

物流廊道隧洞及桁架监测关键技术

郑显辉 李学凯 聂 斌

中国水利水电第三工程局有限公司 陕西 西安 721000

摘 要：本文介绍了隧洞施工监控量测的总体要求、方案制定、选测项目、数据处理与反馈、管理机构及职责以及经验总结与展望。报告强调了隧洞及桁架监测的重要性，特别是在物流业快速发展的背景下，确保物流廊道的安全、稳定和高效运营。阐述了监测技术在隧洞施工中的应用，包括监测设备的布置、测量定位、监测方案的优化、新工艺方法的研究以及监测数据的整理、分析与反馈。提出了监控量测管理机构的职责和对未来隧洞监测技术发展的展望。

关键词：物流廊道；监测；数据处理

1 绪论

1.1 项目背景

物流业的快速发展使得物流廊道的安全、稳定和高效运营变得至关重要。隧洞和桁架作为廊道的关键部分，其健康状况直接影响物流畅通。因此，监测物流廊道隧洞及桁架的健康状况具有重要现实和长远意义。

以中电建（广宁）绿色矿业有限公司木格坪田矿项目为依托，利用高精度GPS定位、GPRS和远程监控设备，实现对物流廊道运输隧洞内皮带运行及外部桁架的全方位监测。解决皮带机、桁架定位安装、皮胶廊道、桁架运行安全监测问题。主要目标是建立和完善物流廊道隧洞及桁架监测系统，实现关键结构实时监控，提高结构安全性和可靠性，确保物流通道正常运营。

1.2 国内外研究现状

监测系统研究涉及测量原理、信号传输、数据处理算法及应用领域。国内研究侧重传统传感器与信号处理技术，而国外则利用新型传感器和物联网技术开发高精度系统。国内科技的快速进步正缩小与国际技术的差距，部分领域已领先世界。

国内物流廊道监测技术随着行业发展取得进展，与国际技术差距缩小，某些方面已领先全球。研究重点为传感器网络、GIS和物联网技术应用。GIS在物流廊道可视化分析中支持决策，同时探索人工智能算法以提高监测系统的效率和精度。为提升物流廊道监测技术，需加强跨学科合作，攻关核心技术，推动产学研结合，缩小理论与实践的差距，促进技术创新转化为实际应用，助力物流行业高效发展。

2 隧洞监测技术

2.1 隧洞变形监测

2.1.1 位移监测方法

在隧道工程中，监测隧洞结构位移对评估其稳定性和安全性至关重要。现代技术如全站仪、收敛计、光纤光栅传感器（FBG）、全球导航卫星系统（GNSS）和无人机电载激光扫描仪（LiDAR）等，已被用于高精度、实时数据采集。这些技术提升了监测的效率和准确性，有助于确保工程安全和延长使用寿命。

例如，FBG传感器能将形变转化为光学信号，精确捕捉位移变化。GNSS在大范围监测中具有优势，而DTS/DAS技术适用于监测深埋隧洞的围岩变形。LiDAR技术则能快速生成高精度三维点云数据，支持结构形态变化分析。结合多种技术，可构建全面监测体系，提高监测结果可靠性，为风险评估和决策提供详实数据。

通过引入先进的传感技术和数据分析方法，可以有效提升隧洞位移监测的效率与准确性。这对于确保隧洞工程的安全运行以及延长其使用寿命具有重要意义。未来，随着技术的进一步发展，相信这些方法将在更多实际工程中得到广泛应用^[1]。

2.1.2 沉降监测技术

沉降监测技术对隧洞工程至关重要，旨在获取结构垂直位移数据，评估稳定性和安全性。多种技术方案已发展，各有适用场景。

传统水准测量精度高，但效率低，易受环境影响。自动化全站仪和GNSS可实现连续实时监测，适合长距离或复杂地形。全站仪能高频率测量，GNSS提供全天候定位服务。

光纤传感和InSAR技术是新兴方法。光纤传感可沿隧洞布置传感器阵列，捕捉高分辨率沉降信息。InSAR基于微波干涉，实现大范围高精度监测，对评估隧洞上方稳定性重要。

选择沉降监测技术需考虑地质条件、施工需求、成

本和精度要求。软弱围岩地区需高频率监测。多技术融合可提高监测结果的可靠性和准确性。

深入分析沉降数据可评估隧洞结构稳定性，为维护管理提供依据。数据分析涉及复杂模型和统计方法，揭示风险因素。沉降监测技术进步推动隧洞工程发展，保障基础设施安全。

2.2 隧洞健康状态评估

2.2.1 裂缝检测技术

在隧道健康检测中，裂缝检测技术至关重要。图像识别技术的进步使得基于图像的自动裂缝检测方法受到关注，因其高效率和准确性。这些技术使用高分辨率摄像机捕捉隧道表面图像，并通过计算机视觉算法进行处理和分析，精确确定裂缝位置和评估其严重程度。

常用技术包括传统图像处理和深度学习模型。传统方法依赖边缘检测等技术提取裂缝特征，而深度学习方法如卷积神经网络（CNN）从数据中学习裂缝模式。深度学习在复杂背景下提供更高精度，但需要大量标注数据和计算资源。

使用无人机或机器人平台提高检测效率，覆盖更广泛的隧道表面，提高自动化程度。同时，需优化图像采集设备的稳定性和适应性，确保数据质量满足分析需求。

随着技术进步，裂缝检测自动化程度显著提高，为工程安全提供保障，推动技术革新。未来研究需解决深度学习模型对标注数据的依赖和降低计算成本，实现更广泛应用。跨学科合作和技术融合将是关键。

2.2.2 渗水监测系统

隧道工程中，渗水监测至关重要，为此设计了一套基于多传感器融合技术的系统，实时监测隧洞渗水状况。系统以分布式光纤传感器为核心，结合压力和湿度传感器，精确布置于关键部位，实现对渗水变化的捕捉。光纤传感技术用于连续监测温度和应变，而压力与湿度传感器则用于精确定位渗漏点。

系统引入数据融合算法和机器学习模型，如卡尔曼滤波和SVM或DNN，以减少环境干扰，预测渗漏风险，并在检测到异常时自动触发警报，传输信息至中央控制平台，确保及时应对。

针对不同渗水问题，需采取不同解决方案。例如，增设排水孔可缓解衬砌后水压积累，而结构性缺陷引起的严重渗漏则需注浆加固或衬砌修复。选择注浆材料时，需考虑地质条件，优化排水系统也是解决渗水问题的关键。

3 桁架监测技术

3.1 应力应变监测

3.1.1 传感器布置方案

在桁架结构应力应变监测中，传感器布置至关重要，需考虑结构受力特性和测量精度。建议优先在节点连接处和主要承载杆件中段布置传感器，因为这些区域应力集中，对理解结构力学行为关键。实际操作中，对称分布策略有效，可减少环境干扰，保证数据可靠性。有限元分析确定的高应力区域也应重点监测。传感器间距应根据结构尺寸和应变梯度调整，以确保数据密度反映真实应力变化。

为避免温度变化或振动等外部因素影响测量结果，安装传感器时需采取固定措施确保稳定性。这一步骤对获得高质量数据至关重要。最终传感器布置方案需根据实验条件灵活调整，包括传感器数量、位置和敏感度微调，以实现高效精确的数据采集。

3.1.2 数据校准方法

在进行工程测量时，数据校准扮演着至关重要的角色，它是确保测量结果具有高可靠性的关键步骤。数据校准过程涵盖了多种技术手段，其中包括零点漂移校正、温度补偿以及非线性修正等，这些方法的目的是为了尽可能地减少测量误差，并且提高测量的精度。

零点漂移校正是一种专门针对测量数据基线进行调整的技术，它能够有效地消除在测量过程中由于各种因素引起的漂移影响，特别是在那些对精度要求极高的高精度监测场合中，零点漂移校正显得尤为关键。而温度补偿技术则利用了温度与设备灵敏度之间的关系模型，通过这种模型来修正数据，从而降低因温度波动而产生的误差。在选择校准策略时，必须充分考虑所使用的设备特性以及实验的具体条件，因为不同的设备和条件可能需要不同的校准方法。在一些特定的应用场景，如隧道施工等，非线性修正显得尤为重要，因为这些场景下的测量数据往往表现出较为复杂的非线性特性。通过综合运用上述提到的多种校准技术，可以显著地提升数据的质量，这对于相关领域的科学研究和实际工程实践都具有重要的支持作用。

3.2 振动特性分析

3.2.1 动态响应监测

在工程实践中，桁架结构常常面临动态荷载的作用，这种作用对结构的安全性和稳定性具有决定性影响。为了深入理解桁架在不同工况下的表现，动态响应监测成为一种不可或缺的技术手段。通过实时采集和分析数据，可以评估桁架的振动特性、应力分布以及变形情况，从而为结构优化设计和健康评估提供科学依据。在此过程中，基于加速度传感器与应变片的组合测量方

法被广泛采用,这种方法能够有效捕捉动态荷载作用下关键参数的变化^[1]。

综上所述,通过对桁架结构动态响应的深入研究,不仅可以揭示其在复杂工况下的力学特性,还可以为工程实践中的优化设计提供重要参考。这一过程体现了现代工程科学中实验与理论相结合的重要性,同时也展示了多学科交叉在解决实际问题中的巨大潜力。需要注意的是,尽管当前技术已经取得了显著进展,但在极端条件下的监测精度和数据处理效率方面,仍需进一步探索和改进^[3]。

3.2.2 模态分析技术

在结构工程领域,模态分析技术被用来评估桁架的振动特性,其核心在于提取出结构的关键动态参数。通过结合有限元模型与实验数据,这项技术能够发现结构的损伤情况。在实际应用时,它需要精确的数据采集,并且要考虑到外部因素的影响,比如环境激励和材料特性的变化。

同时,根据模态参数的变化规律,建立一套科学且合理的健康监测指标体系。一旦结构出现局部损伤,其固有频率可能会发生明显的变化,而振型则可能表现出微小的偏差。这种现象为识别和定位结构损伤提供了关键的依据。另外,由于模态分析支持在多种工况下的适应性分析,它在复杂环境下的工程实用性也很高^[2]。

模态分析技术对结构的动态特性进行深入解析,为结构工程提供了重要的支持。它不仅展现了强大的功能,还推动了领域的发展。随着计算能力和传感器技术的不断进步,模态分析在未来将变得更加重要。深入研究和优化模态分析对于提高工程结构的安全性和可靠性是至关重要的。作为理论与实践的桥梁,模态分析在学术界和工业界都受到了高度的重视。

4 量测数据整理、分析与反馈

4.1 数据整理、分析

在物流廊道隧洞及桁架监测项目中,收集到的大量数据需经过系统整理和深入分析。首先,对原始数据进行清洗,剔除错误和异常值,确保数据质量。随后,利用统计软件或专用分析工具对数据进行整理,包括时间序列分析、空间分布统计等,以直观展示监测数据的变化趋势和分布特征。通过对比分析不同监测点的数据,可以识别结构变形、应力集中的潜在风险区域。进一步地,结合有限元模拟和理论计算,对监测数据进行深度解析,评估结构的安全性和稳定性,为后续的维护决策提供科学依据。

4.2 反馈及应用

在数据整理与分析的基础上,将结果及时反馈给设计和施工部门至关重要。一旦监测数据反映出异常变形或潜在风险,相关部门应立即响应,组织专家进行会诊,确定是否需要调整施工方案或加强支护措施。例如,如果发现围岩变形量接近或超过设计限界,应立即停止掘进作业,增加临时支撑结构,以确保施工安全。

同时,这些数据也为后续的施工决策提供了科学依据。设计部门可以根据监测结果调整隧道开挖的断面尺寸、支护参数等,以提高隧道的稳定性和安全性。施工部门则可以依据数据反馈,优化施工工序和工法,减少施工对围岩的扰动,确保施工质量和进度。

此外,整理和分析后的数据还可以用于科学研究和经验总结。通过对大量监测数据的统计分析,可以揭示隧道变形的规律和特点,为类似工程的监测和支护设计提供参考。同时,这些数据也可以作为工程验收和质量控制的重要依据,确保工程质量和安全。

5 经验总结与展望

在项目实施的过程中,通过对多个案例的深入分析可以发现,资源分配、团队协作以及技术选择等关键环节对最终成果具有深远的影响。具体而言,在资源分配方面,通过合理规划有限资源并结合动态优先级调整机制,能够有效确保项目的按时推进^[3]。

在工程实施过程中,确保隧洞与桁架结构的稳定与安全,需要依靠高品质的施工与不断的监测维护。本项目通过实践,积累了宝贵的现场监测经验,并掌握了先进技术的应用,对类似工程具有显著的指导意义。

展望未来,随着物联网、大数据以及人工智能技术的进步,隧洞和桁架的监测技术将得到革新。智能监测网络与实时数据分析能够迅速应对异常情况,增强应急处理的效率。通过机器学习算法深入分析监测数据,可以揭示潜在的风险,并为决策提供精确的支持。

我们同样期望在传感器技术、数据处理算法以及监测系统的集成方面取得突破,以进一步提高监测的效率和精确度,减少工程风险,延长结构的使用寿命,并为交通与物流行业的发展提供坚实的支持。

参考文献

- [1]曹雪,宋敏,吕海强,等.长距离隧洞引黄工程施工过程中安全监测研究[C]//2023年全国工程建设行业施工技术交流会.中建三局集团有限公司,2023.
- [2]张凌翔.城市地下道路、物流廊道与综合管廊一体化研究[J].地下空间与工程学报,2020,(s01):7-11
- [3]杨翎,陈建安.安徽池州神山物流廊道1#隧道出口段爆破开挖施工工艺[J].现代矿业,2018,000(3):222-224,227