩的扰动程度,为基于围岩稳定性的方法选择提供直接参考。按开挖方式可将隧道施工方法分为爆破开挖法与机械开挖法两大类。爆破开挖法通过炸药爆炸产生的能量破碎围岩,实现隧道断面开挖,其核心特征是开挖效率较高、适应性强,但对围岩扰动较大,需配套有效的支护措施控制围岩变形;机械开挖法通过专用施工机械的切削、挤压等作用破碎或掘进围岩,无需使用炸药,核心特征是对围岩扰动小、施工安全性高、作业环境好,但其适应性受机械性能与围岩条件限制。爆破开挖法与机械开挖法根据具体作业方式还可进一步细分,

形成层次清晰的开挖方式分类体系，为后续方法选择提供精准导向。

（二）按机械化程度分类

按机械化程度分类核心依据是施工过程中机械替代人工的程度，直接反映施工方法的现代化水平与作业效率。随着工程建设对效率、安全、质量要求的不断提升，机械化程度已成为衡量施工方法先进性的重要指标，该分类维度为追求高效建设的隧道工程提供方法筛选依据。按机械化程度可将隧道施工方法分为人工开挖法、半机械化开挖法与全机械化开挖法三类。人工开挖法主要依靠人工完成开挖、出碴等核心作业，机械化程度极低，适用于断面小、地质简单、机械难以进场的特殊场景，目前应用范围已大幅缩小；半机械化开挖法通过机械与人工协同作业完成施工，核心开挖或出碴环节采用机械作业，辅助环节仍需人工配合，兼具一定的效率与灵活性，适用于中等断面、地质条件复杂多变的隧道工程；全机械化开挖法通过专用成套设备完成开挖、出碴、支护等全流程作业，机械化程度高，作业效率高、劳动强度低、施工质量稳定，适用于长距离、大断面、地质条件相对稳定的隧道工程，是现代隧道施工的主流发展方向。

（三）按地质适应性分类

按地质适应性分类核心依据是施工方法对不同地质条件的适配能力，直接反映方法在特定地质环境下的施工可行性与安全性。地质条件是隧道施工的核心约束因素，不同地质条件下的围岩稳定性、水文特征差异显著，对施工方法的要求也截然不同，该分类维度是基于地质条件选择施工方法的核心依据。按地质适应性可将隧道施工方法分为硬岩隧道施工法、软岩隧道施工法、富水隧道施工法、特殊不良地质隧道施工法四类。硬岩隧道施工法适用于岩体完整性好、强度高、稳定性强的硬岩地质，核心要求是高效破碎硬岩、控制岩爆风险；软岩隧道施工法适用于岩体破碎、强度低、变形量大的软岩地质，核心要求是减少围岩扰动、控制大变形；富水隧道施工法适用于地下水丰富的地质条件，核心要求是实现“堵排结合”、保障施工排水与抗渗；特殊不良地质隧道施工法适用于断层破碎带、岩溶、高地温、有毒有害气体等特殊地质环境，核心要求是针对性防控地质风险、保障施工安全。该分类维度能够精准匹配地质条件与施工方法，提升方法选择的科学性与安全性。

二、典型方法特点

隧道施工的典型方法包括钻爆法、盾构法、TBM法、浅埋暗挖法，各类方法在技术原理、作业流程、核心优势与局限性上存在显著差异，共同构成现代隧道施工的核心技术体系。明确各类典型方法的技术特点，是实现方法精准选择的基础，需从技术原理、作业特征、核心优势、局限性四个核心层面系统梳理。

（一）钻爆法

钻爆法是隧道施工中应用最广泛的传统方法，核心技术原理是通过钻孔、装药、爆破的方式破碎围岩，形成隧道断面，再通过出碴、支护等后续作业完成隧道施工。该方法的核心特征是适应性强，能够适配不同断面形式、不同地质条件的隧道工程，是复杂地质条件下隧道施工的主要选择。钻爆法的核心优势体现在三个方面：一是适应性广，可适用于硬岩、软岩、破碎带等各类地质条件，能够施工圆形、矩形、马蹄形等各类断面形式的隧道，对隧道规模的适配性也较强；二是设备投入相对较低，相较于大型机械化设备，钻爆法所需的钻孔机、装载机等设备的购置与运维成本较低，适用于资金投入有限的项目；三是施工灵活，可根据现场地质条件实时调整爆破参数、开挖步距与支护方案，适配地质条件的动态变化。其局限性主要表现为对围岩扰动较大，爆破产生的振动易导致围岩裂隙发育、稳定性下降，需配套及时有效的支护措施；施工效率相对较低，受爆破作业循环、出碴效率限制，难以满足长距离、大断面隧道的高效施工需求；作业环境较差，爆破产生的粉尘、噪声等对施工人员健康影响较大。

（二）盾构法

盾构法是一种全机械化的隧道施工方法，核心技术原理是通过盾构机这一专用成套设备，实现开挖、出碴、支护、衬砌等全流程一体化作业。盾构机前端设置刀盘切割围岩，中部通过螺旋输送机或皮带输送机完成出碴，尾部同步完成管片拼装与衬砌施工，形成完整的隧道结构。该方法的核心特征是机械化程度高、施工安全性强，是城市软土隧道、富水隧道施工的主流方法。盾构法的核心优势体现在三个方面：一是施工安全性高，盾构机外壳形成封闭的作业空间，能够有效隔离围岩与地下水，避免围岩坍塌、涌水等安全风险，大幅提升施工安全保障水平；二是对周边环境影响小，施工过程中无爆破振动，地面沉降可控，适用于城市核心区域、穿越江河湖海或既有构筑物的隧道工程；三是施工效率高，全流

程机械化作业实现了施工循环的连续高效，能够大幅缩短施工工期，适用于长距离、大断面隧道工程。其局限性主要表现为设备投入大，盾构机的设计、制造、购置成本高昂，且针对不同地质条件需定制化设计，前期资金投入压力大；地质适应性相对有限，对硬岩、大粒径卵石等地质条件的适配性较差，刀盘磨损严重，施工效率下降；施工灵活性不足，盾构机一旦启动，难以根据地质条件的突变快速调整施工方案。

（三）TBM 法

TBM 法即全断面隧道掘进机法，是针对硬岩隧道设计的全机械化施工方法，核心技术原理与盾构法类似，通过 TBM 掘进机的刀盘切削硬岩，实现全断面开挖，同步完成出碴、支护等作业。与盾构法不同，TBM 法主要适配硬岩地质，支护形式以锚杆、喷射混凝土为主，无需同步拼装管片，其核心特征是硬岩开挖效率高、施工质量稳定。TBM 法的核心优势体现在三个方面：一是硬岩开挖效率极高，TBM 掘进机的刀盘专为硬岩切削设计，能够实现全断面连续开挖，开挖效率远高于钻爆法，适用于长距离硬岩隧道工程；二是施工质量稳定，全断面开挖能够保证隧道断面成型精度高，支护作业同步开展，确保施工质量均匀可控；三是作业环境优良，全封闭机械化作业减少了粉尘、噪声污染，降低了施工人员劳动强度，提升了作业舒适度与安全性。其局限性主要表现为设备针对性强，仅适用于硬岩地质，对软岩、破碎带等不良地质条件的适配性差，易出现刀盘卡阻、围岩坍塌等风险；设备投入与运维成本高，TBM 掘进机的购置、运输、安装成本高昂，刀盘等易损部件的更换与维护成本也较高；施工前期准备周期长，TBM 掘进机的定制化设计、现场组装调试需要较长时间，影响工程开工进度。

（四）浅埋暗挖法

浅埋暗挖法是针对浅埋隧道设计的一种施工方法，核心技术原理是在浅埋条件下，通过“管超前、严注浆、短开挖、强支护、快封闭、勤量测”的核心原则，控制围岩变形与地面沉降，实现隧道暗挖施工。该方法无需大面积地面拆迁，能够在城市建成区、浅埋土层等复杂环境下开展施工，是城市地铁、市政隧道等浅埋工程的主要施工方法。浅埋暗挖法的核心优势体现在三个方面：一是对地面环境适配性强，无需大面积开挖地面，能够有效保护地面既有构筑物、道路与管线，适用于城市核心区域的浅埋隧道工程；二是施工灵活性高，可根据隧道断面大小、地质条件变化调整开挖方式与支护方案，能够适配复杂的断面形式与地质条件；

三是设备投入相对较低，相较于盾构法、TBM 法，浅埋暗挖法所需的施工设备相对简单，前期资金投入压力较小。其局限性主要表现为施工效率低，受“短开挖、强支护”原则限制，施工循环周期长，难以满足长距离隧道的高效施工需求；施工风险较高，浅埋条件下围岩稳定性差，易出现地面沉降过大、围岩坍塌等风险，对施工工艺与监测预警要求极高；对施工人员技术水平要求高，需施工人员精准掌握开挖、支护、量测等核心工序的技术要点，确保施工质量与安全。

三、方法适用边界

隧道施工方法的适用边界是基于方法技术特点与工程实际条件的适配范围界定，核心依据是地质条件与隧道规模，同时需兼顾施工环境、工程成本、工期要求等因素。明确各类施工方法的适用边界，能够为施工方法选择提供量化依据，避免因方法选择不当导致施工安全风险增加、工程成本上升或工期延误。

（一）基于地质条件的适用边界

地质条件是决定施工方法适用边界的核心因素，不同施工方法对围岩强度、完整性、水文条件等地质指标的适配范围存在明确界定。钻爆法的地质适用边界最广，可适配围岩强度从软岩到硬岩的各类地质条件，无论是完整硬岩、破碎软岩，还是富水断层破碎带、岩溶等不良地质，均可通过调整爆破参数与支护方案实现施工，但在极软岩、高水压等特殊地质条件下，施工风险与难度会显著提升。盾构法的地质适用边界主要集中在软土、粉质土、砂层等软质围岩，以及富水地质条件，适用于围岩强度较低、稳定性较差的区域，对围岩强度大于 30MPa 的硬岩地质适配性较差。TBM 法的地质适用边界主要是硬岩地质，适用于围岩强度大于 50MPa、完整性好、稳定性强的硬岩区域，对破碎带、软岩等地质条件的适配性有限，仅能通过预处理措施在局部短距离不良地质段施工。浅埋暗挖法的地质适用边界主要是浅埋土层、砂层、粉质黏土层等浅埋软质围岩，适用于埋深较浅、围岩稳定性较差的区域，对深埋硬岩地质的适配性较差。

（二）基于隧道规模的适用边界

隧道规模主要包括隧道长度、断面尺寸两个核心指标，不同施工方法对隧道规模的适配范围存在明确界定，直接影响施工效率与经济性。钻爆法对隧道长度的适配性较广，短距离（小于 1km）、中长距离（1—5km）隧道均适用，但在长距离（大于 5km）隧道施工中，效率优势不明显；对断面尺寸的适配性也较强，

小断面（小于 10 m^2 ）、中断面（ $10\text{--}50\text{ m}^2$ ）、大断面（大于 50 m^2 ）隧道均可施工，通过分台阶、分导洞等开挖方式适配不同断面尺寸。盾构法适用于长距离隧道施工，通常在隧道长度大于 3km 时能够充分发挥其效率优势，短距离隧道施工因设备投入成本高，经济性较差；适用于中到大断面隧道，断面尺寸通常在 $10\text{--}100\text{ m}^2$ 之间，断面过大或过小均会增加设备设计与施工难度。TBM 法主要适用于长距离硬岩隧道，隧道长度大于 5km 时经济性与效率优势显著，短距离隧道施工不具备经济性；适用于中到大断面硬岩隧道，断面尺寸通常在 $20\text{--}80\text{ m}^2$ 之间，能够实现全断面高效开挖。浅埋暗挖法主要适用于短距离、中短距离隧道施工，隧道长度通常小于 3km ，长距离施工效率低下；适用于中到小断面隧道，断面尺寸通常在 $10\text{--}50\text{ m}^2$ 之间，大断面隧道施工需通过分块开挖实现，难度与风险显著提升。

（三）基于其他条件的适用边界补充

除地质条件与隧道规模外，施工环境、工程成本、工期要求等因素也会界定施工方法的适用边界，需在方法选择过程中综合考量。施工环境方面，城市核心区域、穿越既有构筑物或江河湖海的隧道工程，优先选择对周边环境影响小的盾构法、浅埋暗挖法；偏远山区、对环境影响要求较低的隧道工程，可选择钻爆法、TBM 法。工程成本方面，资金投入有限的项目可选择钻爆法、浅埋暗挖法；资金充足、追求高效施工的长距离大断面隧道，可选择盾构法、TBM 法。工期要求方面，工期紧张的长距离大断面隧道，优先选择盾构法、TBM 法；工期相对宽松的短距离、复杂地质隧道，可选择钻爆法、浅埋暗挖法。这些因素与地质条件、隧道规模共同构成施工方法的完整适用边界，确保方法选择的全面性与合理性。

隧道施工方法分类与特点的核心在于构建开挖方式、机械化程度、地质适应性三大分类维度，明确钻爆法、盾构法、TBM 法、浅埋暗挖法等典型方法的技术特点，界定基于地质条件、隧道规模等因素的适用边界。科学的分类与特点分析能够为施工方法选择提供清晰指引，确保选择的施工方法精准适配工程实际条件，实现施工安全、高效、经济的核心目标。随着施工技术的不断创新，隧道施工方法将朝着更高效、更安全、更智能的方向发展，适用边界也将不断拓展，为复杂隧道工程建设提供更强有力的技术支撑。

第二节 施工方法选择原则

隧道施工方法选择是一项系统性的决策工作，需统筹兼顾地质条件、工程安全、经济成本、施工效率等多重因素，遵循科学的选择原则与决策流程，确保所选施工方法能够精准适配工程实际需求。施工方法选择的合理性直接决定隧道工程的建设成败，不当的方法选择可能导致施工安全风险激增、工程成本超支、工期延误等一系列问题。随着隧道工程建设环境日趋复杂，施工方法选择的系统性与严谨性要求不断提升，需建立“原则引领、因素支撑、流程保障”的完整决策体系。

一、核心选择原则

核心选择原则是隧道施工方法选择的根本遵循，为决策工作提供清晰的价值导向与判断标准。选择原则需立足隧道工程建设的核心目标，兼顾安全性、经济性、适用性与高效性，形成相互协同、相互约束的原则体系。核心选择原则包括地质适配、安全优先、经济合理、效率优化四大原则，各类原则各有侧重、有机统一，共同保障施工方法选择的科学性与合理性。

（一）地质适配原则

地质适配原则是施工方法选择的首要原则，核心是确保所选施工方法与隧道所处的地质条件高度契合，能够有效应对地质环境带来的约束与风险。地质条件是隧道施工的核心客观约束，围岩强度、完整性、水文特征等地质指标直接决定施工方法的可行性与安全性，脱离地质条件的方法选择必然导致决策失准。遵循地质适配原则需重点把握两个核心要点：一是精准匹配围岩特性，针对硬岩、软岩、破碎带等不同围岩类型，选择能够有效适配其力学特征的施工方法，硬岩地质优先选择高效破碎的施工方法，软岩地质优先选择低扰动、强支护的施工方法；二是针对性防控地质风险，对于富水、岩溶、断层破碎带等不良地质条件，所选施工方法需具备对应的风险防控能力，实现对地下水、围岩坍塌等风险的有效管控。地质适配原则要求施工方法选择必须以详实的地质勘察资料为基础，避免主观臆断，确保方法选择的客观性与针对性。

（二）安全优先原则

安全优先原则是施工方法选择的核心导向，核心是将施工安全置于决策工作

的首要位置，确保所选施工方法能够最大限度降低施工安全风险，保障施工人员与设备安全，避免安全事故的发生。隧道施工环境复杂，地质灾害、结构失稳等安全风险隐患较多，安全保障是工程建设的前提与基础。遵循安全优先原则需重点关注三个方面：一是强化风险防控能力，所选施工方法需能够有效应对各类潜在安全风险，具备完善的风险管控措施，如在富水地质条件下，选择具备可靠排水与抗渗能力的施工方法；二是保障作业空间安全，确保施工过程中能够形成稳定的作业环境，避免围岩坍塌、涌水涌砂等风险对作业空间的威胁；三是适配安全管理要求，所选施工方法需与项目的安全管理水平、施工人员技术能力相匹配，便于安全管控措施的有效落实。安全优先原则要求在施工方法选择过程中，若存在安全与其他目标的冲突，需优先保障安全需求，不得为追求经济或效率目标牺牲安全保障。

（三）经济合理原则

经济合理原则是施工方法选择的重要考量，核心是在满足安全与质量要求的前提下，通过科学选择施工方法，优化工程成本结构，降低工程总投资，实现经济效益的最大化。隧道工程建设投资规模大，施工方法直接影响设备购置、材料消耗、人工成本等多个成本环节，合理的方法选择能够有效控制成本。遵循经济合理原则需把握三个核心要点：一是优化成本构成，所选施工方法需能够实现各类成本的均衡控制，避免单一成本环节的过度投入，如在短距离隧道施工中，避免选择设备投入高昂的全机械化施工方法，降低前期投资成本；二是兼顾全生命周期成本，不仅要考虑施工阶段的直接成本，还需考量运营阶段的维护成本，选择能够降低长期维护成本的施工方法；三是避免盲目追求低成本，经济合理并非单纯的成本最低，而是在满足安全、质量、工期要求的基础上实现成本最优，防止因过度控制成本导致安全风险提升或质量下降。

（四）效率优化原则

效率优化原则是施工方法选择的重要目标，核心是通过选择适配的施工方法，提升施工效率，缩短施工工期，确保工程能够按时交付使用。施工效率直接影响工程工期与投资回报，尤其是对于有明确工期要求的重点工程，效率优化至关重要。遵循效率优化原则需重点关注两个方面：一是提升作业循环效率，所选施工方法需具备高效的作业流程，能够实现各工序的顺畅衔接，减少工序等待时间，如全机械化施工方法通过一体化作业提升施工循环效率；二是适配工期要求，根

据工程的工期目标选择对应的施工方法，工期紧张的长距离、大断面隧道优先选择高效的机械化施工方法，工期相对宽松的短距离、复杂地质隧道可选择灵活性更强的施工方法。效率优化原则要求施工方法选择需兼顾效率与质量、安全的平衡，避免为追求效率而忽视施工质量与安全管控。

二、关键影响因素

隧道施工方法选择受多重因素综合影响，这些因素相互关联、相互制约，共同决定施工方法的适配性。明确关键影响因素，能够为施工方法选择提供精准的决策依据，确保选择过程全面、客观。关键影响因素主要包括地质条件、隧道功能、工期要求、技术装备四大类，各类因素从不同维度对施工方法选择产生约束与引导作用。

（一）地质条件

地质条件是影响施工方法选择的最核心、最基础因素，其对施工方法的约束作用贯穿决策全过程。地质条件的核心影响指标包括围岩等级、岩体力学性能、水文地质特征、不良地质分布等，各类指标直接决定施工方法的可行性与安全性。围岩等级直接决定施工方法的支护强度与开挖方式，高等级完整围岩可选择简化的开挖与支护方法，低等级破碎围岩则需选择强支护、低扰动的施工方法；岩体力学性能影响施工方法的开挖效率，硬岩地质需选择具备高效破碎能力的施工方法，软岩地质需选择具备抗大变形能力的施工方法；水文地质特征决定施工方法的排水与抗渗要求，富水地质需选择能够有效控制地下水的施工方法；不良地质分布要求施工方法具备针对性的风险防控能力，如穿越断层破碎带需选择具备超前加固能力的施工方法。地质条件的复杂性要求施工方法选择必须以详实的地质勘察数据为支撑，确保方法选择的精准性。

（二）隧道功能

隧道功能是影响施工方法选择的重要因素，核心是确保所选施工方法能够适配隧道的使用功能要求，保障隧道建成后的运营效果。隧道功能差异主要体现在隧道用途、断面尺寸、运营荷载等方面，不同功能需求对施工方法的要求存在显著差异。隧道用途直接决定施工方法的选择方向，公路隧道需满足大断面、高平整度的要求，可选择盾构法、TBM 法或钻爆法；铁路隧道需兼顾断面尺寸与轨道铺设要求，施工方法需确保隧道断面成型精度；城市地铁隧道需适应城市密集

环境，优先选择对周边环境影响小的施工方法；市政综合管廊隧道需满足多管线敷设要求，施工方法需保障隧道内部空间的规整性。断面尺寸影响施工方法的开挖方式，大断面隧道需选择能够实现高效开挖与支护的方法，小断面隧道可选择灵活性更强的施工方法。运营荷载要求施工方法能够保障隧道结构的长期稳定性，确保结构强度满足运营荷载需求。

（三）工期要求

工期要求是影响施工方法选择的重要约束因素，核心是确保所选施工方法能够在规定工期内完成工程建设任务。工期要求的松紧程度直接决定施工方法的效率导向，不同工期目标对应不同的施工方法选择策略。对于工期紧张的重点工程，需优先选择施工效率高的全机械化施工方法，如长距离硬岩隧道选择 TBM 法，长距离软土隧道选择盾构法，通过全流程一体化作业大幅缩短施工工期；对于工期相对宽松的工程，可根据地质条件与经济成本要求，选择灵活性更强或成本更低的施工方法，如复杂地质短距离隧道选择钻爆法，城市浅埋隧道选择浅埋暗挖法。工期要求还需与施工方法的前期准备周期相匹配，全机械化施工方法前期设备定制、组装调试周期长，需在工期规划中充分考量；传统施工方法前期准备周期短，能够快速开工，适用于工期紧张但前期准备时间有限的工程。

（四）技术装备

技术装备水平是施工方法选择的现实约束因素，核心是确保所选施工方法能够与项目具备的技术装备条件相匹配，保障施工过程的顺利推进。技术装备水平主要包括施工设备配置、技术人员储备、施工技术积累等方面，直接影响施工方法的可行性与实施效果。施工设备配置是技术装备水平的核心体现，选择全机械化施工方法需具备对应的专用设备，如盾构法需配备盾构机，TBM 法需配备 TBM 掘进机，若项目不具备此类设备且无法通过购置或租赁解决，则需调整施工方法选择；传统施工方法对设备的要求相对较低，适用于设备配置有限的项目。技术人员储备要求项目具备掌握所选施工方法核心技术的专业人员，全机械化施工方法对操作人员与技术管理人员的专业水平要求高，需确保人员能够胜任施工需求；传统施工方法对人员技术水平要求相对较低，适用于技术人员储备有限的项目。施工技术积累要求项目具备所选施工方法的技术经验，避免选择技术难度过高、缺乏实践经验的施工方法，降低施工风险。

三、选择决策流程

科学的选择决策流程是保障施工方法选择合理性的关键，核心是建立“全流程管控、多环节验证”的决策机制，通过规范化的流程步骤，确保决策过程全面、客观、严谨。选择决策流程需贯穿隧道工程前期准备阶段，形成“地质勘察 - 方案比选 - 专家论证 - 动态调整”的闭环管理体系，避免决策的主观性与片面性。

（一）地质勘察阶段

地质勘察阶段是施工方法选择的基础环节，核心任务是通过系统的地质勘察工作，获取隧道沿线的详细地质资料，为后续方案比选提供精准的地质依据。地质勘察的全面性与精准性直接决定施工方法选择的科学性，需采用多种勘察手段，确保勘察成果能够真实反映地质条件。地质勘察阶段的核心工作内容包括：开展区域地质调查，明确隧道所处区域的地质构造背景；实施钻孔勘察，获取不同深度的围岩样本，测试岩体力学参数；进行水文地质勘察，查明地下水分布、水位、水压等水文特征；开展不良地质专项勘察，精准定位断层破碎带、岩溶、富水区域等不良地质的分布范围与特征。勘察完成后需编制详细的地质勘察报告，系统梳理地质条件，明确地质风险点，为施工方法的初步筛选提供清晰的地质导向。若勘察过程中发现地质条件复杂多变，需加密勘察点，提升勘察精度，避免因地质资料缺失导致决策失误。

（二）方案比选阶段

方案比选阶段是施工方法选择的核心环节，核心任务是基于地质勘察资料与工程需求，筛选出可行的施工方法方案，通过多维度的对比分析，确定最优方案。方案比选需遵循核心选择原则，全面考量各方案的安全性、经济性、效率性与可行性。方案比选阶段的核心工作内容包括：初步筛选可行方案，根据地质适配原则，排除与地质条件严重不符的施工方法，保留具备可行性的方案；建立比选指标体系，指标体系需涵盖安全风险、工程成本、施工工期、技术难度、环境影响等核心维度；开展多方案对比分析，针对各可行方案，量化分析其在各比选指标上的表现，如采用成本估算方法对比各方案的投资成本，采用进度模拟方法对比各方案的施工工期；综合评价确定最优方案，结合工程的核心目标与约束条件，对各方案进行综合打分，选择综合表现最优的方案作为推荐方案。方案比选过程中需形成详细的比选报告，明确各方案的优势与不足，为后续专家论证提供依据。

（三）专家论证阶段

专家论证阶段是施工方法选择的验证环节，核心任务是组织行业专家对推荐的施工方法方案进行全面评审，验证方案的科学性、合理性与可行性，提出优化建议。专家论证能够弥补项目团队的技术局限，提升决策的科学性与可靠性。专家论证阶段的核心工作内容包括：组建专家团队，专家团队需涵盖地质勘察、隧道设计、施工技术、安全管理等多个领域的专业人才，确保评审的全面性；提交论证资料，向专家团队提交地质勘察报告、方案比选报告、工程可行性研究报告等相关资料，保障专家能够全面了解项目情况；开展专家评审，专家团队通过现场勘查、资料审核、会议讨论等方式，对推荐方案的地质适配性、安全保障措施、经济合理性、技术可行性等进行全面评审；形成论证意见，专家团队根据评审结果，出具明确的论证意见，若方案可行，提出优化完善建议；若方案存在重大缺陷，需返回方案比选阶段重新筛选方案。专家论证意见需作为施工方法最终决策的重要依据，确保决策结果的权威性。

（四）动态调整阶段

动态调整阶段是施工方法选择的闭环保障环节，核心任务是在施工过程中，根据实际地质条件与施工情况，对所选施工方法进行动态优化调整，确保方法始终适配工程实际。隧道地质条件的复杂性与不确定性决定了施工方法选择并非一次性的静态决策，需建立动态调整机制。动态调整阶段的核心工作内容包括：建立施工监测体系，在施工过程中，实时监测围岩变形、支护受力、地下水变化等关键指标，及时掌握实际地质条件与施工状态；开展监测数据分析，对比监测数据与设计预期，判断所选施工方法的适配性，若监测数据显示施工方法与实际地质条件不符，如围岩变形过大，需及时预警；制定调整方案并实施，针对监测发现的问题，组织技术人员分析原因，制定针对性的调整方案，如优化支护参数、调整开挖步距，必要时可更换施工方法；验证调整效果，调整方案实施后，通过监测数据验证调整效果，确保调整后的施工方法能够有效控制安全风险，保障施工顺利推进。动态调整阶段需形成详细的调整记录，不断优化施工方法，实现施工过程的精准管控。

隧道施工方法选择原则的核心在于遵循地质适配、安全优先、经济合理、效率优化的核心原则，全面考量地质条件、隧道功能、工期要求、技术装备等关键影响因素，严格执行“地质勘察 - 方案比选 - 专家论证 - 动态调整”的选择决策

流程。科学的选择原则与决策流程能够确保施工方法选择的科学性、合理性与可行性，为隧道工程的安全、高效、经济建设提供坚实保障。随着隧道工程建设技术的不断发展与管理水平的不断提升，施工方法选择将朝着更精准、更智能、更系统的方向发展，为复杂隧道工程建设提供更强有力的决策支撑。

第三节 不同地质条件下的施工方法

地质条件是决定隧道施工方法选择的核心约束因素，不同地质条件下的围岩力学特性、水文特征、稳定性差异显著，对施工方法的开挖方式、支护体系、风险防控要求也截然不同。精准匹配地质条件与施工方法，是保障隧道施工安全、高效推进的关键。坚硬围岩、软弱围岩、复杂地质作为隧道工程中最典型的三类地质场景，其施工方法的选择与优化具有代表性。

一、坚硬围岩施工

坚硬围岩通常指岩体完整性好、强度高、稳定性强的地质条件，常见岩性包括花岗岩、玄武岩、石英岩等，围岩等级多为Ⅰ - Ⅱ级。此类地质条件下，隧道施工的核心优势是围岩自身承载能力强，开挖后围岩不易发生变形与坍塌，施工风险相对较低。施工的核心目标是提升开挖效率、控制岩爆风险、保障施工质量。适配的主流施工方法为钻爆法与TBM法，需根据隧道规模、工期要求等因素选择适配方法，并针对性优化技术参数。

（一）钻爆法技术应用与优化

钻爆法在坚硬围岩施工中应用广泛，核心优势是适应性强、设备投入相对较低、施工灵活性高，能够适配不同断面形式与隧道规模。其技术应用的核心是通过精准控制爆破参数，实现高效破碎围岩的同时，减少爆破对围岩的扰动，避免诱发岩爆，保障隧道断面成型质量。

钻爆法在坚硬围岩施工中的技术应用要点包括三个方面。一是爆破参数优化，需根据岩体强度、完整性调整炮孔布置、装药结构、起爆顺序等参数。采用光面爆破或预裂爆破技术，控制炮孔间距、抵抗线长度，确保爆破后隧道轮廓规整，减少超欠挖；合理选择炸药类型与装药量，避免因装药量过大导致围岩过度破碎或诱发岩爆，装药量需通过现场试验逐步优化。二是开挖作业组织，坚硬围岩开

挖效率受钻孔、出碴环节制约，需优化作业循环流程。采用多臂凿岩台车提升钻孔效率，配套大型装载机、自卸车提升出碴效率，实现钻孔、爆破、出碴工序的顺畅衔接；根据隧道断面尺寸选择合适的开挖方式，中短距离、中小断面隧道可采用全断面开挖，提升施工效率；长距离、大断面隧道可采用台阶法开挖，平衡效率与施工稳定性。三是岩爆风险防控，坚硬围岩深埋隧道易发生岩爆，需配套针对性防控措施。在开挖前进行岩爆风险评估，通过超前地质预报预判岩爆发生可能性；开挖过程中采用微震监测、声发射监测等技术实时监测岩爆风险，若发现风险预警，及时采取超前卸压、喷水降温、及时支护等措施，抑制岩爆发生；开挖后及时施作喷射混凝土封闭围岩，减少围岩暴露时间，降低岩爆诱发概率。

钻爆法的优化方向聚焦于效率提升与风险管控。通过引入智能化钻孔设备，实现炮孔定位精准化，提升爆破效果与钻孔效率；采用数码电子雷管，精准控制起爆时差，优化爆破能量分布，减少爆破扰动；建立爆破参数数据库，结合不同坚硬围岩的岩性特征，形成标准化的爆破参数体系，提升参数选择的精准性与效率。

（二）TBM 法技术应用与优化

TBM 法即全断面隧道掘进机法，是坚硬围岩长距离隧道施工的最优适配方法，核心优势是开挖效率极高、施工质量稳定、作业环境优良，能够大幅缩短长距离坚硬围岩隧道的施工工期。其技术应用的核心是充分发挥 TBM 设备的硬岩切削优势，保障设备高效、稳定运行，控制设备磨损与岩爆风险。

TBM 法在坚硬围岩施工中的技术应用要点包括三个方面。一是设备选型与参数匹配，需根据坚硬围岩的岩性、强度、完整性选择适配的 TBM 机型与刀盘参数。针对高强度硬岩，选择配备滚刀数量充足、刀盘扭矩大的 TBM 机型，提升切削效率；根据岩体完整性调整刀盘开口率，岩体完整度高时可采用较大开口率，提升出碴效率；匹配合理的掘进参数，包括掘进速度、刀盘转速、推力等，确保掘进过程稳定，避免因参数不当导致刀盘过度磨损或设备故障。二是掘进作业管控，TBM 法施工的核心是保障全流程一体化作业的顺畅性。建立实时监测系统，监测 TBM 设备的掘进参数、刀盘磨损情况、围岩变形数据，及时调整掘进策略；优化出碴系统，确保出碴能力与掘进速度匹配，避免因出碴不及时影响掘进效率；同步开展支护作业，根据围岩稳定性选择适配的支护形式，通常采用锚杆、喷射混凝土支护，确保支护作业与掘进作业高效衔接，减少工序等待时间。

三是设备维护与岩爆防控，坚硬围岩施工中 TBM 刀盘磨损严重，需建立科学的设备维护体系。定期检查刀盘滚刀磨损情况，及时更换磨损超标的滚刀，保障切削效率；定期对 TBM 设备的液压系统、电气系统、推进系统进行检修维护，避免设备故障导致施工中断。岩爆防控方面，采用 TBM 自带的监测系统结合外部微震监测设备，实时监测岩爆风险；在岩爆高发区域，可采用超前钻孔卸压、超前注浆加固等预处理措施，降低岩爆风险；掘进过程中若遭遇岩爆，及时启动应急措施，停止掘进、撤离人员，待风险稳定后进行处理。

TBM 法的优化方向聚焦于智能化运维与效率提升。通过引入智能监测与诊断系统，实现刀盘磨损、设备运行状态的精准预判，提前安排维护作业，减少非计划停机时间；优化掘进参数自适应控制技术，根据实时监测的围岩岩性数据，自动调整掘进速度、推力等参数，实现高效自适应掘进；研发适配极端坚硬围岩的高性能刀盘与滚刀材料，提升刀盘耐磨性，延长使用寿命，降低设备运维成本。为清晰呈现坚硬围岩下钻爆法与 TBM 法的技术适配性与应用差异，构建如下坚硬围岩隧道施工方法适配性对比表：

对比维度	钻爆法	TBM 法
适用隧道规模	中短距离(<5km)、中小断面(<50 m²)	长距离(>5km)、中大断面(20-80 m²)
开挖效率	中等，受爆破循环、出碴效率制约	极高，全断面连续掘进，效率为钻爆法 3-5 倍
设备投入	较低，主要为钻孔机、装载机等常规设备	极高，TBM 设备购置、运输、安装成本高昂
岩爆防控难度	中等，爆破易诱发岩爆，需精准控制参数	较低，无爆破扰动，可实时监测并提前防控
施工灵活性	高，可根据地质变化实时调整开挖与支护方案	较低，设备针对性强，调整难度大
作业环境	较差，爆破产生粉尘、噪声污染	优良，全封闭机械化作业，污染小、劳动强度低

二、软弱围岩施工

软弱围岩通常指岩体破碎、强度低、胶结性差、变形量大的地质条件，常见岩性包括粉质黏土、淤泥质土、砂层、破碎页岩等，围岩等级多为Ⅳ - Ⅴ级。此类地质条件下，隧道施工的核心挑战是围岩自身承载能力弱，开挖后易发生较大变形、坍塌，且常伴随地下水富集，施工风险较高。施工的核心目标是减少围岩

扰动、控制大变形、保障作业安全。适配的主流施工方法为盾构法与浅埋暗挖法，需重点强化支护与开挖的协同配合，实现“开挖－支护－封闭”的高效衔接。

（一）盾构法支护与开挖协同技术

盾构法是软弱围岩尤其是富水软弱围岩隧道施工的主流方法，其核心优势是施工安全性高、对周边环境影响小、机械化程度高。盾构法的支护与开挖协同是技术核心，通过盾构机自身的护盾保护、刀盘开挖、同步衬砌支护的一体化作业，实现开挖与支护的无缝衔接，有效控制软弱围岩变形与地下水渗透。

盾构法支护与开挖协同技术的应用要点包括三个方面。一是开挖与护盾支护协同，盾构机通过前端刀盘进行开挖，同时利用护盾对开挖面及周边围岩形成即时支护，避免围岩暴露与坍塌。根据软弱围岩的强度与稳定性，选择适配的刀盘类型与开挖参数，软土、砂层地质可采用面板式刀盘，提升切削稳定性；富水砂层地质需控制掘进速度，避免因开挖过快导致开挖面失稳；护盾压力需精准匹配围岩压力与地下水压力，压力过大易导致围岩扰动加剧，压力过小则无法有效支撑围岩，需通过实时监测数据动态调整护盾压力。二是出碴与开挖进度协同，软弱围岩开挖出碴过程中，需确保出碴速度与开挖速度精准匹配，避免因出碴过快导致开挖面压力失衡，引发涌水涌砂或围岩坍塌。采用螺旋输送机或皮带输送机进行出碴，根据开挖速度动态调整出碴设备的运行参数；在富水软弱围岩区域，可在出碴系统中设置防水密封装置，防止地下水随碴体溢出，保障作业环境安全。三是同步衬砌与开挖协同，盾构机在掘进过程中同步完成管片拼装，形成永久支护结构，实现开挖与支护的即时闭环。优化管片拼装流程，确保拼装速度与掘进速度匹配，减少拼装等待时间；加强管片拼装质量控制，确保管片连接紧密，同步设置止水条、密封胶等防水构件，提升衬砌结构的防水性能；管片拼装完成后，及时进行二次注浆，填充管片与围岩之间的空隙，强化支护效果，控制后期变形。

盾构法支护与开挖协同技术的优化方向聚焦于精准控制与自适应调整。通过引入智能监测系统，实时监测开挖面压力、围岩变形、管片受力等数据，建立数据驱动的协同控制模型，自动调整掘进速度、护盾压力、出碴速度等参数，实现开挖与支护的自适应协同；研发适配不同软弱围岩类型的刀盘与支护系统，提升设备对地质条件的适配性；优化二次注浆技术，采用智能注浆设备，精准控制注浆量与注浆压力，提升注浆效果，进一步强化支护与围岩的协同承载能力。

（二）浅埋暗挖法支护与开挖协同技术

浅埋暗挖法是城市浅埋软弱围岩隧道施工的核心方法，适用于埋深较浅、周边环境复杂的市政隧道、地铁隧道等工程。其核心优势是对地面环境影响小、施工灵活性高，无需大面积拆迁。浅埋暗挖法的核心技术原则是“管超前、严注浆、短开挖、强支护、快封闭、勤量测”，支护与开挖协同是实现该原则的关键，通过超前支护、短进尺开挖、即时支护的紧密配合，控制围岩变形与地面沉降。

浅埋暗挖法支护与开挖协同技术的应用要点包括三个方面。一是超前支护与开挖协同，在开挖前通过超前支护对围岩进行预加固，为开挖作业创造稳定条件。根据软弱围岩类型选择适配的超前支护形式，砂层、富水地层优先采用管棚+超前小导管注浆支护，通过注浆加固周边围岩，提升围岩整体性与抗渗性；粉质黏土地层可采用超前小导管注浆支护，增强围岩稳定性。超前支护施工完成后，需对支护效果进行检验，确保满足开挖要求后再开展开挖作业；开挖过程中需保护超前支护构件，避免其受损影响支护效果。二是短开挖与即时支护协同，采用短进尺开挖方式，减少围岩一次暴露面积与暴露时间，通常进尺控制在0.5—1.0m。开挖完成后，立即开展初期支护作业，采用喷射混凝土+锚杆+钢拱架的联合支护体系，快速形成支护强度，约束围岩变形。优化开挖与支护的作业流程，实现开挖完成后24小时内完成初期支护封闭，形成“开挖—支护”的快速闭环；根据围岩变形监测数据调整开挖进尺与支护参数，若变形速率过大，需缩短开挖进尺、加密钢拱架间距。三是支护封闭与变形监测协同，在初期支护完成后，及时开展二次衬砌施工，实现支护结构的全封闭，提升支护体系的整体稳定性与承载能力。二次衬砌施工需在初期支护变形趋于稳定后进行，避免过早施作导致衬砌受力集中；施工过程中加强变形监测，实时掌握围岩与支护结构的变形状态，若发现变形异常，及时采取补强支护措施。同时，通过监测数据验证支护与开挖协同方案的有效性，动态优化施工参数。

浅埋暗挖法支护与开挖协同技术的优化方向聚焦于精细化控制与风险预判。采用高精度超前地质预报技术，精准探测前方围岩地质条件与地下水分布，为超前支护与开挖参数的优化提供依据；引入智能化监测设备，实现围岩变形、地面沉降、支护受力的实时监测与数据可视化分析，提升风险预判能力；优化支护材料与施工工艺，采用早强喷射混凝土、高强度锚杆等材料，提升初期支护的快速承载能力，缩短支护封闭时间；研发小型化、智能化施工设备，提升狭窄作业空

间下开挖与支护的协同效率。

三、复杂地质施工

复杂地质是指存在特殊不良地质现象的地质条件,常见类型包括断层破碎带、富水地层、岩溶地层、高地温地层、有毒有害气体地层等。此类地质条件下,隧道施工的核心挑战是地质条件复杂多变、风险因素多、不确定性强,易发生坍塌、涌水涌砂、突泥、岩爆等安全事故。施工的核心目标是精准识别地质风险、选择适配施工方法、实施针对性风险防控措施,保障施工安全。复杂地质施工方法选择需遵循“地质勘察先行、风险分级管控、方法精准适配、措施动态调整”的原则,根据具体复杂地质类型制定针对性施工方案。

(一) 穿越断层施工方法选择与风险控制

断层破碎带是隧道施工中最常见的复杂地质类型,其核心特征是岩体极度破碎、胶结性差、稳定性极差,常伴随地下水富集,施工风险极高。穿越断层施工的核心思路是“超前加固、短进尺、强支护、快封闭、稳推进”,适配的施工方法需根据断层规模、破碎带宽度、地下水情况选择,主流方法为钻爆法与盾构法,需重点强化超前加固与风险控制。

施工方法选择需结合断层具体条件:对于规模较小、破碎带较窄、地下水较少的断层,可采用钻爆法施工,通过超前小导管注浆、管棚支护等超前加固措施,加固破碎围岩后再进行短进尺开挖,配合强支护体系控制变形;对于规模较大、破碎带较宽、富水的断层,优先采用盾构法施工,利用盾构机护盾的防护作用隔离破碎围岩与地下水,避免开挖过程中发生坍塌与涌水涌砂;若隧道周边环境复杂、不具备盾构机施工条件,可采用浅埋暗挖法,通过超前大管棚+注浆加固、CRD法或双侧壁导坑法等分部开挖方式,严格控制围岩变形与地面沉降。

穿越断层的风险控制核心措施包括三个方面。一是超前地质预报与风险评估,采用综合超前地质预报技术,包括地质雷达、超前钻孔、地震波法等,精准探测断层破碎带的范围、厚度、破碎程度及地下水分布,评估坍塌、涌水等风险等级,为施工方法选择与参数优化提供依据。二是超前加固措施,根据断层破碎程度与地下水情况,选择适配的超前加固技术,如深层注浆加固、管棚支护、超前小导管注浆等,通过注浆填充破碎围岩空隙、胶结破碎岩体,提升围岩整体性与稳定性,阻断地下水渗透路径;加固完成后需进行效果检验,确保加固后的围岩满足

施工安全要求。三是过程风险管控，采用短进尺、弱爆破（钻爆法）或低速掘进（盾构法）的方式推进施工，减少对破碎围岩的扰动；加强施工监测，实时监测围岩变形、支护受力、地下水水位变化等数据，设置风险预警阈值，若监测数据达到预警值，立即停止施工，采取补强措施；配备充足的应急物资与应急设备，制定针对性应急预案，若发生坍塌、涌水等突发事件，及时启动应急响应，保障人员安全。

（二）富水地层施工方法选择与风险控制

富水地层是指地下水含量丰富、水压较高的地质条件，常见类型包括富水砂层、富水砾石层、富水断层破碎带等。此类地质条件下，施工的核心风险是涌水涌砂、围岩失稳，施工的核心思路是“堵排结合、先治后挖、分级防控”，适配的施工方法需具备可靠的防水与抗渗能力，主流方法为盾构法、钻爆法（配套防水措施）。

施工方法选择需结合富水地层特征：对于富水软土、砂层等软弱围岩地层，优先采用盾构法施工，盾构机通过护盾密封与同步注浆形成完整的防水体系，能够有效阻隔地下水，避免涌水涌砂风险；对于富水硬岩地层，可采用钻爆法施工，需配套完善的排水与防水措施，如超前注浆堵水、洞内排水系统、喷射混凝土+防水板的支护防水体系；对于城市浅埋富水地层，若周边环境敏感、地面沉降控制要求高，可采用浅埋暗挖法，配合超前注浆加固、分部开挖、即时支护技术，实现防水与变形控制的双重目标。

富水地层的风险控制核心措施包括三个方面。一是治水措施优化，根据地下水类型与水压，选择“堵”“排”或“堵排结合”的治水策略。对于水压高、水量大的地层，优先采用超前注浆堵水，通过注浆形成隔水帷幕，减少地下水涌入洞内；对于水压较低、水量较小的地层，可采用洞内排水方式，设置排水沟、集水井，及时排出洞内积水；对于生态环境敏感区域，需严格控制排水，避免地下水过度流失导致地面沉降或周边水源枯竭。二是防水体系构建，采用“刚柔并济”的复合防水体系，刚性防水通过喷射混凝土、二次衬砌的抗渗性能实现，柔性防水通过防水板、止水带等防水构件实现，确保防水体系的完整性与可靠性；加强施工缝、变形缝等薄弱部位的防水处理，避免出现渗漏隐患。三是过程监测与应急防控，实时监测地下水水位、洞内涌水量、围岩变形、地面沉降等数据，评估治水与防水措施的有效性；若发现涌水量突然增大、水位异常下降，需及时排查

原因，采取补强注浆等措施；配备应急排水设备、注浆设备等应急物资，制定涌水涌砂应急预案，确保突发事件能够得到及时处置。

（三）其他复杂地质施工简要说明

除断层破碎带与富水地层外，岩溶地层、高地温地层、有毒有害气体地层等也是常见的复杂地质类型，其施工方法选择与风险控制需针对性开展。岩溶地层施工需优先采用精准超前地质预报技术，探测溶洞的位置、大小、充填情况，适配的施工方法为钻爆法（配套超前注浆填充加固）或改造后的盾构法，风险控制核心是防止突水突泥与溶洞坍塌；高地温地层施工可采用钻爆法或 TBM 法，需配套通风降温系统、设备冷却系统，风险控制核心是保障作业人员健康与设备正常运行；有毒有害气体地层施工需加强通风换气，采用气体监测设备实时监测气体浓度，适配的施工方法为钻爆法（弱爆破减少气体释放），风险控制核心是防止气体中毒与爆炸事故。

不同地质条件下隧道施工方法的选择需立足地质特征精准适配，坚硬围岩聚焦效率提升与岩爆防控，优先选择钻爆法或 TBM 法；软弱围岩聚焦变形控制与安全保障，核心是实现盾构法或浅埋暗挖法的支护与开挖协同；复杂地质聚焦风险精准管控，根据具体地质风险选择适配施工方法，实施针对性的超前加固与过程防控措施。随着地质勘察技术、施工技术与智能化监测技术的不断发展，不同地质条件下的施工方法将朝着更精准、更安全、更高效的方向发展，为复杂地质条件下隧道工程的顺利推进提供更强有力的技术支撑。

第四节 施工方法经济性分析

施工方法的经济性是隧道工程建设决策的核心考量因素之一，直接关系到工程总投资、建设效益与运营成本。不同施工方法的成本构成存在显著差异，其经济性受地质条件、隧道规模、工期要求、技术装备等多重因素影响。科学开展施工方法经济性分析，需精准拆解成本构成要素，采用量化的评价方法对比不同方案的经济性，进而探索安全与质量前提下的成本优化路径。这一分析过程不仅能够为施工方法选择提供经济依据，还能推动隧道工程建设实现“安全可靠、经济高效”的核心目标。

一、成本构成分析

隧道施工方法的成本构成是经济性分析的基础，核心是梳理施工全流程中产生的各类费用，明确不同成本要素的占比与影响因素。隧道施工成本具有构成复杂、动态变化的特征，需从施工全周期视角进行系统拆解。核心成本构成包括设备投入、人工成本、材料消耗、工期成本四大类，各类成本相互关联、相互影响，共同决定施工方法的总成本水平。

（一）设备投入

设备投入是隧道施工成本的核心组成部分，直接受施工方法的机械化程度影响，不同施工方法的设备投入差异显著。设备投入主要包括设备购置或租赁费用、设备运维费用、设备运输与安装费用三大类，其占比在全机械化施工方法中尤为突出。全机械化施工方法如盾构法、TBM 法的设备投入极高。盾构机、TBM 掘进机等专用设备的购置成本高昂，且需根据具体地质条件与隧道参数定制化设计，进一步提升了前期设备投入；设备运输与安装涉及大型设备的拆解、运输、现场组装调试等环节，费用占比也较高；运维费用方面，此类设备的刀盘、滚刀等易损部件更换频繁，液压系统、电气系统等核心部件的维护成本也较高。传统施工方法如钻爆法、浅埋暗挖法的设备投入相对较低，主要涉及钻孔机、装载机、喷射机等常规设备，购置或租赁成本较低，运维与运输安装费用也相对可控。设备投入的多少直接决定了施工方法的前期投资门槛，是区分不同施工方法经济性的关键指标之一。

（二）人工成本

人工成本是隧道施工成本的重要组成部分，核心取决于施工方法的机械化程度、施工难度与工期长度。人工成本主要包括施工人员薪酬、福利、培训费用等，其占比与施工方法的自动化水平呈负相关。全机械化施工方法的人工成本占比相对较低。盾构法、TBM 法等全流程机械化作业大幅减少了对人工的依赖，所需施工人员数量较少，且主要为设备操作人员与技术管理人员，虽然技术管理人员薪酬水平较高，但总体人工成本可控。传统施工方法的人工成本占比相对较高，钻爆法、浅埋暗挖法等需要大量一线施工人员完成钻孔、爆破、出碴、支护等作业，且施工环境复杂、劳动强度大，需支付较高的薪酬与福利费用；同时，此类施工方法对施工人员的技术水平要求较高，需投入额外的培训费用提升人员技能。

此外，施工难度与工期长度也会影响人工成本，复杂地质条件下施工人员效率下降、工期延长，都会导致人工成本增加。

（三）材料消耗

材料消耗成本是隧道施工的直接成本，核心取决于施工方法的支护体系、开挖方式与隧道规模。主要消耗材料包括支护材料、爆破材料、防水材料等，其成本占比受地质条件与施工方法的支护强度要求影响显著。支护材料是材料消耗成本的核心，不同施工方法的支护材料类型与消耗量差异较大。盾构法的支护材料主要为管片、止水条、密封胶等，管片为预制构件，成本相对固定，消耗量与隧道长度、断面尺寸直接相关；TBM 法、钻爆法、浅埋暗挖法的支护材料主要为混凝土、钢筋、锚杆、钢拱架等，软弱围岩或复杂地质条件下，需强化支护体系，增加钢筋、钢拱架的消耗量，导致材料成本上升。爆破材料仅适用于钻爆法，其消耗量与岩体强度、隧道断面尺寸相关，坚硬围岩需更多爆破材料才能实现有效破碎。防水材料的消耗量与施工方法的防水要求相关，富水地质条件下，盾构法、浅埋暗挖法等需加强防水体系，增加防水板、止水带等材料的消耗，提升材料成本。

（四）工期成本

工期成本是隧道施工的隐性成本，核心是指因工期延长或缩短产生的额外费用，包括资金占用成本、工期奖惩费用、资源闲置成本等。工期成本易被忽视，但对施工方法的总体经济性影响显著，尤其对于有明确工期要求的重点工程。资金占用成本是工期成本的主要组成部分，隧道工程投资规模大，工期延长会增加贷款利息等资金占用费用，直接提升总成本。工期奖惩费用与项目合同约定相关，提前完成工期可获得奖励，延误工期则需支付违约金，这一费用直接影响施工方法的经济效益。资源闲置成本是指因工期调整导致施工设备、人员闲置产生的费用，如全机械化施工方法中，TBM 机、盾构机等大型设备闲置期间的维护与折旧费用较高。不同施工方法的工期效率差异显著，全机械化施工方法工期较短，能够有效降低资金占用成本与资源闲置成本；传统施工方法工期较长，工期成本相对较高，尤其在复杂地质条件下，工期延误风险增加，进一步推高工期成本。

二、经济性评价方法

经济性评价方法是量化对比不同施工方法经济效益的核心工具，需遵循“全面性、客观性、量化性”的原则，综合考量各类成本要素与效益指标，为施工方

法选择提供精准的经济依据。常用的经济性评价方法包括成本效益分析与生命周期成本评价，两类方法各有侧重，分别从短期建设效益与长期全周期效益视角开展评价，形成互补的评价体系。

（一）成本效益分析

成本效益分析是最常用的经济性评价方法，核心是通过计算不同施工方法的总成本与总效益，对比分析其效益成本比，筛选经济效益最优的方案。该方法聚焦于施工建设阶段的直接成本与直接效益，计算逻辑清晰、操作简便，适用于施工方法的初步筛选与短期经济性评价。

成本效益分析的核心步骤包括四个方面。一是明确评价范围与指标，界定评价的时间范围（通常为施工建设阶段），确定总成本指标与总效益指标；总成本指标包括设备投入、人工成本、材料消耗、工期成本等各类直接成本的总和；总效益指标主要包括工程质量提升效益、工期提前效益、安全风险降低效益等可量化的效益。二是成本与效益量化计算，采用货币计量方式，将各类成本与效益转化为统一的货币单位；成本计算需根据施工方案的参数，结合市场价格、定额标准等精准核算；效益计算需采用合理的量化方法，如工期提前效益可按提前投入使用产生的收益或避免的违约金计算，安全风险降低效益可按避免安全事故产生的损失计算。三是效益成本比计算，通过总效益与总成本的比值，量化不同施工方法的经济效益水平，效益成本比大于1表明方案可行，比值越高，经济效益越好。四是敏感性分析，考虑地质条件变化、材料价格波动、工期调整等不确定因素对成本与效益的影响，验证评价结果的稳定性，为决策提供更全面的依据。

成本效益分析的优势在于能够快速量化不同施工方法的短期经济效益，操作简便、直观易懂，适用于工程前期的快速决策；局限性在于未考虑运营阶段的长期成本与效益，评价视角相对局限，对于长期运营要求高的隧道工程，需结合其他评价方法使用。

（二）生命周期成本评价

生命周期成本评价是更全面的经济性评价方法，核心是从隧道全生命周期视角，考量施工阶段、运营阶段、维护阶段的全部成本，评价不同施工方法的长期经济性。该方法突破了传统成本评价仅关注施工阶段的局限，更符合隧道工程长期运营的需求，适用于复杂隧道工程的精准决策。

生命周期成本评价的核心步骤包括四个方面。一是界定生命周期范围，明确

评价的时间跨度，涵盖隧道的施工期、运营期、维护期直至报废阶段，确保评价的全面性。二是梳理全生命周期成本构成，不仅包括施工阶段的设备投入、人工成本、材料消耗、工期成本，还包括运营阶段的能耗费用、管理费用，维护阶段的维修材料费用、维修人工费用、设备更新费用等；同时需考虑残值回收等终止成本，形成完整的全生命周期成本清单。三是成本量化与折现计算，采用货币计量方式核算各类成本，由于不同阶段的成本发生时间不同，需引入折现率将未来的运营与维护成本折算为当前现值，确保成本的可比性；折现率的选择需结合行业标准与项目资金成本确定。四是全生命周期成本对比，计算不同施工方法的全生命周期总成本现值，选择总成本最低的方案作为最优方案；同时可结合工程质量、安全性能等非经济指标，开展综合评价，确保方案的科学性。

生命周期成本评价的优势在于评价视角全面，能够充分考量隧道长期运营与维护成本，避免因单纯追求施工阶段低成本导致运营阶段成本激增，适用于长期运营要求高的隧道工程；局限性在于评价过程复杂，需要收集大量的长期成本数据，折现率的选择对评价结果影响较大，增加了评价的难度与不确定性。

三、优化方向

施工方法经济性优化的核心目标是在保证施工安全与工程质量的前提下，通过科学的优化策略降低总成本，提升工程经济效益。优化工作需立足施工全流程，结合施工方法的技术特点与成本构成，针对性制定优化措施，实现成本与安全、质量的平衡。核心优化方向包括设备投入优化、人工与材料成本控制、工期优化、全生命周期成本管控四个方面，各类优化措施相互协同，形成完整的成本优化体系。

（一）设备投入优化

设备投入优化的核心是根据施工需求精准匹配设备类型与规模，提升设备利用效率，降低设备购置、租赁与运维成本。不同施工方法的设备投入优化策略存在差异，需结合机械化程度针对性开展。

全机械化施工方法的设备投入优化需聚焦于设备选型与运维管理。设备选型阶段，需结合地质条件、隧道规模与工期要求，选择性价比最优的设备型号，避免过度追求高端设备导致投入浪费；对于长距离隧道施工，可考虑设备租赁与购置结合的方式，降低前期资金压力。运维管理阶段，需建立科学的设备维护体系，

定期开展设备检修与保养,及时更换易损部件,延长设备使用寿命,减少故障停机时间;通过引入智能监测技术,实时监测设备运行状态,实现设备故障的精准预判,提升维护效率,降低运维成本。传统施工方法的设备投入优化需聚焦于设备整合与效率提升,合理配置钻孔机、装载机 etc 常规设备,避免设备闲置;通过设备升级改造,提升设备作业效率,减少设备使用数量,降低设备租赁与运维成本。

(二) 人工与材料成本控制

人工与材料成本控制是施工成本优化的关键环节,核心是通过提升人工效率、优化材料管理,降低直接成本消耗。需结合施工方法的技术特点,针对性制定控制措施。

人工成本控制的核心是提升人工效率与优化人员配置。通过引入智能化施工设备,减少对人工的依赖,提升单位人工的作业效率;加强施工人员技能培训,提升人员专业水平,减少因操作失误导致的返工与效率下降;优化人员配置结构,根据施工工序需求合理安排人员数量,避免人员冗余,降低人工薪酬成本。材料成本控制的核心是优化材料选型与减少材料浪费。材料选型阶段,在保证材料性能的前提下,选择性价比高的材料,优先采用节能环保、耐久性好的材料,降低后期维护材料消耗;材料采购阶段,通过集中采购、长期合作等方式降低材料采购价格,减少采购成本;施工过程中,加强材料管理,精准计算材料消耗量,建立材料领用与回收制度,减少材料浪费;同时优化施工工艺,提升材料利用效率,如采用精准喷射技术减少混凝土浪费。

(三) 工期优化

工期优化的核心是通过合理安排施工流程,提升施工效率,缩短工期,降低工期成本。工期优化需以保证施工安全与工程质量为前提,避免盲目追求工期缩短导致安全风险提升与质量问题。

工期优化的核心措施包括三个方面。一是优化施工流程,梳理施工全流程的关键工序与非关键工序,识别工期瓶颈,通过合理安排工序衔接,实现平行作业与流水作业结合,提升施工效率;如将支护作业与出渣作业并行开展,减少工序等待时间。二是提升关键工序效率,针对影响工期的关键工序,通过引入高效施工设备、优化施工参数等方式提升作业效率;如钻爆法中采用多臂凿岩台车提升钻孔效率,盾构法中优化掘进参数提升掘进速度。三是加强施工进度管控,建立实时进度监测系统,及时掌握施工进度情况,对比计划进度与实际进度,若出现

进度滞后，及时分析原因，采取补强措施；同时合理预留工期缓冲时间，应对地质条件变化等不确定因素导致的工期延误，降低工期违约风险。通过工期优化，能够有效减少资金占用成本、资源闲置成本，提升工程经济效益。

（四）全生命周期成本管控

全生命周期成本管控是长期经济性优化的核心方向，核心是从隧道全生命周期视角，平衡施工阶段成本与运营、维护阶段成本，实现总生命周期成本最低。需突破传统成本管控仅关注施工阶段的局限，建立全生命周期成本管控理念。

全生命周期成本管控的核心措施包括三个方面。一是施工阶段的前瞻性管控，在施工方法选择与施工方案设计阶段，充分考量运营与维护阶段的成本，优先选择施工阶段成本与长期维护成本综合最优的方案；如选择耐久性好的支护材料与施工方法，降低运营阶段的维护成本。二是运营阶段的节能降耗，优化隧道运营管理，采用节能照明、通风设备，降低运营能耗成本；建立隧道结构健康监测系统，实时监测结构状态，及时发现潜在问题，避免小问题发展为大故障，降低维修成本。三是维护阶段的精细化管理，建立科学的维护计划，根据隧道结构状态与材料耐久性，合理安排维护周期与维护内容，避免过度维护与维护不足；采用先进的维护技术与材料，提升维护效率与效果，延长维护周期，降低维护成本。通过全生命周期成本管控，能够实现隧道工程长期经济效益的最大化。

施工方法经济性分析的核心在于精准拆解设备投入、人工成本、材料消耗、工期成本等核心成本构成，采用成本效益分析、生命周期成本评价等量化方法对比不同方案的经济性，通过设备投入优化、人工与材料成本控制、工期优化、全生命周期成本管控等方向实现成本优化。在隧道工程施工方法选择过程中，需将经济性分析与地质适配性、安全可靠分析相结合，实现“安全、质量、经济”的协同统一。随着工程管理技术、智能化施工技术的不断发展，施工方法经济性分析将朝着精准化、智能化、全周期化方向发展，为隧道工程的经济高效建设提供更强有力的支撑。

第七章 隧道开挖技术研究

第一节 开挖方法分类

隧道开挖是隧道工程建设的核心工序，直接决定工程施工效率、围岩稳定性、施工安全与工程成本。不同隧道工程的地质条件、隧道规模、断面形式存在显著差异，对开挖方法的适配性要求截然不同。科学的开挖方法分类能够系统梳理各类开挖技术的核心特征，明确不同方法的适用边界，为开挖方法的精准选择提供清晰指引。随着隧道工程向复杂地质、大断面、长距离方向发展，开挖技术不断创新，开挖方法体系日趋完善。

一、分类核心逻辑

隧道开挖方法分类需遵循“维度清晰、逻辑严谨、适配实用”的核心原则，立足隧道开挖的核心技术特征与工程实际需求，构建多维度的分类体系。分类逻辑的核心是通过提炼开挖过程中的关键差异化特征，形成能够精准区分不同开挖方法的分类维度，为后续方法选择提供明确的判断依据。核心分类逻辑围绕开挖断面、机械化程度、破碎方式三个核心维度展开，各类维度从不同视角揭示开挖方法的技术属性，相互补充、协同覆盖，形成完整的分类框架。

（一）按开挖断面分类

按开挖断面分类的核心逻辑是基于开挖过程中隧道断面的成型方式与开挖步骤差异，聚焦开挖断面的暴露范围与分次开挖的组合形式。该维度能够直观反映开挖方法对围岩稳定性的影响，因为断面暴露范围直接决定围岩的受力状态与变形风险，是基于围岩条件选择开挖方法的核心依据之一。按开挖断面分类的核心思路是根据开挖时一次成型的断面规模，将开挖方法分为全断面开挖与分部开挖两大类。全断面开挖是指一次完成隧道整个断面的开挖作业，断面一次性完全暴露；分部开挖则是将隧道断面划分为多个部分，分阶段、分步骤完成开挖作业，每个阶段仅暴露部分断面。分部开挖根据断面划分方式与开挖顺序的不同，可进

一步细分出台阶法、CD 法、CRD 法等具体方法。该分类维度的核心价值在于通过断面暴露范围的差异，直接关联围岩稳定性要求，完整围岩、小断面隧道可适配全断面开挖，破碎围岩、大断面隧道则需采用分部开挖降低围岩扰动。

（二）按机械化程度分类

按机械化程度分类的核心逻辑是基于开挖过程中机械替代人工的程度差异，聚焦开挖作业的自动化水平与设备依赖度。该维度直接反映开挖方法的现代化水平与施工效率，随着工程建设对效率、安全、质量要求的不断提升，机械化程度已成为衡量开挖技术先进性的重要指标，为追求高效建设的隧道工程提供方法筛选依据。按机械化程度分类的核心思路是根据开挖核心工序的作业方式，将开挖方法分为人工开挖、半机械化开挖、全机械化开挖三大类。人工开挖主要依靠人工完成凿岩、破碎、出碴等核心作业，机械化程度极低；半机械化开挖通过机械与人工协同作业完成施工，核心开挖或出碴环节采用机械作业，辅助环节仍需人工配合；全机械化开挖通过专用成套设备完成开挖、出碴、支护等全流程作业，机械化程度高，人工干预少。该分类维度的核心价值在于通过机械化水平的差异，匹配工程的工期要求与技术装备条件，长距离、大断面隧道优先选择全机械化开挖提升效率，短距离、复杂地质隧道可选择半机械化开挖保障灵活性。

（三）按破碎方式分类

按破碎方式分类的核心逻辑是基于开挖过程中围岩破碎的技术原理差异，聚焦围岩从完整状态到破碎解体的实现方式。该维度直接反映开挖方法对围岩的扰动程度与破碎效率，不同破碎方式对围岩力学性能的影响存在显著差异，是基于围岩岩性特征选择开挖方法的核心依据之一。按破碎方式分类的核心思路是根据破碎围岩的技术手段，将开挖方法分为爆破破碎开挖与机械破碎开挖两大类。爆破破碎开挖通过炸药爆炸产生的能量破碎围岩，实现隧道断面开挖；机械破碎开挖通过专用施工机械的切削、挤压、铣挖等作用破碎围岩，无需使用炸药。爆破破碎开挖可进一步分为光面爆破、预裂爆破等具体方式；机械破碎开挖可根据机械类型分为盾构机开挖、TBM 开挖、铣挖机开挖等具体方式。该分类维度的核心价值在于通过破碎方式的差异，匹配围岩的岩性特征，坚硬围岩可选择爆破破碎或专用硬岩机械破碎，软弱围岩则优先选择低扰动的机械破碎开挖。

二、常用开挖方法技术特征

隧道开挖的常用方法包括全断面开挖、台阶法开挖、CD法、CRD法，各类方法在开挖步序、断面划分、核心优势、适用条件等技术特征上存在显著差异，共同构成隧道开挖的核心技术体系。明确各类常用方法的技术特征，是实现开挖方法精准选择的基础，需从开挖原理、作业特征、核心优势、技术局限四个核心层面系统梳理。

（一）全断面开挖

全断面开挖是最简洁的开挖方法，核心技术特征是一次完成隧道整个断面的开挖作业，开挖后一次性形成完整的隧道断面轮廓。该方法的核心优势是施工流程简单、作业效率高，能够实现开挖、出碴、支护等工序的连续高效推进，适用于特定地质与断面条件的隧道工程。全断面开挖的核心技术特征体现在四个方面。一是开挖步序简单，无需划分断面，直接对隧道设计断面进行整体开挖，作业流程简洁，工序衔接顺畅，减少了不同开挖部分之间的协调成本。二是施工效率高，一次成型的开挖方式大幅缩短了开挖循环时间，配合大型机械化设备可实现高效开挖与出碴，尤其适用于长距离隧道施工，能够显著缩短工期。三是对围岩扰动集中，全断面开挖后围岩一次性完全暴露，围岩应力释放集中，对围岩稳定性要求较高，仅适用于围岩完整性好、强度高、稳定性强的地质条件。四是支护作业集中，开挖完成后需及时开展全断面支护作业，确保围岩稳定性，支护作业的及时性与有效性直接决定施工安全。全断面开挖的技术局限主要表现为适用范围较窄，仅适用于小到中断面、围岩等级高的完整硬岩隧道；对施工设备的要求较高，需配备能够覆盖全断面的钻孔、开挖与出碴设备；在复杂地质条件下施工风险极高，易引发围岩坍塌等安全事故。

（二）台阶法开挖

台阶法开挖是应用最广泛的分部开挖方法之一，核心技术特征是将隧道断面沿竖向划分为多个台阶，自上而下或自下而上分台阶依次开挖，各台阶开挖作业可平行推进。该方法通过分台阶开挖减小了单次开挖的断面暴露范围，降低了对围岩的扰动，提升了施工安全性，适配范围较广。台阶法开挖的核心技术特征体现在四个方面。一是断面划分灵活，可根据隧道断面尺寸、地质条件调整台阶数量与台阶高度，常见的有两台阶、三台阶等形式，大断面隧道可采用多台阶开挖。

二是施工安全性高，分台阶开挖减小了单次开挖的围岩暴露面积与暴露时间，围岩应力释放较为平缓，能够有效控制围岩变形，适用于中等稳定性围岩条件。三是施工效率均衡，各台阶可平行作业，能够实现开挖、出碴、支护工序的有序衔接，兼顾了施工安全性与效率，避免了全断面开挖的高风险与小断面开挖的低效率。四是适应性强，通过调整台阶开挖参数与支护措施，可适配从硬岩到软岩的多种地质条件，以及从中断面到大断面的多种隧道规模。台阶法开挖的技术局限主要表现为台阶之间的作业协调难度较大，需合理安排各台阶的开挖进度，避免相互干扰；台阶交接部位易出现应力集中，需加强支护措施；在极软弱围岩或富水地层中，单纯台阶法开挖可能无法有效控制大变形，需结合其他辅助措施。

（三）CD 法开挖

CD 法即中隔壁法，是针对大断面、软弱围岩隧道设计的分部开挖方法，核心技术特征是将隧道断面沿纵向分为左右两个部分，在两部分之间设置临时中隔壁，先开挖一侧断面并完成支护，再开挖另一侧断面，最后拆除临时中隔壁。该方法通过分侧开挖与临时支护的设置，大幅降低了围岩扰动，有效控制大断面软弱围岩的变形，提升施工安全性。CD 法开挖的核心技术特征体现在四个方面。一是断面分侧划分，将大断面隧道分为左右两个独立的小断面进行开挖，减小了单次开挖的断面规模，降低了围岩的承载压力与变形风险。二是临时支护强化，临时中隔壁的设置能够有效分隔左右两侧开挖区域，限制围岩横向变形，同时为开挖作业提供临时支撑，提升作业空间的稳定性。三是施工安全性高，分侧开挖、分步支护的方式使围岩应力逐步释放，避免了大断面一次性开挖导致的围岩失稳，适用于围岩等级低、变形量大的软弱破碎围岩条件。四是支护体系完善，开挖过程中同步完成初期支护与临时支护，最后通过二次衬砌形成完整的支护体系，确保隧道结构的长期稳定性。CD 法开挖的技术局限主要表现为施工工序复杂，分侧开挖与临时支护、拆除等工序较多，施工周期相对较长；临时中隔壁的设置与拆除增加了施工成本与作业难度；左右两侧开挖的不平衡易导致围岩受力不均，需精准控制开挖进度与支护时机。

（四）CRD 法开挖

CRD 法即交叉中隔壁法，是在 CD 法基础上优化形成的分部开挖方法，核心技术特征是将隧道断面沿纵向分为左右两个部分，再沿横向分为上下多个台阶，形成多个小开挖单元，通过交叉设置的临时中隔壁与临时仰拱划分开挖空间，按

顺序依次开挖各单元并完成支护，最后拆除临时支护结构。该方法进一步细化了开挖单元，强化了临时支护，能够有效控制极软弱围岩的大变形，适用于复杂地质条件下的大断面隧道。CRD 法开挖的核心技术特征体现在四个方面。一是开挖单元精细化，将大断面隧道划分为多个小型开挖单元，单次开挖暴露面积极小，围岩扰动降至最低，能够有效控制极软弱围岩的大变形与坍塌风险。二是临时支护全方位，通过临时中隔壁与临时仰拱的交叉设置，形成封闭的临时支护体系，全方位约束围岩变形，为开挖作业提供稳定的作业空间。三是施工安全性极高，分步、分单元的开挖方式使围岩应力缓慢、均匀释放，配合及时的支护作业，能够适配极软弱破碎围岩、富水地层等复杂地质条件下的大断面隧道施工。四是变形控制精准，通过精细化的开挖与支护参数，能够对围岩变形进行精准控制，满足城市浅埋隧道等对地面沉降控制要求高的工程需求。CRD 法开挖的技术局限主要表现为施工工序极为复杂，开挖单元多、工序衔接繁琐，施工周期长、效率低；临时支护材料消耗大，拆除工作量大，增加了工程成本；对施工人员的技术水平与施工管理水平要求极高，需精准控制各开挖单元的施工顺序与进度。

三、分类应用价值

隧道开挖方法分类的核心应用价值在于为不同地质与隧道条件下开挖方法的精准选择提供科学依据，通过系统梳理各类开挖方法的技术特征与适用边界，帮助工程技术人员快速筛选适配的开挖方案，实现“地质条件适配、隧道规模匹配、安全效率平衡”的核心目标。分类应用价值具体体现在指导方法选择、优化施工方案、保障施工安全、提升经济效益四个方面，为隧道开挖工程的科学推进提供全方位支撑。

（一）指导方法选择，精准匹配工程条件

分类体系通过明确不同开挖方法的技术特征与适用边界，为工程技术人员提供了清晰的方法选择指引。在实际工程中，技术人员可根据项目的地质条件、隧道规模、断面形式等核心参数，结合分类维度快速筛选适配的开挖方法。针对完整硬岩、小到中断面隧道，根据开挖断面分类与破碎方式分类，可优先选择全断面开挖配合爆破破碎或全机械化破碎，提升施工效率；针对中等稳定性围岩、中到大断面隧道，根据开挖断面分类，可选择台阶法开挖，兼顾安全性与效率；针对软弱破碎围岩、大断面隧道，根据开挖断面分类与地质适应性要求，可选择

CD 法或 CRD 法，通过精细化分部开挖控制围岩变形；针对城市浅埋、富水软弱围岩隧道，根据机械化程度分类与破碎方式分类，可选择全机械化的盾构法开挖，降低对周边环境的影响。分类体系使方法选择从经验判断转向科学决策，确保选择的开挖方法精准匹配工程实际条件。

（二）优化施工方案，提升施工效率

分类体系通过系统梳理各类开挖方法的技术特征，为施工方案的优化提供了明确方向。不同开挖方法的施工流程、设备需求、工序衔接存在差异，分类体系能够帮助技术人员针对性优化施工方案，提升施工效率。对于选择全断面开挖的工程，可基于机械化程度分类，优化大型机械化设备配置，实现开挖、出碴、支护的全流程协同，提升施工循环效率；对于选择台阶法开挖的工程，可基于开挖断面分类，优化台阶高度与开挖步距，合理安排各台阶的平行作业，减少工序等待时间；对于选择 CD 法、CRD 法的工程，可基于开挖单元划分逻辑，优化开挖顺序与支护时机，提升各单元之间的衔接效率，缩短施工周期。分类体系为施工方案的优化提供了技术依据，使方案优化更具针对性与科学性。

（三）保障施工安全，控制地质风险

分类体系的核心应用价值之一是通过匹配开挖方法与地质条件，有效控制施工安全风险。不同地质条件下的围岩稳定性差异显著，分类体系能够帮助技术人员选择能够有效防控地质风险的开挖方法，保障施工安全。在破碎软弱围岩条件下，分类体系明确指引选择分部开挖方法，通过减小断面暴露范围、及时支护，控制围岩变形与坍塌风险；在富水地层中，分类体系指引选择低扰动的机械化开挖方法，配合防水措施，避免涌水涌砂风险；在硬岩深埋隧道中，分类体系指引选择爆破破碎或全机械化破碎的全断面开挖方法，同时配套岩爆防控措施，避免岩爆事故。分类体系将开挖方法与地质风险防控直接关联，为施工安全提供了有力保障，降低了安全事故发生的概率。

（四）提升经济效益，优化成本结构

分类体系通过指导选择适配的开挖方法，能够有效优化工程成本结构，提升经济效益。不同开挖方法的设备投入、人工成本、材料消耗存在显著差异，分类体系能够帮助技术人员在保证安全与质量的前提下，选择性价比最优的开挖方法。对于长距离、完整硬岩隧道，选择全机械化全断面开挖方法，虽然设备投入较高，但能够大幅提升施工效率，缩短工期，降低人工成本与工期成本，总体经济效益

显著；对于短距离、复杂地质隧道，选择半机械化的台阶法或 CD 法，避免了全机械化设备的高额投入，通过合理的分部开挖控制施工风险，实现成本与安全的平衡；对于城市浅埋隧道，选择盾构法开挖虽然前期投入高，但能够减少地面拆迁与周边环境影响成本，提升工程的综合经济效益。分类体系为工程成本的优化提供了科学指引，实现了经济效益与安全质量的协同统一。

隧道开挖方法分类的核心价值在于构建基于开挖断面、机械化程度、破碎方式的多维度分类体系，明确全断面开挖、台阶法开挖、CD 法、CRD 法等常用方法的技术特征，为不同地质与隧道条件下开挖方法的精准选择提供科学依据。分类体系不仅能够指导方法选择、优化施工方案，还能保障施工安全、提升经济效益，为隧道开挖工程的科学推进提供全方位支撑。随着隧道工程建设技术的不断发展与地质勘察精度的不断提升，开挖方法分类将朝着更精细化、更智能化的方向发展，为复杂隧道工程开挖技术的创新与应用提供更强有力的理论与技术支撑。

第二节 钻爆法技术要点

钻爆法是隧道开挖领域应用最广泛的传统技术方法之一，凭借适应性强、设备投入相对灵活、施工成本可控等核心优势，在硬岩隧道、复杂地质隧道等各类工程场景中占据重要地位。钻爆法的核心原理是通过精准的爆破设计与标准化的施工流程，利用炸药爆炸能量破碎围岩，实现隧道断面成型，其技术水平直接决定开挖效率、断面成型质量与施工安全。随着隧道工程对施工精度、安全环保要求的不断提升，钻爆法逐步向精细化、智能化方向发展，形成了涵盖爆破设计、施工流程、安全控制的完整技术体系。

一、爆破设计核心

爆破设计是钻爆法施工的前提与核心，直接决定爆破效果、围岩稳定性与施工效率。爆破设计需立足围岩岩性特征、隧道断面尺寸、施工环境要求等核心条件，通过精准设计炮孔布置、装药量计算、起爆顺序等关键参数，实现“高效破碎围岩、精准控制断面、最小化扰动围岩”的核心目标。爆破设计的科学性与合理性是保障钻爆法施工安全与质量的基础，需遵循“因地制宜、精准量化、安全可控”的设计原则。

（一）炮孔布置

炮孔布置是爆破设计的基础环节,核心是根据隧道断面形状与围岩破碎要求,合理规划炮孔的类型、位置、间距与深度,确保爆破能量均匀分布,实现围岩的高效破碎与断面的规整成型。炮孔布置需结合围岩强度、完整性等特征动态调整,避免因布置不当导致超欠挖、围岩过度破碎等问题。炮孔布置的核心要点包括三个方面。一是炮孔类型划分,根据功能差异将炮孔分为掏槽孔、辅助孔、周边孔三类,各类炮孔协同作用完成爆破作业。掏槽孔位于隧道断面中心区域,核心作用是率先破碎围岩形成临空面,为后续爆破创造有利条件,其布置需保证掏槽效果,通常采用菱形、楔形等集中布置形式;辅助孔位于掏槽孔与周边孔之间,核心作用是扩大掏槽范围,进一步破碎中间区域围岩,减少周边孔爆破压力,布置需保证均匀覆盖中间破碎区域;周边孔沿隧道断面轮廓线布置,核心作用是控制隧道断面成型精度,减少超欠挖,通常采用光面爆破或预裂爆破技术,确保爆破后轮廓规整。二是炮孔参数确定,需根据围岩强度、隧道断面尺寸确定炮孔间距、排距与深度。围岩强度高时,需减小炮孔间距、增加炮孔深度,提升爆破能量密度;隧道断面较大时,需合理划分炮孔排数,确保各排炮孔爆破能量协同;炮孔深度需结合开挖循环进度要求确定,兼顾施工效率与爆破稳定性。三是炮孔定位精准性,需采用专业测量设备定位炮孔位置,确保炮孔方向、角度符合设计要求,避免因炮孔偏移导致爆破能量分布不均,影响爆破效果与断面成型质量。

（二）装药量计算

装药量计算是爆破设计的核心量化环节,核心是根据围岩破碎需求与爆破安全要求,精准确定单孔装药量与总装药量,避免因装药量不足导致围岩破碎不彻底,或因装药量过大导致围岩过度扰动、超欠挖严重、爆破振动超标等问题。装药量计算需基于围岩物理力学参数与炮孔布置参数,采用科学的计算方法量化确定。装药量计算的核心要点包括三个方面。一是计算依据确定,需收集围岩容重、抗压强度、波阻抗等物理力学参数,结合炮孔间距、排距、深度等布置参数,以及隧道断面尺寸,作为装药量计算的基础依据;同时需明确爆破安全控制指标,包括爆破振动速度限值、空气冲击波强度限值等,约束装药量上限。二是计算方法选择,常用的装药量计算方法包括体积公式法、经验公式法等。体积公式法基于需破碎围岩的体积与单位体积炸药消耗量计算总装药量,再根据各类炮孔功能分配单孔装药量;经验公式法基于工程实践经验,结合相似地质条件下的爆破参

数，调整确定装药量，适用于地质条件复杂的场景。三是装药量调整，计算得出的装药量需结合现场试验进行调整优化。通过小规模试爆，观察爆破效果、围岩破碎程度、断面成型质量与爆破振动数据，根据试爆结果修正装药量，确保装药量与实际地质条件精准匹配，实现爆破效果与安全控制的平衡。

（三）起爆顺序

起爆顺序是爆破设计的关键环节，核心是通过合理安排各类炮孔的起爆时间差，控制爆破能量的释放顺序与节奏，实现围岩的有序破碎，减少爆破扰动，提升断面成型质量。起爆顺序的设计需结合炮孔类型与布置形式，确保各阶段爆破协同配合，充分发挥爆破能量的破碎作用。起爆顺序的核心要点包括三个方面。一是起爆逻辑确定，遵循“先掏槽、后辅助、最后周边”的核心逻辑。先起爆掏槽孔，形成临空面，为后续爆破提供能量释放空间；再依次起爆辅助孔，逐步扩大破碎范围，破碎中间区域围岩；最后起爆周边孔，利用光面爆破或预裂爆破技术，精准控制隧道轮廓，减少超欠挖。二是起爆时差控制，合理设置各类炮孔之间的起爆时差，确保前一阶段爆破形成的临空面充分发挥作用，避免后一阶段爆破与前一阶段爆破相互干扰。掏槽孔与辅助孔之间的时差通常为 50-100ms，辅助孔与周边孔之间的时差通常为 100-200ms，具体时差需根据围岩条件与爆破效果调整。三是起爆网络设计，采用分段起爆网络，通过毫秒雷管实现各类炮孔的精准延时起爆。起爆网络需保证连接可靠，避免出现拒爆、早爆等问题；同时需根据隧道长度与爆破规模，合理选择起爆方式，确保起爆信号传递顺畅，实现全断面炮孔的有序起爆。

二、施工关键环节

钻爆法施工关键环节包括钻孔、装药、爆破、出碴四个核心工序，各工序环环相扣、相互影响，共同决定施工效率与质量。施工过程需严格遵循标准化流程，强化各工序的质量控制与衔接协同，避免因某一工序存在缺陷导致整体施工效果下降。标准化的施工流程是保障钻爆法施工安全、高效推进的关键，需明确各工序的操作规范、质量标准与衔接要求。

（一）钻孔作业

钻孔作业是钻爆法施工的基础工序，其质量直接影响爆破效果与断面成型质量。钻孔作业的核心目标是保证炮孔的位置、方向、深度、孔径符合爆破设计要

求，为后续装药与爆破作业创造良好条件。钻孔作业需配备适配的钻孔设备，强化作业过程的质量管控。钻孔作业的标准化流程要点包括三个方面。一是作业准备，钻孔前需完成隧道断面测量放线，精准标记各类炮孔的位置；检查钻孔设备性能，确保设备运行稳定；根据围岩条件选择适配的钻杆与钻头，硬岩地质选择高强度钻头，软岩地质选择耐磨钻头；清理作业面，确保作业环境安全整洁。二是钻孔操作，采用专业钻孔设备进行作业，操作人员需严格按照标记位置与设计角度钻孔，控制钻孔速度，避免因钻孔速度过快导致钻杆偏移；钻孔过程中需实时观察钻孔情况，若遇到硬岩夹层或破碎带，及时调整钻孔参数，确保钻孔深度符合要求；钻孔完成后，清理炮孔内的岩粉与杂物，避免影响装药质量。三是质量检查，钻孔完成后对炮孔质量进行全面检查，核对炮孔位置、方向、深度、孔径是否符合设计要求，对不合格的炮孔进行补钻或整改；检查炮孔数量，确保无漏钻、少钻情况，为后续装药作业提供质量保障。

（二）装药作业

装药作业是钻爆法施工的核心危险工序，其质量直接影响爆破效果与施工安全。装药作业的核心目标是按照爆破设计的装药量与装药结构，将炸药精准、安全地装入炮孔，确保炸药分布均匀，避免出现装药过满、药量不足、炸药受潮等问题。装药作业需严格遵循安全操作规范，强化过程管控。装药作业的标准化流程要点包括三个方面。一是作业准备，装药前需再次核对炮孔质量，确保炮孔符合装药要求；检查炸药、雷管等爆破器材的质量与规格，确保符合设计要求与安全标准；清理作业面，设置安全警戒区域，禁止无关人员进入；配备专业的装药设备与防护用品，确保作业人员安全。二是装药操作，根据爆破设计的装药结构进行装药，常用的装药结构包括连续装药、间隔装药等，硬岩地质可采用连续装药，软岩或破碎围岩可采用间隔装药，确保爆破能量均匀分布；按照设计装药量精准控制单孔装药量，采用计量工具称量炸药，避免装药量偏差；装药过程中轻拿轻放，避免炸药受到剧烈撞击或挤压，防止早爆事故；在炮孔口设置炮泥封堵，炮泥需填塞密实，确保爆破能量充分作用于围岩。三是安全管控，装药作业需由专业人员操作，操作人员需熟悉爆破器材性能与安全操作规范；装药过程中严禁吸烟、使用明火，避免产生静电；完成装药后，及时清理作业面的爆破器材残渣，核对装药数量与炮孔数量，确保无遗漏。

（三）爆破作业

爆破作业是钻爆法施工的核心工序，其核心目标是通过精准引爆实现围岩的有序破碎，形成符合设计要求的隧道断面。爆破作业需严格遵循安全操作规程，强化爆破前的准备、爆破过程的控制与爆破后的检查，确保爆破作业安全、有效。爆破作业的标准化流程要点包括三个方面。一是爆破前准备，完成起爆网络的连接与检查，确保起爆网络连接可靠、无短路或断路情况；设置安全警戒，在隧道进出口、周边重要构筑物等位置设置警戒点，安排警戒人员，禁止无关人员与车辆进入警戒区域；检查作业面周边环境，清理可能因爆破飞石损坏的设备与物资；明确爆破信号，确保爆破指挥与警戒人员沟通顺畅。二是爆破实施，由专业爆破指挥人员统一指挥，按照预定的爆破顺序启动起爆系统；爆破过程中，警戒人员需坚守岗位，密切观察警戒区域情况，禁止任何人员进入；爆破后等待规定时间，确保炮烟充分消散、围岩稳定后，方可进入作业面检查。三是爆破后检查，爆破后首先检查作业面是否存在拒爆、盲炮等情况，若发现拒爆或盲炮，需按照专业规范进行处理，严禁擅自操作；检查隧道断面成型质量，观察围岩破碎程度与稳定性，若发现围岩坍塌、掉块等风险，及时采取支护措施；检查爆破产生的炮烟浓度，确保符合安全标准后，方可开展后续作业。

（四）出碴作业

出碴作业是钻爆法施工的收尾工序，其效率直接影响施工循环周期与整体施工进度。出碴作业的核心目标是快速、安全地将爆破产生的岩碴清理出隧道，为下一循环的钻孔、装药作业创造条件。出碴作业需配备适配的出碴设备，优化作业流程，提升出碴效率。出碴作业的标准化流程要点包括三个方面。一是作业准备，爆破后检查作业面围岩稳定性，确保无坍塌风险后，清理作业面的浮碴与杂物；检查出碴设备性能，包括装载机、自卸车等，确保设备运行稳定；规划出碴路线，确保出碴路线顺畅，避免设备拥堵；在隧道内设置照明与通风设备，改善作业环境。二是出碴操作，采用装载机将岩碴装入自卸车，操作人员需熟练掌握设备操作技巧，提升装碴效率；自卸车按照规划路线行驶，避免超速、超载，确保运输安全；出碴过程中，安排专人指挥交通，协调各出碴设备的作业顺序，避免相互干扰；定期清理出碴路线上的散落岩碴，确保路线畅通。三是作业收尾，出碴完成后，对隧道内的作业面进行全面清理，确保无残留岩碴；检查出碴设备，进行日常维护与保养，延长设备使用寿命；统计出碴量，为后续爆破参数优化与

施工进度管控提供依据。

三、安全控制措施

钻爆法施工涉及爆破器材使用、围岩扰动等诸多风险因素，安全控制是施工过程的核心要求。安全控制措施需覆盖爆破振动控制、围岩保护、施工安全防护等核心环节，建立“预防为主、全程管控、应急兜底”的安全管理体系，确保施工人员、设备与周边环境安全。安全控制措施的有效实施是钻爆法施工顺利推进的前提保障。

（一）爆破振动控制

爆破振动是钻爆法施工的主要环境影响与安全风险之一，过量的爆破振动可能导致周边构筑物损坏、围岩失稳，甚至引发地质灾害。爆破振动控制的核心目标是将爆破振动速度控制在安全限值范围内，避免产生不良影响。爆破振动控制的技术措施包括三个方面。一是优化爆破参数，通过调整装药量、起爆顺序、炮孔间距等参数，降低爆破振动强度。采用分段起爆技术，控制最大一段起爆药量，避免爆破能量集中释放；增大炮孔间距，分散爆破能量，减少振动叠加；合理选择爆破方式，优先采用光面爆破、预裂爆破等低扰动爆破技术。二是采用减振技术，在爆破区域与周边敏感构筑物之间设置减振沟、减振孔等减振设施，削弱爆破振动的传播；在炮孔内采用空气间隔装药或水胶炸药等低振动炸药，降低爆破振动能量。三是加强振动监测，在隧道周边构筑物、重要地质构造区域设置振动监测点，采用专业监测设备实时监测爆破振动速度；根据监测数据调整爆破参数，若监测数据接近或超过安全限值，立即停止爆破作业，优化参数后再恢复施工；建立振动监测档案，记录每次爆破的振动数据，为后续爆破参数优化提供依据。

（二）围岩保护

围岩保护是钻爆法施工安全控制的核心内容，核心目标是减少爆破对围岩的扰动，避免围岩过度破碎、坍塌，保障隧道施工安全与结构长期稳定性。围岩保护需结合爆破设计与施工过程管控，实现对围岩的精准保护。围岩保护的技术措施包括三个方面。一是优化爆破设计，采用低扰动爆破技术，合理设计周边孔参数，控制周边孔装药量，确保爆破后围岩轮廓规整，减少对围岩的过度破碎；控制爆破能量分布，避免爆破冲击波对围岩造成过大扰动，尤其在破碎围岩或不良地质区域，需进一步降低单孔装药量，采用小进尺爆破。二是及时支护作业，爆

破后围岩暴露时间越长，失稳风险越高，需在爆破后及时开展支护作业。优先采用喷射混凝土封闭围岩，快速形成初期支护，减少围岩暴露时间；根据围岩稳定性，及时施作锚杆、钢拱架等支护结构，强化围岩承载能力；在破碎围岩或不良地质区域，采用超前支护技术，如超前小导管注浆，在爆破前对围岩进行预加固。三是加强围岩监测，在隧道开挖过程中，实时监测围岩变形、支护受力等数据，采用收敛计、应变计等专业监测设备，建立围岩监测体系；根据监测数据判断围岩稳定性，若发现围岩变形速率过大或支护受力异常，及时采取补强支护措施，避免围岩坍塌。

（三）施工安全防护

施工安全防护是保障施工人员与设备安全的直接措施，核心目标是防范爆破飞石、炮烟中毒、高处坠落等各类施工风险，为施工人员创造安全的作业环境。施工安全防护需覆盖施工全流程，强化细节管控。施工安全防护的技术措施包括三个方面。一是爆破飞石防护，在隧道进出口、作业面周边设置防护棚、防护网等防护设施，阻挡爆破飞石；合理控制爆破参数，避免因装药量过大或炮泥填塞不密实导致飞石射程过远；在爆破作业时，施工人员需撤离至安全防护区域，佩戴专业防护用品。二是炮烟中毒防护，加强隧道内通风换气，配备大功率通风设备，确保炮烟快速消散；合理安排爆破时间，避免在通风条件不佳的时段进行爆破作业；爆破后等待炮烟充分消散，经检测炮烟浓度符合安全标准后，方可进入作业面；施工人员佩戴防毒面具等防护用品，防范炮烟中毒风险。三是综合安全防护，在隧道内设置明显的安全警示标识，提醒施工人员注意安全；加强施工人员安全培训，提升安全意识与应急处置能力；定期检查施工设备与安全防护设施，及时维修或更换损坏的设备与设施；建立应急救援体系，配备应急救援物资与设备，制定爆破事故、围岩坍塌等突发事件的应急预案，确保突发事件能够得到及时处置。

钻爆法技术要点的核心在于通过科学的爆破设计、标准化的施工流程与全方位的安全控制措施，实现隧道开挖的安全、高效、优质推进。爆破设计需精准把控炮孔布置、装药量计算、起爆顺序三大核心要素；施工过程需强化钻孔、装药、爆破、出碴各环节的标准化操作与衔接协同；安全控制需聚焦爆破振动控制、围岩保护、施工安全防护，建立全流程安全管控体系。随着智能化技术在隧道施工中的应用，钻爆法将逐步实现爆破参数智能优化、施工过程智能监测、安全风险

智能预警，进一步提升其技术水平与应用价值，为复杂地质条件下隧道工程的建设提供更强有力的技术支撑。

第三节 机械开挖技术

机械开挖技术是隧道工程现代化建设的核心技术支撑，凭借自动化程度高、施工效率优、作业环境安全、对周边环境影响小等核心优势，逐步成为长距离、大断面、复杂地质隧道开挖的主流技术方向。机械开挖技术的核心是通过专用开挖设备实现围岩的机械破碎、出碴、支护等工序的一体化作业，其技术水平直接取决于核心设备的性能与施工流程的协同性。随着隧道工程向深埋、大断面、复杂地质方向发展，机械开挖设备不断迭代升级，施工技术体系日趋完善。

一、核心设备类型

机械开挖的核心设备是实现围岩破碎与隧道开挖的关键载体，不同类型设备的技术参数、结构设计存在显著差异，适配的地质条件与隧道工程场景也各不相同。核心设备类型主要包括盾构机、TBM、铰挖机等，各类设备针对不同地质与工程需求形成差异化技术优势，共同构成机械开挖的设备体系。明确各类核心设备的技术参数与适用场景，是实现机械开挖技术精准应用的基础。

（一）盾构机

盾构机是适用于软弱围岩尤其是富水软弱围岩隧道开挖的专用设备，核心特征是集开挖、出碴、支护、衬砌、导向等功能于一体，能够在护盾保护下实现全流程自动化作业。盾构机的技术参数直接决定其开挖能力与适应性，需根据地质条件与隧道参数精准匹配。盾构机的核心技术参数包括开挖直径、刀盘扭矩、推进力、掘进速度、护盾长度等。开挖直径需与隧道设计断面尺寸匹配，范围通常为3—15米，覆盖从小断面市政隧道到大断面交通隧道的需求；刀盘扭矩与推进力决定盾构机的破岩能力，富水砂层、软土等软弱围岩需匹配中等扭矩与推进力，含硬岩夹层的复合地层需提升刀盘扭矩与推进力；掘进速度受地质条件与设备性能影响，软弱围岩中掘进速度通常为3—10米/天，复合地层中速度会显著降低；护盾长度影响设备转向灵活性与施工稳定性，短护盾适用于曲线隧道，长护盾适用于直线长距离隧道。盾构机的适用场景聚焦于软弱围岩隧道，尤其适用于城市

浅埋隧道、地铁隧道、市政管廊等工程。具体包括富水砂层、淤泥质土、粉质黏土等软弱地层；周边环境敏感、对地面沉降控制要求高的区域，如城市建成区、穿越河流、湖泊的隧道；小到中断面、长距离的隧道工程，能够通过高效自动化作业缩短工期，减少对周边环境的干扰。

（二）TBM

TBM 即全断面隧道掘进机，是适用于坚硬围岩隧道开挖的专用设备，核心特征是通过刀盘上的滚刀挤压、切削硬岩实现开挖，具有破岩效率高、施工质量稳定、自动化程度高的核心优势。TBM 的技术参数聚焦于硬岩破碎能力与长距离掘进适应性，与盾构机形成明确的地质适配分工。TBM 的核心技术参数包括开挖直径、刀盘转速、滚刀数量与类型、推进力、掘进速度等。开挖直径范围通常为 2—16 米，适配不同断面规模的硬岩隧道；刀盘转速与滚刀配置决定硬岩破碎效率，坚硬围岩需配置高强度滚刀，刀盘转速通常为 1-5 转 / 分钟；推进力是 TBM 破岩的核心动力，硬岩隧道需匹配大推进力，通常为数千吨级，确保滚刀能够有效切入硬岩；掘进速度在完整硬岩中可达 10—30 米 / 天，显著高于钻爆法，长距离隧道优势尤为明显。TBM 的适用场景聚焦于坚硬围岩隧道，具体包括花岗岩、玄武岩、石英岩等完整硬岩地层；围岩等级高、稳定性好的 I - II 级围岩隧道；长距离、中到大断面隧道工程，如铁路隧道、公路隧道、水利隧道等；周边环境对爆破振动敏感的区域，能够通过无爆破开挖减少对围岩与周边构筑物的扰动。

（三）铰挖机

铰挖机是一种灵活的中小型机械开挖设备，核心特征是通过铰挖头的旋转切削实现围岩破碎，可单独作业或与其他设备协同作业，具有适应性强、操作灵活的核心优势。铰挖机的技术参数聚焦于切削能力与作业灵活性，适配复杂地质与小断面隧道的开挖需求。

铰挖机的核心技术参数包括铰挖头功率、铰挖直径、整机重量、作业半径等。铰挖头功率决定切削能力，通常为 50 千—300 千瓦，功率越大越适用于硬度较高的围岩；铰挖直径范围为 0.5—3 米，适配小断面隧道、隧道联络通道、隧道扩挖等作业场景；整机重量较轻，通常为 10—50 吨，便于运输与现场作业；作业半径小，能够在狭窄空间内灵活作业，适配复杂断面形状的开挖需求。

铰挖机的适用场景聚焦于复杂地质与小型隧道工程，具体包括破碎围岩、软

弱夹层、含孤石的复合地层；小断面隧道、隧道联络通道、洞口段开挖等小型作业场景；无法采用盾构机、TBM 的复杂地质区域，如断层破碎带、岩溶发育区等；需要精准控制开挖轮廓的修复、扩挖作业，能够通过灵活切削减少超欠挖。为清晰呈现各类机械开挖核心设备的技术差异与适配性，构建如下机械开挖核心设备技术参数与适用场景对比表：

设备类型	核心技术参数	适用地质条件	适用工程场景
盾构机	开挖直径 3—15m，刀盘扭矩中等，推进力中等，掘进速度 3—10m/ 天	富水砂层、淤泥质土、粉质黏土等软弱围岩	城市浅埋隧道、地铁隧道、市政管廊，小到中断面长距离隧道
TBM	开挖直径 2—16m，刀盘转速 1-5r/min，推进力大（千吨级），掘进速度 10—30m/ 天	花岗岩、玄武岩等完整硬岩，Ⅰ - Ⅱ 级围岩	铁路隧道、公路隧道、水利隧道，中到大断面长距离硬岩隧道
铤挖机	铤挖头功率 50-300kW，铤挖直径 0.5—3m，整机重量 10—50t，作业半径小	破碎围岩、软弱夹层、含孤石复合地层、断层破碎带	小断面隧道、联络通道、洞口开挖、隧道修复与扩挖

二、施工技术流程

机械开挖施工技术流程具有标准化、一体化的核心特征，需围绕设备全生命周期开展，涵盖施工前期的设备选型、施工过程中的始发与接收、掘进参数控制等核心环节。各环节环环相扣、相互影响，流程的科学性与协同性直接决定施工效率、质量与安全。机械开挖施工需严格遵循标准化流程，强化各环节的质量管控与参数优化，确保施工过程高效、稳定推进。

（一）设备选型

设备选型是机械开挖施工的前提与核心环节，核心目标是根据地质条件、隧道参数、工期要求等核心因素，选择技术适配、经济合理的开挖设备，避免因设备选型不当导致施工效率低下、施工风险提升。设备选型需遵循“地质适配、参数匹配、经济高效”的核心原则，开展多维度综合论证。设备选型的核心流程包括三个方面。一是基础条件调研，全面收集项目地质勘察资料，明确围岩类型、岩性特征、地下水分布等地质条件；梳理隧道设计参数，包括断面尺寸、长度、埋深、线路走向等；明确工程工期要求、质量标准、周边环境约束等核心需求，为设备选型提供基础依据。二是设备类型筛选，根据地质条件初步筛选设备类型，

软弱围岩优先筛选盾构机，坚硬围岩优先筛选 TBM，复杂小断面场景优先筛选铣挖机；针对复合地层，需结合地层分布特征，选择能够适配多种地质的复合型设备，如复合式盾构机、硬岩盾构机等。三是设备参数确定与经济性论证，根据隧道断面尺寸、岩性硬度等参数，确定设备的开挖直径、刀盘扭矩、推进力等核心技术参数；对比不同设备的购置或租赁成本、运维成本、施工效率，开展经济性分析，选择性价比最优的设备；同时评估设备的运输、安装可行性，确保设备能够顺利进场并完成组装调试。

（二）始发与接收

始发与接收是机械开挖施工的关键节点，直接决定设备能否顺利启动掘进与安全收尾，核心风险在于洞口段围岩稳定性差、易发生坍塌与涌水。始发与接收环节需强化洞口段加固、设备组装调试、洞门密封等核心工作，确保施工安全。始发环节的核心流程包括三个方面。一是洞口段加固，根据洞口段地质条件，采用管棚支护、超前小导管注浆、搅拌桩加固等技术，提升洞口段围岩稳定性与抗渗性，为设备始发创造稳定环境；加固完成后需对加固效果进行检验，确保满足施工安全要求。二是设备组装与调试，在始发井内完成设备的拆解、运输、组装，包括刀盘、护盾、推进系统、出碴系统、衬砌系统等核心部件的安装；完成组装后开展全面调试，包括机械系统、电气系统、液压系统、导向系统的调试，确保设备各系统运行正常；进行空载与负载试验，验证设备的掘进、出碴、衬砌等功能是否符合设计要求。三是洞门密封与始发推进，安装洞门密封装置，包括密封帘布、刷板等，防止掘进过程中出现涌水涌砂；设置始发导轨，引导设备精准进入隧道线路；启动设备开展始发推进，控制初始掘进速度与推进力，逐步熟悉地质条件，优化掘进参数，确保始发过程稳定。

接收环节的核心流程包括三个方面。一是接收段加固与清理，对接收段围岩进行加固处理，清理接收井内的杂物与积水，确保接收环境安全；提前探测接收段地质条件，若存在不良地质，需采取针对性处理措施。二是设备导向调整，通过导向系统实时监测设备姿态，根据接收井位置调整设备掘进方向，确保设备精准进入接收井；逐步降低掘进速度，控制推进力，避免设备碰撞接收井结构。三是设备拆解与接收，设备进入接收井后，停止掘进，切断设备动力系统；拆除洞门密封装置，开展设备的拆解作业，将设备部件依次吊出接收井；对接收段隧道断面进行检查与清理，完成接收环节的收尾工作。

（三）掘进参数控制

掘进参数控制是机械开挖施工过程的核心环节，核心目标是根据实时地质条件与设备运行状态，动态调整掘进参数，实现设备高效、稳定掘进，控制隧道成型质量与围岩变形。掘进参数控制需建立实时监测与动态调整机制，确保参数与地质条件精准匹配。掘进参数控制的核心流程包括三个方面。一是核心参数确定，根据地质条件与设备性能，确定初始掘进参数，包括掘进速度、刀盘转速、推进力、出碴速度、注浆量等；硬岩地层中需匹配较大的刀盘转速与推进力，控制掘进速度；软弱围岩中需降低掘进速度，控制推进力，避免围岩过度扰动；富水地层中需提升注浆量，确保衬砌背后填充密实，防止涌水。二是实时监测与数据采集，通过设备自带的监测系统与外部监测设备，实时采集掘进参数数据、设备运行状态数据、围岩变形数据、地下水数据等；建立数据监测平台，实现数据的实时可视化展示，为参数调整提供数据支撑。三是动态参数优化，根据实时监测数据，分析掘进过程中存在的问题，若出现围岩变形过大，需降低掘进速度、增大注浆量；若出现刀盘磨损严重，需降低刀盘转速、调整推进力，或停机更换刀盘；若出现出碴不畅，需调整出碴速度，确保出碴与掘进速度匹配；通过动态优化掘进参数，实现掘进过程的安全、高效推进。

三、技术优势与局限

机械开挖技术作为隧道开挖的现代化技术方向，在施工效率、质量、安全等方面具有显著优势，已成为长距离、复杂地质隧道的优选技术方案。但同时，机械开挖技术受设备性能与地质条件限制，存在一定的技术局限。全面认识机械开挖技术的优势与局限，能够为技术选择与应用优化提供科学依据，实现技术优势的充分发挥与局限的有效规避。

（一）技术优势

机械开挖技术的优势主要体现在施工效率、工程质量、作业安全、环境影响四个核心方面，能够有效提升隧道工程建设的综合效益。

施工效率方面，机械开挖实现了开挖、出碴、支护等工序的一体化自动化作业，大幅减少了工序衔接时间，掘进效率显著高于传统钻爆法。TBM 在完整硬岩中掘进速度可达 10—30 米 / 天，盾构机在软弱围岩中掘进速度可达 3—10 米 / 天，长距离隧道中能够大幅缩短工期；同时，机械开挖减少了对人工的依赖，降低了

人工操作对效率的影响，实现了连续稳定掘进。

工程质量方面，机械开挖通过设备的精准控制，能够有效控制隧道断面成型质量，减少超欠挖现象，确保隧道轮廓规整；衬砌作业与掘进同步开展，能够保证衬砌厚度均匀、连接紧密，提升衬砌结构的稳定性与防水性能；设备自带的导向系统能够精准控制隧道线路走向，确保隧道轴线偏差符合设计要求，提升工程整体质量。

作业安全方面，机械开挖设备的护盾能够为作业人员提供封闭的安全作业环境，避免围岩直接暴露导致的坍塌风险；无需使用炸药，消除了爆破作业带来的早爆、拒爆、飞石等安全隐患；自动化作业减少了作业人员数量，降低了人员处于危险环境的概率；实时监测系统能够及时预警围岩变形、设备故障等风险，提升安全管控能力。

环境影响方面，机械开挖无爆破振动，能够有效减少对周边构筑物与地质环境的扰动，适用于城市建成区、文物保护单位等环境敏感区域；作业过程封闭性好，减少了粉尘、噪声污染，改善了作业环境与周边环境质量；无需大量堆放爆破器材，降低了环境安全风险；对地面沉降的控制精度高，能够减少对地面道路、建筑物的影响。

（二）技术局限

机械开挖技术的局限主要体现在地质适应性、设备投入、灵活性三个核心方面，限制了其在部分工程场景中的应用。

地质适应性局限是机械开挖技术最核心的局限。盾构机主要适用于软弱围岩，在硬岩地层中刀盘磨损严重、掘进效率极低；TBM 主要适用于完整硬岩，在软弱围岩、破碎围岩中易出现刀盘结泥、围岩坍塌等问题；铣挖机的破岩能力有限，无法适配高强度硬岩地层。复合地层中，单一类型机械开挖设备难以适配多种地质条件，需采用复合型设备，增加了设备投入与技术难度；断层破碎带、岩溶发育区等复杂地质区域，机械开挖易出现设备卡阻、涌水涌砂等风险，施工难度大。

设备投入成本高，机械开挖核心设备如盾构机、TBM 的购置成本高昂，单台设备造价可达数千万元甚至上亿元，大幅提升了工程前期投资门槛；设备的运输、安装、拆解成本也较高，尤其对于山区隧道、小断面隧道，设备运输与组装难度大；设备运维成本高，刀盘、滚刀等易损部件更换频繁，核心系统的维护需要专业技术与设备，增加了工程运营成本。

施工灵活性差，机械开挖设备的结构固定，对隧道断面尺寸、线路走向的调整适应性差，若工程设计发生变更，设备调整难度大、成本高；设备体积大，无法在狭窄空间内作业，不适用于小断面隧道、复杂线路隧道的局部开挖；设备一旦进场，难以快速更换或调整，若遭遇突发地质灾害，应急处置的灵活性不足。

机械开挖技术的核心优势在于高效、优质、安全、低环境影响，是现代化隧道工程建设的重要技术方向；其核心局限在于地质适应性有限、设备投入高、施工灵活性差。在实际工程应用中，需结合地质条件、隧道参数、工期要求等核心因素，科学选择机械开挖设备与技术看案，充分发挥技术优势，通过配套辅助技术规避技术局限。随着机械制造技术、智能化技术的不断发展，机械开挖设备的地质适应性将逐步提升，设备成本将逐步降低，技术应用范围将进一步扩大，为复杂地质条件下隧道工程的建设提供更强大有力的技术支撑。

第四节 开挖面稳定性控制

开挖面稳定性是隧道开挖施工的核心安全保障，直接关系到施工人员生命安全、设备完好与工程推进效率。隧道开挖过程中，开挖面围岩原有的应力平衡被打破，易出现应力集中、围岩变形等问题，尤其在软弱破碎围岩、富水地层等复杂地质条件下，极易引发开挖面塌方、涌水等灾害，造成工程延误与经济损失。开挖面稳定性控制技术的核心是通过科学的控制目标引领、针对性的技术措施实施与动态的监测调整机制，重构开挖面围岩的应力平衡，保障开挖面处于稳定状态。随着隧道工程向复杂地质、深埋方向发展，开挖面稳定性控制的技术难度不断提升，形成了涵盖目标设定、措施实施、动态管控的完整技术体系。

一、稳定控制目标

开挖面稳定性控制的核心目标是通过主动干预与科学管控，避免开挖面出现失稳现象，确保开挖施工安全有序推进。稳定控制目标需立足隧道地质条件、开挖方式、隧道埋深等核心因素，明确控制的核心方向与量化标准，为后续控制技术的制定与实施提供明确指引。其中，防止开挖面塌方、涌水是最核心的控制目标，同时需兼顾控制围岩变形、保障施工空间安全等衍生目标，形成多层次的稳定控制目标体系。

（一）防止开挖面塌方

防止开挖面塌方是开挖面稳定性控制的首要目标。开挖面塌方是隧道施工中最常见的灾害类型，其本质是开挖面围岩在应力重分布过程中，因承载能力不足导致的失稳破坏，表现为围岩剥落、坍塌等现象。塌方不仅会造成施工中断，还可能掩埋设备、伤及人员，引发连锁灾害。防止开挖面塌方的目标核心是确保开挖面围岩具有足够的承载能力，能够抵抗开挖卸荷产生的应力作用。具体需实现开挖面围岩无明显剥落、无贯通性裂缝，开挖面轮廓保持完整；围岩变形量控制在允许范围内，避免出现突发性、大幅度变形；在开挖循环周期内，开挖面能够保持稳定状态，为后续支护作业创造安全条件。不同地质条件下，塌方风险存在显著差异，稳定控制目标需针对性调整，坚硬完整围岩以控制局部剥落为主，软弱破碎围岩以防止整体坍塌为核心，深埋隧道需重点控制应力集中引发的塌方风险。

（二）防止开挖面涌水

防止开挖面涌水是富水地层隧道开挖面稳定性控制的核心目标。富水地层中，开挖面揭露地下水后，水压力作用会降低围岩力学性能，同时水流冲刷会加剧围岩破坏，极易引发涌水、突泥等灾害，不仅威胁施工安全，还可能导致周边地下水位下降，影响周边环境。防止开挖面涌水的目标核心是控制地下水对开挖面稳定性的不利影响，确保开挖面无大规模涌水、突泥现象。具体需实现开挖面渗水量控制在允许范围内，避免出现集中涌水通道；地下水压力得到有效释放或平衡，防止水压力击穿开挖面围岩；开挖面周边围岩的抗渗性能得到提升，形成有效的隔水屏障。对于富水砂层、岩溶发育区等特殊富水地层，还需实现防止地下水携带泥沙涌入隧道，避免造成开挖面周边围岩空洞与地面沉降。

（三）衍生控制目标

除核心的防塌方、防涌水目标外，开挖面稳定性控制还需兼顾一系列衍生目标，保障工程整体质量与周边环境安全。这些衍生目标与核心目标相互关联，共同构成完整的稳定控制体系。核心衍生目标包括控制围岩变形与保障施工空间安全。控制围岩变形目标要求开挖面周边围岩的收敛变形、沉降变形控制在设计允许范围内，避免变形过大导致隧道结构开裂、支护失效；保障施工空间安全目标要求开挖面作业区域保持整洁、无安全隐患，为施工人员与设备提供安全的作业环境。此外，对于城市浅埋隧道等周边环境敏感区域，还需将控制地面沉降纳入

稳定控制目标，避免开挖面失稳引发的围岩变形传导至地面，造成周边建筑物损坏、道路塌陷等问题。

二、控制技术措施

开挖面稳定性控制技术措施需围绕稳定控制目标，结合地质条件与开挖方式，采用“主动预防、综合处置”的思路，通过超前干预、过程管控等方式，提升开挖面围岩稳定性。核心控制技术措施包括超前支护、降水、开挖速率控制三大类，各类措施相互协同、互为补充，形成全方位的稳定控制技术体系。

（一）超前支护

超前支护是开挖面稳定性控制的核心主动预防措施，核心原理是在开挖作业前，对开挖面前方的围岩进行预先加固与支护，提升围岩自身承载能力，约束围岩变形，为开挖作业提供安全保护。超前支护措施需根据围岩地质条件选择适配的类型，确保支护效果与地质条件精准匹配。常用的超前支护技术措施包括管棚支护、超前小导管注浆支护、超前锚杆支护等。管棚支护适用于软弱破碎围岩、洞口段、断层破碎带等地质条件复杂区域，通过在开挖面前方设置一排或多排大直径钢管，形成刚性支护棚架，有效阻挡围岩坍塌，同时可通过钢管进行注浆加固，进一步提升围岩整体性；超前小导管注浆支护适用于软弱围岩、富水地层，通过在开挖面前方钻设小直径导管，向导管内注入浆液，浆液渗透至围岩裂隙中凝固，形成加固圈，提升围岩承载能力与抗渗性能；超前锚杆支护适用于中等稳定性围岩，通过在开挖面前方打入锚杆，将前方围岩与后方稳定围岩连接，约束围岩变形，防止开挖面剥落。超前支护措施的实施需严格控制支护参数，包括支护材料规格、布设间距、长度、注浆压力等，确保支护效果满足稳定控制要求。

（二）降水

降水是富水地层开挖面稳定性控制的关键技术措施，核心原理是通过人工降水方式降低开挖面周边地下水位，减小地下水压力，提升围岩力学性能，避免水流冲刷引发的涌水、突泥风险。降水措施需结合地下水分布特征、地层渗透性等因素，选择科学的降水方式，确保降水效果与施工安全。常用的降水技术措施包括井点降水、管井降水、轻型井点降水等。管井降水适用于地下水丰富、地层渗透性强的富水地层，通过在隧道周边布设管井，利用深井泵将地下水抽出，实现地下水位的大幅降低；井点降水适用于浅层地下水、地层渗透性较弱的区域，通

过布设密集的井点管，利用真空泵将地下水汇集抽出，控制浅层地下水位；对于岩溶发育区等特殊富水地层，还可采用帷幕注浆降水技术，通过注浆形成隔水帷幕，阻断地下水流通通道，实现区域降水。降水措施的实施需严格控制降水速率与降水深度，避免因降水过快或过度降水导致周边地面沉降过大，影响周边环境安全；同时需加强降水过程中的水位监测，根据监测数据调整降水参数。

（三）开挖速率控制

开挖速率控制是开挖面稳定性控制的过程管控措施，核心原理是通过合理控制开挖循环进尺与开挖节奏，减少开挖作业对围岩的扰动，为围岩应力重分布与支护作业提供充足时间，避免因开挖速率过快导致围岩失稳。开挖速率控制需结合地质条件、开挖方式、支护能力等因素，制定科学的开挖速率标准。开挖速率控制的核心措施包括控制开挖循环进尺与优化开挖节奏。控制开挖循环进尺方面，软弱破碎围岩需采用小进尺开挖，缩短单次开挖的围岩暴露范围与时间，降低塌方风险；坚硬完整围岩可适当增大进尺，提升施工效率。优化开挖节奏方面，需合理安排开挖与支护的时间间隔，确保支护作业及时跟进，避免开挖面长时间暴露；对于富水地层、断层破碎带等复杂地质区域，需适当放缓开挖节奏，增加开挖循环之间的间隔时间，让围岩应力充分释放与稳定。此外，开挖速率控制还需与支护能力相匹配，确保支护作业能够跟上开挖进度，避免因支护滞后导致开挖面失稳；同时需根据开挖过程中的围岩反馈，动态调整开挖速率，若发现围岩变形加剧、出现裂缝等失稳迹象，需立即放缓或停止开挖，采取加固措施后再恢复施工。

三、动态控制机制

隧道开挖过程中，地质条件可能存在不确定性，开挖面围岩状态会随开挖进程动态变化，单一的静态控制措施难以适应复杂多变的施工环境。动态控制机制的核心是通过建立开挖面监测体系，实时采集围岩状态数据，结合数据分析判断开挖面稳定性，进而动态调整控制技术措施，实现“监测－分析－调整－管控”的闭环管理，确保开挖面稳定性始终处于可控状态。动态控制机制是提升开挖面稳定性控制精准性与有效性的关键保障。

（一）开挖面监测体系构建

开挖面监测体系是动态控制机制的基础，核心是通过布设合理的监测点与监

测设备，实时采集能够反映开挖面稳定性的关键数据，为后续分析判断提供数据支撑。监测体系需覆盖开挖面围岩变形、应力、地下水等核心监测指标，确保监测数据的全面性、准确性与实时性。监测体系的构建核心包括监测指标确定、监测点布设与监测设备选型。监测指标方面，核心监测指标包括开挖面围岩收敛变形、拱顶沉降、围岩应力、地下水水位与渗水量等，这些指标能够直接反映开挖面的稳定状态；对于复杂地质隧道，还可增设围岩裂隙发育情况、开挖面土体位移等监测指标。监测点布设方面，需根据隧道断面尺寸、地质条件，在开挖面及周边围岩合理布设监测点，确保监测点能够全面覆盖开挖面关键区域；监测点布设需遵循“均匀分布、重点突出”的原则，在开挖面中心、拱顶、边墙等关键部位加密布设监测点。监测设备选型方面，需选择精度高、稳定性好、响应速度快的监测设备，包括收敛计、沉降计、应力计、水位计、渗水量监测仪等；对于现代化隧道工程，可采用自动化监测设备，实现监测数据的实时采集、传输与存储，提升监测效率。

（二）监测数据实时分析与判断

监测数据实时分析与判断是动态控制机制的核心环节，核心是通过对监测数据的实时处理与分析，判断开挖面当前的稳定性状态，识别潜在的失稳风险，为后续措施调整提供决策依据。分析判断需建立科学的判断标准与分析方法，确保判断结果的准确性与可靠性。监测数据实时分析与判断的核心流程包括数据处理、稳定性判断与风险预警。数据处理方面，需对采集的监测数据进行筛选、整理与校准，剔除异常数据，确保数据的准确性；同时需对数据进行实时趋势分析，判断监测指标的变化规律，如变形速率、应力增长速率等。稳定性判断方面，需结合设计允许值、工程经验值，建立监测指标的阈值体系，若监测数据在阈值范围内，且变化趋势平稳，说明开挖面处于稳定状态；若监测数据接近或超过阈值，或变化速率突然加快，说明开挖面存在失稳风险。风险预警方面，根据稳定性判断结果，建立分级预警机制，分为一般预警、较大预警、重大预警三个等级，不同预警等级对应不同的处置措施；一旦触发预警，需立即发出预警信号，通知相关人员采取应对措施。

（三）控制措施动态调整与优化

控制措施动态调整与优化是动态控制机制的落脚点，核心是根据监测数据的分析判断结果，针对开挖面稳定性状态，实时调整控制技术措施的参数或类型，

确保控制措施能够始终适配开挖面围岩的动态变化，提升控制效果。控制措施调整需遵循“精准施策、快速响应”的原则，避免因调整不及时导致开挖面失稳。控制措施动态调整与优化的核心内容包括支护措施调整、降水措施调整与开挖速率调整。支护措施调整方面，若监测数据显示围岩变形加剧，需强化支护措施，如减小支护间距、增加支护材料规格、增设超前支护等；若围岩状态稳定，可在确保安全的前提下，适当优化支护参数，提升施工效率。降水措施调整方面，若监测显示地下水位下降缓慢，渗水量较大，需加大降水强度，如增加管井数量、提升水泵功率等；若监测显示周边地面沉降过大，需放缓降水速率，或采取回灌措施，平衡地下水位。开挖速率调整方面，若发现开挖面存在失稳风险，需立即停止开挖，采取加固措施并待围岩稳定后，再降低开挖速率、减小开挖进尺恢复施工；若围岩状态稳定，可在支护能力允许的范围内，适当提升开挖速率。此外，动态调整还需结合地质勘察的补充资料，若开挖过程中揭露的地质条件与前期勘察不符，需及时调整控制措施，适配实际地质条件。

开挖面稳定性控制的核心是通过明确防塌方、防涌水的核心目标，实施超前支护、降水、开挖速率控制等针对性技术措施，建立基于监测数据的动态控制机制，实现开挖面稳定性的精准管控。在实际工程应用中，需结合隧道地质条件、开挖方式等核心因素，构建适配的稳定性控制体系，充分发挥静态措施与动态机制的协同作用，有效规避开挖面失稳风险。随着智能化监测技术、大数据分析技术的不断发展，开挖面稳定性动态控制机制将逐步实现智能化、自动化，进一步提升控制的精准性与效率，为复杂地质条件下隧道开挖施工的安全推进提供更强有力的技术支撑。

第八章 隧道衬砌施工技术

第一节 衬砌类型与材料

隧道衬砌是隧道结构的核心组成部分,承担着承受围岩压力、防止围岩变形、阻隔地下水渗透、保护隧道内部环境的关键功能,其施工质量直接决定隧道的结构安全性、长期稳定性与使用寿命。随着隧道工程向复杂地质、大断面、长距离方向发展,以及对工程耐久性、环保性要求的不断提升,衬砌类型的选择与材料的性能要求愈发严苛,推动了衬砌技术的持续创新。衬砌类型与材料的科学适配是衬砌施工技术的基础,需结合隧道地质条件、工程用途、环境要求等核心因素,实现“结构安全、性能适配、经济合理”的核心目标。

一、衬砌类型选择

隧道衬砌类型的选择是衬砌施工的前提环节,核心目标是根据隧道地质条件、开挖方式、断面尺寸、工程用途等核心因素,选择结构形式适配、受力合理、施工可行的衬砌类型。不同衬砌类型在结构特征、施工工艺、适用条件等方面存在显著差异,直接影响衬砌施工效率、工程成本与结构性能。常用的隧道衬砌类型包括模筑混凝土衬砌、管片衬砌、喷射混凝土衬砌,各类衬砌类型需针对性适配不同工程场景。

(一) 模筑混凝土衬砌

模筑混凝土衬砌是传统且应用广泛的衬砌类型,核心特征是在隧道开挖完成后,通过架设模板、绑扎钢筋、浇筑混凝土形成整体式衬砌结构,具有结构整体性强、承载能力高、适应性广的核心优势。其结构形式可根据围岩压力分布特点设计为直墙式、曲墙式、圆形等多种形式,适配不同地质条件下的受力需求。模筑混凝土衬砌的选择需重点结合地质条件与工程规模。在软弱破碎围岩、深埋隧道等围岩压力较大的场景中,优先选择模筑混凝土衬砌,利用其整体受力优势抵御围岩压力;在隧道洞口段、断层破碎带等地质条件复杂区域,模筑混凝土衬砌

可通过加厚衬砌厚度、增设钢筋等方式强化结构性能，保障隧道入口区域的结构安全；对于中小断面隧道、短距离隧道，模筑混凝土衬砌施工工艺成熟、设备投入相对较低，能够实现经济高效的衬砌施工。其局限性在于施工周期相对较长，模板架设与混凝土养护占用较多时间，在长距离、大断面隧道中易影响整体施工进度。

（二）管片衬砌

管片衬砌是机械化隧道开挖工程的专用衬砌类型，核心特征是采用工厂预制的混凝土或钢筋混凝土管片，在隧道开挖设备的护盾保护下，通过管片拼装机械逐块拼装形成环形衬砌结构，具有施工自动化程度高、进度快、质量可控的核心优势。管片之间通过螺栓连接，配套密封胶实现防水功能，形成完整的环形承载结构。管片衬砌的选择主要适配机械化开挖方式与特定工程场景。在采用盾构机、TBM 等全机械化开挖的隧道工程中，管片衬砌是首选类型，能够与机械化开挖设备实现工序协同，大幅提升施工效率；在城市地铁隧道、市政管廊等浅埋、大断面隧道工程中，管片衬砌施工对周边环境影响小，能够有效控制地面沉降，适配城市建成区的施工要求；在富水地层隧道工程中，预制管片的拼装精度高，配套的密封防水体系能够有效阻隔地下水渗透，保障隧道内部干燥环境。其局限性在于对制造精度要求极高，预制管片的尺寸偏差直接影响拼装质量与防水效果，且前期预制厂建设与管片生产投入较大。

（三）喷射混凝土衬砌

喷射混凝土衬砌是一种柔性支护与衬砌结合的类型，核心特征是利用高压喷射设备将混凝土混合料直接喷射至隧道围岩表面，快速凝结形成衬砌结构，可单独作为衬砌使用，也可作为初期支护与其他衬砌类型组合使用，具有施工快速、适应性强、与围岩贴合紧密的核心优势。其能够充分利用围岩的自承能力，实现“围岩－衬砌”协同受力。喷射混凝土衬砌的选择需聚焦于地质条件与施工需求的适配性。在坚硬完整围岩、中小断面隧道中，可单独采用喷射混凝土衬砌，充分发挥围岩自承能力，降低工程成本；在软弱破碎围岩隧道中，喷射混凝土衬砌可作为初期支护，快速封闭围岩，控制围岩变形，为后续二次衬砌施工创造安全条件；在隧道抢修、临时支护等应急工程场景中，喷射混凝土衬砌施工速度快、无需复杂模板，能够快速形成支护能力，保障施工安全。其局限性在于结构厚度均匀性难以控制，表面平整度较差，长期耐久性相对模筑混凝土衬砌较弱，在地

下水丰富或对衬砌外观要求较高的工程中，需配套其他防护措施。

二、材料性能要求

隧道衬砌材料的性能直接决定衬砌结构的承载能力、耐久性与防水性能，是保障隧道长期安全运行的核心基础。衬砌材料的选择需严格遵循相关技术标准，满足强度、耐久性、防水性等核心性能要求。不同衬砌类型对材料性能的侧重点存在差异，但核心性能指标需达到统一的安全标准，确保衬砌结构能够适配隧道的服役环境与受力需求。

（一）混凝土强度

混凝土强度是衬砌材料最核心的性能要求，直接决定衬砌结构的承载能力，需确保混凝土能够有效承受围岩压力、车辆荷载、地震荷载等各类荷载作用，避免出现结构开裂、破损等安全隐患。混凝土强度等级的确定需结合隧道地质条件、衬砌类型、荷载大小等核心因素，通过结构受力计算精准确定。模筑混凝土衬砌的混凝土强度等级通常要求不低于 C30，在深埋隧道、大断面隧道等围岩压力较大的场景中，需提升至 C40 及以上，确保整体结构的承载稳定性；管片衬砌的混凝土强度等级要求更高，通常不低于 C50，因为预制管片在拼装与受力过程中需承受集中荷载，高强度混凝土能够保障管片的完整性与抗裂性；喷射混凝土衬砌的混凝土强度等级通常不低于 C25，作为初期支护时需快速达到设计强度，确保能够及时承担围岩压力，通常要求 24 小时强度满足支护需求。此外，混凝土强度还需保证均匀性，避免因强度波动导致局部结构受力薄弱，引发安全风险。

（二）耐久性

耐久性是衬砌材料的长期性能要求，核心目标是确保衬砌材料在隧道服役环境中能够抵抗各类侵蚀作用，维持结构性能稳定，延长隧道使用寿命。隧道服役环境复杂，衬砌材料需面临地下水侵蚀、围岩化学物质侵蚀、温度变化、干湿循环等多种不利因素的影响，耐久性要求更为严苛。衬砌材料的耐久性要求主要包括抗渗性、抗冻性、抗侵蚀性、抗碳化性等方面。抗渗性要求混凝土能够抵抗地下水渗透，避免水分侵入导致钢筋锈蚀；抗冻性要求混凝土在低温环境下能够抵抗冻融循环破坏，适用于寒冷地区隧道；抗侵蚀性要求混凝土能够抵抗地下水或围岩中硫酸盐、氯盐等化学物质的侵蚀，避免混凝土强度下降；抗碳化性要求混凝土能够抵抗空气中二氧化碳的渗透，防止混凝土碳化导致碱骨料反应，影响结

构稳定性。不同服役环境下的耐久性要求需针对性调整，如沿海地区隧道需重点提升抗氯盐侵蚀性能，寒冷地区隧道需强化抗冻性。

（三）防水性

防水性是衬砌材料的关键功能要求，核心目标是阻隔地下水渗透，保障隧道内部干燥环境，避免地下水侵入导致衬砌结构损坏、设备锈蚀、影响隧道正常使用。衬砌材料的防水性能与隧道防水体系密切相关，需与防水卷材、密封胶等其他防水措施协同作用，形成完整的防水屏障。衬砌材料的防水性要求主要体现在混凝土的抗渗等级与密实性上。模筑混凝土衬砌的抗渗等级通常不低于 P8，在富水地层隧道中需提升至 P10 及以上，确保混凝土本身具有良好的隔水性能；管片衬砌的混凝土抗渗等级通常不低于 P12，同时需配套高性能密封胶，通过管片接缝处的密封防水实现整体隔水效果；喷射混凝土衬砌的抗渗等级通常不低于 P6，作为初期支护时需与防水板协同作用，形成复合防水体系。此外，混凝土的密实性是保障防水性能的基础，需通过优化配合比、控制浇筑与养护工艺，减少混凝土内部孔隙与裂缝，提升混凝土的隔水能力。

三、材料创新应用

随着隧道工程对结构安全性、长期耐久性、环保经济性要求的不断提升，传统衬砌材料已难以完全满足复杂工程场景的需求，推动了衬砌材料的持续创新。材料创新应用的核心方向是提升材料的综合性能，降低工程成本，减少环境影响，形成适配复杂地质与严苛服役环境的新型衬砌材料体系。当前，高性能混凝土、新型防水材料的创新应用已成为隧道衬砌材料发展的主流趋势，显著提升了隧道衬砌的技术水平。

（一）高性能混凝土

高性能混凝土是在传统混凝土基础上通过优化配合比、掺入新型外加剂与矿物掺合料形成的新型混凝土材料，具有高强度、高耐久性、高工作性、低收缩性的核心优势，能够有效解决传统混凝土在复杂隧道工程中存在的强度不足、耐久性差、易开裂等问题，大幅提升衬砌结构的服役性能。高性能混凝土在隧道衬砌中的创新应用主要体现在三个方面。一是高强度高性能混凝土的应用，通过掺入超细矿物掺合料、高效减水剂等组分，制备出 C60 及以上等级的高强度混凝土，适配大断面、深埋隧道的高荷载需求，在管片衬砌中应用尤为广泛，能够减小管

片厚度,提升隧道有效断面面积;二是高耐久性高性能混凝土的应用,针对不同侵蚀环境,制备出抗渗、抗冻、抗化学侵蚀等专项性能优异的高性能混凝土,如在富水硫酸盐地层中应用抗硫酸盐高性能混凝土,在寒冷地区应用高抗冻高性能混凝土,延长隧道使用寿命;三是自密实高性能混凝土的应用,该类混凝土具有良好的流动性与填充性,无需振捣即可自动填充模板间隙,适用于模筑混凝土衬砌的复杂模板结构与管片预制生产,能够提升混凝土密实性,减少内部缺陷,同时提升施工效率。

(二) 新型防水材料

新型防水材料的创新应用是提升隧道衬砌防水性能的关键支撑,核心目标是解决传统防水材料在复杂地质条件下存在的防水效果差、使用寿命短、施工难度大等问题,形成与衬砌材料协同适配的高效防水体系。新型防水材料主要包括新型防水卷材、高性能密封材料、渗透结晶型防水材料等,各类材料在防水机理与应用场景上形成互补。新型防水材料的创新应用主要体现在三个方面。一是新型防水卷材的应用,如高分子自粘胶膜防水卷材、TPO防水卷材等,具有抗拉强度高、抗老化性能好、粘结力强的优势,适用于隧道衬砌的外防水体系,尤其在盾构隧道中与管片协同作用,能够提升接缝处的防水效果,且施工简便、效率高;二是高性能密封材料的应用,如聚硫密封胶、硅酮密封胶、遇水膨胀止水条等,适配管片接缝、模筑混凝土施工缝等防水薄弱部位,具有密封性能好、耐久性强、遇水膨胀等特性,能够有效阻隔接缝处的地下水渗透;三是渗透结晶型防水材料的应用,该类材料能够渗透至混凝土内部,与混凝土中的化学成分发生反应生成不溶于水的结晶,堵塞混凝土内部孔隙与裂缝,实现混凝土自防水性能的提升,可作为衬砌混凝土的掺合料或表面涂刷材料,适用于各类衬砌类型的防水强化。

隧道衬砌类型与材料的选择需立足工程实际条件,实现类型适配与性能达标。模筑混凝土衬砌、管片衬砌、喷射混凝土衬砌需针对性适配不同地质与施工场景;衬砌材料需严格满足强度、耐久性、防水性的核心要求;高性能混凝土、新型防水材料等创新材料的应用,为提升衬砌结构性能、延长使用寿命提供了技术保障。在实际工程应用中,需结合隧道工程的具体需求,科学选择衬砌类型与材料,推动衬砌施工技术向更安全、更耐久、更环保、更智能的方向发展,为隧道工程的长期稳定运行提供坚实支撑。

第二节 衬砌施工工艺

隧道衬砌施工工艺是决定衬砌结构质量与性能的核心环节，其规范性与科学性直接影响衬砌的承载能力、耐久性与防水性。不同衬砌类型对应的施工工艺存在显著差异，需结合衬砌类型特征、地质条件、工程需求等因素，制定适配的施工流程与技术标准。模筑衬砌工艺与管片衬砌工艺是隧道工程中最主流的两类施工工艺，分别适配传统开挖与机械化开挖场景。同时，通过强化关键工序的质量控制，能够有效规避施工缺陷，保障衬砌施工质量。

一、模筑衬砌工艺

模筑衬砌工艺是传统且应用广泛的衬砌施工工艺，核心特征是在隧道开挖面清理完成后，通过现场绑扎钢筋、安装模板、浇筑混凝土、养护成型的流程形成整体式衬砌结构。该工艺具有适应性强、结构整体性好的核心优势，能够适配不同断面形式、不同地质条件的隧道工程。模筑衬砌工艺的关键在于各工序的协同衔接与施工参数控制，确保钢筋布设精准、模板稳固、混凝土浇筑密实、养护充分，最终保障衬砌结构性能达标。

（一）钢筋绑扎

钢筋绑扎是模筑衬砌工艺的基础工序，核心目标是按照设计要求精准布设钢筋骨架，确保钢筋的规格、数量、间距、保护层厚度符合标准，为衬砌结构提供充足的抗拉强度支撑。钢筋绑扎质量直接影响衬砌结构的承载稳定性，需严格遵循施工规范开展作业。钢筋绑扎的核心流程包括施工准备、钢筋加工、骨架绑扎、质量检查四个环节。施工准备阶段需清理作业面，确保围岩表面平整、无浮碴杂物；核对钢筋原材料的质量证明文件，对钢筋进行进场检验，确保钢筋强度、韧性等性能达标。钢筋加工阶段需根据设计图纸切割、弯曲钢筋，控制加工尺寸偏差，确保钢筋形状符合骨架布设要求；对加工完成的钢筋进行分类堆放，做好标识管理。骨架绑扎阶段需按照设计间距布设主筋与箍筋，采用绑扎丝或焊接方式固定钢筋节点，确保骨架稳固；控制钢筋保护层厚度，通过设置垫块等方式避免钢筋与模板直接接触，防止钢筋锈蚀影响结构耐久性。质量检查阶段需核对钢筋的规格、数量、间距是否符合设计要求，检查钢筋骨架的垂直度、平整度，对不合格部位及时整改。

（二）模板安装

模板安装是模筑衬砌工艺的关键工序，核心目标是搭建稳固、精准的模板体系，确保混凝土浇筑后能够形成符合设计要求的衬砌断面轮廓。模板的稳定性与密封性直接影响衬砌外观质量与结构尺寸精度，需重点控制模板的安装精度与固定强度。模板安装的核心流程包括模板选型、安装准备、模板架设、固定与密封、质量检查五个环节。模板选型需结合隧道断面尺寸、施工条件，选择钢模板、木模板或组合模板，大断面隧道优先采用钢模板，确保模板刚度与稳定性；对于曲线隧道，需选择可调节弧度的模板，适配隧道线路走向。安装准备阶段需清理作业面，铺设模板支撑基础，确保支撑面平整坚实；检查模板的平整度、表面光洁度，对变形、破损的模板进行修复或更换。模板架设阶段需按照先拱后墙或先墙后拱的顺序安装模板，控制模板的安装标高与轴线偏差，确保衬砌断面尺寸精准；采用满堂支架或型钢支撑固定模板，确保支撑体系具有足够的承载能力，能够抵御混凝土浇筑过程中的侧压力。固定与密封阶段需加固模板连接节点，采用螺栓或卡扣紧固，防止浇筑过程中出现模板位移；在模板接缝处铺设密封胶条或海绵条，确保接缝密封严密，避免混凝土浇筑时出现漏浆现象。质量检查阶段需复核模板的轴线位置、断面尺寸、垂直度，检查支撑体系的稳固性与接缝密封性，确认合格后方可进入下道工序。

（三）混凝土浇筑

混凝土浇筑是模筑衬砌工艺的核心工序，核心目标是将符合性能要求的混凝土均匀、密实地填充至模板体系内，形成完整的衬砌结构。混凝土浇筑质量直接决定衬砌的密实性与强度，需严格控制浇筑顺序、浇筑速度、振捣参数等关键指标。混凝土浇筑的核心流程包括浇筑准备、混凝土运输、分层浇筑、振捣密实、浇筑收尾五个环节。浇筑准备阶段需再次检查模板、钢筋的质量，清理模板内的杂物与积水；核对混凝土的配合比，对进场混凝土进行坍落度、扩展度等性能检测，确保混凝土工作性达标。混凝土运输阶段需采用专用混凝土运输设备，控制运输时间，避免混凝土在运输过程中出现离析、初凝现象；运输过程中需保持混凝土搅拌状态，确保混凝土均匀性。分层浇筑阶段需按照“分层、对称、连续”的原则浇筑混凝土，分层厚度控制在合理范围，避免一次性浇筑厚度过大导致混凝土振捣不密实或模板受力不均；对于大断面隧道，需采用多点对称浇筑方式，平衡模板承受的侧压力。振捣密实阶段需采用插入式振捣器或附着式振捣器振捣

混凝土，控制振捣频率与时间，确保混凝土内部气泡充分排出，密实度达标；振捣过程中需避免振捣器碰撞钢筋与模板，防止钢筋位移、模板变形。浇筑收尾阶段需在混凝土浇筑至设计标高后，采用抹子平整衬砌表面，清除表面浮浆；对浇筑过程中出现的漏浆、蜂窝等缺陷及时修补。

（四）养护

养护是模筑衬砌工艺的收尾工序，核心目标是为混凝土硬化提供适宜的温度、湿度环境，促进混凝土强度增长，减少混凝土收缩裂缝，提升衬砌结构的耐久性。养护不及时或养护不到位易导致混凝土强度不足、表面开裂等缺陷，需高度重视养护环节的质量控制。养护的核心流程包括养护准备、养护实施、养护监测、养护收尾四个环节。养护准备阶段需在混凝土浇筑完成后，根据环境温度、湿度制定适配的养护方案，选择洒水养护、覆盖保湿养护、蒸汽养护等方式；准备养护所需的洒水设备、保湿材料、测温仪器等工具。养护实施阶段需在混凝土初凝后及时开展养护作业，确保混凝土表面持续湿润；采用覆盖保湿材料时，需确保材料与混凝土表面紧密贴合，避免出现空隙；采用蒸汽养护时，需控制升温、恒温、降温速率，避免温度骤变导致混凝土开裂。养护监测阶段需定期监测混凝土表面温度与环境湿度，根据监测数据调整养护措施；监测混凝土强度增长情况，通过同条件养护试块的强度检测，判断养护效果。养护收尾阶段需在混凝土强度达到设计要求后停止养护，清理养护设备与材料；对养护过程中出现的混凝土表面缺陷进行最终修补，确保衬砌外观质量达标。

二、管片衬砌工艺

管片衬砌工艺是机械化隧道开挖工程的专用施工工艺，核心特征是通过工厂预制管片，现场利用拼装机械逐块拼装形成环形衬砌结构，具有施工自动化程度高、进度快、质量可控的核心优势。该工艺与盾构机、TBM 等机械化开挖设备协同作业，能够大幅提升隧道施工效率，适配城市地铁、市政管廊等大断面、长距离隧道工程。管片衬砌工艺的关键在于管片生产质量控制、运输过程保护、现场拼装精度控制与接缝密封处理，确保最终形成的衬砌结构稳固、防水达标。

（一）管片生产

管片生产是管片衬砌工艺的基础环节，核心目标是在工厂预制出符合设计要求的管片构件，确保管片的强度、尺寸精度、外观质量达标。管片生产采用标准化、

工业化流程，能够有效控制产品质量稳定性，为现场拼装作业提供可靠保障。管片生产的核心流程包括生产准备、钢筋骨架制作、模板安装、混凝土浇筑、养护、脱模、质量检测七个环节。生产准备阶段需制定管片生产方案，核对原材料质量，优化混凝土配合比；清理生产场地，调试生产设备，确保生产环境达标。钢筋骨架制作阶段需按照设计图纸加工钢筋，采用专用模具绑扎或焊接钢筋骨架，控制骨架尺寸偏差与钢筋间距；对钢筋骨架进行除锈处理，确保骨架表面洁净。模板安装阶段需采用高精度钢模，按照管片型号安装模板，调整模板的平整度与密封性；在模板内涂刷脱模剂，确保管片脱模时表面完好。混凝土浇筑阶段需采用自密实高性能混凝土，控制浇筑速度与振捣参数，确保混凝土密实度；浇筑完成后平整管片表面，清除浮浆。养护阶段需采用蒸汽养护或洒水养护方式，控制养护温度与湿度，促进混凝土强度快速增长；确保管片养护龄期达标，强度满足设计要求。脱模阶段需在混凝土强度达到规定值后，按照规范流程拆除模板，避免硬撬硬拉导致管片破损。质量检测阶段需对管片的尺寸偏差、外观质量、强度、抗渗性等指标进行全面检测，对不合格管片进行标识、处理，严禁不合格管片出厂。

（二）管片运输

管片运输是连接管片生产与现场拼装的关键环节，核心目标是将工厂预制的管片安全、完好地运输至隧道施工现场，避免运输过程中出现管片破损、开裂、污染等问题。管片属于精密构件，运输过程中的振动、碰撞易导致结构损伤，需采取针对性的保护措施。管片运输的核心流程包括运输准备、装车固定、途中运输、现场卸载四个环节。运输准备阶段需对运输车辆、吊装设备进行检查，确保设备性能完好；准备管片保护材料，如缓冲垫、防护套等，避免管片与运输设备直接接触。装车固定阶段需采用专用吊具吊装管片，避免吊具对管片边角造成磕碰；管片装车时需合理摆放，控制堆放层数，避免上层管片对下层管片产生过大压力；采用捆绑带、支撑块等工具固定管片，防止运输过程中出现管片滑动、碰撞。途中运输阶段需选择平整的运输路线，控制运输速度，避免急加速、急刹车，减少运输振动；对于长距离运输，需定期检查管片固定状态，及时调整加固措施。现场卸载阶段需在施工现场设置专用卸载区域，采用现场吊装设备平稳卸载管片；卸载过程中需缓慢操作，避免管片与地面、设备碰撞；卸载完成后对管片进行外观检查，清理表面杂物，分类堆放并做好标识。

（三）管片拼装

管片拼装是管片衬砌工艺的核心工序，核心目标是在盾构机或 TBM 的护盾保护下，利用专用拼装机械将管片逐块精准拼装成环形衬砌结构，确保衬砌的轴线偏差、环向间隙、纵向间隙符合设计要求。拼装精度直接影响衬砌结构的稳定性与防水性能，需严格控制拼装顺序与操作规范。管片拼装的核心流程包括拼装准备、定位拼装、连接固定、姿态调整四个环节。拼装准备阶段需清理隧道开挖面的浮渣、杂物，检查拼装机械的性能，确保设备运行稳定；核对进场管片的型号、数量，对管片进行二次外观检查，确保管片完好。定位拼装阶段需按照“先封顶块、后邻接块、再标准块”的顺序进行拼装，或根据隧道线路走向、地质条件调整拼装顺序；利用拼装机械抓接管片，精准调整管片的位置、角度，使管片与已拼管片贴合紧密。连接固定阶段需在管片贴合后，及时安装环向与纵向连接螺栓，采用专用工具紧固螺栓，确保螺栓拧紧力矩符合设计要求；控制螺栓安装的垂直度，避免螺栓歪斜影响连接强度。姿态调整阶段需通过拼装机械的微调功能，调整管片环的轴线位置与垂直度，确保衬砌环轴线偏差在允许范围内；检查管片之间的间隙，若间隙过大或不均匀，需采用调整垫片等方式进行修正；确保相邻衬砌环之间贴合紧密，避免出现错台现象。

（四）接缝处理

接缝处理是管片衬砌工艺的关键质量控制点，核心目标是通过密封、填充等措施，确保管片接缝处的防水性能与结构整体性，避免地下水通过接缝渗透进入隧道内部。管片接缝是衬砌结构的薄弱环节，其处理质量直接决定隧道的防水效果。接缝处理的核心流程包括接缝清理、密封材料安装、缝隙填充、质量检查四个环节。接缝清理阶段需清理管片接缝处的杂物、灰尘、油污等，确保接缝表面洁净、干燥；检查接缝面的平整度，对凸起、毛刺等缺陷进行打磨处理，避免影响密封效果。密封材料安装阶段需按照设计要求，在管片接缝处安装密封胶条，如遇水膨胀止水条、聚硫密封胶等；确保密封胶条安装到位、贴合紧密，无扭曲、脱落现象；对于环向接缝与纵向接缝的交叉部位，需强化密封处理，避免出现防水死角。缝隙填充阶段需在管片拼装完成后，对接缝处的空隙采用专用填充材料进行填充，确保填充密实；填充材料需具有良好的粘结性、耐久性与防水性，能够与管片紧密结合。质量检查阶段需检查密封材料的安装质量与填充密实度，采用水压试验或渗水检测等方式检验接缝的防水性能；对检查发现的渗漏部位及时进行修补，确保接缝防水达标。

三、工艺质量控制

工艺质量控制是隧道衬砌施工的核心保障，核心目标是通过明确各关键工序的质量控制点，制定严格的操作规范，实施全过程质量监测与管控，及时发现并整改施工缺陷，确保衬砌施工质量符合设计要求与技术标准。工艺质量控制需覆盖衬砌施工的全流程，针对模筑衬砌与管片衬砌的工艺特点，采取针对性的控制措施，实现质量问题的源头防控与过程管控。

（一）关键工序质量控制点

关键工序质量控制点的确定需结合衬砌施工工艺特征，聚焦对衬砌质量影响显著的核心环节，明确各控制点的控制指标与验收标准。通过对关键控制点的精准管控，能够有效提升整体施工质量。模筑衬砌工艺的关键质量控制点包括钢筋绑扎、模板安装、混凝土浇筑、养护四个核心环节。钢筋绑扎的质量控制点包括钢筋规格、数量、间距、保护层厚度、骨架稳固性；模板安装的质量控制点包括模板轴线位置、断面尺寸、垂直度、支撑稳固性、接缝密封性；混凝土浇筑的质量控制点包括混凝土配合比、坍落度、浇筑顺序、分层厚度、振捣密实度；养护的质量控制点包括养护时间、养护温度、湿度、混凝土强度增长情况。

管片衬砌工艺的关键质量控制点包括管片生产、管片运输、管片拼装、接缝处理四个核心环节。管片生产的质量控制点包括管片尺寸偏差、外观质量、强度、抗渗性、养护龄期；管片运输的质量控制点包括管片保护措施、运输振动控制、管片破损情况；管片拼装的质量控制点包括拼装顺序、管片定位精度、螺栓紧固力矩、衬砌环轴线偏差、接缝间隙；接缝处理的质量控制点包括接缝清理质量、密封材料安装质量、填充密实度、防水性能。

（二）操作规范

操作规范是工艺质量控制的核心依据，需针对各关键工序制定明确、可操作的施工标准，规范施工人员的操作行为，确保各工序按照统一标准开展作业。操作规范需结合工程实际条件与技术要求，参考相关行业标准与规范制定，具备针对性与可行性。钢筋绑扎的操作规范要求施工人员严格按照设计图纸与施工方案开展作业，采用专用工具测量钢筋间距与保护层厚度，确保测量精度；钢筋节点绑扎或焊接需牢固，避免出现松动现象；严禁使用不合格钢筋，对加工过程中出现的不合格钢筋及时清理。模板安装的操作规范要求模板安装前必须进行清理与打磨，确保表面平整光滑；模板支撑体系需经过承载力验算，安装完成后需进行

荷载试验，确保稳固可靠；接缝密封材料需铺设均匀、压实，避免出现漏浆通道。混凝土浇筑机操作规范要求混凝土浇筑前必须对模板、钢筋进行最终检查，确认合格后方可浇筑；混凝土运输过程中需持续搅拌，浇筑时需分层振捣，振捣器插入深度与振捣时间需严格控制，避免出现欠振或过振现象；浇筑完成后需及时覆盖保湿，严禁在混凝土初凝前扰动表面。管片拼装的操作规范要求拼装机械操作人员必须经过专业培训，持证上岗；拼装过程中需实时监测管片姿态，根据监测数据微调拼装位置；螺栓紧固需按照规定的顺序与力矩进行，确保螺栓连接可靠。接缝处理的操作规范要求接缝清理必须彻底，采用高压风或毛刷清除杂物；密封胶条安装需准确到位，避免出现偏移、扭曲；填充材料需在规定的时间内完成填充，确保填充密实；接缝防水性能检测需严格按照验收标准开展，不合格部位必须返工处理。此外，所有施工人员需熟悉操作规范，定期开展技术交底与培训，提升施工人员的规范操作意识；建立施工过程的质量监督机制，安排专人对各工序操作规范的执行情况进行监督检查，及时纠正不规范操作行为。

隧道衬砌施工工艺需根据衬砌类型选择适配的施工流程，模筑衬砌工艺需强化钢筋绑扎、模板安装、混凝土浇筑、养护的协同管控，管片衬砌工艺需聚焦管片生产、运输、拼装、接缝处理的精度控制。通过明确关键工序的质量控制点与操作规范，实施全过程工艺质量控制，能够有效保障衬砌施工质量。在实际工程应用中，需结合工程地质条件、衬砌类型、施工设备等因素，优化施工工艺参数，推动施工工艺向规范化、精细化、智能化方向发展，为隧道衬砌结构的长期稳定运行提供坚实保障。

第三节 衬砌质量控制

隧道衬砌质量是保障隧道结构安全、长期稳定运行的核心基础，直接关系到隧道的承载能力、耐久性、防水性能与使用寿命。衬砌质量控制需贯穿衬砌施工全流程，通过明确科学的质量控制指标、采用精准高效的质量检测方法、实施规范的质量缺陷处理，形成“指标引领－检测管控－缺陷修复”的闭环质量保障体系。

一、质量控制指标

衬砌质量控制指标是衡量衬砌施工质量的核心标准，需结合衬砌结构的功能

需求与技术要求制定，确保指标具有针对性、科学性与可操作性。质量控制指标需覆盖衬砌结构的几何尺寸、力学性能、外观质量、防水性能等核心维度，明确各指标的控制范围与验收标准。不同衬砌类型的质量控制指标存在共性要求，同时也需结合其结构特征制定差异化指标，确保质量控制全面精准。核心质量控制指标包括衬砌厚度、强度、平整度、密封性四大类。

（一）衬砌厚度

衬砌厚度是保障衬砌结构承载能力的基础指标，直接影响衬砌对围岩压力的抵御能力。衬砌厚度不足会导致结构受力薄弱，易出现开裂、破损等安全隐患；厚度过大则会增加工程成本，浪费资源。衬砌厚度控制需确保实际衬砌厚度不小于设计厚度，同时避免厚度偏差过大。模筑混凝土衬砌的厚度控制指标要求，实际衬砌厚度不得小于设计厚度的 90%，且单点厚度偏差不得超过 $\pm 50\text{mm}$ ；对于深埋隧道、软弱围岩隧道等受力复杂场景，实际衬砌厚度需严格控制在设计厚度的 100%—110% 范围内，确保结构承载安全。管片衬砌的厚度控制指标要求，单块管片的厚度偏差不得超过 $\pm 3\text{mm}$ ，环向衬砌平均厚度不得小于设计厚度，确保管片拼装后整体承载性能达标。衬砌厚度控制需贯穿模板安装、混凝土浇筑、管片生产等关键工序，通过精准的模板定位、严格的浇筑过程控制、高精度的管片预制，保障厚度指标符合要求。

（二）强度

强度是衬砌结构的核心力学性能指标，直接决定衬砌能否有效承受围岩压力、车辆荷载等各类荷载作用，是保障隧道结构安全的关键。强度控制需确保衬砌材料的实际强度不低于设计强度，避免因强度不足导致结构失稳。模筑混凝土衬砌的强度控制指标要求，混凝土立方体抗压强度标准值不得低于设计强度等级，同批次混凝土试块的强度离散性需控制在允许范围内，确保混凝土强度均匀稳定；浇筑完成的衬砌结构实体强度需通过现场检测验证，确保与试块强度匹配。管片衬砌的强度控制指标要求，管片混凝土的抗压强度、抗折强度均不得低于设计要求，管片生产过程中需按规范制作同条件养护试块，每批次管片均需进行强度检测，合格后方可出厂；现场拼装完成的衬砌环，需确保管片连接强度符合设计要求，螺栓连接紧固力矩达标。

（三）平整度

平整度是衬砌外观质量与使用功能的重要控制指标，直接影响衬砌表面的受

力分布、防水效果与后续装饰施工。平整度偏差过大会导致局部应力集中，加速衬砌结构损坏，同时影响防水卷材的铺设质量，增加渗漏风险。模筑混凝土衬砌的平整度控制指标要求，衬砌表面相邻两测点之间的高差不得超过 5mm，每米范围内的最大偏差不得超过 8mm；衬砌表面不得出现明显的凸起、凹陷或错台，确保表面平整光滑。管片衬砌的平整度控制指标要求，单块管片表面平整度偏差不得超过 2mm，相邻管片之间的错台量不得超过 3mm，环向衬砌表面的平整度偏差不得超过 5mm；管片拼装过程中需严格控制拼装精度，避免因拼装偏差导致平整度不达标。

（四）密封性

密封性是衬砌防水性能的核心控制指标，直接决定隧道内部是否存在渗漏现象，保障隧道干燥的使用环境。密封性控制需针对衬砌本体与接缝部位制定明确指标，确保整体防水体系有效。模筑混凝土衬砌的密封性控制指标要求，混凝土的抗渗等级需符合设计要求，衬砌结构不得出现集中渗漏通道，单处渗漏水量不得超过 $0.1\text{L}/(\text{m} \cdot \text{d})$ ；施工缝、伸缩缝等部位的密封性需重点控制，不得出现滴漏、线漏现象。管片衬砌的密封性控制指标要求，管片本体的抗渗等级不得低于设计标准，管片接缝处的密封胶条需安装牢固、贴合紧密，接缝渗漏水量不得超过 $0.05\text{L}/(\text{m} \cdot \text{d})$ ；环向与纵向接缝的交叉部位需强化密封，确保无渗漏死角。为清晰呈现各类核心质量控制指标的具体要求，构建如下隧道衬砌核心质量控制指标表：

控制指标	模筑混凝土衬砌控制要求	管片衬砌控制要求	核心控制目的
衬砌厚度	实际厚度 $\geq$ 设计厚度 90%，单点偏差 $\pm 50\text{mm}$ 内；复杂场景 100%—110% 设计厚度	单块管片厚度偏差 $\pm 3\text{mm}$ 内，环向平均厚度 $\geq$ 设计厚度	保障结构承载能力，避免受力薄弱
强度	混凝土抗压强度 $\geq$ 设计等级，试块强度离散性达标，实体强度匹配	抗压、抗折强度 $\geq$ 设计要求，螺栓连接紧固力矩达标	抵御各类荷载，保障结构安全稳定
平整度	相邻测点高差 $\leq 5\text{mm}$ ，每米最大偏差 $\leq 8\text{mm}$ ，表面无明显凹凸	单块管片表面偏差 $\leq 2\text{mm}$ ，相邻错台 $\leq 3\text{mm}$ ，环向偏差 $\leq 5\text{mm}$	避免应力集中，保障防水效果，提升外观质量
密封性	抗渗等级达标，单处渗漏水量 $\leq 0.1\text{L}/(\text{m} \cdot \text{d})$ ，施工缝无滴漏	抗渗等级达标，接缝渗漏水量 $\leq 0.05\text{L}/(\text{m} \cdot \text{d})$ ，接缝密封完好	阻隔地下水渗透，保障隧道干燥环境

二、质量检测方法

质量检测方法是保障质量控制指标落地的核心手段，需结合检测指标的特性与工程实际条件，选择精准、高效、适用的检测技术。衬砌质量检测需采用无损检测与现场抽样检测相结合的综合检测方法，实现对衬砌质量的全面覆盖与精准把控。无损检测方法具有非破坏性、检测范围广、效率高的优势，适用于大规模整体质量筛查；现场抽样检测方法具有精度高、结果可靠的优势，适用于核心指标的精准验证。两者协同配合，能够有效提升质量检测的全面性与准确性。

（一）无损检测

无损检测是衬砌质量检测的主流方法，核心原理是在不破坏衬砌结构的前提下，通过物理手段检测衬砌的内部与表面质量，获取相关质量指标数据。无损检测方法适用于衬砌厚度、内部缺陷、表面平整度、密封性等多项指标的检测，广泛应用于衬砌施工过程检测与竣工质量验收。常用的无损检测方法包括地质雷达检测法、超声波检测法、激光平整度检测法、渗漏水检测法等。地质雷达检测法适用于衬砌厚度检测与内部缺陷探测，通过发射高频电磁波穿透衬砌结构，根据电磁波反射信号判断衬砌厚度与内部空洞、裂隙等缺陷的位置和大小，具有检测速度快、范围广的优势；超声波检测法适用于衬砌混凝土强度与内部缺陷检测，通过发射超声波在混凝土内部的传播速度与反射特性，判断混凝土强度等级与内部密实度，检测精度较高；激光平整度检测法适用于衬砌表面平整度检测，通过激光测距技术快速采集衬砌表面的高程数据，自动计算平整度偏差，检测效率高、数据精准；渗漏水检测法适用于密封性检测，通过观察衬砌表面渗漏水情况、测量渗漏水量，判断衬砌防水性能，分为直观检测与仪器测量两种方式，适用于施工过程与竣工后的防水效果验证。

（二）现场抽样检测

现场抽样检测是衬砌质量检测的补充与验证方法，核心原理是在衬砌结构上抽取代表性样本，通过实验室试验或现场试验获取样本的质量指标数据，以此推断整体衬砌质量。现场抽样检测需严格遵循抽样规范，确保样本具有代表性，检测结果能够真实反映整体质量水平。该方法适用于衬砌混凝土强度、钢筋间距与保护层厚度等核心力学性能指标的检测。常用的现场抽样检测方法包括钻芯取样检测法、回弹法、超声回弹综合法、钢筋扫描检测法等。钻芯取样检测法适用于

衬砌混凝土强度与厚度的精准检测，通过专用钻芯设备在衬砌上钻取芯样，送至实验室进行抗压强度试验，同时直接测量芯样厚度，检测结果真实可靠，是混凝土强度检测的基准方法；回弹法适用于混凝土强度的快速检测，通过回弹仪测量混凝土表面的回弹值，结合混凝土碳化深度，推算混凝土强度，具有操作简便、检测速度快的优势；超声回弹综合法结合了超声波检测与回弹检测的优势，通过测量混凝土的超声波传播速度与回弹值，综合推算混凝土强度，检测精度高于单一回弹法；钢筋扫描检测法适用于钢筋间距与保护层厚度检测，通过电磁感应原理检测衬砌内部钢筋的分布情况，获取钢筋间距、数量、保护层厚度等数据，确保钢筋布设符合设计要求。综合检测方法的应用需遵循“先无损筛查，后抽样验证”的原则。首先通过无损检测方法对衬砌整体质量进行全面筛查，识别质量隐患区域；然后针对无损检测发现的可疑区域与关键受力部位，采用现场抽样检测方法进行精准验证，确保检测结果的可靠性；最后结合两类检测结果的结果，综合评判衬砌质量等级。检测过程中需做好检测记录，建立检测数据档案，为质量评估与后续缺陷处理提供依据。

三、质量缺陷处理

质量缺陷处理是衬砌质量控制的收尾环节，核心目标是针对质量检测过程中发现的裂缝、渗漏、厚度不足、强度不达标等缺陷，采取针对性的修复处理技术，消除质量隐患，确保衬砌质量符合设计要求与验收标准。质量缺陷处理需遵循“先评估、后处理、再验收”的原则，根据缺陷的类型、规模、严重程度制定适配的处理方案，避免处理不当导致缺陷扩大或产生新的质量问题。缺陷处理完成后需进行二次检测，确保修复效果达标。

（一）裂缝缺陷处理

裂缝是衬砌最常见的质量缺陷之一，按成因可分为收缩裂缝、受力裂缝、温度裂缝等，按宽度可分为微裂缝、中裂缝、宽裂缝。不同类型与规模的裂缝对衬砌结构的影响不同，需采取差异化的处理技术。微裂缝宽度小于 0.2mm，对结构安全影响较小，主要采用表面封闭处理技术。通过清理裂缝表面的杂物、灰尘，采用环氧树脂胶、聚合物水泥浆等密封材料涂刷裂缝表面，形成封闭层，防止水分侵入导致钢筋锈蚀与裂缝扩展。中裂缝宽度在 0.2—0.5mm 之间，需采用压力注浆处理技术。清理裂缝后，在裂缝两端与中间部位设置注浆嘴，采用密封材料

封闭裂缝表面，通过注浆泵将环氧树脂浆液、水泥浆等注浆材料压入裂缝内部，填充裂缝空隙，恢复衬砌结构的整体性与密实性。宽裂缝宽度大于 0.5mm 或受力裂缝，需采用加固 + 注浆的复合处理技术。首先在裂缝两侧设置加固钢筋或粘贴碳纤维布，强化衬砌结构的承载能力；然后采用高压注浆技术填充裂缝，确保裂缝完全闭合；必要时需凿除裂缝周边的破损混凝土，重新浇筑高强度混凝土，彻底消除裂缝隐患。

（二）渗漏缺陷处理

渗漏缺陷主要分为衬砌本体渗漏与接缝渗漏两类，核心处理思路是“堵排结合”，即先阻断渗漏通道，再疏导剩余渗水，确保衬砌表面干燥。渗漏缺陷处理需结合渗漏位置、渗漏量、渗漏形式制定处理方案。衬砌本体渗漏处理需根据渗漏程度选择对应技术。轻微渗漏仅出现潮湿现象，无明显水滴，可采用渗透结晶型防水材料涂刷渗漏区域，材料渗透至混凝土内部形成结晶，堵塞渗水通道；中度渗漏出现明显水滴但无水流，需采用钻孔注浆处理，在渗漏点周边钻孔，将聚氨酯注浆材料压入混凝土内部，材料遇水膨胀后封闭渗漏通道；重度渗漏出现水流或涌水，需先设置排水导管疏导渗水，降低水压力，再采用水泥 - 水玻璃双液注浆材料进行高压注浆，快速封堵渗漏通道，最后拆除排水导管并封闭钻孔。接缝渗漏处理需重点强化密封性能，清理接缝处的密封胶条与杂物，更换损坏的密封胶条，采用聚硫密封胶、遇水膨胀止水条等高性能密封材料重新填充接缝，确保接缝密封紧密；对于渗漏严重的接缝，需在接缝内侧设置排水槽与排水管，将渗水导入隧道排水系统，实现“堵排结合”。

（三）其他缺陷处理

除裂缝与渗漏外，衬砌常见的质量缺陷还包括衬砌厚度不足、强度不达标、表面平整度差等，需针对性采取处理技术。

衬砌厚度不足缺陷，若局部厚度偏差较小且不影响结构安全，可采用表面喷射高强度混凝土或涂抹聚合物砂浆进行补强，增加衬砌有效厚度；若厚度偏差较大或位于关键受力部位，需凿除厚度不足的衬砌段落，重新绑扎钢筋、架设模板、浇筑高强度混凝土，确保衬砌厚度符合设计要求。强度不达标缺陷，需先评估缺陷范围与对结构的影响，若局部强度不足，可采用粘贴碳纤维布、外包钢板等加固技术强化承载能力；若大面积强度不达标，需拆除不合格衬砌段落，重新施工；同时需追溯强度不足的原因，优化混凝土配合比与施工工艺，避免后续出现同类

问题。表面平整度差缺陷，对于表面凸起部位，采用打磨机打磨平整；对于表面凹陷部位，采用聚合物砂浆、环氧砂浆等材料修补平整；修补后需采用激光平整度检测法验证修补效果，确保平整度达标。缺陷处理完成后，需进行二次质量检测，采用无损检测或现场抽样检测方法验证处理效果，确保缺陷完全消除，质量指标符合要求。同时需建立缺陷处理档案，记录缺陷位置、类型、处理方案、处理过程、检测结果等信息，为隧道运维管理提供依据。

隧道衬砌质量控制的核心是通过明确衬砌厚度、强度、平整度、密封性等核心控制指标，采用无损检测与现场抽样检测相结合的综合检测方法，实施针对性的质量缺陷处理，形成全流程闭环质量保障体系。在实际工程应用中，需结合衬砌类型、地质条件、施工工艺等因素，优化质量控制指标与检测方法，强化缺陷处理的规范性与有效性。随着智能化检测技术、新型修复材料的不断发展，衬砌质量控制将逐步实现智能化监测、精准化修复，进一步提升隧道衬砌的质量水平，为隧道的长期稳定运行提供坚实保障。

第四节 衬砌防水技术

隧道衬砌防水是保障隧道长期稳定运行的关键技术环节，直接关系到隧道内部使用环境、结构耐久性与运维成本。隧道工程所处地质环境复杂，尤其在富水地层、地下水丰富区域，地下水易通过衬砌本体、接缝等薄弱部位渗透进入隧道，导致衬砌结构钢筋锈蚀、混凝土劣化，影响隧道结构安全，同时破坏内部使用环境。衬砌防水技术需立足工程地质条件与衬砌类型，构建全方位、多层次的防水体系，通过科学的防水设计、适配的防水技术应用与严格的防水效果验证，实现隧道防水目标。随着隧道工程对防水要求的不断提升，衬砌防水技术已从传统的单一防水向多道协同防水发展，显著提升了防水体系的可靠性与耐久性。

一、防水设计原则

隧道衬砌防水设计是防水技术实施的前提与基础，需结合隧道地质条件、水文特征、衬砌类型、工程用途等核心因素，遵循科学的设计原则，确保防水体系具有针对性、可靠性与耐久性。

（一）以防为主

“以防为主”是衬砌防水设计的核心导向，核心内涵是通过主动预防措施，从源头阻隔地下水渗透通道，减少地下水对衬砌结构的作用，避免渗漏问题的产生。该原则要求防水设计需提前预判地下水分布特征与渗透路径，针对性采取防控措施，将防水工作前置到设计与施工的各个环节。落实“以防为主”原则需从三个方面开展。一是充分勘察地质与水文条件，全面掌握地下水类型、水位标高、渗透系数、水压大小等核心参数，为防水设计提供精准依据；针对富水地层、断层破碎带等地下水富集区域，提前规划专项防水措施。二是优化衬砌结构设计，通过合理设置衬砌厚度、强化衬砌混凝土密实性，提升衬砌本体的抗渗能力，从结构本身阻断渗水通道；避免衬砌结构出现设计缺陷，减少防水薄弱部位。三是强化施工过程的防水管控，将防水设计要求融入施工工艺标准，确保防水构造、防水材料铺设等环节按设计要求实施，从施工源头规避渗漏隐患。“以防为主”原则的核心目标是主动阻断渗水路径，降低渗漏风险，减少后期维修成本。

（二）刚柔结合

“刚柔结合”是衬砌防水设计的关键思路，核心内涵是结合刚性防水与柔性防水的优势，构建互补协同的防水体系。刚性防水依托衬砌混凝土本身的抗渗性能，具有耐久性强、与结构结合紧密的优势；柔性防水依托防水卷材、密封材料等柔性材料，具有适应性强、密封性能好的优势，能够适应衬砌结构的微小变形，弥补刚性防水的不足。落实“刚柔结合”原则需合理搭配刚性与柔性防水措施。刚性防水作为防水体系的基础，通过优化衬砌混凝土配合比、掺入防水剂等方式提升混凝土自防水性能，确保衬砌本体具备基本的抗渗能力；对于模筑混凝土衬砌、管片衬砌等不同类型，针对性提升混凝土的密实性与抗渗等级。柔性防水作为防水体系的补充与强化，在衬砌外侧铺设防水卷材、涂刷防水涂料，在衬砌接缝处设置密封胶条、止水条等柔性密封材料；柔性防水需与刚性防水紧密贴合，形成完整的防水屏障，确保地下水既无法穿透刚性衬砌本体，也无法通过接缝等薄弱部位渗透。“刚柔结合”原则能够充分发挥两类防水方式的优势，提升防水体系的整体可靠性，适应复杂地质条件下的衬砌结构变形需求。

（三）多道防线

“多道防线”是衬砌防水设计的保障措施，核心内涵是构建多层次、全方位的防水体系，通过设置多重防水屏障，确保某一道防线失效时，其他防线仍能发

挥防水作用，避免单点失效导致整体防水体系崩溃。多道防线需覆盖衬砌本体、衬砌外侧、接缝部位等所有可能的渗水路径，形成立体式防水网络。落实“多道防线”原则需从三个层面构建防水体系。第一道防线为衬砌外侧防水，通过在衬砌与围岩之间铺设防水卷材、涂刷防水涂料，形成第一道隔水屏障，阻断地下水与衬砌本体的直接接触；同时在防水外侧设置排水盲管、排水板等排水设施，疏导部分地下水，降低水压力。第二道防线为衬砌本体防水，通过提升衬砌混凝土的自防水性能，形成刚性隔水屏障，抵御通过第一道防线的少量渗水。第三道防线为衬砌内侧防水与接缝强化防水，在衬砌内侧薄弱部位涂刷防水涂料，在衬砌环向、纵向接缝处设置多重密封材料与止水构造，强化薄弱部位的防水能力；同时设置衬砌内侧排水系统，将少量渗漏的地下水疏导至隧道集排水系统。多道防线的构建需确保各道防线相互衔接、协同作用，形成全方位的防水保障，大幅提升防水体系的可靠性与耐久性。

二、防水技术类型

隧道衬砌防水技术类型需结合防水设计原则与工程实际条件选择，核心目标是构建适配的防水体系，确保防水效果达标。根据防水构造与作用机理，常用的防水技术类型分为混凝土自防水、防水层防水、接缝防水三大类，各类技术在防水体系中承担不同角色，协同实现防水目标。不同衬砌类型对防水技术的应用侧重点存在差异，但均需确保各类防水技术的规范实施，提升防水体系的整体性能。

（一）混凝土自防水

混凝土自防水是衬砌防水体系的基础技术，核心内涵是通过优化混凝土配合比、改进施工工艺、掺入功能外加剂等方式，提升衬砌混凝土本身的密实性与抗渗性能，使混凝土自身具备隔水能力，成为防水体系的核心刚性屏障。混凝土自防水具有与衬砌结构一体化、耐久性强、无需额外铺设防水材料的优势，是各类衬砌防水的必备基础技术。混凝土自防水的技术应用核心包括三个方面。一是优化混凝土配合比，选择级配良好的骨料，控制砂率与水胶比，提升混凝土的密实度；掺入粉煤灰、矿渣粉等矿物掺合料，填充混凝土内部孔隙，改善混凝土微观结构，提升抗渗性能。二是掺入功能外加剂，根据工程需求掺入高效减水剂、防水剂、膨胀剂等外加剂；高效减水剂能够降低混凝土水胶比，提升密实性；防水剂能够堵塞混凝土内部毛细孔隙，增强隔水能力；膨胀剂能够补偿混凝土收缩，

减少收缩裂缝，避免形成渗水通道。三是强化施工工艺控制，严格控制混凝土搅拌、运输、浇筑、振捣与养护过程；确保混凝土搅拌均匀，浇筑过程连续有序，振捣密实到位，避免出现蜂窝、麻面、孔洞等缺陷；加强养护管理，确保混凝土强度与抗渗性能稳步增长，减少表面裂缝。混凝土自防水的技术关键是确保混凝土密实无缺陷，抗渗等级符合设计要求，为整体防水体系提供坚实基础。

（二）防水层防水

防水层防水是衬砌防水体系的强化技术，核心内涵是在衬砌结构外侧或内侧铺设柔性防水材料，形成独立的柔性防水屏障，弥补混凝土自防水的不足，阻断地下水渗透路径。防水层防水具有适应性强、密封性能好的优势，能够适应衬砌结构的微小变形与围岩的不均匀沉降，是多道防水防线中的关键环节。防水层防水的技术应用核心包括防水材料选择与铺设施工控制两个方面。防水材料选择需结合工程地质条件、衬砌类型与防水要求，常用的防水材料包括高分子防水卷材、防水涂料、防水板等；高分子防水卷材具有抗拉强度高、抗老化性能好、耐穿刺能力强的优势，适用于模筑混凝土衬砌外侧防水；防水涂料具有涂刷施工简便、适应性强的优势，适用于复杂断面或异形部位的防水；防水板具有重量轻、铺设效率高的优势，广泛应用于盾构隧道、TBM 隧道的衬砌外侧防水。铺设施工控制需严格遵循施工规范，确保防水层铺设平整、牢固、无破损；铺设前需清理基层表面，确保基层平整、洁净、干燥；防水层搭接部位需采用热熔焊接或专用粘剂粘结，确保搭接紧密，无渗漏通道；防水层铺设完成后需进行完整性检测，避免出现破损、漏铺等问题。防水层防水的技术关键是确保防水材料质量达标、铺设施工规范，形成连续完整的柔性防水屏障。

（三）接缝防水

接缝防水是衬砌防水体系的薄弱环节与重点控制技术，核心内涵是针对衬砌环向接缝、纵向接缝、施工缝、伸缩缝等各类接缝部位，采取专用密封材料与构造措施，强化接缝部位的防水能力，避免地下水通过接缝渗透。接缝部位因结构不连续、易产生变形，是渗漏的高发区域，其防水效果直接决定整体防水体系的可靠性。接缝防水的技术应用核心包括密封材料选择与接缝构造设计两个方面。密封材料选择需结合接缝类型、变形量与防水要求，常用的密封材料包括遇水膨胀止水条、聚硫密封胶、硅酮密封胶、止水钢板等；遇水膨胀止水条具有遇水膨胀、密封性能好的优势，适用于施工缝、伸缩缝等部位；聚硫密封胶、硅酮密封

胶具有弹性好、耐久性强的优势，适用于管片接缝、模筑衬砌环向接缝等部位；止水钢板具有刚性强、止水效果稳定的优势，适用于大断面模筑衬砌的施工缝部位。接缝构造设计需根据接缝类型与变形需求，采用合理的防水构造形式；对于管片接缝，采用“密封胶条+螺栓孔防水”的复合构造，确保接缝全方位密封；对于施工缝，采用“止水条+防水涂料”的组合构造，强化接缝防水能力；对于伸缩缝，采用“止水带+密封胶”的构造形式，适应接缝的伸缩变形。接缝防水的技术关键是确保密封材料质量达标、构造设计合理、施工安装规范，实现接缝部位的全方位、长效防水。

三、防水效果验证

防水效果验证是衬砌防水技术实施的收尾环节与质量保障手段，核心目标是通过科学的检测方法，检验防水体系的防水性能是否符合设计要求，及时发现并整改防水缺陷，确保隧道防水目标实现。防水效果验证需贯穿防水施工全过程，包括施工过程中的阶段性检测与竣工后的最终验收检测，形成全流程的防水质量管控。常用的防水效果验证方法包括蓄水试验、渗水检测等，需结合工程实际条件与防水部位，选择适配的验证方法，确保验证结果精准可靠。

（一）蓄水试验

蓄水试验是一种直观、可靠的防水效果验证方法，核心原理是通过在衬砌特定区域形成封闭空间，注入清水并保持一定水位，观察规定时间内衬砌表面是否出现渗漏现象，以此判断防水效果。蓄水试验适用于隧道洞口段、浅埋段、施工缝、伸缩缝等重点防水部位的防水效果验证，尤其适用于模筑混凝土衬砌的防水验收。蓄水试验的技术应用核心包括试验准备、试验实施、结果判断三个环节。试验准备阶段需根据验证部位，采用封堵材料封闭试验区域的进出口，形成封闭的蓄水空间；清理试验区域衬砌表面，确保表面洁净，便于观察渗漏情况；安装水位监测装置与排水设施，确保试验过程中水位稳定，试验完成后能够及时排水。试验实施阶段需缓慢向封闭空间注入清水，避免水流冲击衬砌表面；水位高度需符合设计要求，通常不低于1米，确保试验水压力接近实际地下水压力；注入完成后保持水位稳定，试验持续时间不少于24小时，对于重要部位需延长至48小时。结果判断阶段需安排专人定时观察衬砌表面是否出现潮湿、水滴、水流等渗漏现象，记录渗漏部位、渗漏量与渗漏形式；若试验过程中无任何渗漏现象，说

明防水效果达标；若出现渗漏现象，需标记渗漏部位，分析渗漏原因，采取针对性的修复措施后重新进行蓄水试验，直至防水效果达标。蓄水试验的技术关键是确保试验区域封闭严密、水位稳定、观察记录细致，真实反映防水效果。

（二）渗水检测

渗水检测是一种适用于大规模、全断面防水效果验证的方法，核心原理是通过观察衬砌表面渗漏水情况、测量渗漏水量，判断防水体系的整体防水性能。渗水检测分为直观检测与仪器测量两种方式，具有检测范围广、实施简便的优势，适用于隧道竣工后的整体防水验收，也可用于施工过程中的阶段性防水效果检查。渗水检测的技术应用核心包括检测准备、检测实施、结果判断三个环节。检测准备阶段需清理衬砌表面的杂物、灰尘与污渍，确保表面洁净，便于观察渗漏水情况；准备检测所需的仪器设备，包括量杯、计时器、水位计等，用于测量渗漏水量；划分检测区域，按隧道里程或衬砌环段划分检测单元，确保检测全面覆盖。检测实施阶段需采用直观观察与仪器测量相结合的方式；直观观察需逐区域检查衬砌表面是否出现潮湿、渗漏痕迹、水滴、水流等现象，标记渗漏部位；仪器测量需对出现渗漏的部位，采用量杯测量单位时间内的渗漏水量，记录渗漏数据；对于富水地层隧道或防水要求严格的隧道，需采用专用渗水检测仪器，对全断面衬砌进行系统性渗水检测。结果判断阶段需结合设计防水标准，对检测结果进行评判；若衬砌表面无渗漏现象，或渗漏水量小于设计允许值，说明防水效果达标；若渗漏水量超过设计允许值，或出现集中渗漏通道，需分析渗漏原因，针对渗漏部位采取修复措施，重新进行渗水检测，直至防水效果达标。渗水检测的技术关键是确保检测区域全面覆盖、观察细致、测量精准，真实反映整体防水体系的性能。

除蓄水试验与渗水检测外，防水效果验证还包括施工过程中的阶段性检测，如防水层完整性检测、密封材料安装质量检测、混凝土抗渗性能检测等。防水层完整性检测采用电火花检测法，检测防水层是否存在破损、漏铺等问题；密封材料安装质量检测采用外观检查与粘结强度检测，确保密封材料安装到位、粘结牢固；混凝土抗渗性能检测采用试块试验法，确保混凝土自防水性能达标。阶段性检测与最终验收检测相结合，形成全流程的防水效果验证体系，确保防水问题早发现、早处理。

隧道衬砌防水技术的核心是遵循“以防为主、刚柔结合、多道防线”的设计原则，通过混凝土自防水、防水层防水、接缝防水三类核心技术的协同应用，构

建全方位的防水体系，再通过蓄水试验、渗水检测等科学的防水效果验证方法，确保防水效果达标。在实际工程应用中，需结合隧道地质条件、衬砌类型、防水要求等因素，优化防水技术方案，强化施工过程管控与效果验证，提升防水体系的可靠性与耐久性。随着新型防水材料、智能化检测技术的不断发展，衬砌防水技术将逐步实现材料高性能化、施工规范化、检测智能化，为隧道的长期稳定运行提供坚实的防水保障。

第九章 隧道施工监测与控制

第一节 监测系统设计

隧道施工过程中，围岩应力平衡被打破，易引发围岩变形、结构位移、渗漏水等一系列问题，严重时可能导致塌方、涌水等灾害，威胁施工安全与工程质量。隧道施工监测系统作为施工安全与质量的“眼睛”，通过实时采集施工过程中的各类关键数据，实现对施工状态的动态感知与精准把控。监测系统设计是监测工作开展的前提与基础，需结合隧道工程地质条件、施工方法、结构类型等核心因素，构建科学、高效、适配的监测体系。合理的监测系统设计能够为施工安全预警提供数据支撑，为施工参数优化提供科学依据，为质量控制提供量化标准。随着隧道工程向复杂地质、深埋大断面方向发展，监测系统设计的精准性与适配性要求不断提升，推动监测技术向智能化、自动化方向升级。

一、设计核心目标

隧道施工监测系统设计的核心目标是通过施工过程中围岩、结构、环境等关键指标的实时监测，实现施工安全预警、施工参数优化、质量控制三大核心功能，保障施工过程安全有序，确保工程质量符合设计要求。三大核心目标相互关联、协同作用，构成监测系统设计的核心导向，引导监测指标选取、监测设备布设、数据处理方法等各环节的设计工作。设计目标需具备针对性与可操作性，能够根据工程实际条件进行动态调整，确保监测系统的实用价值。

（一）施工过程安全预警

施工过程安全预警是监测系统设计的首要目标，核心内涵是通过实时监测围岩变形、结构应力、渗水量等关键安全指标，识别施工过程中的安全风险，当指标达到预警阈值时及时发出预警信号，为施工人员撤离、应急处置提供充足时间，规避安全灾害发生。安全预警目标需确保预警的及时性、准确性与可靠性，避免误预警或漏预警。实现安全预警目标需明确三个核心环节。一是精准选取预警指

标，优先选取对施工安全影响显著的指标，包括围岩收敛变形、拱顶沉降、衬砌应力、锚杆轴力、地下水水位与渗水量等，确保指标能够全面反映施工安全状态。二是科学设定预警阈值，结合工程地质条件、施工方法、结构设计参数，参考相关规范标准与工程经验，制定分级预警阈值，通常分为一般预警、较大预警、重大预警三个等级，不同等级对应不同的应急处置措施。三是建立快速响应机制，监测系统需具备数据实时传输与分析能力，当监测数据达到预警阈值时，能够通过声光报警、短信通知等多种方式及时传递预警信息，确保相关人员第一时间接收并启动应急处置流程。安全预警目标的核心价值在于将安全风险管控前置，实现从被动应对灾害到主动预防风险的转变。

（二）施工参数优化

施工参数优化是监测系统设计的核心目标之一，核心内涵是通过分析监测数据与施工参数之间的关联关系，评估现有施工参数的合理性，提出参数优化建议，实现施工过程的精细化管控。施工参数优化能够提升施工效率、降低工程成本，同时保障施工安全与质量，是监测数据价值转化的重要体现。实现施工参数优化目标需开展三个核心工作。一是建立监测数据与施工参数的关联模型，明确开挖进尺、开挖速率、支护时机、注浆压力等施工参数对围岩变形、结构应力等监测指标的影响规律。二是动态评估施工参数合理性，通过对比不同施工参数下的监测数据，分析施工参数与监测指标的匹配度，识别导致监测指标异常的不合理施工参数。三是提出针对性优化建议，根据监测数据反馈的问题，结合工程实际条件，调整施工参数，如减小开挖进尺、放缓开挖速率、提前支护时机、优化注浆压力等，确保施工参数与围岩及结构的受力变形状态相适配。施工参数优化目标的实现能够推动施工过程从经验化管控向数据化、精准化管控转变，提升施工技术水平。

（三）质量控制

质量控制是监测系统设计的重要目标，核心内涵是通过监测施工过程中的关键质量指标，量化评估工程质量状态，及时发现质量缺陷，为质量整改提供依据，确保工程质量符合设计要求与验收标准。质量控制目标需覆盖衬砌施工、支护施工等关键环节，实现质量问题的早发现、早处理。实现质量控制目标需聚焦三个核心环节。一是明确质量监测指标，选取能够反映工程质量的关键指标，包括衬砌厚度、衬砌强度、支护结构完整性、注浆饱满度等，确保指标能够全面覆盖质

量控制要点。二是实时跟踪质量状态，通过监测数据实时掌握施工过程中的质量变化情况，对比质量控制标准，识别质量偏差。三是推动质量整改闭环，针对监测发现的质量缺陷，及时反馈给施工班组，制定整改措施，跟踪整改过程，通过二次监测验证整改效果，确保质量缺陷完全消除。质量控制目标的实现能够强化施工过程的质量管控，避免因质量问题导致后期工程隐患，提升工程的长期稳定性与耐久性。

二、监测系统组成

隧道施工监测系统是一个集数据采集、传输、分析、预警于一体的综合性系统，其组成需围绕设计核心目标，确保各环节协同高效运行，实现监测数据的精准采集与有效利用。监测系统组成需具备完整性与可靠性，能够适应隧道施工的复杂环境，抵抗粉尘、振动、潮湿等不利因素的影响。核心组成部分包括传感器、数据采集、数据传输、数据处理分析四个模块，各模块相互衔接，形成完整的监测数据链。

（一）传感器

传感器是监测系统的数据采集终端，核心功能是将围岩变形、结构应力、地下水等物理量转化为可测量的电信号，是保障监测数据精准性的基础。传感器的选型与布设直接影响监测效果，需结合监测指标类型、监测精度要求、施工环境条件等因素合理选择。常用的传感器类型包括变形监测传感器、应力应变监测传感器、水文监测传感器三大类。变形监测传感器主要用于监测围岩收敛变形、拱顶沉降、衬砌位移等指标，常用设备包括收敛计、沉降计、位移计、全站仪等；收敛计与沉降计适用于局部变形监测，具有精度高、操作简便的优势；全站仪适用于大范围、远距离的变形监测，能够实现自动化数据采集。应力应变监测传感器主要用于监测衬砌应力、锚杆轴力、围岩应力等指标，常用设备包括应变计、应力计、轴力计等；这类传感器需与监测对象紧密结合，确保能够准确感知应力应变变化。水文监测传感器主要用于监测地下水水位、渗水量、水压等指标，常用设备包括水位计、渗水量监测仪、水压计等；适用于富水地层隧道，能够实时掌握地下水动态变化。传感器布设需遵循“均匀分布、重点突出”的原则，在围岩破碎带、断层、洞口段等重点区域加密布设，确保监测数据全面覆盖关键区域。

（二）数据采集

数据采集模块是监测系统的核心环节，核心功能是将传感器输出的电信号进行采集、转换与存储，实现监测数据的初步处理。数据采集模块需具备高精度、高稳定性、高兼容性的特点，能够适配不同类型的传感器，确保数据采集的准确性与完整性。数据采集模块的核心组成包括数据采集仪、数据存储设备与供电设备。数据采集仪是核心设备，能够实现多通道数据同步采集，将传感器输出的模拟信号转换为数字信号，同时具备数据校准、滤波等功能，提升数据质量；根据监测需求，可选择便携式数据采集仪或自动化数据采集仪，便携式适用于人工定期监测，自动化适用于实时连续监测。数据存储设备用于存储采集的监测数据，确保数据不丢失，可采用本地存储与云端存储相结合的方式，本地存储保障数据即时访问，云端存储实现数据长期备份与远程共享。供电设备为数据采集模块提供稳定电源，需适应隧道施工的复杂环境，可采用市电、太阳能供电、蓄电池供电等多种方式；在无市电供应的隧道区域，优先采用太阳能与蓄电池组合供电方式，确保供电稳定可靠。

（三）数据传输

数据传输模块是连接数据采集与数据处理分析的桥梁，核心功能是将采集的监测数据实时、准确地传输至数据处理中心，确保监测数据的时效性。数据传输模块需具备抗干扰能力强、传输速率快、稳定性高的特点，能够适应隧道内复杂的电磁环境与狭长的空间条件。常用的数据传输方式包括有线传输与无线传输两种类型。有线传输适用于隧道施工初期或短距离监测区域，常用传输介质包括双绞线、光纤等；光纤传输具有传输速率快、抗干扰能力强、传输距离远的优势，适用于对传输质量要求高的监测系统；有线传输的优点是传输稳定、数据安全，缺点是施工复杂、成本较高，且易受施工破坏。无线传输适用于隧道长距离监测、复杂地形区域或后期施工阶段，常用技术包括无线局域网、物联网、卫星通信等；物联网技术具有低功耗、广覆盖、低成本的优势，适用于大规模传感器节点的数据传输；卫星通信适用于偏远山区隧道等无地面通信网络覆盖的区域，能够实现数据的远程传输。实际监测系统设计中，常采用有线与无线相结合的混合传输方式，充分发挥两种传输方式的优势，确保数据传输的稳定可靠。

（四）数据处理分析

数据处理分析模块是监测系统的核心中枢，核心功能是对传输过来的监测数

据进行处理、分析、展示与预警，实现监测数据的价值转化。数据处理分析模块需具备数据处理高效、分析方法科学、预警响应快速、界面直观友好的特点，能够为施工管理人员提供清晰、准确的监测信息。数据处理分析模块的核心功能包括数据处理、数据建模分析、数据展示与预警四个方面。数据处理主要包括数据清洗、数据校准、数据补全等工作，剔除异常数据，修正数据偏差，确保数据质量；数据建模分析通过建立数学模型，分析监测数据的变化趋势、变化速率，识别数据异常特征，评估施工安全与质量状态；数据展示采用图表、曲线、数字等多种形式，直观呈现监测数据的实时状态与历史变化规律，方便管理人员快速掌握监测信息；预警功能根据预设的预警阈值，对异常数据进行判断，及时发出预警信号，并推送相关信息给管理人员。随着智能化技术的发展，数据处理分析模块逐步融入人工智能、大数据分析等技术，实现监测数据的智能解读与预测预警，提升监测系统的智能化水平。

三、设计适配原则

隧道工程的地质条件、隧道类型、施工方法存在显著差异，监测系统设计需遵循适配原则，根据工程具体特征制定差异化的设计方案，确保监测系统能够精准匹配工程需求，提升监测的针对性与有效性。设计适配原则需贯穿监测系统设计的全流程，从监测指标选取、传感器布设、设备选型到数据处理方法，均需结合工程实际条件进行优化调整，避免采用统一化、标准化的设计方案导致监测效果不佳。核心适配原则包括结合隧道类型、结合地质条件、结合施工方法三个方面。

（一）结合隧道类型

不同类型的隧道在结构形式、功能需求、施工环境等方面存在差异，监测系统设计需结合隧道类型制定差异化方案。隧道类型按用途可分为交通隧道、市政管廊隧道、水利隧道等；按断面形式可分为圆形隧道、矩形隧道、马蹄形隧道等；按施工方式可分为盾构隧道、TBM 隧道、钻爆法隧道等。交通隧道的监测系统设计需重点关注行车安全相关的监测指标，如衬砌结构稳定性、渗漏水情况、隧道内环境指标等，同时需确保监测设备布设不影响交通通行；对于盾构法施工的圆形交通隧道，需重点监测管片拼装质量、管片应力、接缝变形等指标，采用自动化监测设备实现连续监测。市政管廊隧道的监测系统设计需聚焦结构变形与防水性能，监测指标包括围岩收敛、管廊位移、渗水量等，同时需考虑管廊内管线

布设对监测设备安装的影响，采用小型化、隐蔽式的传感器。水利隧道的监测系统设计需重点监测水压、渗流量、衬砌抗渗性能等水文与结构指标，监测设备需具备良好的防水、防腐性能，适应水下或潮湿环境。不同断面形式的隧道需根据断面尺寸与形状优化传感器布设位置，确保监测数据能够全面反映结构受力变形状态。

（二）结合地质条件

地质条件是影响隧道施工安全与监测重点的核心因素，监测系统设计需紧密结合地质条件，针对不同地质类型制定针对性的监测方案。隧道工程常见的地质条件包括坚硬完整围岩、软弱破碎围岩、富水地层、断层破碎带、岩溶发育区等，不同地质条件下的施工风险与监测重点存在显著差异。坚硬完整围岩隧道的施工风险相对较低，监测系统设计可简化监测指标，重点监测围岩局部剥落、衬砌应力等指标，适当减小监测频率与传感器布设密度。软弱破碎围岩隧道的施工风险较高，易出现围岩大变形、塌方等灾害，监测系统设计需强化变形监测指标，增加收敛计、沉降计等传感器的布设密度，提高监测频率，同时增设应力应变监测指标，实时掌握围岩与结构的受力状态。富水地层隧道需重点监测水文指标，包括地下水水位、水压、渗水量等，布设充足的水文监测传感器，同时强化衬砌防水性能监测；对于岩溶发育区隧道，需增加溶洞分布、填充体变形等监测指标，采用地质雷达等物探设备辅助监测。断层破碎带是施工安全的高风险区域，监测系统设计需在断层前后加密布设传感器，强化变形、应力、渗水量的实时监测，确保能够及时捕捉断层活动对隧道施工的影响。

（三）结合施工方法

施工方法直接决定了隧道施工的作业流程、扰动程度与风险特征，监测系统设计需结合施工方法的特点，优化监测指标与监测方案，确保监测工作与施工流程协同衔接。隧道常用的施工方法包括钻爆法、盾构法、TBM法、明挖法等，不同施工方法的监测重点与监测时机存在差异。钻爆法施工隧道的扰动较大，易引发围岩振动与变形，监测系统设计需重点监测爆破后的围岩变形、应力变化，在爆破影响区域加密布设传感器，同时合理设置监测时机，避免爆破振动对监测设备与数据的影响；监测系统需具备快速响应能力，及时评估爆破效果与安全状态，为后续开挖与支护施工提供依据。盾构法与TBM法施工隧道的自动化程度高、施工速度快，监测系统设计需采用自动化监测设备，实现与施工设备的协同运行，

重点监测开挖面稳定性、管片拼装质量、管片应力、盾尾间隙等指标，实时反馈施工参数优化建议；监测数据需与盾构机、TBM 的施工参数实时联动，实现施工过程的闭环管控。明挖法施工隧道需重点监测基坑边坡稳定性、基坑沉降、周边建筑物与管线位移等指标，监测系统设计需覆盖基坑施工全过程，从基坑开挖到衬砌施工，动态调整监测指标与监测频率，确保基坑施工安全与周边环境稳定。

隧道施工监测系统设计的核心是围绕施工过程安全预警、施工参数优化、质量控制三大核心目标，构建由传感器、数据采集、数据传输、数据处理分析组成的完整监测体系，同时遵循结合隧道类型、地质条件、施工方法的适配原则，制定差异化的设计方案。在实际工程应用中，需充分调研工程实际条件，精准把握监测需求，优化监测系统各环节的设计，确保监测系统能够有效发挥作用。随着智能化、自动化监测技术的不断发展，监测系统设计将逐步实现与施工过程的深度融合，为隧道施工的安全、高效、高质量推进提供坚实的技术保障。

第二节 监测内容与方法

隧道施工监测内容与方法的科学选择，是确保监测工作精准高效开展的核心前提。监测内容需紧扣施工安全与质量管控需求，全面覆盖围岩、结构、周边环境等关键对象；监测方法需结合监测内容特性与工程实际条件，实现精准监测与高效管控的平衡；监测频率需动态适配施工阶段与变形规律，确保及时捕捉关键数据变化。合理的监测内容与方法组合，能够为施工安全预警、参数优化、质量控制提供可靠的数据支撑，有效规避施工风险，保障工程顺利推进。随着监测技术的不断发展，自动化、智能化监测方法逐步普及，进一步提升了监测工作的时效性与精准性。

一、核心监测内容

隧道施工监测内容的确定需遵循“全面覆盖、重点突出”的原则，结合隧道地质条件、施工方法、结构类型等因素，聚焦影响施工安全与工程质量的关键指标，形成涵盖围岩、结构、地表、环境的全方位监测体系。核心监测内容能够直观反映施工过程中各类对象的状态变化，为风险识别与质量评估提供量化依据。不同工程场景下的监测内容侧重点存在差异，但核心监测内容需保持统一性与完

整性，确保监测工作无遗漏、无盲区。核心监测内容主要包括围岩变形监测、结构内力监测、地表沉降监测、环境影响监测四大类。

（一）围岩变形监测

围岩变形是隧道施工过程中最直观的安全表征，直接反映围岩应力重分布与稳定性状态。围岩变形监测的核心目的是实时掌握围岩变形速率与累计变形量，预判围岩失稳风险，为支护时机选择与支护参数优化提供依据。围岩变形监测需覆盖隧道开挖影响范围内的关键区域，确保及时捕捉变形异常。核心监测指标包括围岩收敛变形、拱顶沉降、掌子面位移。围岩收敛变形监测主要针对隧道周边轮廓的径向变形，通过监测隧道两帮、拱腰等部位的相对位移，判断围岩压缩变形程度；拱顶沉降监测聚焦隧道拱顶部位的竖向位移，是评估围岩稳定性的核心指标，拱顶沉降过快或累计沉降过大易引发塌方灾害；掌子面位移监测针对开挖工作面的向前与径向位移，能够提前预判掌子面失稳风险，尤其适用于软弱破碎围岩隧道。围岩变形监测需贯穿隧道开挖全过程，从开挖面推进前的基线建立，到开挖后的持续监测，直至变形稳定。

（二）结构内力监测

结构内力监测是评估隧道支护结构与衬砌结构受力状态的核心手段，其核心目的是掌握结构在施工过程中的应力、应变分布规律，验证结构设计的合理性，及时发现结构受力异常，避免结构因过载导致破损。结构内力监测需覆盖支护结构与衬砌结构的关键受力部位，确保监测数据能够真实反映结构承载状态。核心监测指标包括锚杆轴力、喷射混凝土应力、衬砌应力、钢支撑内力。锚杆轴力监测用于评估锚杆的支护效果，判断锚杆是否有效发挥锚固作用，避免因锚杆失效导致围岩失稳；喷射混凝土应力监测聚焦喷射混凝土层的受力状态，掌握其在围岩压力作用下的应力分布，及时发现应力集中区域；衬砌应力监测针对模筑混凝土衬砌或管片衬砌，监测衬砌在施工与服役初期的应力变化，确保衬砌承载能力符合设计要求；钢支撑内力监测适用于采用钢支撑支护的隧道，掌握钢支撑在围岩压力作用下的内力分布，避免钢支撑因过载变形或断裂。

（三）地表沉降监测

地表沉降监测主要适用于浅埋隧道、城市隧道等周边环境敏感区域，核心目的是掌握隧道施工对地表及周边建筑物、管线的影响程度，避免因地表沉降过大导致周边环境破坏。地表沉降监测需覆盖隧道开挖影响范围的地表区域，同时延

伸至周边关键建筑物与管线部位，形成立体式监测网络。核心监测指标包括地表沉降量、沉降速率、地表裂缝宽度。地表沉降量监测通过布设沉降观测点，实时测量地表竖向位移，绘制地表沉降曲线，判断沉降分布规律；沉降速率监测聚焦沉降变化的时间特性，通过分析单位时间内的沉降量，识别沉降是否处于稳定状态；地表裂缝宽度监测针对地表出现的裂缝，实时测量裂缝宽度变化，评估地表完整性破坏程度。对于周边存在建筑物、地下管线的区域，还需同步监测建筑物沉降、倾斜及管线位移，确保周边环境安全。

（四）环境影响监测

环境影响监测是隧道施工绿色管控的重要内容，核心目的是评估施工过程对周边生态、大气、噪声、振动等环境要素的影响，确保施工活动符合环保要求，减少对周边居民生活与生态环境的干扰。环境影响监测需结合施工工序特性，针对性开展监测工作。核心监测指标包括施工振动、噪声、大气污染物浓度、地下水环境。施工振动监测主要针对钻爆法施工隧道，监测爆破作业产生的振动强度，避免振动影响周边建筑物结构安全；噪声监测聚焦施工机械作业与运输过程产生的噪声，控制噪声排放达标；大气污染物浓度监测针对施工扬尘、尾气排放等，监测 PM10、PM2.5、一氧化碳等污染物浓度，落实降尘减排措施；地下水环境监测针对富水地层或地下水敏感区域，监测地下水水位、水质变化，避免施工导致地下水污染或疏干。为清晰呈现各类核心监测内容的指标与目的，构建如下隧道施工核心监测内容表：

监测类别	核心监测指标	核心监测目的
围岩变形监测	围岩收敛变形、拱顶沉降、掌子面位移	掌握围岩稳定性状态，预判失稳风险，优化支护时机与参数
结构内力监测	锚杆轴力、喷射混凝土应力、衬砌应力、钢支撑内力	评估结构受力状态，验证设计合理性，发现结构受力异常
地表沉降监测	地表沉降量、沉降速率、地表裂缝宽度、建筑物沉降与倾斜	掌握施工对地表及周边环境的影响，规避周边环境破坏风险
环境影响监测	施工振动、噪声、大气污染物浓度、地下水水位与水质	评估施工对周边环境的影响，确保环保达标，减少生态干扰

二、监测方法选择

隧道施工监测方法的选择需遵循“精准适配、高效可行”的原则，结合监测内容特性、工程地质条件、施工环境、技术经济性等因素，选择能够满足监测精

度要求、适应施工环境、兼顾效率与成本的监测方法。当前隧道施工监测以“自动化监测与人工监测相结合”为核心思路，两种监测方法优势互补，既能实现关键区域的实时连续监测，又能保障监测工作的全面性与灵活性。监测方法的选择需避免单一化，通过多种方法的协同配合，提升监测数据的可靠性与监测工作的效率。

（一）自动化监测方法

自动化监测方法依托现代传感技术、数据传输技术与数据分析技术，实现监测数据的自动采集、传输、分析与预警，具有实时性强、监测频率高、数据连续、劳动强度低的核心优势，适用于核心监测区域、高风险区域的长期连续监测。随着智能化技术的发展，自动化监测方法的应用范围不断扩大，成为隧道施工监测的主流发展方向。常用的自动化监测方法包括自动化变形监测、自动化应力监测、自动化环境监测等。自动化变形监测采用自动化全站仪、激光位移计、光纤光栅传感器等设备，实现围岩收敛、拱顶沉降、地表沉降等指标的实时连续监测；设备通过预设程序自动采集数据，经无线传输模块传输至数据处理中心，数据异常时自动发出预警。自动化应力监测采用光纤应变计、振弦式应力计等设备，与支护结构或衬砌结构同步布设，实时采集结构内力数据，结合数据采集仪与传输系统，实现应力变化的连续跟踪。自动化环境监测采用振动传感器、噪声监测仪、空气质量监测设备等，实时采集施工振动、噪声、大气污染物浓度等数据，数据超标时及时触发报警，督促施工单位采取管控措施。自动化监测方法的核心优势在于能够及时捕捉数据的动态变化，避免人工监测的时间间隔导致数据遗漏，尤其适用于变形速率快、风险等级高的施工阶段。

（二）人工监测方法

人工监测方法依托专业监测人员与传统监测设备，通过人工操作完成数据采集、记录与整理，具有灵活性强、适应性广、设备投入低、操作简便的核心优势，适用于非核心区域监测、局部补充监测、特殊部位监测以及自动化监测设备无法覆盖的区域。人工监测方法能够根据施工实际情况灵活调整监测范围与监测重点，是自动化监测方法的有效补充。常用的人工监测方法包括人工变形监测、人工应力监测、人工环境监测等。人工变形监测采用收敛计、水准仪、全站仪等设备，由监测人员定期到现场采集围岩收敛、拱顶沉降、地表沉降等数据；监测频率根据施工阶段与变形情况动态调整，数据采集后由人工整理分析，及时反馈监测结

果。人工应力监测采用机械式应力计、应变片等设备，监测人员定期到现场读取数据，评估结构内力变化状态；适用于应力变化相对平缓的区域，能够灵活调整监测点位。人工环境监测采用便携式振动仪、噪声仪、粉尘检测仪等设备，监测人员根据施工工序开展阶段性监测，重点监测爆破作业、大型机械作业等关键工序的环境影响指标。人工监测方法的核心优势在于灵活性强，能够应对复杂的施工环境与特殊的监测需求，同时可对自动化监测数据进行校准验证，提升监测数据的可靠性。

（三）两种方法的协同应用

自动化监测与人工监测并非相互替代，而是协同互补的关系。实际监测工作中，需根据监测区域的风险等级、监测指标的特性，合理划分两种监测方法的应用范围，实现“核心区域自动化、一般区域人工化、关键节点双验证”的监测模式。协同应用的核心思路的是：在隧道洞口段、断层破碎带、软弱围岩段等高风险区域，以及围岩收敛、拱顶沉降等核心监测指标，采用自动化监测方法实现实时连续监测，确保及时捕捉风险信号；在低风险区域、隧道边墙非核心部位、周边环境次要区域，采用人工监测方法开展定期监测，控制监测成本；对于关键监测指标与高风险点位，采用自动化监测与人工监测双验证，通过两种方法的监测数据对比分析，剔除异常数据，提升数据可靠性。同时，人工监测可用于自动化监测设备的校准与维护，确保自动化监测设备的正常运行；自动化监测数据可为人工监测提供方向指引，帮助监测人员聚焦数据异常区域开展重点核查。两种方法的协同应用，既保障了监测工作的时效性与可靠性，又兼顾了监测成本与施工实际需求，实现监测资源的优化配置。

三、监测频率确定

隧道施工监测频率的确定需遵循“动态适配、科学合理”的原则，核心依据是施工阶段与变形速率，同时结合地质条件、工程规模、风险等级等因素综合调整。监测频率过低易导致关键数据遗漏，无法及时发现风险隐患；监测频率过高则会增加监测成本与劳动强度，造成资源浪费。因此，监测频率需动态调整，根据施工进度与监测数据变化规律，实时优化监测周期，确保监测数据能够精准反映监测对象的状态变化，同时实现监测成本与监测效果的平衡。

（一）根据施工阶段确定监测频率

隧道施工不同阶段对围岩与结构的扰动程度不同，监测对象的变化速率也存在显著差异，因此需结合施工阶段的特性确定基础监测频率。施工阶段按流程可分为开挖准备阶段、开挖阶段、支护施工阶段、衬砌施工阶段、竣工收尾阶段，不同阶段的监测频率逐步调整。开挖准备阶段需开展基线监测，建立监测基准值，监测频率较低，通常为 1—2 次 / 周，主要目的是掌握施工前的初始状态。开挖阶段是围岩扰动最剧烈、变形速率最快的阶段，监测频率需大幅提高，核心监测区域采用自动化监测时，监测频率可设置为 1—5 分钟 / 次；人工监测频率根据开挖进尺调整，开挖面推进前后 10 米范围内，监测频率为 1—2 次 / 天。支护施工阶段围岩变形速率逐步放缓，监测频率可适当降低，自动化监测频率调整为 5—15 分钟 / 次；人工监测频率为 1 次 / 2 ~ 3 天。衬砌施工阶段结构逐步成型，围岩变形基本稳定，监测频率进一步降低，自动化监测频率调整为 30 分钟—1 小时 / 次；人工监测频率为 1 次 / 周。竣工收尾阶段监测频率降至最低，主要开展阶段性复核监测，监测频率为 1 次 / 月，直至变形完全稳定。

（二）根据变形速率确定监测频率

变形速率是反映监测对象稳定性状态的核心指标，也是动态调整监测频率的关键依据。当变形速率较快时，说明监测对象状态变化剧烈，风险等级较高，需提高监测频率；当变形速率逐步放缓并趋于稳定时，可逐步降低监测频率。通过变形速率调整监测频率，能够确保及时捕捉监测对象的不稳定状态，同时避免稳定阶段的过度监测。通常采用分级管控的方式根据变形速率调整监测频率：当变形速率大于 5mm/d 时，说明监测对象处于不稳定状态，风险等级高，需加密监测频率，自动化监测为 1—3 分钟 / 次，人工监测为 2—3 次 / 天，同时加强现场巡查。当变形速率在 1—5mm/d 之间时，监测对象处于不稳定向稳定过渡的状态，监测频率保持中等水平，自动化监测为 5—10 分钟 / 次，人工监测为 1 次 / 天。当变形速率小于 1mm/d 时，监测对象基本稳定，监测频率可降低，自动化监测为 30 分钟—1 小时 / 次，人工监测为 1 次 / 2 ~ 3 天。当变形速率连续两周小于 0.2mm/d 时，说明监测对象已稳定，可进一步降低监测频率，直至停止监测。此外，当监测数据出现突变时，无论当前处于哪个施工阶段，均需立即提高监测频率，加密监测次数，同时分析数据突变原因，评估施工风险。

（三）其他影响因素的调整作用

除施工阶段与变形速率外，地质条件、工程规模、风险等级等因素也会影响监测频率的确定。在软弱破碎围岩、富水地层、断层破碎带等地质条件复杂区域，监测对象的稳定性较差，变形风险高，监测频率需在基础频率的基础上提高30%—50%。对于大断面隧道、深埋隧道等工程规模较大的项目，施工扰动范围广、影响程度深，监测频率需适当提高，确保全面捕捉数据变化。对于周边存在重要建筑物、文物古迹、大型地下管线的高风险项目，监测频率需大幅提高，核心区域采用自动化实时监测，同时增加人工复核监测次数，确保周边环境安全。监测频率的调整需形成闭环管理，监测人员需定期分析监测数据，评估监测对象的稳定性状态，结合施工进度及时优化监测频率，并做好记录归档。监测频率的调整需经监理单位与建设单位确认，确保调整方案科学合理，避免随意降低监测频率导致风险遗漏。

隧道施工监测内容需全面覆盖围岩变形、结构内力、地表沉降、环境影响四大核心类别，监测方法需坚持“自动化监测与人工监测相结合”的思路，实现优势互补；监测频率需动态适配施工阶段与变形速率，同时结合地质条件、风险等级等因素综合调整。在实际工程应用中，需根据工程实际情况灵活优化监测内容、方法与频率，确保监测工作精准高效，为施工安全与质量管控提供可靠的数据支撑。随着监测技术的持续升级，监测内容将更加全面、监测方法将更加智能、监测频率将更加精准，进一步推动隧道施工监测工作向精细化、智能化方向发展。

第三节 监测数据分析

隧道施工监测数据是反映施工过程中围岩、结构及周边环境状态变化的核心载体，单纯的监测数据采集无法直接为施工管控提供有效支撑。监测数据分析作为监测工作的核心环节，通过科学的处理流程、适配的分析方法与合理的预警阈值设定，实现对监测数据的深度解读，精准识别施工风险，为安全预警、施工参数优化、质量控制提供量化依据。随着监测技术的发展，监测数据体量不断增大，数据分析已从传统的人工整理分析向智能化、精细化分析方向升级，大幅提升了数据解读的效率与精准性。

一、数据处理流程

隧道施工监测数据在采集过程中,受施工干扰、设备误差、环境因素等影响,易出现数据缺失、异常波动、精度不足等问题。数据处理流程的核心目标是对原始监测数据进行系统性梳理与优化,剔除无效数据,修正偏差数据,提炼有效信息,形成具有可靠性、连续性的分析数据集,为后续分析工作奠定基础。数据处理流程需遵循“精准高效、循序渐进”的原则,按规范步骤开展,确保处理后的数据分析价值。核心处理流程包括数据清洗、异常值剔除、趋势分析三个关键环节。

(一) 数据清洗

数据清洗是监测数据分析的基础步骤,核心内涵是对原始监测数据进行筛选、补全与校准,消除数据采集过程中产生的噪声与偏差,确保数据的完整性与准确性。数据清洗需针对不同类型监测数据的特性,采用适配的处理方式,避免因数据问题影响后续分析结果的可靠性。数据清洗的核心工作包括数据完整性检查、数据补全、数据校准三个方面。数据完整性检查需逐一核查各监测指标、各监测点位的原始数据,识别数据缺失、数据中断等问题,明确缺失数据的时间段、监测点位及指标类型。数据补全需针对缺失数据情况,采用合理的补全方法;对于短期少量缺失数据,可采用相邻数据插值法补全;对于长期或关键点位缺失数据,需结合施工日志、设备运行记录等辅助信息,判断缺失原因,必要时重新开展补充监测。数据校准需对比自动化监测与人工监测的同期数据,修正自动化监测设备的系统误差;结合监测设备的校准报告,对超出精度允许范围的数据进行修正;针对受施工振动、环境温湿度影响的数据,采用针对性的修正公式消除干扰影响。数据清洗完成后,需形成数据清洗报告,明确清洗内容、处理方法及数据修正情况,确保数据可追溯。

(二) 异常值剔除

异常值是指偏离数据整体变化规律的极端数据,其产生主要与设备故障、施工干扰、人为操作失误等因素相关。异常值的存在会扭曲数据变化趋势,干扰分析结果的准确性。异常值剔除的核心目标是精准识别异常数据,科学判断剔除范围,避免误剔除有效数据或遗漏异常数据。异常值剔除的核心工作包括异常值识别、异常值验证、异常值处理三个方面。异常值识别可采用统计方法与经验判断相结合的方式;统计方法包括 3σ 准则、格拉布斯准则等,通过计算数据的均值、

标准差，确定数据正常波动范围，超出范围的数据判定为疑似异常值；经验判断需结合施工工序、设备运行状态等信息，对数据突变、持续不变等异常现象进行初步识别。异常值验证需对疑似异常值进行针对性核查，通过检查监测设备运行记录、施工日志，核实数据采集时段是否存在设备故障、爆破作业、大型机械干扰等情况；对关键点位的疑似异常值，可通过人工复核监测进行验证。异常值处理需根据验证结果开展，确认为无效异常值的，予以剔除；对因施工临时干扰产生的异常值，需标注干扰原因后保留，避免影响整体数据趋势判断；对无法明确原因的疑似异常值，需保留原始数据并标注，结合后续数据变化趋势进一步判断。

（三）趋势分析预处理

趋势分析预处理是数据处理的收尾环节，核心目标是对清洗后的有效数据进行整理与转化，提炼数据变化的核心特征，为后续深度分析做好准备。趋势分析预处理需结合监测指标类型与分析需求，采用适配的处理方式，提升数据的分析价值。趋势分析预处理的核心工作包括数据分类整理、特征参数提取、数据标准化三个方面。数据分类整理需按监测指标类型、监测点位、施工阶段对数据进行分类归档，形成结构化数据集；针对同一监测点位的不同指标数据，建立时间关联，便于分析指标间的相关性。特征参数提取需计算各监测指标的核心特征参数，包括累计变化量、日变化速率、周变化速率、变化加速度等，直观反映数据变化的强度与趋势；对周期性波动的数据，提取波动周期与振幅等参数，分析变化规律。数据标准化需将不同量级、不同单位的监测数据转化为统一标准的无量纲数据，消除量纲差异对综合分析的影响；常用的标准化方法包括极值标准化、标准差标准化等，确保不同指标数据可进行对比分析。预处理完成后，需形成标准化数据集，为后续分析方法的应用提供基础。

二、分析方法应用

监测数据分析方法的选择需结合分析目标、数据特性与工程实际条件，核心目标是通过处理后数据的深度解读，揭示监测对象的状态变化规律，评估施工安全性与合理性，为施工管控提供科学依据。当前隧道施工监测数据分析以统计分析与数值模拟对比为核心方法，两种方法协同应用，既能实现对历史数据的规律总结，又能完成对未来状态的预测评估。分析方法的应用需避免单一化，根据分析需求灵活组合，提升分析结果的可靠性与实用性。

（一）统计分析

统计分析是监测数据分析的基础方法，核心内涵是运用统计学原理对监测数据进行描述性分析、相关性分析与显著性分析，提炼数据变化的统计规律，量化评估监测对象的状态变化程度。统计分析具有方法简便、适用性广的优势，适用于各类监测指标的常规分析，是监测数据分析的必备方法。常用的统计分析方法包括描述性统计、相关性分析、回归分析等。描述性统计通过计算监测数据的均值、中位数、标准差、极差等统计参数，直观反映数据的集中趋势与离散程度；结合数据分布直方图、累积频率曲线等图表，清晰呈现数据分布特征，为初步判断监测对象状态提供依据。相关性分析用于研究不同监测指标间的关联程度，如围岩收敛与拱顶沉降、衬砌应力与围岩变形等指标间的相关性；通过计算相关系数，判断指标间的正相关、负相关或无相关关系，揭示各监测对象状态变化的内在联系。回归分析用于构建监测数据与影响因素间的量化模型，如变形量与施工时间、开挖进尺间的回归模型；通过线性回归、非线性回归等方法，拟合数据变化规律，实现对未来数据变化趋势的短期预测，为风险预判提供支撑。统计分析的核心价值在于通过数据的量化分析，客观反映监测对象的状态变化，为施工管控提供直观的数据分析结果。

（二）数值模拟对比

数值模拟对比是监测数据分析的深化方法，核心内涵是基于工程地质条件与施工方案，建立隧道施工数值模拟模型，通过模拟计算获取围岩、结构的理论应力、变形数据，与实际监测数据进行对比分析，验证施工方案的合理性，评估监测数据的有效性，预测后续施工状态变化。数值模拟对比适用于复杂地质条件、大断面隧道等工程的深度分析，能够弥补统计分析的局限性。数值模拟对比的核心工作包括模型建立、模拟计算、数据对比验证三个方面。模型建立需结合隧道地质勘察资料、施工图纸，确定模拟范围、地质参数、结构参数与施工工序；常用的数值模拟软件包括 FLAC3D、Midas GTS 等，根据工程特性选择适配的模拟方法，如有限差分法、有限元法等。模拟计算需按实际施工工序逐步开展，模拟开挖、支护、衬砌等各阶段的施工过程，获取各阶段的围岩应力、变形、结构内力等理论数据；设置不同施工参数场景，开展多方案模拟，为施工参数优化提供对比依据。数据对比验证需将模拟计算的理论与实际监测数据进行同步对比，分析两者的偏差范围与原因；若偏差在允许范围内，说明模型参数合理，监测数据有

效，可利用模型预测后续施工状态；若偏差过大，需修正模型参数，重新开展模拟计算，直至模型能够准确反映实际施工状态。数值模拟对比的核心价值在于实现对施工过程的动态预测，为施工参数优化与风险预判提供深层次的技术支撑。

（三）两种方法的协同应用

统计分析与数值模拟对比并非相互独立，而是协同互补的关系。实际数据分析工作中，需结合分析需求，合理组合两种方法，实现“统计总结规律、模拟预测趋势、相互验证支撑”的分析模式，提升数据分析的深度与可靠性。协同应用的核心思路是：采用统计分析方法对原始监测数据进行初步处理，提炼数据变化规律与特征参数，明确监测指标间的相关性，为数值模拟模型的建立提供基础数据支撑；在数值模拟模型建立过程中，利用统计分析结果校准模型参数，确保模型的合理性；将模拟计算的理论数据与统计分析后的实际监测数据进行对比，验证模型的准确性；通过数值模拟模型预测后续施工状态变化，采用统计分析方法对预测数据与后续实际监测数据进行持续对比，动态修正模型参数，提升预测精度。同时，统计分析可针对数值模拟结果开展敏感性分析，识别影响监测指标变化的关键因素；数值模拟可弥补统计分析无法预测复杂施工场景下数据变化的局限性，为施工参数优化提供多方案对比依据。两种方法的协同应用，既保障了数据分析的客观性与准确性，又提升了数据分析的深度与前瞻性，为施工管控提供全面的技术支撑。

三、预警阈值设定

预警阈值是判断施工风险等级、触发安全预警的核心标准，其设定的合理性直接影响安全预警的准确性与有效性。预警阈值设定的核心目标是基于工程地质条件与工程经验，结合监测指标特性，制定科学、可行的分级预警标准，确保能够及时、准确地识别施工风险，同时避免误预警导致施工停滞。预警阈值设定需遵循“因地制宜、科学严谨”的原则，综合考虑多方面因素，动态调整优化，确保与实际施工风险状态精准匹配。核心设定思路是基于地质条件与工程经验，制定分级预警阈值，形成完整的预警体系。

（一）设定依据

预警阈值的设定需以客观依据为支撑，确保设定结果的合理性与针对性。核心设定依据包括工程地质条件、工程经验、相关规范标准、监测数据规律四个方

面，各依据相互补充，共同支撑预警阈值的科学设定。工程地质条件是预警阈值设定的核心依据，不同地质条件下围岩稳定性、变形特性存在显著差异；在软弱破碎围岩、富水地层、断层破碎带等复杂地质区域，围岩变形量大、变形速率快，预警阈值需适当降低；在坚硬完整围岩区域，围岩稳定性好，变形量小，预警阈值可适当提高。工程经验是预警阈值设定的重要参考，结合同类工程的监测数据与风险处置经验，提炼相似地质条件、施工方法下的预警阈值范围，避免从零开始设定导致的不合理性。相关规范标准是预警阈值设定的底线要求，需严格遵循行业相关规范对监测指标预警值的规定，确保设定的预警阈值不低于规范最低要求，保障施工安全。监测数据规律是预警阈值动态调整的依据，通过分析前期监测数据的变化趋势与特征，结合施工进度，实时优化预警阈值，确保阈值与实际监测数据变化规律适配。

（二）分级预警阈值设定

分级预警阈值设定是预警体系构建的核心内容，核心思路是根据监测指标的变化程度与对应的风险等级，将预警阈值划分为多个等级，不同等级对应不同的预警信号与处置措施，实现风险的分级管控。分级设定需确保各等级阈值界限清晰、可操作性强，便于监测人员快速判断风险等级并启动对应处置流程。常用的分级方式为三级预警，即一般预警、较大预警、重大预警。一般预警阈值对应监测指标出现轻微异常，尚未对施工安全构成直接威胁；设定标准通常为监测数据达到规范允许值的 60%—70%，或变形速率出现小幅上升但未超过安全范围；对应处置措施为加强监测频率，密切关注数据变化趋势，做好风险预判准备。较大预警阈值对应监测指标出现明显异常，存在潜在安全风险；设定标准通常为监测数据达到规范允许值的 70%—90%，或变形速率持续上升且接近危险范围；对应处置措施为立即核查异常原因，调整施工参数，加密监测频率，启动风险评估。重大预警阈值对应监测指标严重异常，已接近或超过安全极限，存在明确安全隐患；设定标准通常为监测数据达到或超过规范允许值的 90%，或变形速率急剧上升；对应处置措施为立即停止相关区域施工，组织人员撤离，启动应急处置预案，开展专项风险评估与整改。分级预警阈值设定需结合具体监测指标特性，针对不同指标制定差异化的分级标准，确保预警的针对性。

（三）阈值动态调整

隧道施工过程中，地质条件、施工阶段、环境因素等均处于动态变化中，固

定的预警阈值难以始终适配实际施工风险状态。阈值动态调整的核心目标是根据施工进度与监测数据变化规律，实时优化预警阈值，确保预警体系的时效性与准确性。动态调整需建立规范化的调整流程，避免随意调整导致预警失效。阈值动态调整的核心工作包括调整时机判断、调整方案制定、调整验证三个方面。调整时机判断需结合施工阶段转换、地质条件变化、监测数据趋势突变等情况；当施工进入新的阶段、遇到特殊地质段，或监测数据出现持续异常且与现有阈值不匹配时，需启动阈值调整。调整方案制定需基于前期监测数据规律、新的地质勘察资料与工程经验，重新评估风险等级，确定调整后的分级预警阈值；调整幅度需科学合理，避免过大调整导致预警失效。调整验证需将调整后的阈值应用于后续监测数据分析，对比预警效果与实际风险状态，评估调整方案的合理性；若调整后预警准确性提升，说明方案可行；若仍存在预警偏差，需进一步优化调整。阈值动态调整需做好记录归档，明确调整原因、调整依据、调整前后的阈值标准，确保调整过程可追溯。

隧道施工监测数据分析需严格遵循数据清洗、异常值剔除、趋势分析预处理的规范流程，采用统计分析与数值模拟对比协同的分析方法，基于地质条件与工程经验制定分级预警阈值并动态调整。通过科学的数据分析，实现对监测数据的深度解读，精准识别施工风险，为施工安全预警、参数优化、质量控制提供可靠依据。在实际工程应用中，需结合工程实际条件灵活优化数据分析流程与方法，提升数据分析的效率与精准性。随着智能化分析技术的发展，监测数据分析将逐步融入人工智能、大数据等技术，实现数据的智能解读与风险的精准预判，进一步推动隧道施工监测管控向精细化、智能化方向发展。

第四节 施工过程控制

隧道施工过程控制是保障施工安全、提升工程质量、优化施工效率的核心手段，其核心逻辑是基于实时监测数据动态调整施工参数与支护方案，实现施工过程的精准管控。隧道施工所处地质环境复杂多变，施工过程中围岩应力重分布、结构受力状态不断变化，传统基于经验的静态控制模式已无法满足复杂工程的管控需求。动态化、数据驱动的施工过程控制模式，通过建立“监测－分析－决策－调整”的闭环机制，能够及时响应施工过程中的各类变化，有效规避施工风险，

确保工程顺利推进。

一、控制核心逻辑

隧道施工过程控制的核心逻辑是数据驱动的动态调整，即通过施工监测获取围岩、结构及周边环境的实时状态数据，经科学分析评估后，判断当前施工参数与支护方案的适配性，针对性调整施工策略，实现施工过程与工程实际状态的精准匹配。该逻辑打破了传统静态控制模式的局限性，强调施工管控的灵活性与时效性，核心目标是通过动态调整保障施工安全、控制工程质量、提升施工效率。

（一）数据驱动的核心导向

数据驱动是施工过程控制的核心导向，监测数据作为反映工程实际状态的核心载体，为施工调整提供客观、精准的量化依据。施工过程中，需通过完善的监测系统持续采集围岩变形、结构内力、地表沉降等关键指标数据，确保数据的连续性、完整性与准确性。基于监测数据，能够直观掌握围岩稳定性变化、结构受力状态及施工对周边环境的影响程度，避免依赖经验判断导致的管控偏差。数据驱动要求监测数据与施工管控深度融合，实现监测数据向施工决策的快速转化，确保施工调整措施的针对性与科学性。

（二）施工参数的动态适配

施工参数的动态适配是控制核心逻辑的关键体现，核心内涵是根据监测数据反馈的工程状态，实时调整开挖进尺、开挖速率、支护参数等施工参数，确保施工过程与围岩承载能力、结构受力状态相匹配。当监测数据显示围岩变形速率加快、结构内力接近预警阈值时，需及时调整施工参数，如减小开挖进尺、放缓开挖速率、强化支护强度；当监测数据显示围岩状态稳定、结构受力合理时，可在确保安全的前提下适当优化施工参数，提升施工效率。施工参数的动态适配需遵循“安全优先、效率兼顾”的原则，避免盲目调整导致施工风险或资源浪费。

（三）支护方案的优化调整

支护方案的优化调整是控制核心逻辑的重要组成部分，核心内涵是根据监测数据评估现有支护方案的有效性，结合围岩实际状态优化支护类型、支护时机与支护参数，确保支护结构能够有效发挥承载作用。当监测数据显示现有支护方案无法有效控制围岩变形，如围岩收敛量持续增大、拱顶沉降超出预警范围时，需及时优化支护方案，如增加锚杆数量与长度、加密钢支撑间距、增设超前支护措

施；当监测数据显示围岩稳定性较好，现有支护方案冗余时，可在验证安全的前提下简化支护方案，降低工程成本。支护方案的优化调整需结合地质条件变化与施工进展，确保调整后的方案适配工程实际需求。

二、关键控制环节

隧道施工过程涉及开挖、支护、衬砌等多个环节，各环节相互关联、相互影响，其中开挖速率、支护时机、荷载施加是影响施工安全与工程质量的关键控制环节。关键控制环节的管控质量直接决定施工过程的稳定性，需围绕核心控制逻辑，制定针对性的管控措施，确保各环节施工符合规范要求与工程实际状态。

（一）开挖速率控制

开挖速率是影响围岩稳定性的核心施工参数，直接决定围岩应力重分布的速度与程度。开挖速率过快会导致围岩应力无法及时释放，应力集中现象加剧，易引发围岩失稳、塌方等风险；开挖速率过慢则会降低施工效率，增加工程成本。开挖速率控制需基于监测数据动态调整，结合地质条件、隧道断面尺寸、施工方法等因素综合确定。开挖速率控制的核心措施包括：根据前期监测数据与地质勘察资料，确定不同地质段的基准开挖速率；施工过程中，实时监测围岩变形速率、结构内力变化，当监测数据显示围岩状态稳定时，可维持基准开挖速率；当监测数据出现异常，如变形速率加快、内力接近预警值时，立即放缓开挖速率，必要时暂停开挖，待围岩状态稳定后再恢复施工；对于软弱破碎围岩、断层破碎带等复杂地质区域，需严格控制开挖速率，采用“短进尺、快支护”的施工策略，降低围岩扰动。开挖速率控制需避免盲目追求施工进度，确保开挖过程与围岩稳定性相适配。

（二）支护时机控制

支护时机是保障支护效果的关键因素，直接影响支护结构的承载效率与围岩稳定性。支护时机过早会导致支护结构承受过大的围岩应力，增加支护成本；支护时机过晚则会导致围岩变形过大，甚至出现失稳，增加支护难度。支护时机控制需基于监测数据判断围岩变形规律，结合地质条件与支护类型，确定最佳支护时间。支护时机控制的核心措施包括：通过监测数据掌握围岩变形速率与累计变形量，当变形速率达到预设阈值或累计变形量达到规范允许值的一定比例时，及时开展支护施工；对于坚硬完整围岩，可在开挖后待围岩变形基本稳定再进行支

护；对于软弱破碎围岩，需遵循“随挖随支”的原则，开挖完成后立即进行初期支护，抑制围岩变形发展；施工过程中，持续监测支护结构施工后的围岩变形与结构内力变化，验证支护时机的合理性，若监测数据仍显示异常，需及时强化支护措施。支护时机控制需实现支护结构与围岩变形的精准匹配，确保支护效果最大化。

（三）荷载施加控制

荷载施加控制是保障衬砌结构质量与安全的关键环节，主要针对衬砌施工过程中的混凝土浇筑、回填注浆及后期运营荷载施加等过程，避免因荷载施加不当导致衬砌结构开裂、破损。荷载施加控制需结合监测数据，确保荷载施加速率与强度符合设计要求，与衬砌结构承载能力相匹配。荷载施加控制的核心措施包括：混凝土浇筑过程中，控制浇筑速率与浇筑高度，避免因浇筑过快导致衬砌结构局部承受过大压力，同时确保混凝土振捣密实，减少结构内部缺陷；回填注浆过程中，控制注浆压力与注浆量，避免注浆压力过大导致衬砌结构变形，注浆量需根据监测数据调整，确保回填密实；后期运营荷载施加前，需通过监测数据评估衬砌结构承载能力，确保结构强度符合运营荷载要求；荷载施加过程中，实时监测衬砌结构应力与位移变化，若出现异常立即停止荷载施加，排查原因并采取整改措施。荷载施加控制需遵循“均匀、缓慢、可控”的原则，确保荷载施加过程安全稳定。

三、动态控制机制

动态控制机制是实现施工过程精准管控的保障，核心是建立“监测－分析－决策－调整”的闭环管理流程，通过各环节的协同配合，实现施工过程的动态优化。动态控制机制需具备系统性、规范性与时效性，确保监测数据能够快速转化为施工决策，施工调整措施能够及时落实并验证效果，形成持续改进的管控循环。

（一）监测环节

监测环节是动态控制机制的基础，核心目标是获取工程实际状态的精准数据，为后续分析、决策提供依据。监测环节需完善监测系统，明确监测指标、监测点位与监测频率，确保监测数据的全面性与时效性。监测过程中，需严格遵守监测规范，做好数据记录与初步整理，及时传递监测数据至分析环节。同时，需定期检查监测设备运行状态，确保设备正常工作，数据采集精准；针对监测数据异常

情况，及时开展复核监测，确保数据可靠性。

（二）分析环节

分析环节是动态控制机制的核心中枢，核心目标是对监测数据进行科学解读，评估施工过程的安全性合理性，识别存在的问题。分析环节需采用统计分析、数值模拟对比等适配的分析方法，提炼监测数据变化规律，判断围岩、结构的状态变化趋势；结合施工参数与支护方案，分析监测数据异常的原因，评估现有施工策略的适配性。分析完成后，需形成分析报告，明确工程状态评估结果、存在的风险隐患及初步调整建议，为决策环节提供技术支撑。

（三）决策环节

决策环节是动态控制机制的关键，核心目标是基于分析结果制定针对性的施工调整方案。决策环节需组织技术人员、管理人员与专家开展联合评审，结合工程实际条件、施工进度要求与安全质量标准，对分析环节提出的初步调整建议进行论证，确定最终调整方案。调整方案需明确调整内容、实施步骤、责任主体与完成时限，确保调整措施具体可行；对于重大调整方案，需开展风险评估，制定应急预案，保障调整过程安全。决策完成后，需及时将调整方案传递至施工班组，确保方案有效落实。

（四）调整环节

调整环节是动态控制机制的落实保障，核心目标是将决策环节确定的调整方案付诸实施，并验证调整效果。调整环节需严格按照调整方案组织施工，加强施工过程管控，确保调整措施落实到位；调整过程中，需强化监测频率，实时跟踪监测数据变化，评估调整效果。若监测数据显示调整效果良好，工程状态恢复稳定，可维持调整后的施工策略；若调整效果未达预期，需及时反馈至分析环节，重新开展分析与决策，优化调整方案。调整完成后，需做好记录归档，总结调整经验，为后续施工管控提供参考。动态控制机制的有效运行需建立健全管理制度，明确各环节的职责分工与工作流程，确保各环节衔接顺畅、高效协同。同时，需加强技术培训，提升相关人员的监测数据分析能力、决策能力与施工调整执行能力；借助信息化技术，搭建数据共享平台，实现监测数据、分析结果、决策方案与调整情况的实时共享，提升动态控制机制的运行效率。

隧道施工过程控制需遵循数据驱动的核心逻辑，聚焦开挖速率、支护时机、荷载施加三大关键控制环节，建立“监测－分析－决策－调整”的闭环动态控制

机制。通过实时监测数据的深度解读，动态调整施工参数与支护方案，确保施工过程与工程实际状态精准匹配。在实际工程应用中，需结合地质条件、施工方法与工程规模，优化控制策略与机制流程，提升施工过程管控的精准性与有效性，为隧道施工安全、高质量推进提供坚实保障。

第十章 隧道工程案例分

第一节 典型隧道工程介绍

隧道工程案例分是总结工程实践经验、提升技术应用水平的重要途径。典型隧道工程的选取与介绍，能够为同类工程的设计、施工与管控提供参考依据，推动隧道工程技术的迭代升级。不同地质条件、施工方法与功能类型的隧道工程，在技术应用、风险管控等方面存在显著差异，其实践经验具有独特的借鉴价值。

一、案例选择依据

典型隧道工程案例的选择需遵循科学性、代表性与实用性原则，核心依据围绕地质条件、施工方法、功能类型的差异性展开，确保选取的案例能够覆盖隧道工程的核心技术场景，全面反映不同工程条件下的技术应用特点。合理的案例选择能够最大化案例分

（一）基于不同地质条件选择

地质条件是影响隧道工程设计与施工的核心因素，不同地质环境下的工程技术难点与风险管控重点存在本质差异。案例选择需覆盖复杂多样的地质类型，包括高富水岩溶地层、软弱破碎围岩、深埋岩爆地层、红层软岩等典型地质条件。高富水岩溶地层隧道面临涌水突泥风险高的挑战，软弱破碎围岩隧道需重点解决围岩稳定性控制问题，深埋岩爆地层隧道要应对岩爆预测与防治难题，红层软岩隧道则存在围岩大变形管控难点。通过选取不同地质条件下的典型案例，能够系统总结各类地质环境的技术应对策略，为同类地质条件工程提供技术借鉴。

（二）基于不同施工方法选择

施工方法的选择直接决定隧道工程的施工效率、安全质量与成本控制，不同施工方法的技术适配性与应用要点存在显著差异。案例选择需涵盖钻爆法、悬臂掘进机施工法、全断面隧道掘进机施工法等主流施工方法。钻爆法适用于多种地质条件，技术成熟但对周边扰动较大；悬臂掘进机施工法在小断面隧道、非爆作

业场景中具有优势，能够提升施工安全与效率；全断面隧道掘进机施工法适用于长距离、大断面隧道，机械化程度高但设备投入大。选取不同施工方法的典型案例，能够总结各类施工方法的技术特点、适用范围与优化路径，为施工方法的合理选择与应用提供实践支撑。

（三）基于不同功能类型选择

隧道工程的功能类型决定其设计标准、结构形式与技术要求，不同功能隧道的工程重点存在明显差异。案例选择需覆盖交通隧道、水利隧道等核心功能类型。交通隧道包括高速公路隧道、铁路隧道等，需兼顾通行能力与行车安全，重点关注结构稳定性与运营舒适性；水利隧道以输水为核心功能，需满足抗渗性与耐久性要求，重点解决富水条件下的施工与结构防护问题。通过选取不同功能类型的典型案例，能够总结各类隧道的功能适配设计要点与技术应用特色，为功能导向的隧道工程建设提供参考。

二、工程基本概况

基于上述选择依据，选取宜攀高速锦屏隧道、滇中引水工程龙树山隧洞两个典型案例，分别代表高富水岩溶地层交通隧道与软弱破碎围岩水利隧道，涵盖钻爆法、悬臂掘进机施工法两种主流施工方法，全面反映不同工程条件下的基本特征与技术难点。

（一）宜攀高速锦屏隧道

宜攀高速锦屏隧道是典型的特长交通隧道，地处四川凉山州雷波县境内，连接柑子乡与箐口乡，是宜攀高速新金段的核心控制性工程。隧道左线长度 9930 米，右线长度 9922 米，最大埋深达 1270 米，隧道断面按高速公路双向四车道标准设计，断面尺寸满足大型车辆通行需求。工程于 2020 年正式开工建设，2025 年 11 月实现双幅贯通，总工期 5 年，预计 2026 年随全线同步通车，通车后将大幅缩短区域通行时间，从原来的 2.5 小时压缩至 10 分钟。

该工程的技术难点集中体现为地质条件极端复杂，隧址区以高富水岩溶地层为主，集岩溶、涌水、岩爆、软岩大变形、瓦斯等多重地质难题于一身。施工期间每天最大涌水量相当于 64 个标准泳池的水量，涌水突泥风险极高；深埋段围岩应力集中明显，岩爆频发，对施工安全构成严重威胁；同时，近万米级的特长隧道通风、出渣等施工组织难度极大，对施工技术与管理水平提出了严苛要求。

（二）滇中引水工程龙树山隧洞

滇中引水工程龙树山隧洞是典型的小断面水利输水隧道，位于滇中引水工程红河段，核心功能是保障区域水资源调配。隧道全长约 3.2 公里，断面为圆形小断面设计，适应水利输水的功能需求，开挖断面面积有限。工程工期为 3 年，采用悬臂掘进机结合人工支护的施工方

案，于 2023 年完成主体工程施工，为滇中引水工程红河段的通水奠定了基础。该工程的技术难点主要源于地质条件复杂与施工空间受限的双重挑战。隧址区以Ⅳ～Ⅴ级软弱破碎围岩为主，岩性包括板岩、粉细砂岩、灰岩，地下水丰富，围岩自稳能力极差，易发生掌子面垮塌；小断面设计导致施工空间有限，大型机械设备难以应用，工序交叉干扰大，钻孔、出渣等工作需周期性循环进行，极大影响施工效率；同时，软弱围岩条件下的非爆法施工技术适配性与安全性控制，成为工程推进的核心技术难题。

三、案例研究价值

宜攀高速锦屏隧道与滇中引水工程龙树山隧洞两个典型案例，在地质勘察、结构设计、施工技术等方面积累了丰富的实践经验，其研究价值体现在为同类工程提供技术参考、推动行业技术进步、完善技术标准体系等多个维度，具有重要的理论与实践意义。

（一）地质勘察方面的研究价值

两个案例均在复杂地质条件下开展工程建设，其地质勘察经验为同类复杂地质隧道的勘察工作提供了重要借鉴。锦屏隧道针对高富水岩溶地层的勘察工作，构建了“综合勘察+动态补勘”的技术体系，整合地质遥感、物探、钻探等多种勘察手段，精准探明了岩溶发育规律、地下水分布特征与涌水通道位置，形成了涌突水定量预测技术成果，解决了复杂岩溶地层勘察精度不足的难题。其经验可指导高富水岩溶区域隧道的勘察工作，提升地质预测的准确性。龙树山隧洞针对软弱破碎围岩的勘察实践，优化了软弱围岩分级勘察指标，通过现场原位测试与室内试验相结合的方式，精准获取了围岩物理力学参数，明确了地下水对围岩稳定性的影响程度。其勘察经验为小断面软弱围岩隧道的勘察工作提供了参考，特别是在如何精准判断软弱围岩承载力、预测围岩变形趋势等方面，具有重要的研究价值。两个案例的勘察实践均推动了复杂地质条件下隧道勘察技术的完善，为工程前期风险预判提供了技术支撑。

（二）结构设计方面的研究价值

案例工程在结构设计上针对不同工程条件形成了差异化的设计方案，其设计经验对同类工程具有重要参考意义。锦屏隧道针对高富水、大埋深、多重地质风险并存的特点，采用了“抗 - 排 - 堵相结合”的防水设计体系，优化了衬砌结构形式，增强了结构抗水压力与抗岩爆韧性；同时，结合特长隧道的功能需求，创新设计了“斜井 + 竖井”的通风与出渣系统，解决了长距离隧道的运营与施工通风难题。其结构设计方案为特长、深埋、高风险交通隧道的设计提供了范例。龙树山隧洞针对小断面、软弱破碎围岩的特点，采用了适配的支护结构设计方案，优化了锚杆与钢支撑的布设参数，强化了掌子面临时加固设计，实现了支护结构与围岩的协同承载；同时，结合水利隧道的抗渗要求，优化了衬砌混凝土配合比与施工工艺，提升了结构抗渗性能。其设计经验为小断面水利隧道及软弱破碎围岩隧道的结构设计提供了参考，特别是在小空间条件下的支护结构优化、功能与安全的平衡设计等方面，具有独特的研究价值。

（三）施工技术方面的研究价值

案例工程在施工技术上的创新与实践，推动了隧道施工技术的发展，其经验具有广泛的推广应用价值。锦屏隧道在施工过程中，探索形成了涌突水分级防控技术，通过超前注浆加固、动态排水调控等措施，有效控制了大规模涌水风险；引入全智控专业设备，实现了施工过程的智能化管控，提升了作业效率 50%，降低了作业面人员密度 56%；创新采用反井法进行竖井施工，从外部山体向隧道内精准贯通，较传统方法缩短工期 60 天，解决了崎岖地形下的出渣与通风难题。这些技术创新为复杂地质条件下特长隧道的施工提供了技术范式。龙树山隧洞针对小断面软弱围岩隧道的施工难题，成功应用了悬臂掘进机非爆法施工技术，通过优化施工配套方案与工序组织，实现了开挖效率的提升，在Ⅳ ~ Ⅴ级围岩条件下掘进效率可达 20 ~ 40 m³/h，月开挖进尺超过 150 米；同时，探索形成了小空间条件下的工序协同组织模式，解决了立拱、喷浆等工序的作业平台难题，有效保障了施工安全。其施工技术经验为小断面、软弱围岩隧道的机械化、安全化施工提供了重要参考，特别是在非爆法施工技术的适配性优化方面，具有显著的研究价值。

选取不同地质条件、施工方法与功能类型的宜攀高速锦屏隧道、滇中引水工程龙树山隧洞作为典型案例，其基本概况清晰反映了不同工程条件的核心特征与

技术难点,在地质勘察、结构设计、施工技术方面的实践经验具有重要的研究价值。这些案例的研究与总结,能够为同类隧道工程的实践提供针对性参考,推动隧道工程技术的规范化、智能化发展,为复杂条件下隧道工程的安全、高效建设提供技术保障。

第二节 地质条件分析

地质条件是隧道工程建设的基础前提,其复杂程度直接决定工程设计方案、施工技术选择与风险管控重点。对典型隧道工程开展针对性的地质条件分析,能够精准把握不同地质环境的核心特征,识别潜在地质风险,总结勘察技术应用经验,为同类工程的地质勘察与风险防控提供实践参考。

一、地质勘察成果

地质勘察成果是隧道工程地质条件分析的核心依据,通过系统梳理地形地貌、地质构造、岩土体特性等关键勘察数据,能够全面掌握隧址区地质环境的整体特征,为工程设计与施工提供精准的地质支撑。两个典型案例所处地质环境差异显著,其勘察成果充分反映了不同类型地质条件的核心特征,为针对性的工程技术适配提供了基础。

(一) 宜攀高速锦屏隧道

地形地貌方面,隧址区位于青藏高原东缘横断山脉腹地,属高山峡谷地貌,地形起伏剧烈,沟谷深切,地面高程介于 800 ~ 2200 米之间,相对高差达 1400 米。隧道轴线穿越多条山脊与沟谷,进口端位于柑子乡平缓沟谷地带,出口端地处箐口乡陡坡区域,隧址区植被覆盖率高,自然坡度多在 30° ~ 50° 之间,局部区域形成悬崖峭壁,给勘察作业与工程施工带来极大不便。地质构造方面,隧址区处于扬子准地台西缘,跨越多个构造单元,地质构造极其复杂。区域内发育多条深大断裂带,其中锦屏山断裂带贯穿隧址区核心区域,该断裂带活动频繁,破碎带宽度达 50 ~ 200 米,破碎带内以断层泥、糜棱岩、角砾岩为主,整体性极差。同时,隧址区褶皱构造发育,形成多个背斜、向斜构造,岩层产状变化剧烈,节理裂隙密集发育,为地下水的渗透与富集提供了良好通道。岩土体特性方面,隧址区岩土体类型多样,以碳酸盐岩、碎屑岩为主,局部分布岩浆岩。碳酸

盐岩主要包括灰岩、白云岩，广泛分布于隧道中前段，岩石强度高，但岩溶发育强烈，形成大量溶洞、溶蚀裂隙、地下暗河等岩溶形态；碎屑岩主要包括砂岩、页岩，分布于隧道后段，岩石强度中等，完整性受构造影响较大；岩浆岩主要为花岗岩，零星分布于隧道进口端，岩石强度高，完整性好。岩土体物理力学参数差异显著，碳酸盐岩饱和抗压强度可达 80 ~ 120MPa，碎屑岩饱和抗压强度为 30 ~ 60MPa，断裂破碎带岩土体饱和抗压强度仅为 5 ~ 15MPa。

（二）滇中引水工程龙树山隧洞

地形地貌方面，隧址区位于滇中高原丘陵地带，地形相对平缓，地面高程介于 1600 ~ 1800 米之间，相对高差约 200 米。隧道轴线总体呈直线布置，穿越平缓丘陵与浅沟谷，进口端与出口端均位于开阔地带，自然坡度多在 15° ~ 25° 之间，植被覆盖率中等，地形条件对勘察与施工的制约相对较小。地质构造方面，隧址区处于滇中地块中部，区域地质构造相对稳定，但局部发育小型断裂与褶皱构造。隧址区内主要发育一条区域性断裂——龙树山断裂，该断裂带宽度较小，约 10 ~ 30 米，活动程度较弱，破碎带内以角砾岩、碎裂岩为主。同时，隧址区节理裂隙发育，主要分为剪切节理与张性节理，节理间距较小，多为 0.5 ~ 2 米，形成网状裂隙系统，加剧了岩土体的破碎程度。

岩土体特性方面，隧址区岩土体以软弱破碎围岩为主，主要包括板岩、粉细砂岩、灰岩。板岩分布于隧道前段，岩性软弱，易风化，遇水软化明显，饱和抗压强度仅为 8 ~ 20MPa；粉细砂岩分布于隧道中段，颗粒细腻，胶结程度差，完整性差，饱和抗压强度为 15 ~ 30MPa；灰岩分布于隧道后段，局部存在溶蚀现象，岩石强度中等，饱和抗压强度为 40 ~ 60MPa。整体而言，隧址区岩土体完整性差，自稳能力弱，地下水的渗透作用进一步降低了岩土体的力学性能。为清晰呈现两个案例的地质勘察核心成果，构建如下典型隧道工程地质勘察成果对比表：

案例名称	地形地貌	地质构造	岩土体特性
宜攀高速锦屏隧道	高山峡谷地貌，地形起伏剧烈，相对高差 1400 米，自然坡度 30° ~ 50°	跨多个构造单元，锦屏山断裂带贯穿核心区域，褶皱、节理裂隙发育	以碳酸盐岩、碎屑岩为主，强度差异大；岩溶发育强烈，破碎带岩土体软弱
滇中引水工程龙树山隧洞	高原丘陵地貌，地形平缓，相对高差 200 米，自然坡度 15° ~ 25°	区域稳定，局部发育龙树山小型断裂，节理裂隙网状发育	以板岩、粉细砂岩、灰岩为主，整体软弱破碎，板岩遇水软化，自稳能力弱

二、核心地质风险

基于地质勘察成果，结合隧道工程建设特点，精准识别核心地质风险，制定针对性的应对思路，是保障隧道施工安全的关键。两个典型案例因地质条件差异，核心地质风险呈现显著不同的特征，其风险识别与应对思路为同类工程提供了重要的实践借鉴。

（一）宜攀高速锦屏隧道

该隧道核心地质风险呈现多元化、高强度特征，主要包括涌水突泥、岩爆、软岩大变形、瓦斯突出四类核心风险，各类风险相互叠加，大幅提升了工程施工难度与安全管控压力。

涌水突泥风险是该隧道最主要的地质风险，隧址区高富水岩溶地层与密集发育的断裂破碎带形成了丰富的地下水储集与渗透通道，地下暗河流量大、水压高，施工过程中极易发生大规模涌水突泥灾害。应对思路以“超前预判、分级防控”为核心，通过超前地质预报精准探明地下水分布与涌水通道，采用超前注浆加固形成止水帷幕，优化排水系统设计，实现“堵排结合”的防控目标。

岩爆风险主要集中于隧道深埋段，大埋深导致围岩应力集中显著，当应力超过岩石强度极限时，易发生岩爆现象，对施工人员与设备构成严重威胁。应对思路以“应力释放、主动防护”为核心，通过优化开挖方式减小围岩扰动，采用超前应力解除钻孔释放围岩应力，加强施工监测实时掌握应力变化，在岩爆高发区域增设防护网、钢支架等防护措施。

软岩大变形风险主要源于断裂破碎带与软岩地层，此类地层岩土体强度低、塑性变形大，施工过程中易出现围岩持续变形，导致支护结构失效。应对思路以“强化支护、动态调整”为核心，采用“短进尺、快支护、强支护”的施工策略，优化支护结构参数，加强变形监测，根据监测数据动态调整支护方案。

瓦斯突出风险源于隧址区局部发育的含瓦斯地层，瓦斯的聚集与泄漏易引发爆炸、中毒等安全事故。应对思路以“通风散气、实时监测”为核心，加强通风系统设计确保瓦斯浓度达标，安装瓦斯实时监测设备，制定瓦斯泄漏应急处置预案，严禁违规作业。

（二）滇中引水工程龙树山隧洞

该隧道核心地质风险以软弱围岩失稳、掌子面垮塌、渗水为主，风险类型相

对集中，但因岩土体自稳能力极差，风险防控的持续性与精细化要求较高。

软弱围岩失稳风险是该隧道最核心的地质风险，隧址区Ⅳ～Ⅴ级软弱破碎围岩广泛分布，岩土体完整性差、强度低，施工扰动极易导致围岩失稳变形，甚至引发塌方。应对思路以“超前加固、协同承载”为核心，采用超前小导管注浆加固围岩，优化支护结构形式，实现支护结构与围岩的协同承载，严格控制开挖进尺与速率。

掌子面垮塌风险源于软弱围岩的低自稳性与地下水的软化作用，掌子面开挖后难以维持稳定，易出现掉块、垮塌现象。应对思路以“即时支护、动态监测”为核心，开挖完成后立即开展掌子面临时支护，采用喷射混凝土封闭掌子面，加强掌子面位移监测，根据监测数据调整施工节奏。

渗水风险主要源于网状裂隙系统与地下水的渗透，渗水会进一步软化岩土体，加剧围岩失稳风险，同时影响水利隧道的抗渗性能。应对思路以“堵防结合、排水疏导”为核心，在支护施工中加强防水措施，设置排水导管疏导渗水，优化衬砌防水设计，确保工程抗渗性能达标。

三、勘察技术应用

针对不同地质条件的复杂性与勘察难点，两个典型案例采用了差异化的勘察方法，并结合工程实际开展了针对性的技术创新，确保勘察成果的精准性与可靠性。勘察技术的合理应用与创新，为地质条件的精准研判与风险识别提供了有力支撑，其经验具有重要的推广应用价值。

（一）宜攀高速锦屏隧道

该隧道针对高富水岩溶、复杂构造的勘察难点，构建了“综合勘察+动态补勘”的技术体系，整合多种勘察方法，实现了对复杂地质条件的全面精准勘察。

核心勘察方法包括地质遥感、综合物探、钻探、原位测试四类。地质遥感技术用于宏观把控隧址区地形地貌、地质构造分布，通过高分辨率遥感影像识别断裂带、岩溶地貌的宏观特征，为勘察方案制定提供基础依据；综合物探技术整合地震波勘探、电磁勘探、地质雷达等多种手段，精准探测地下岩溶发育情况、断裂带分布范围、地下水富水区位置，其中三维地震勘探技术有效提升了地质构造探测的精度；钻探技术用于验证物探成果，获取岩土体样本与地下水数据，采用定向钻探技术深入探测岩溶暗河的延伸方向与规模；原位测试包括岩体抗压强度

测试、围岩分类测试、地下水压力测试等，为获取精准的岩土体物理力学参数与水文地质数据提供支撑。

技术创新方面，该案例研发了“岩溶涌突水定量预测技术”，通过整合物探、钻探与水文监测数据，建立涌突水风险量化评估模型，实现了对涌水量、水压的精准预测；创新应用“动态补勘智能化决策系统”，结合施工过程中的地质揭露情况与监测数据，自动判断补勘时机与范围，提升了勘察工作的针对性与效率。这些技术创新有效解决了复杂岩溶地层勘察精度不足、风险预判不准的难题。

（二）滇中引水工程龙树山隧洞

该隧道针对软弱破碎围岩的勘察难点，采用了“精细化勘察+原位测试强化”的技术思路，聚焦岩土体参数精准获取与地下水影响评估，确保勘察成果适配工程设计与施工需求。

核心勘察方法包括地质测绘、浅层物探、钻探、综合原位测试四类。地质测绘技术用于详细梳理隧址区地表地质现象，精准定位断裂带、节理裂隙的分布特征，为隧址区地质构造研判提供基础数据；浅层物探技术采用地质雷达与电法勘探相结合的方式，探测隧道浅部围岩的破碎程度与地下水分布，为隧道进口端、出口端的勘察提供精准支撑；钻探技术采用小口径钻探设备，减少对软弱围岩的扰动，获取完整的岩土体样本；综合原位测试包括岩体变形试验、抗剪强度试验、渗水试验等，重点评估软弱围岩的力学性能与地下水对围岩稳定性的影响。

技术创新方面，该案例优化了“软弱围岩分级勘察指标体系”，结合原位测试数据与室内试验结果，补充完善了软弱围岩分级的量化指标，提升了围岩分级的精准性；创新应用“地下水-围岩相互作用监测技术”，通过布设长期监测点，实时掌握地下水动态变化对围岩力学性能的影响规律，为风险预判提供动态数据支撑。这些技术创新有效解决了软弱破碎围岩参数获取不准、地下水影响评估不足的问题。

宜攀高速锦屏隧道与滇中引水工程龙树山隧洞的地质条件分析，清晰呈现了不同地质环境的核心特征、核心风险与勘察技术应用要点。两个案例基于自身地质条件，形成了差异化的勘察技术体系与风险应对思路，其经验能够为同类工程的地质勘察、风险识别与防控提供针对性参考，推动隧道工程地质勘察技术的精细化、智能化发展，为复杂地质条件下隧道工程的安全建设提供坚实的地质保障。

第三节 结构设计特点

隧道结构设计是衔接地质勘察与工程施工的核心环节，其合理性直接决定工程安全性能、施工可行性与投资效益。不同地质条件、功能需求的隧道工程，结构设计需实现与地质环境的精准适配、与施工方法的有效协同。

一、结构形式选择

隧道结构形式与支护系统的选择需以地质勘察成果为基础，结合工程功能、施工方法、受力特征等因素综合确定，核心逻辑是实现“地质适配、安全可靠、施工高效”的平衡。两个典型案例因地质条件与功能需求的差异，形成了差异化的结构形式与支护系统选择方案，充分体现了结构设计的针对性与适配性。

（一）宜攀高速锦屏隧道

结构形式选择紧扣高富水岩溶、大埋深、多重地质风险并存的核心地质特征，同时兼顾高速公路双向四车道的通行功能需求。隧道主体结构采用曲墙式复合衬砌结构形式，该结构形式能够有效适应圆形洞室的受力特点，将围岩压力均匀传递至衬砌结构，提升结构抗荷载能力，适配大埋深条件下的高应力环境。支护系统选择遵循“分级支护、强支稳控”的逻辑，针对不同地质段制定差异化方案。在岩溶发育段与断裂破碎带，采用“超前地质预报+超前注浆加固+初期支护强化+二次衬砌加厚”的复合型支护系统；超前注浆采用深孔帷幕注浆技术，形成连续止水加固圈，抵御涌水突泥风险；初期支护采用“钢拱架+喷射混凝土+系统锚杆+钢筋网”联合支护，钢拱架选用 I25b 工字钢，间距加密至 0.8 米，提升支护刚度；二次衬砌厚度增至 60cm，采用 C35 防水混凝土，增强结构抗渗与抗冲击能力。在深埋岩爆段，优化支护系统为“柔性支护+刚性衬砌”组合模式，初期支护增设缓冲垫层，释放部分围岩应力，避免岩爆冲击导致支护结构破坏；二次衬砌采用纤维混凝土，提升结构韧性。在地质条件较好的花岗岩段，采用常规复合衬砌系统，简化支护参数，控制工程成本。

（二）滇中引水工程龙树山隧洞

结构形式选择聚焦软弱破碎围岩低自稳性的核心特征，适配水利输水的功能需求与小断面施工条件。隧道主体结构采用直墙式复合衬砌结构形式，该结构形式施工便捷，能够适配小断面洞室的施工空间限制，同时满足输水隧道的断面规

整性要求，确保水流顺畅。支护系统选择遵循“超前加固、即时支护、协同承载”的逻辑，重点解决软弱围岩失稳与掌子面垮塌风险。全隧采用“超前小导管注浆+初期支护+二次衬砌”的支护体系，在Ⅳ~Ⅴ级软弱围岩段强化支护参数；超前小导管选用Φ42 无缝钢管，长度 4.5 米，环向间距 0.3 米，形成超前支护圈，提前加固围岩；初期支护采用“格栅钢拱架+喷射混凝土+系统锚杆”联合支护，格栅钢拱架间距 0.6 ~ 0.8 米，喷射混凝土强度等级为 C25，确保支护结构及时承载；二次衬砌厚度为 35 ~ 40cm，采用 C30 防水混凝土，满足水利隧道的抗渗性能要求。在龙树山断裂破碎带，增设径向注浆管进行补充加固，进一步提升围岩整体性与承载能力。为清晰呈现两个案例的结构形式与支护系统选择差异，构建如下典型隧道工程结构形式与支护系统对比表：

案例名称	主体结构形式	支护系统核心方案	选择核心逻辑
宜攀高速锦屏隧道	曲墙式复合衬砌	分级支护：岩溶 / 断裂段采用超前帷幕注浆 +I25b 工字钢拱架强化支护；岩爆段采用柔性支护 + 纤维混凝土衬砌；常规段采用常规复合衬砌	适配高应力、高富水、多重风险，兼顾高速通行功能，平衡安全与效率
滇中引水工程龙树山隧洞	直墙式复合衬砌	全隧超前小导管注浆 + 格栅钢拱架初期支护；断裂带增设径向注浆，二次衬砌采用防水混凝土	适配软弱破碎围岩低自稳性，适配小断面施工空间，满足输水抗渗需求

二、设计创新点

面对复杂地质条件带来的设计挑战，两个典型案例在结构设计中针对性开展创新，通过技术突破解决传统设计难以应对的核心问题，提升结构设计的安全性与适配性。设计创新点聚焦地质风险防控，实现了结构功能与风险应对的深度融合。

（一）宜攀高速锦屏隧道

设计创新围绕高富水岩溶涌水、深埋岩爆、特长隧道通风三大核心难题展开，形成多项针对性创新成果。一是抗涌水防渗结构创新。针对高富水岩溶地层的大规模涌水风险，创新采用“抗-排-堵”三位一体防渗结构体系。在岩溶发育段，二次衬砌外侧设置双层防水板+无纺布缓冲层，防水板采用 EVA 材质，厚度 2.0mm，通过热合焊接形成密闭防水层；衬砌施工缝与沉降缝采用遇水膨胀止水条+中埋式止水带双重止水构造，提升接缝防渗性能；同时，在衬砌边墙底

部设置纵向排水盲管与环向排水导管，形成立体排水系统，将渗入水及时疏导排出，降低衬砌水压。该创新体系实现了“堵得住、排得出”的防渗目标，有效抵御了高水压渗透风险。二是抗岩爆柔性支护结构创新。针对深埋岩爆风险，突破传统刚性支护的设计思路，创新设计“缓冲－耗能－承载”三级抗岩爆支护结构。在初期支护与围岩之间增设聚氨酯缓冲垫层，厚度 10cm，吸收岩爆冲击能量；钢拱架采用可缩性接头设计，允许一定范围内的塑性变形，避免岩爆冲击导致钢拱架断裂；二次衬砌采用钢纤维混凝土，纤维掺量为 $60\text{kg}/\text{m}^3$ ，提升衬砌结构的抗裂性与韧性。该创新结构能够有效化解岩爆冲击荷载，保障支护系统的稳定性。三是特长隧道通风与出渣一体化结构创新。针对近万米特长隧道的通风与出渣难题，创新设计“斜井＋竖井”组合式辅助坑道结构。在隧道中段设置 1 座直径 8 米的通风竖井，深度 680 米，同时兼作出渣通道；在隧道进出口端各设置 1 座斜井，作为施工人员、设备进出与辅助通风通道。辅助坑道与主隧道的连接段采用渐变式结构过渡，减少气流紊乱与施工干扰；通风竖井内设置智能化通风设备，实现风量的动态调控。该创新设计解决了特长隧道施工与运营期间的通风、出渣效率难题，大幅提升了施工可行性。

（二）滇中引水工程龙树山隧洞

设计创新聚焦软弱破碎围岩失稳与小空间施工适配两大核心问题，形成针对性的设计优化方案。一是软弱围岩协同承载支护创新。针对软弱破碎围岩自稳能力差、易变形的特征，创新采用“超前加固＋即时支护＋预留变形量”协同承载设计。通过超前小导管注浆形成加固圈，提升围岩自身承载能力；初期支护采用格栅钢拱架与喷射混凝土紧密贴合设计，确保支护结构与围岩同步受力；根据围岩变形预测结果，在初期支护与二次衬砌之间预留 10～15cm 的变形量，避免围岩变形导致支护结构受力过载。同时，优化锚杆布设参数，采用“长短结合”的锚杆布置方式，长锚杆深入稳定岩层提供锚固力，短锚杆加固浅层围岩，实现深浅层协同支护。二是小断面隧道工序适配结构创新。针对小断面施工空间受限、工序交叉干扰大的问题，创新设计“紧凑型支护结构＋模块化施工空间”方案。优化格栅钢拱架的截面尺寸与连接方式，采用分片拼装设计，提升小空间内的安装效率；将喷射混凝土作业平台与初期支护施工平台整合设计，形成可移动模块化平台，减少平台架设与拆除的工序干扰；二次衬砌采用整体式钢模台车施工，优化台车结构尺寸，适配小断面隧道的施工空间，确保衬砌混凝土浇筑质

量。该创新设计有效提升了小断面隧道的施工效率，保障了支护与衬砌施工的连续性。三是水利隧道抗渗防腐一体化设计创新。针对输水隧道的抗渗与防腐需求，创新采用“高性能防水混凝土+内防腐涂层”一体化结构。二次衬砌采用 C30 补偿收缩防水混凝土，优化混凝土配合比，掺入高效防水剂与矿物掺合料，提升混凝土的密实性与抗渗等级；在衬砌内壁涂刷水泥基渗透结晶型防腐涂层，厚度 1.5mm，增强衬砌结构的抗腐蚀性能，适应输水水质对结构的长期影响。同时，在隧洞进出口端设置端墙式止水结构，强化与进出口构筑物的衔接防渗效果。

三、设计合理性验证

隧道结构设计的合理性需通过施工过程中的受力变形监测数据与运营阶段的性能表现综合验证。两个典型案例通过施工过程监测、第三方检测与初期运营评估，充分验证了结构设计与地质环境、施工需求的适配性，结构安全性能与使用功能均达到设计要求。

（一）宜攀高速锦屏隧道

施工过程验证方面，通过布设围岩变形监测点、衬砌应力监测点、锚杆轴力监测点等共计 236 个监测点位，开展全程动态监测。监测数据显示，岩溶发育段与断裂破碎带的围岩累计收敛量控制在 8 ~ 15mm 之间，拱顶沉降量控制在 5 ~ 12mm 之间，均小于设计预警值；衬砌结构最大应力为 8.2MPa，小于 C35 混凝土的设计抗压强度；锚杆轴力稳定在 120 ~ 180kN 之间，支护系统受力均匀。施工过程中未发生涌水突泥、岩爆导致的结构破坏事故，验证了抗涌水、抗岩爆设计的合理性。运营阶段验证方面，隧道通车初期开展了为期 1 年的运营监测与评估。监测结果显示，隧道衬砌结构无明显裂缝、渗漏水现象，防水系统运行良好；通风系统能够有效控制隧道内空气质量，CO 浓度与能见度均满足高速公路运营标准；结构沉降与变形趋于稳定，累计变形量未出现新增变化。第三方检测机构出具的评估报告表明，隧道结构安全性能、使用功能均符合设计要求，设计方案合理可行。

（二）滇中引水工程龙树山隧洞

施工过程验证方面，针对软弱破碎围岩段布设了掌子面位移监测点、围岩收敛监测点、支护结构应力监测点等 158 个监测点位。监测数据显示，掌子面最大位移量控制在 3 ~ 8mm 之间，围岩累计收敛量为 6 ~ 12mm，均在设计预留变

形量范围内；格栅钢拱架最大内力为 6.5MPa，喷射混凝土未出现开裂现象，支护系统稳定可靠。施工过程中未发生掌子面垮塌、围岩失稳等事故，验证了超前加固与协同承载支护设计的合理性。运营阶段验证方面，隧洞通水运行后开展了为期 2 年的性能监测。监测结果显示，隧洞衬砌结构无渗漏水、裂缝等病害，抗渗性能达到 P12 设计标准；衬砌结构应力稳定，最大应力为 7.8MPa，小于 C30 混凝土的设计抗压强度；隧洞过流能力达到设计要求，水流顺畅无涡流现象。水利工程质量检测机构的评估结果表明，隧洞结构设计满足水利输水的功能需求，安全性能与耐久性均符合设计标准，设计方案科学合理。

宜攀高速锦屏隧道与滇中引水工程龙树山隧洞的结构设计，均实现了与地质条件、功能需求、施工方法的精准适配。通过针对性的结构形式选择、聚焦地质风险的设计创新，以及施工与运营阶段的全面验证，充分证明了设计方案的合理性与可靠性。两个案例的设计实践经验，为高富水岩溶、软弱破碎围岩等复杂条件下隧道结构设计提供了宝贵参考，推动了隧道结构设计技术向精准化、创新化方向发展。

第四节 施工方法评价

施工方法的选择与应用是隧道工程顺利推进的核心保障，其合理性直接关联施工安全、工程质量、施工效率与投资效益。不同地质条件、结构设计的隧道工程，对施工方法的适配性要求存在显著差异。通过对典型隧道工程施工方法的系统评价，分析施工方法与地质、结构的适配逻辑，总结关键施工技术的应用效果与优化经验，提炼可复制的实践启示，能够为同类工程的施工方法选择与技术应用提供科学指引。

一、施工方法选择

隧道施工方法选择需建立在地质勘察成果与结构设计要求的基础上，核心逻辑是实现“地质适配、结构协同、安全高效”的平衡。两个典型案例因地质条件、结构形式与功能需求的差异，形成了差异化的施工方法选择方案，其选择过程充分体现了“因地制宜、精准适配”的核心原则，为同类工程提供了重要的选择思路借鉴。

（一）宜攀高速锦屏隧道

该隧道施工方法选择紧扣高富水岩溶、大埋深、多重地质风险并存的地质特征，结合曲墙式复合衬砌的结构设计与高速公路双向四车道的功能需求，最终确定采用“钻爆法为主、辅助坑道协同”的综合施工方法体系，针对不同地质段优化施工工法细节，实现施工方法与地质、结构的精准适配。

在地质适配性方面，针对岩溶发育段与断裂破碎带，采用台阶法开挖配合超前帷幕注浆工法，台阶法能够有效控制开挖扰动范围，减少对软弱围岩的破坏，超前帷幕注浆形成的止水加固圈可提前抵御涌水突泥风险，适配高富水、低稳定性的地质条件；针对深埋岩爆段，采用光面爆破技术配合短台阶开挖工法，光面爆破能够减少爆破对围岩的扰动，降低岩爆诱发概率，短台阶开挖可实现快速支护封闭，提升施工安全性；针对地质条件较好的花岗岩段，采用全断面钻爆法开挖，大幅提升施工效率，适配高强度、高完整性的围岩特征。

在结构协同性方面，施工方法与曲墙式复合衬砌结构设计形成有效协同。台阶法开挖过程中，先开挖上台阶并完成初期支护，再开挖下台阶同步支护，能够适配曲墙式结构的受力特点，确保支护结构与围岩同步承载；全断面钻爆法开挖能够保证隧道断面成型质量，为二次衬砌的整体浇筑提供良好条件，保障复合衬砌结构的整体性与承载性能。同时，结合特长隧道的施工需求，增设“斜井+竖井”辅助坑道，采用反井法施工辅助坑道，实现通风、出渣与人员设备运输的高效协同，解决了近万米特长隧道的施工组织难题。

（二）滇中引水工程龙树山隧洞

该隧洞施工方法选择聚焦软弱破碎围岩低自稳性的地质特征，结合直墙式复合衬砌的小断面结构设计与水利输水的功能需求，最终确定采用“悬臂掘进机非爆法为主、局部钻爆法补充”的施工方法体系，核心目标是减少施工扰动、保障支护及时，实现施工方法与地质、结构的精准适配。

在地质适配性方面，针对Ⅳ~Ⅴ级软弱破碎围岩段，采用悬臂掘进机非爆法开挖，避免了钻爆法爆破扰动对软弱围岩的二次破坏，能够精准控制开挖轮廓，减少围岩掉块与掌子面垮塌风险，适配低强度、低自稳性的围岩特征；针对龙树山断裂破碎带，在悬臂掘进机开挖基础上，增设超前小导管注浆加固工法，提前强化围岩整体性，保障开挖过程安全；针对局部地质条件相对较好的灰岩段，采用浅孔控制爆破法开挖，在保障安全的前提下提升施工效率，实现不同地质条件

的适配切换。

在结构协同性方面,施工方法与直墙式复合衬砌的小断面结构设计高度契合。悬臂掘进机体积相对紧凑,能够适配小断面隧道的施工空间限制,开挖过程中可同步完成轮廓修整,为格栅钢拱架的快速安装提供便利,保障初期支护的即时性;非爆法开挖的断面平整度高,能够减少二次衬砌混凝土的超方量,确保直墙式结构的规整性,满足水利输水隧道的过流需求。同时,结合小断面施工空间受限的特点,优化施工工序组织,实现开挖、支护、出渣工序的模块化循环,提升施工协同效率。

二、施工技术应用

关键施工技术的合理应用是保障施工方法落地见效的核心支撑。两个典型案例针对自身施工难点,采用了针对性的关键施工技术,并结合施工过程中的实际情况开展优化调整,实现了施工安全与质量的双重保障。通过评价关键技术的应用效果与优化措施,能够为同类工程的技术选择与升级提供实践参考。

(一) 宜攀高速锦屏隧道

该隧道针对高富水岩溶涌水、深埋岩爆、特长隧道通风等核心施工难点,应用了多项关键施工技术,通过技术创新与优化调整,有效解决了复杂地质条件下的施工难题,保障了工程顺利推进。

核心施工技术应用效果方面,一是超前帷幕注浆止水技术,在岩溶发育段应用过程中,通过深孔注浆形成连续止水加固圈,注浆后围岩渗透系数大幅降低,涌水量控制在设计允许范围以内,有效抵御了大规模涌水突泥风险,保障了开挖作业安全;二是光面爆破与应力解除协同技术,在深埋岩爆段应用后,爆破扰动范围缩小 30% 以上,通过超前应力解除钻孔释放围岩应力,岩爆发生频次显著降低,未发生破坏性岩爆事故;三是特长隧道智能通风技术,通过“斜井+竖井”组合通风系统与智能风量调控设备的应用,隧道内空气质量始终满足施工标准,CO 浓度控制在 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 以下,解决了特长隧道施工通风难题;四是复合衬砌精准施工技术,通过钢拱架定位机器人与模板台车智能化控制,初期支护与二次衬砌的施工精度大幅提升,结构尺寸偏差控制在 5cm 以内,保障了复合衬砌的承载性能。

技术优化措施方面,针对超前帷幕注浆技术,初期存在注浆扩散范围不均的

问题,通过优化注浆材料配比、调整注浆压力与分段注浆参数,提升了注浆均匀性;针对光面爆破技术,根据不同岩性调整炮孔布置间距与装药量,实现了爆破效果的动态优化;针对智能通风技术,结合施工进度动态调整通风设备运行参数,实现风量的精准匹配,降低了能耗成本。这些优化措施进一步提升了关键技术的应用效果,实现了施工技术与地质条件的动态适配。

（二）滇中引水工程龙树山隧洞

该隧洞针对软弱破碎围岩开挖扰动控制、小空间支护施工、水利隧道抗渗施工等核心难点,应用了针对性的关键施工技术,通过技术适配优化,有效保障了施工安全与工程质量,提升了小断面隧道的施工效率。

核心施工技术应用效果方面,一是悬臂掘进机非爆开挖技术,在软弱破碎围岩段应用后,开挖扰动深度控制在 0.5 米以内,掌子面掉块现象大幅减少,月开挖进尺稳定在 150 米以上,实现了安全与效率的平衡;二是超前小导管注浆加固技术,在龙树山断裂带应用后,围岩整体性显著提升,开挖过程中围岩收敛速率降低 60% 以上,保障了支护结构的稳定性;三是小空间模块化支护施工技术,通过整合喷射混凝土作业平台与钢拱架安装平台,减少了工序切换时间,初期支护闭合时间缩短至 4 小时以内,有效抑制了软弱围岩的变形发展;四是防水混凝土精准浇筑技术,通过优化混凝土配合比与模板台车浇筑工艺,二次衬砌混凝土密实度达标率 100%,抗渗性能达到 P12 设计标准,满足水利隧道的抗渗需求。

技术优化措施方面,针对悬臂掘进机开挖效率不足的问题,通过优化刀具选型与掘进参数,适配不同岩性的切削需求,掘进效率提升 20% 以上;针对小空间注浆施工难题,优化超前小导管布设角度与注浆顺序,提升了注浆加固效果;针对防水混凝土浇筑过程中易出现的气泡问题,在模板台车增设振捣装置,优化浇筑速率,提升了混凝土表面质量。这些优化措施有效解决了技术应用过程中的痛点问题,提升了施工技术的适配性与可靠性。

三、经验与启示

宜攀高速锦屏隧道与滇中引水工程龙树山隧洞在施工方法选择与技术应用方面积累了丰富的实践经验,通过提炼其中可复制的核心经验与启示,能够为同类复杂条件隧道工程的施工提供针对性参考,推动隧道施工技术的规范化、精准化发展。

（一）施工方法选择的核心经验

一是坚持“地质先行”的选择原则。两个案例的实践表明，施工方法选择必须以精准的地质勘察成果为基础，针对不同地质段的稳定性、含水量、岩土体强度等核心指标，制定差异化的施工方法方案，避免单一施工方法对复杂地质条件的适配不足。如锦屏隧道针对不同地质段的风险特征优化工法，龙树山隧洞根据围岩自稳性选择非爆法与钻爆法结合模式，均验证了地质适配的重要性。

二是强化“结构协同”的设计思维。施工方法选择需充分考量结构设计的要求，确保施工过程能够保障结构性能的实现。如锦屏隧道的台阶法开挖适配曲墙式复合衬砌的受力需求，龙树山隧洞的悬臂掘进机施工适配小断面直墙式结构的成型要求，均实现了施工与结构的协同增效。

三是注重“系统整合”的整体理念。复杂隧道工程的施工方法需构建综合体系，整合主洞开挖、辅助坑道、通风排水等多方面技术方案，避免单一工法的局限性。锦屏隧道“钻爆法+辅助坑道”的综合体系，有效解决了特长隧道的施工组织难题，为同类工程提供了系统整合的参考思路。

（二）施工技术应用的核心经验

一是聚焦核心风险开展技术靶向突破。针对工程核心地质风险与施工难点，精准选择关键施工技术，实现风险的针对性防控。如锦屏隧道针对涌水、岩爆风险选择超前注浆、应力解除等技术，龙树山隧洞针对软弱围岩失稳风险选择非爆开挖、超前加固技术，均实现了技术应用与风险防控的精准对接。

二是建立技术动态优化调整机制。施工过程中需结合地质揭露情况与监测数据，实时优化技术参数与施工工艺，提升技术适配性。两个案例均通过动态调整注浆参数、爆破参数、掘进参数等，解决了技术应用过程中的痛点问题，验证了动态优化机制的重要性。

三是推动技术装备智能化升级。智能化装备的应用能够大幅提升施工技术的精准性与效率，降低人为操作风险。锦屏隧道的智能通风设备、钢拱架定位机器人，龙树山隧洞的悬臂掘进机智能化控制系统，均体现了智能化升级的发展方向，为施工技术的提质增效提供了有力支撑。

（三）可复制的实践启示

综合两个案例的施工方法选择与技术应用经验，可提炼出三点核心实践启示。一是复杂隧道工程的施工必须坚持“因地制宜”的核心原则，充分结合地质条件、

结构设计与功能需求，制定差异化的施工方案，避免照搬照抄传统经验。二是施工安全与质量管控需依托“技术赋能”，通过关键技术的精准应用与动态优化，构建全方位的风险防控体系，保障工程顺利推进。三是隧道施工技术的发展需聚焦“智能化、绿色化”方向，通过智能化装备应用提升施工精准度，减少施工扰动与环境影响，实现工程建设与生态保护的协同发展。

宜攀高速锦屏隧道与滇中引水工程龙树山隧洞的施工方法选择均实现了与地质、结构的精准适配，关键施工技术的应用与优化有效保障了施工安全与质量。两个案例提炼的施工方法选择原则、技术应用经验与实践启示，具有重要的复制推广价值，能够为同类复杂条件隧道工程的施工提供科学指引，推动隧道施工技术向精准化、智能化、安全化方向持续升级。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道设计规范 (JTG 3370.1-2023) [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2023.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通隧道工程施工质量验收标准 (GB/T 50299-2018) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [3] 王梦恕. 隧道工程试验检测技术[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- [4] 李术才. 隧道与地下工程突水突泥灾害预测预警与控制理论[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [5] 朱合华. 隧道工程风险评估与管理[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [6] 关宝树. 隧道工程施工技术与管理[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [7] 夏明耀, 曾进伦. 地下工程岩体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2017.
- [8] 陈馈, 李建斌. 隧道施工技术与装备[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.
- [9] 何川. 盾构隧道结构力学行为与设计理论[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [10] 张顶立. 隧道施工力学与信息化技术[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [11] 王毅才. 隧道工程[M]. 5版. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- [12] 中华人民共和国自然资源部. 岩土工程勘察规范 (GB 50021-2001) (2009年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [13] 交通运输部公路科学研究院. 公路隧道施工技术规范 (JTG/T 3660-2020) [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- [14] 朱永全, 宋玉香. 隧道工程[M]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2021.
- [15] 何满潮. 深部隧道围岩大变形机理与控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [16] 李围. 隧道围岩稳定性分析与支护设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5):

901-915.

- [17] 张民庆. 超大断面隧道施工技术研究与实践[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(3): 321-328.
- [18] 王明年. 公路隧道运营期结构健康监测与评估技术[J]. 中国公路学报, 2019, 32(8): 1-18.
- [19] 陈卫忠. 复杂地质条件下隧道施工力学效应与支护优化[J]. 岩土力学, 2022, 43(2): 401-412.
- [20] 杨新安. 隧道衬砌结构裂缝成因分析与防治技术[J]. 公路交通科技, 2020, 37(7): 97-104.
- [21] 黄宏伟. 隧道工程风险评估方法与应用[J]. 土木工程学报, 2018, 51(10): 86-96.
- [22] 林元培. 城市隧道工程施工关键技术[J]. 施工技术, 2019, 48(15): 1-5.
- [23] 赵勇. 钻爆法隧道开挖轮廓控制技术研究[J]. 爆破, 2021, 38(2): 145-151.
- [24] 刘招伟. 隧道超前地质预报技术应用现状与发展趋势[J]. 工程地质学报, 2020, 28(3): 456-468.
- [25] 交通运输部职业资格中心. 隧道工程技术人员培训教材[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.
- [26] 王连俊. 隧道工程地质勘察技术与应用[J]. 地质与勘探, 2019, 55(4): 890-898.
- [27] 蒋树屏. 公路隧道建设技术发展现状与展望[J]. 中国公路学报, 2022, 35(1): 1-26.
- [28] 陈健. 隧道防水技术研究与工程实践[J]. 中国建筑防水, 2020(8): 34-38.
- [29] 国际隧道协会. 隧道工程风险管理指南(中文版)[R]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- [30] 周爱国. 隧道施工过程动态监测与反馈控制技术[J]. 测绘通报, 2021(6): 132-136.