

# 综合勘察方法在桥梁工程地质评价中的应用研究 ——以白沙洲长江桥跨青菱立交段特大桥工程为例

贺嘉备

(江苏科信岩土工程勘察有限公司, 江苏 南京 221000)

**摘要:** 为解决我国桥梁工程向复杂地质区域延伸时,传统单一勘察手段难以实现地质精准评价的问题,聚焦综合勘察方法的技术体系构建与工程应用研究<sup>[1]</sup>。通过集成遥感探测、地球物理勘探、钻探取样、原位测试等多元技术,搭建“空—天—地”一体化综合勘察模式,形成从宏观地质识别到微观参数获取的全维度勘察技术链<sup>[2]</sup>。结合岩溶地区桥梁工程实例开展实证分析,结果表明该综合勘察方法能有效提升不良地质体(如溶洞、软弱夹层)的识别精度,实现地质参数的定量表征,显著增强工程风险防控的针对性与有效性<sup>[3]</sup>。与传统单一勘察方法相比,该综合勘察体系在岩溶强烈发育区可将不良地质体的空间定位精度提高约30%~50%,实现了地质判识从定性到定量的跨越。构建了“宏观到微观、检测到验证”的多层级技术链,并提出针对岩溶地区的“阶段式、验证式”方法组合应用范式<sup>[4]</sup>。

**关键词:** 综合勘察方法;桥梁工程;复杂地质;地质评价;空天地一体化;风险防控

**中图分类号:** U445.4;TU997

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2026)03-0215-05

## Application of Comprehensive Survey Methods in Geological Evaluation of Bridge Engineering: A Case Study of the Baishazhou Yangtze River Bridge Crossing Qingling Interchange Super Major Bridge

HE Jiabei

(Jiangsu Kexin Geotechnical Engineering Investigation Co., Ltd., Nanjing 221000, China)

**Abstract:** To address the problem that traditional single survey methods are difficult to meet the demand for accurate geological evaluation when China's bridge projects extend to complex geological areas, this paper focuses on the construction of the technical system and engineering application of comprehensive survey methods. By integrating multiple technologies such as remote sensing detection, geophysical exploration, drilling sampling, and in-situ testing, an "air-space-ground" integrated comprehensive survey mode is established, forming a full-dimensional survey technology chain from macro geological identification to micro parameter acquisition. Empirical analysis is carried out in combination with bridge engineering cases in karst areas. The results show that this comprehensive survey method can effectively improve the identification accuracy of unfavorable geological bodies (such as karst caves and weak interlayers), realize the quantitative characterization of geological parameters, and significantly enhance the pertinence and effectiveness of engineering risk prevention and control. Compared with traditional single survey methods, this comprehensive survey system can improve the spatial positioning accuracy of adverse geological bodies by about 30% ~ 50% in areas with strong karst development, achieving a leap from qualitative to quantitative geological identification. The innovation of this article lies in the construction of a multi-level technology chain from macro to micro, detection to verification, and the proposal of a combination application paradigm of "stage based and verification based" methods for karst areas.

**Keywords:** comprehensive survey method; bridge engineering; complex geology; geological evaluation; air-space-ground integration; risk prevention and control

## 0 引言

桥梁工程地质评价是确保结构安全与耐久性的基础工作,尤其在岩溶发育、软土深厚等复杂地质条

收稿日期: 2025-11-24

作者简介: 贺嘉备(1990—),男,硕士,高级工程师,从事勘探技术研究工作。

件下,常规勘察方法易存在局限性<sup>[5]</sup>。在岩溶地区,传统依赖稀疏钻探的手段难以控制溶洞的空间展布,地球物探解译常具多解性,导致对岩溶发育规律、地基不均匀性及施工潜在地质风险(如塌陷、突水)的评估不足,成为制约桥梁基础选型与安全的关键瓶颈<sup>[6]</sup>。

1 综合勘察方法的技术体系

1.1 遥感与无人机测绘技术

遥感技术作为综合勘察体系的宏观勘察手段,具有覆盖范围广、信息获取快、不受地形限制等特点。在桥梁工程地质评价中,遥感解译能够快速识别大范围的地形地貌、地质构造、植被分布及水文网络等宏观地质环境信息。高分辨率卫星影像可提供桥址区地形起伏、河流发育、岩层出露及构造展布等基本信息,为后续详细勘察提供方向性指导<sup>[7]</sup>。

无人机测绘是遥感技术的重要补充,以其灵活性高、分辨率高、成本低的优势,在桥梁工程勘察中发挥着日益重要的作用。无人机通过搭载高分辨率相机、多光谱传感器或激光雷达等设备,能够快速获取桥址区的高精度三维地形数据。

1.2 地球物理勘探技术

地球物理勘探是综合勘察体系中的重要组成部分,主要包括地震反射法、高分辨率直流电法、电磁法等多种手段<sup>[8]</sup>。这些方法通过对地下岩土体的物理场特征进行测量,推断地质体的内部结构和分布特征,为钻探工作提供先导信息<sup>[9]</sup>。

而且地震勘探是工程物探中最为常用的方法之一,通过分析人工激发地震波在地下岩层中的传播特性,可以推断岩土层的厚度、埋深及物理力学性质。电法勘探则通过测量地下介质的电阻率差异来识别地质构造、含水层分布等特征<sup>[10]</sup>。在复杂地质条件下,多种物探方法的组合使用能够显著提高解释精度(见表1)。

1.3 钻探与现场试验技术

钻探是工程地质勘察中最为直接的技术手段,通过钻孔取样和原位测试,能够获取地下岩土体的实物样本和力学参数<sup>[11]</sup>。钻探技术包括钻孔、取心、取样等步骤,通过不同类型钻孔(如钻孔灌注桩、钻孔探井等)获取不同深度的地质样本。这些样本用于实验室分析,以确定土壤和岩石的物理力学性质、地质构造、地下水位等关键参数。

表1 综合勘察方法体系中的主要地球物理技术及其应用特点

| 技术方法  | 基本原理            | 适用条件            | 主要应用           | 局限性             |
|-------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 地震反射法 | 利用声波在不同岩层中的反射特性 | 各种岩土条件,深部勘察效果更佳 | 探测基岩面、断层、岩溶发育带 | 受地形振动干扰较大,成本较高  |
| 高密度电法 | 测量地下介质电阻率差异     | 适用于浅部地质勘察       | 划分岩土层、探测含水层、洞穴 | 受地下水矿化度影响较大     |
| 电磁法   | 利用岩层电磁特性差异      | 各种地形条件          | 探测断层、裂隙带、岩性分界  | 受电磁干扰影响精度       |
| 地质雷达  | 高频电磁波反射原理       | 浅部精细勘察          | 检测浅层洞穴、埋藏物、分层  | 探测深度较浅(一般<30 m) |

现代钻探技术已发展出一系列原位测试方法,如标准贯入试验、静力触探试验、压力板试验等,能够在钻孔过程中直接获取岩土体的力学参数<sup>[12]</sup>,这些原位测试数据避免了取样扰动的影响,更能真实反映岩土体的天然力学性质<sup>[13]</sup>。

1.4 室内试验与数值分析技术

室内试验是综合勘察体系中的重要环节,通过对钻探获取的岩土样本进行精细测试,获取其物理力学参数。室内试验主要包括岩石力学试验、土工试验和水质分析等。这些试验结果为地基承载力评估、基础设计以及施工质量控制提供了科学依据<sup>[14]</sup>。

而数值分析技术是现代工程地质评价的核心手段,其通过有限元法、离散元法、极限平衡法等计算方法,对岸坡的稳定性、应力应变分布以及失稳后的运动堆积过程进行模拟计算。

1.5 多源数据融合与协同验证机制

上述“空一天一地”多元技术并非孤立运用,而是遵循“区域扫描、重点探测、精准验证、定量评价”的逻辑进行集成。其核心在于建立多源数据的协同验证与融合机制:首先,利用遥感与无人机测绘进行宏观地质背景识别与靶区圈定;其次,基于物探手段对靶区进行面状或剖面式扫描,初步揭示地下异常体的空间形态;随后,以钻探与原位测试对物探异常进行“点”上的精准揭露与验证,获取定量的岩土力学参数与地质边界真实信息,同时校正物探解译的多解性;最后,室内试验与数值分析对所有勘察数据进行综合集成与模型化分析,实现地质体与工程参数的三维数字化表征。这一流程形成了“面—线—点”逐级聚焦、探测与验证闭环迭代的技术链路,确保了地质评价成果的可靠性与精度。

## 2 综合勘察方法在岩溶地区桥梁工程地质评价中的应用

### 2.1 综合勘察方法体系的构成与选择依据

本体系主要由地质测绘与调查、地球物理勘探、钻探技术、水文地质试验及现代监测技术等构成。这些方法相互补充、验证,形成了一套多层次、全方位的勘察体系。

(1)地质测绘与调查是基础工作,通过野外地质调查、遥感解译和地形地貌分析,初步掌握岩溶发育的宏观规律和地质背景<sup>[15]</sup>。

(2)地球物理勘探是岩溶勘察的关键技术,主要包括高密度电阻率法、地震勘探、地质雷达、等值反磁通瞬变电磁法等,这些方法具有覆盖面广、效率高的优点,但解译存在多解性,需结合其他方法验证<sup>[16]</sup>。例如,高密度电阻率法通过测量地层电阻率差异识别溶洞(完整灰岩电阻率通常 $>100\ \Omega\cdot\text{m}$ ,而充填溶洞 $<53\ \Omega\cdot\text{m}$ );等值反磁通瞬变电磁法对浅部岩溶探测效果显著;跨孔电磁波 CT 技术则能精细刻画钻孔间岩溶发育情况。

(3)钻探技术是获取地下地质信息的直接手段,能提供精确的岩土体结构、岩溶发育情况和物理力学参数,在岩溶地区钻探通常遵循“阶段式推进”原则,从初步控制性钻孔到详细勘察阶段的加密钻孔,乃至施工阶段的“一桩一孔”或“一桩多孔”。

(4)水文地质试验在岩溶地区尤为重要,因为岩溶发育与地下水活动密切相关。通过水位观测、抽水试验、连通试验和水化学分析等方法,可以查明地下水分布、流向、流速及其对岩溶发育和桥基稳定性的影响。

(5)现代监测技术如分布式光纤传感、InSAR 和微震监测等,可用于岩溶发育过程的长期监测,为桥梁运营安全提供预警<sup>[17]</sup>。

选择综合勘察方法时,需考虑岩溶发育程度、工程阶段、场地条件和经济性等因素。初勘阶段以地质测绘和区域地球物理勘探为主;详勘阶段侧重精细物探和钻探验证;施工阶段则根据需要进行补充勘察和监测<sup>[18]</sup>(见表 2)。

### 2.2 各勘察阶段的方法应用与技术要求

岩溶地区桥梁工程地质勘察通常分为初步勘察、详细勘察和施工勘察三个阶段,各阶段目标不同,采用的综合勘察方法和技术要求也有所差异。

表 2 岩溶地区桥梁工程常用综合勘察方法及其特点

| 勘察方法   | 主要技术手段                | 适用性与优势             | 局限性             |
|--------|-----------------------|--------------------|-----------------|
| 地质测绘   | 遥感解译、现场调查             | 宏观把握岩溶发育规律,成本低     | 无法揭示地下深部情况      |
| 地球物理勘探 | 高密度电法、地震勘探、地质雷达、跨孔 CT | 覆盖面广,效率高,多种方法可互补验证 | 解释存在多解性,受地形地物限制 |
| 钻探     | 岩芯钻探、取样测试             | 直接可靠,提供精确地质参数      | 成本高,效率低,一孔之见    |
| 水文地质试验 | 水位监测、抽水试验、连通试验        | 揭示水文地质条件,评价岩溶活动性   | 周期较长,受季节性影响     |
| 监测技术   | 光纤传感、InSAR、微震监测       | 长期监测,实时预警          | 成本较高,需要长期维护     |

(1)初步勘察阶段:旨在宏观了解桥址区的工程地质条件,初步评价场地稳定性和适宜性。主要采用地质测绘、遥感解译和区域地球物理勘探(如高密度电法、大地电磁法)等方法,圈定岩溶发育重点区,为详细勘察提供方向。此阶段钻孔布置较少,以控制性钻孔为主。

(2)详细勘察阶段:在初勘基础上,针对重点区域进行精细探测,查明岩溶的空间分布、规模、填充情况等。通常采用加密地球物理勘探(如地质雷达、跨孔 CT)、钻探(钻孔布置在墩台位置,通常一墩两孔或逐桩布孔)和水文地质试验等方法。钻探深度需进入稳定基岩一定深度(通常不小于 5 m 或 3~5 倍桩径),并对岩芯进行编录和测试。

(3)施工勘察阶段:在施工过程中进行补充勘察,解决详细勘察未查明的隐患或验证处理效果<sup>[19]</sup>,常采用施工钻探、钎探、孔内电视和弹性波 CT 等方法,重点关注桩位处的岩溶情况,指导基础施工和处理<sup>[20]</sup>。

各阶段勘察工作应遵循“由面到点、由粗到细”的原则,前后阶段相互衔接,后续阶段应验证和补充前期成果。勘察过程中需注重多种方法的综合应用和相互验证,以提高勘察成果的准确性。

### 2.3 基于综合勘察结果的岩溶发育规律分析

基于综合勘察获取的多源数据,可以系统地分析岩溶发育规律,包括其空间分布特征、垂直分带性及受地质构造控制的特点,为桥梁工程设计和处理提供地质依据。

(1)空间分布特征:岩溶发育在平面上往往呈带状分布,其方向与区域地质构造线(如断层、裂隙走向)基本一致<sup>[21]</sup>。

(2)垂直分带规律:岩溶发育程度随深度增加而



减弱,并呈现一定的成层性,这通常与地质历史时期的地下水位变动和侵蚀基准面有关。

(3)地质构造控制规律:断裂带、褶皱轴部等构造脆弱带是岩溶强烈发育的部位。此外,岩性也是控制岩溶发育的重要因素,纯灰岩地区岩溶通常比泥质灰岩地区更发育。

对岩溶发育规律的准确分析,有助于预测潜在岩溶灾害风险,指导桥梁墩台位置的优化选择,并为基础设计和处理提供针对性方案。

3 工程应用案例与分析

3.1 工程概况与勘察背景

白沙洲长江桥跨青菱立交段特大桥位于湖北省武汉市,全长3 126.285 m,桥跨结构复杂,包含简支箱梁、连续梁、连续刚构等多种形式<sup>[22]</sup>。桥址区地貌属汉江冲积平原,地形平坦,地面高程20.0~26.0 m,地表分布人工填土、淤泥质黏土、砂层及下伏基岩。该工程面临的主要地质问题包括厚层软土、岩溶强烈发育、地下水丰富等复杂条件。勘察工作分阶段进行(2019年初测至2025年补充定测),采用综合勘察方法,旨在为桥梁基础设计提供精准地质参数。

3.2 综合勘察方法的应用与成果

本项目采用“遥感解译+地质测绘+钻探+物探+原位测试”的综合技术体系,具体应用如下。

(1)遥感与地质测绘:通过1:2 000工程地质测绘(测绘范围线路两侧500 m)和高分辨率卫星影像解译,初步识别不良地质分布范围,发现桥址区DK0+000~DK1+600段与青菱河并行,存在软土和岩溶潜在地段。

(2)钻探与原位测试:完成了钻探工作量为21 967.43 m/236孔,并结合1 799次标贯试验、612次动力触探试验,精确划分地层结构。钻探揭示岩溶发育区见洞率达75.58%(172个可溶岩钻孔中130个见溶洞),溶洞高度0.2~43.1 m,线岩溶率19.05%,属强烈发育等级。

(3)地球物理勘探:采用高密度电法、地震勘探等手段,辅助探测岩溶空间分布。物探结果显示灰岩区溶蚀裂隙发育,与钻探数据相互验证,减少了解译多解性。

(4)水文地质试验:通过7组地下水、5组地表水取样分析,判定DK0+960~DK1+250段地下水具H1级碳酸侵蚀性,为混凝土结构耐久性设计提供依据(见表3)。

表3 岩溶发育程度统计表

| 项目 | 可溶岩钻孔数/个 | 见溶洞钻孔数/个 | 见洞率/% | 最大溶洞高度/m | 线岩溶率/% | 发育等级 |
|----|----------|----------|-------|----------|--------|------|
| 数据 | 172      | 130      | 75.58 | 43.1     | 19.05  | 强烈发育 |

3.3 岩土工程地质条件评价

3.3.1 地层岩性与参数

根据钻探与试验数据,桥址区地层主要包括第四系填土、冲积层(淤泥质黏土、粉质黏土、砂层)及下伏基岩(泥质砂岩、灰岩)。

关键岩土参数如下。

(1)软土层:②<sub>2</sub>淤泥质黏土厚度2.2~11.4 m,天然孔隙比0.83,承载力仅80 kPa,易导致桩基缩孔。

(2)岩溶发育区:灰岩(⑦<sub>2-3</sub>层)饱和抗压强度35.42 MPa,但溶洞充填物性质差,易引发施工塌孔。

(3)砂层:②<sub>7-2</sub>细圆砾土动力触探击数标准值14.27,承载力300 kPa,但透水性强,施工需防渗流塌孔(见表4)。

表4 主要岩土层力学参数建议值

| 地层代号                     | 抗压试验干燥/MPa | 抗压试验饱和/MPa | 基本承载力/kPa | 岩土工程施工分级 |
|--------------------------|------------|------------|-----------|----------|
| ⑤ <sub>2-2</sub> 强风化泥质砂岩 | —          | —          | 300       | Ⅲ        |
| ⑤ <sub>2-3</sub> 弱风化泥质砂岩 | 6.25       | 2.76       | 400       | Ⅳ        |
| ⑦ <sub>1-3</sub> 弱风化泥岩   | —          | —          | 450       | Ⅳ        |
| ⑦ <sub>2-3</sub> 弱风化灰岩   | 45.06      | 35.42      | 800       | Ⅴ        |

3.3.2 不良地质与抗震评价

(1)岩溶塌陷风险:根据《铁路工程不良地质勘察规程》评分,6~11号墩、15~20号墩为易塌陷区,需采用钢护筒跟进并结合回填法等措施进行防控。对于施工中揭露的溶洞,根据其规模及填充情况,采用回填法以形成稳固的桩基持力层,因为回填法适用于溶洞较为独立且施工工期较紧张的工程,通过钻孔将片石等填料自上而下依次填充夯实,回填材料为片石、碎石、混凝土,回填法工艺的示意如图1所示。

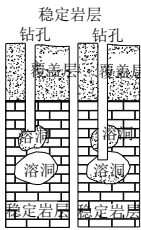


图9 桥梁实景图

(2)场地抗震性:基本地震动峰值加速度0.05g,场地类别以Ⅲ类为主(DK0+650~DK0+950段为Ⅳ类),软土震陷风险低,但需考虑桩基抗震设计。

### 3.4 室内试验与数值分析技术

在综合勘察体系中,室内试验与数值分析为地质评价提供了重要的定量化支撑。本项目通过系统的室内试验,对钻探获取的岩土样本进行精细测试,获取了各类岩土体的物理力学参数。其中对软塑粉质黏土进行了30组物理性质试验,揭示其天然孔隙比为0.8,压缩系数为0.36;对硬塑粉质黏土进行了50组剪切试验,测得内摩擦角达18.38度。岩石试验方面,对弱风化泥质砂岩和灰岩分别进行了干燥与饱和状态下的单轴抗压试验,为桩端承载力计算提供了关键依据。

数值分析技术在本项目中得到深入应用,采用有限元法对桩基-岩土相互作用进行模拟,评估了不同荷载条件下桩端溶洞顶板稳定性。通过极限平衡法对岩溶塌陷风险进行分级预测,定量评价了6~11号墩岩溶易塌陷区的安全风险。数值分析结果与现场勘察数据相互验证,为桩基嵌入深度设计和溶洞处理方案提供了科学依据,实现了地质条件从定性判断到定量评价的跨越。

### 3.5 综合勘察的工程指导价值

本案例中,综合勘察方法的应用明确了3大关键问题:

(1)桩基持力层选择:推荐以弱风化泥质砂岩(承载力400 kPa)或灰岩(承载力800 kPa)为持力层,桩端需穿越溶洞并进入完整基岩一定深度。

(2)施工风险预警:指出岩溶区桩基施工可能诱发地面塌陷,建议采用泥浆护壁、跟进套筒等工艺。

(3)环境影响控制:发现地下水抽取可能影响周边民井,要求施工中避免大范围抽水,防止污染扩散<sup>[23]</sup>。

## 4 结 语

总而言之,研究表明,本文构建的“空一天一地”一体化综合勘察方法体系,在岩溶地区桥梁工程地质评价中有效提升了不良地质体识别精度与参数定量化水平,为工程风险防控提供了关键技术支撑。该方法的普适性价值在于其多层次、多技术协同的逻辑框架,使其能够迁移至其他复杂地质条件下的桥梁工程勘察。例如,在深厚软土区,可侧重无人机遥感识别地表沉降趋势,结合静力触探与十字板剪切试验精细评价土层力学特性;在活动断层带,则需强化高密度电法与地震反射剖面探测,配以跨孔CT技术厘定断裂空间展布及活动性。其核心调整原则

在于针对主导地质问题动态优化技术组合,即基于区域地质特征与工程阶段,差异化配置遥感、物探、钻探等技术权重,并坚持“探测—验证—融合”的技术路径。未来,应加强综合勘察方法与智能化技术的深度融合,推动勘察成果向全生命周期地质信息服务延伸,从而提升各类复杂地质环境下桥梁工程的本质安全与韧性。

#### 参考文献:

- [1] 李晓茜.大跨径桥梁区域稳定性及工程地质灾害评价方法[J].中国公路学报,2020,33(8):98-107.
- [2] 何钱生.多源数据融合的升压站设备工况自适应巡检方法[J].电器工业,2025(12):71-75.
- [3] 王宇鹏.煤矿防爆装备温升试验多源数据融合技术研究[J].煤矿机械,2025,46(12):90-92.
- [4] 汪永红,朱李英,凌佳.岩溶区某特大桥桥梁基础地质勘察分析[J].四川水泥,2024(10):199-201.
- [5] 陈铁峰.基于BIM施工模拟的公路桥梁工程智能信息化管理监测应用[J].建设机械技术与管理,2025,38(5):122-123;132.
- [6] 李晓兵.桥梁岩土工程地质勘察技术分析[J].江苏建材,2024(2):108-110.
- [7] 张迪.公路桥梁工程地质勘察中遥感与物探技术协同应用[J].中外公路,2025,45(3):151-153.
- [8] 陈维市,张兴杰,戴天星,等.高密度电法在湖南某地岩溶物探勘察中的应用[J].勘察科学技术,2025(4):76-78;86.
- [9] 周彬.智能建造技术在道路与桥梁工程中的应用探索[J].时代汽车,2025(17):190-192.
- [10] 张琪.岩溶地区桥梁基础地质勘察技术优化与设计方法[J].低碳世界,2025,15(3):142-144.
- [11] 李强,秦余顺.中老铁路桥梁桩基岩溶处理施工技术研究[J].中国岩溶,2019,38(4):607-611.
- [12] 吴志坚,谷雷雷,沈薇.软土地区桥梁桩基变形规律与预警模型研究[J].岩土工程学报,2022,44(增刊1):189-193.
- [13] 黄俊,徐树斌,刘栋,等.综合物探在徐州地铁岩溶勘察中的应用[J].勘察科学技术,2025(3):82-86.
- [14] 冯忠居,武敏,何静斌,等.陡坡一岩溶耦合作用下公路桥梁桩基极限承载力的计算[J].公路,2021,66(1):115-121.
- [15] 王瑞虎,白兰兰.强烈岩溶发育区的桥梁勘察与设计[J].灾害学,2018,33(增刊1):183-188.
- [16] 汪永红,朱李英,凌佳.岩溶区特大桥桥梁基础地质勘察数据融合技术[J].工程勘察,2024,52(10):1-6.
- [17] 刘进.桥梁工程中的智能化监测与维护系统研究[J].中国高新技术,2024(8):69-71.
- [18] 李聪.山区桥梁横向陡坡段桥台处地质勘察设计要点[J].产业创新研究,2024(6):127-129.
- [19] 熊亮,尹峰.岩溶区铁路桥梁基础设计与施工技术[J].铁道工程学报,2009,26(3):23-26.
- [20] 姚宏生,冯忠居,袁展,等.岩溶发育区特大桥桥梁基础施工技术研究[J].施工技术,2017,46(19):130-133.
- [21] 张景桥.岩溶地质桥梁基础设计[J].铁道标准设计,2008(2):56-58.
- [22] 张迪.公路桥梁工程地质勘察技术分析[J].低碳世界,2025,15(3):151-153.
- [23] 夹卫民.桥梁与隧道工程施工质量控制措施研究[J].运输经理世界,2024(28):105-107.