

# 基于分布式光纤的铁路隧道衬砌变形动态感知方法

李 英

国能朔黄铁路原平分公司线桥检修中心 山西 忻州 034100

**摘 要:** 随着高速铁路的快速发展, 铁路隧道的安全运营成为至关重要的议题。隧道衬砌结构的变形监测对于保障隧道安全具有重要意义。本文提出了一种基于分布式光纤传感技术的铁路隧道衬砌变形动态感知方法, 详细阐述了该方法的实现过程, 并分析了面临的挑战及对策, 为铁路隧道衬砌结构的健康监测提供了新的思路和技术手段。

**关键词:** 铁路隧道; 衬砌变形; 分布式光纤传感技术; 动态感知; 健康监测

## 引言

铁路隧道作为高速铁路的重要组成部分, 其安全运营直接关系到列车的行驶安全和乘客的生命财产安全。隧道衬砌结构的变形是评估隧道安全状态的重要指标之一。传统的变形监测方法存在监测范围有限、精度不高、实时性差等问题, 难以满足现代高速铁路对隧道安全监测的高要求。分布式光纤传感技术以其长距离、高精度、实时性强的特点, 在隧道变形监测领域展现出巨大的应用潜力。

### 1 分布式光纤传感技术原理

分布式光纤传感技术是一种先进的监测手段, 其核心原理在于利用光纤中的背向散射效应与分布式定位技术的巧妙结合, 实现对待测光纤全长范围内的连续、分布式传感。具体而言, 当光脉冲在光纤中传播时, 会产生背向散射光, 这些散射光携带着光纤沿线的物理信息。其中, 布里渊光时域分析 (BOTDA) 技术作为该领域的佼佼者, 凭借其卓越的高精度和长距离测量能力, 在隧道变形监测等领域大放异彩。BOTDA技术通过精确测量光纤中布里渊散射光的频移量, 这一频移与光纤沿线的温度和应变紧密相关。通过对频移变化的细致分析, 可以实时、准确地获取光纤沿线的温度和应变分布信息, 进而对隧道衬砌结构的微小变形进行动态、连续的监测, 为隧道的安全运营提供有力保障。

## 2 基于分布式光纤的铁路隧道衬砌变形动态感知方法的实现

### 2.1 监测系统设计

基于分布式光纤传感技术的铁路隧道衬砌变形动态感知系统主要包括传感光缆、分布式光纤解调仪、数据采集与处理模块以及预警系统。(1) 传感光缆: 选择适合隧道环境的传感光缆, 用于感知衬砌结构的变形信息。(2) 分布式光纤解调仪: 负责将光纤中的散射信号转换为电信号, 并进行初步处理, 提取出温度和应变信

息。(3) 数据采集与处理模块: 对解调后的信号进行进一步分析, 利用特定的算法提取出变形量和变形速率等信息, 并存储于数据库中。(4) 预警系统: 根据预设的阈值, 对监测结果进行实时判断。当变形量或变形速率超过阈值时, 预警系统发出预警信号, 提醒相关人员采取必要的措施进行处理。

### 2.2 监测原理与步骤

#### 2.2.1 光纤布设

光纤布设是分布式光纤传感技术应用于隧道衬砌结构监测的第一步, 也是至关重要的一步。在选择传感光缆类型时, 需要根据隧道衬砌结构的特点和监测需求进行综合考虑。常见的传感光缆类型有碳纤维布封装应变传感光缆、铠装应变光缆等。碳纤维布封装应变传感光缆具有轻质、高强、耐腐蚀等优点, 适合用于需要长期、稳定监测的场合; 而铠装应变光缆则因其良好的抗压、抗拉性能, 更适用于环境恶劣、易受外力破坏的隧道段落。在布设光缆时, 应确保光缆能够紧贴衬砌表面或嵌入衬砌内部, 以便准确感知衬砌结构的变形信息<sup>[1]</sup>。对于表面铺设的光缆, 可以采用专用的粘合剂或夹具将其固定在衬砌上, 确保光缆与衬砌之间的紧密接触; 对于嵌入铺设的光缆, 则需要在衬砌施工时将光缆预先埋入, 确保光缆与衬砌材料的一体化。此外, 还需要考虑光缆的布设密度和长度, 以满足监测精度和范围的要求。

#### 2.2.2 数据采集

数据采集是分布式光纤传感技术的核心环节之一。在这一环节中, 分布式光纤解调仪扮演着至关重要的角色。解调仪定期向传感光缆发射光脉冲, 这些光脉冲在光纤中传播时, 会与光纤中的原子或分子发生相互作用, 产生背向散射光信号。这些散射光信号携带着光纤沿线的物理信息, 如温度、应变等。解调仪通过接收这些背向散射光信号, 并对其进行处理和分析, 可以测量出散射光的频移变化。频移变化与光纤沿线的温度和应

变紧密相关，是反映衬砌结构变形情况的重要指标。为了获得准确的频移变化信息，解调仪需要具备高精度的测量能力和稳定的性能，同时还需要对测量环境进行严格的控制和校准。

### 2.2.3 数据处理与分析

数据采集完成后，接下来是对采集到的数据进行处理和分析。这一环节的目标是从原始数据中提取出有用的信息，如变形量、变形速率等，以便对衬砌结构的健康状况进行评估和预测。数据处理的首要任务是去除噪声和干扰信号。在实际测量中，由于各种因素的影响，如光源波动、光纤损耗、环境噪声等，采集到的数据往往会包含一定的噪声和干扰信号。这些信号会对后续的数据分析产生负面影响，因此需要通过滤波、去噪等手段将其去除。接下来，利用特定的算法对处理后的数据进行进一步的分析和提取。常用的算法包括小波变换、卡尔曼滤波等。小波变换是一种时频分析方法，能够有效地提取出信号中的局部特征，对于处理非平稳信号具有显著优势；卡尔曼滤波则是一种递归算法，能够根据前一时刻的估计值和当前时刻的观测值，对系统的状态进行最优估计，适用于实时监测和数据处理。通过算法处理，可以得到光纤沿线的温度和应变分布信息，进而计算出变形量和变形速率等指标。这些指标是反映衬砌结构变形情况的重要参数，对于评估结构的健康状况和预测未来的变形趋势具有重要意义<sup>[2]</sup>。最后，将处理后的数据与历史数据进行对比和分析。通过对比不同时间点的监测数据，可以观察到衬砌结构的变形趋势和规律，为结构的维护和修复提供科学依据。同时，还可以结合其他监测手段和方法，如现场勘查、实验室测试等，对监测结果进行验证和补充，提高监测的准确性和可靠性。

### 2.2.4 结果展示与预警

数据处理与分析完成后，接下来是将监测结果以直观、易懂的形式展示出来，方便相关人员查看和分析。常用的展示形式包括图表、曲线等。图表可以清晰地展示出光纤沿线的温度和应变分布情况，以及变形量和变形速率等指标的变化趋势；曲线则可以直观地反映出监测数据随时间的变化情况，便于观察和分析结构的变形过程。除了结果展示外，预警系统也是分布式光纤传感技术的重要组成部分。当监测结果超过预设阈值时，预警系统会立即发出预警信号，提醒相关人员采取必要的措施进行处理。预警阈值的设定需要根据结构的实际情况和监测需求进行综合考虑，既要确保能够及时发现潜在的安全隐患，又要避免误报和漏报的情况发生。预警信号的发出方式可以多种多样，如声音报警、灯光闪

烁、短信通知等。这些方式可以根据实际需求和场景进行选择和控制，确保预警信号能够及时、准确地传达给相关人员。同时，还需要建立完善的预警响应机制，明确预警信号的接收、处理和反馈流程，确保在收到预警信号后能够迅速采取有效的措施进行处理和应对。

## 2.3 监测指标与要求

在隧道衬砌结构的健康监测中，明确而具体的监测指标是确保隧道安全运营的关键。

### 2.3.1 变形量

变形量是衡量隧道衬砌结构稳定性的重要指标之一。具体来说，关注的是隧道衬砌结构的绝对沉降量和水平位移量。这些变形量应严格控制在小于等于5mm的范围内，这一数值涵盖了各种加载和卸载条件下的最终位移量。这意味着，无论是在隧道施工期间，还是在运营过程中，由于各种因素（如地质条件变化、交通荷载等）引起的衬砌结构沉降和水平位移，都必须保持在这一安全范围内，以确保隧道的结构安全和运营稳定。

### 2.3.2 变形速率

除了变形量外，变形速率也是判断衬砌结构稳定性的重要依据。变形速率反映了衬砌结构变形随时间的变化情况。通过持续监测变形速率的变化，可以及时发现衬砌结构可能出现的异常变形或加速变形现象<sup>[3]</sup>。当变形速率突然增大，或超过预设的阈值时，应引起的高度重视，因为这可能意味着衬砌结构正面临某种不稳定因素或潜在的安全隐患。此时，应及时采取措施进行进一步的检查和评估，以确保隧道的运营安全。

### 2.3.3 其他指标

除了变形量和变形速率外，还有一些其他指标也应纳入隧道衬砌结构的监测范围。例如，隧道纵向变形曲线的曲率半径是一个重要的几何参数，它反映了隧道沿纵向的变形情况。隧道的相对变曲也是另一个需要关注的指标，它反映了隧道在不同位置处的相对变形情况。此外，施工因素引起的隧道外壁附加荷载也应被纳入监测范围，因为这些荷载可能对隧道的结构安全产生不利影响。通过全面、细致的监测，可以确保隧道的整体安全性能得到有效保障。

## 3 面临的挑战及对策

在隧道变形监测中，分布式光纤传感技术以其独特的优势逐渐成为该领域的主流技术之一。然而，随着技术的不断发展和应用范围的扩大，也面临着一些挑战。

### 3.1 面临的挑战

#### 3.1.1 光纤易受环境因素影响

隧道环境复杂多变，光纤作为传感元件，其性能极

易受到温度、湿度、振动等多种环境因素的影响。例如,温度的变化会导致光纤的折射率发生变化,进而影响光信号的传输特性;湿度的过大或过小都可能对光纤的涂层和包层产生损害,降低光纤的传输效率;振动则可能导致光纤产生微弯损耗,影响监测结果的准确性。这些因素的存在,使得分布式光纤传感技术在隧道变形监测中的应用面临一定的挑战。

### 3.1.2 数据处理复杂度高

分布式光纤传感技术产生的数据量巨大,这是因为光纤传感系统需要连续不断地采集和处理来自光纤沿线的散射光信号。这些信号包含了大量的温度、应变等信息,需要经过复杂的数据处理和分析才能提取出有用的监测结果。这就要求数据处理系统具备较高的计算能力和算法支持,否则将难以满足实时监测的需求。

### 3.1.3 标准化与规范化不足

目前,分布式光纤传感技术在隧道变形监测领域的应用尚处于初级阶段。由于缺乏统一的标准和规范,不同厂家、不同型号的光纤传感系统在性能、接口、数据格式等方面存在差异,这给技术的推广和应用带来了一定的困难。同时,缺乏标准化和规范化也使得监测结果的可比性和可靠性受到一定影响。

## 3.2 对策

针对上述挑战,提出以下对策:

### 3.2.1 优化光纤布设方式

为了减少环境因素对光纤的影响,需要根据隧道环境的特点和监测需求,设计合理的光纤布设方案。例如,在温度变化较大的区域,可以采用温度补偿光纤或特殊涂层的光纤来减少温度对监测结果的影响;在湿度较大的区域,可以采用防水性能好的光纤和光缆来保护光纤不受损害;在振动较大的区域,可以采用抗震性能好的光纤固定装置来减少振动对光纤的影响<sup>[4]</sup>。同时,还可以采用抗干扰能力强的传感光缆和光纤解调仪,提高监测结果的准确性。

### 3.2.2 提高数据处理效率

为了提高数据处理和分析的效率,可以采用先进的算法和计算技术。例如,可以利用小波变换、卡尔曼滤

波等算法对采集到的数据进行去噪、平滑和特征提取,提高数据的处理速度和质量。同时,还可以建立分布式光纤传感技术数据库,将处理后的数据进行存储和管理,实现数据的共享和再利用。这不仅可以提高数据处理的效率,还可以为后续的监测和研究提供有力的数据支持。

### 3.2.3 加强标准化与规范化研究

为了推动分布式光纤传感技术在隧道变形监测领域的标准化和规范化研究,需要积极参与相关标准和规范的制定工作。通过制定统一的标准和规范,可以明确光纤传感系统的性能要求、接口规范、数据格式等,促进不同厂家、不同型号的光纤传感系统的互操作性和兼容性。同时,还可以加强对监测结果的可比性和可靠性的研究,提高监测结果的准确性和可信度。这将有助于推动分布式光纤传感技术在隧道变形监测领域的广泛应用和发展。

## 结语

本文提出了一种基于分布式光纤传感技术的铁路隧道衬砌变形动态感知方法,详细阐述了该方法的实现过程,并分析了面临的挑战及对策。该方法具有长距离、高精度、实时性强的特点,能够为铁路隧道的健康监测提供有力的技术支持。未来,随着技术的不断发展和完善,该方法有望在更多领域得到应用和推广。同时,需要进一步加强光纤传感技术的标准化和规范化研究,推动其在工程实践中的广泛应用。

## 参考文献

- [1]梁斯铭,谢长岭,蒋儿,等.分布式光纤技术在隧道变形监测中的应用[J].隧道建设(中英文),2020,40(S1): 436-443.
- [2]任宇浩.基于分布式光纤传感技术的隧道衬砌结构变形及沉降特性研究[D].沈阳建筑大学,2023.
- [3]张泽尧.基于分布式光纤传感技术的隧道衬砌变形监测及评估研究[D].石家庄铁道大学,2022.
- [4]马卓,方忠强,张丹,等.隧道接缝三维变形分布式光纤智能感知方法[J].隧道建设(中英文),2023,43(03):514-520.