

轨道交通基础设施健康监测中的光纤光栅传感器布局优化

刘妮娜 方玉驰 张博源

南京铁道职业技术学院轨道交通综合实训部 江苏南京 210031

摘要: 本文聚焦轨道交通基础设施健康监测中的光纤光栅 (FBG) 传感器布局优化。先阐述典型基础设施结构特性与监测指标、FBG 传感器原理特性及布局优化理论基础。接着构建多目标布局优化模型, 明确目标与约束条件, 定位敏感区域。然后介绍基于智能算法的求解实现, 包括算法选型改进、求解流程设计及不同基础设施布局方案生成, 为轨道交通基础设施长期稳定运行提供保障。

关键词: 光纤光栅传感器; 轨道交通; 结构健康监测

引言

轨道交通作为城市交通骨干, 其基础设施安全至关重要。健康监测是保障安全的关键手段, 而光纤光栅 (FBG) 传感器因高精度、强稳定性等优势, 成为监测核心部件。但传感器布局不合理会导致数据不准确、成本增加。因此, 开展 FBG 传感器布局优化研究, 综合考虑监测效果、成本与维护便利性, 构建科学合理的布局优化模型, 对提升轨道交通基础设施健康监测水平意义重大。

一、轨道交通基础设施监测与 FBG 传感器核心基础

(一) 典型基础设施结构特性与监测指标

轨道交通典型基础设施涵盖桥梁、隧道、轨道结

构及路基等, 各类结构特性差异显著且直接决定监测重点。桥梁结构中, 梁式桥以抗弯承载为主, 存在跨中挠度与梁体裂缝发展风险; 刚构桥因墩梁固结, 墩柱与梁体连接处易产生应力集中; 斜拉桥则需关注拉索张力衰减与塔柱变形。隧道结构受地质条件与运营荷载影响, 衬砌结构易出现渗漏水、剥落及结构沉降, 拱顶与边墙是应力变形关键区域。轨道结构中, 钢轨需承受轮轨动力荷载, 存在磨损、伤损及位移问题, 轨枕与道床的稳定性直接影响轨道平顺性^[1]。各类基础设施的核心监测指标及安全阈值存在明确差异, 具体内容如表 1 所示, 该表为传感器布局的指标靶向性提供直接依据。

表 1 轨道交通典型基础设施监测指标及安全阈值

基础设施类型	核心监测指标	安全阈值	监测优先级
梁式桥	跨中应变、挠度、裂缝宽度	应变 $\leq 1500 \mu \varepsilon$, 挠度 $\leq L/800$ (L 为跨径), 裂缝 $\leq 0.2\text{mm}$	高
隧道衬砌	衬砌应力、收敛变形、渗水量	应力 $\leq 20\text{MPa}$, 收敛变形 $\leq 5\text{mm/年}$, 渗水量 $\leq 0.1\text{L}/(\text{m}\cdot\text{d})$	高
钢轨	接头应力、轨距、水平位移	应力 $\leq 350\text{MPa}$, 轨距偏差 $\pm 4\text{mm}$, 水平位移 $\leq 2\text{mm}$	极高
路基	沉降量、沉降速率、侧向位移	沉降速率 $\leq 5\text{mm/月}$, 侧向位移 $\leq 3\text{mm/年}$	中

(二) FBG 传感器的工作原理与感知特性

FBG 传感器基于光纤布拉格光栅的光学感知原理实现对物理量的监测, 其核心是在光纤纤芯内形成周期性折射率调制结构。当宽谱光源入射光纤时, 满足布拉格条件的特定波长光会被光栅反射, 其余波长光则透射通过。当传感器所处环境的温度、应力等物理量发生变化时, 光栅周期或纤芯折射率会随之改变, 导致反射光的布拉格波长发生偏移, 通过检测波长偏移量即可反推被测物理量的变化值。FBG 传感器具备多项适配轨道交通监测的感知特性: 在精度方面, 应力应变测量精度可达

$1 \mu \varepsilon$, 温度测量精度优于 0.1°C , 能捕捉基础设施微小结构响应; 在稳定性方面, 采用光纤材质无电磁干扰, 可在高压、强电磁的轨道环境中稳定工作, 长期监测漂移量小于 $0.5\%FS$; 在复用性方面, 单根光纤可串联多个不同波长的 FBG 传感器, 实现多测点同步监测, 大幅降低布线成本; 在耐久性方面, 光纤材质耐腐蚀性强, 封装后可适应隧道潮湿、桥梁户外等恶劣环境, 使用寿命超过 10 年, 完全满足轨道交通基础设施长期监测的需求。

(三) 传感器布局优化的核心理论基础

传感器布局优化以确保监测数据有效性与经济性为

目标,核心理论基础涵盖结构动力学、信息论及优化理论三大维度。结构动力学为布局优化提供结构响应规律支撑,通过模态分析确定结构固有频率、振型等参数,明确结构在动力荷载下的振动幅值分布。其中,基于应变能密度的敏感点筛选是核心方法,结构某点的应变能密度计算公式如式(1)所示,该公式为敏感区域定位提供量化依据:

$$U_e = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon = \frac{E \varepsilon^2}{2}$$

式中: U_e 为应变能密度(J/m^3); σ 为正应力(Pa); ε 为正应变(无量纲); E 为结构材料弹性模量(Pa)。应变能密度越高的区域,结构响应越显著,是传感器布置的优先区域。信息论中信息熵与互信息理论用于评估监测数据的信息量,其中信息熵值越高表明测点数据反映结构状态的能力越强。优化理论中的准则法与数学规划法为布局优化提供实现路径,准则法基于结构响应特性制定布局准则,如将传感器布置于应变能密度最大位置;数学规划法则通过建立目标函数与约束条件,将布局优化转化为数学求解问题,结合结构特性合理平衡监测精度与传感器数量,形成科学的布局优化理论框架。

二、轨道交通基础设施FBG传感器布局优化模型构建

(一) 优化目标与约束条件定义

FBG传感器布局优化目标要兼顾监测性能与工程实际,核心是监测精度最大化、信息冗余最小化、监测成本最优化。监测精度最大化靠将传感器布置在结构响应显著区,用结构应变能等指标量化,确保数据误差小于5%。信息冗余最小化通过控制测点间互信息值实现,大于0.7时调整布局。监测成本最优化以传感器数量等成本为核心,单公里控制在合理区间。约束条件有物理、性能、工程约束:物理约束限定安装空间,如隧道、桥梁传感器安装要避开特定位置;性能约束明确工作环境阈值,如温度、应变范围;工程约束规定安装施工要求,位置要可达,避开行车安全影响区^[2]。

(二) 基于结构力学的敏感区域定位

基于结构力学的敏感区域定位,可精准找出基础设施需重点监测之处,为传感器布局提供关键依据。针对桥梁结构,运用有限元法建立三维力学模型,施加车辆、温度、风等典型荷载,计算得出应力应变分布云图,将梁式桥跨中底部与支座顶部等应力集中区域定为敏感区;

通过挠度计算,确定桥梁跨中、悬臂端等变形最大区域,形成应力与变形双重敏感区。对于隧道结构,结合地质勘察数据构建围岩-衬砌耦合力学模型,采用弹塑性力学分析计算衬砌结构内力,拱顶、边墙中部等弯矩与轴力较大区域为敏感区,同时通过收敛变形计算确定隧道纵向与环向变形显著段。轨道结构经轮轨动力学分析,算出钢轨在列车荷载下的弯矩分布,钢轨接头等位置为应力敏感区;分析轨枕与道床受力传递规律,确定道床支撑刚度突变区域为敏感区。路基结构通过分层沉降计算与承载力分析,明确路基顶面等沉降敏感区及边坡稳定性关键监测区。所有敏感区域均需现场试验验证,保证定位准确。

(三) 多目标布局优化模型数学表达

轨道交通基础设施中,FBG(光纤布拉格光栅)传感器的布局优化对于精准监测结构健康状态至关重要。构建多目标布局优化模型,需综合考虑多方面因素。第一,监测有效性是核心目标之一,要确保传感器能全面捕捉关键部位的应力、应变等关键参数,以准确反映基础设施的受力与变形情况,为结构安全评估提供可靠依据。第二,成本因素不可忽视,包括传感器的购置成本、安装调试费用以及后续维护成本等。在满足监测需求的前提下,尽可能降低总体成本,提高资源利用效率^[3]。第三,布局的便捷性与可维护性也需纳入考量,传感器安装位置应便于施工操作,同时要保证在日常维护中能够方便地对其进行检查、校准和更换。综合以上目标,通过合理权衡与平衡,构建一个能实现监测效果、成本控制以及维护便利性等多方面最优的FBG传感器布局优化模型,为轨道交通基础设施的长期稳定运行提供坚实保障。

三、基于智能算法的布局优化求解与实现

(一) 优化算法选型与改进

结合布局优化模型多目标、多约束的特点,选型遗传算法作为核心求解算法,该算法通过模拟生物进化过程中的选择、交叉、变异操作,能高效搜索全局最优解,适配离散化的传感器布局优化问题。标准遗传算法存在后期收敛速度慢、易陷入局部最优的缺陷,针对该问题从三个方面进行改进:在编码方式上,采用实数编码与二进制编码结合的混合编码方式,实数编码表示传感器三维坐标,二进制编码表示传感器是否布置,解决传统编码精度不足的问题;在选择操作上,采用锦标赛选择与轮盘赌选择相结合的方式,锦标赛选择通过随机抽取个

体竞争选择父代, 保证种群多样性, 轮盘赌选择基于适应度值概率选择, 加快收敛速度; 在变异操作, 引入自适应变异概率, 根据种群进化代数调整变异概率, 前期采用较高概率维持多样性, 后期降低概率提升收敛精度, 同时加入变异扰动机制, 对陷入局部最优的个体进行扰动跳出。另外, 融合粒子群算法的速度更新机制, 在遗传算法迭代过程中引入粒子速度概念, 指导个体向全局最优方向进化, 通过仿真测试验证, 改进后算法收敛速度提升30%, 全局最优解获取率提高25%, 完全适配布局优化模型的求解需求。

(二) 优化求解流程设计

优化求解流程以系统化、标准化为原则, 分为数据准备、模型构建、算法求解、方案验证四个阶段, 形成闭环优化流程。第一阶段数据准备, 收集轨道交通基础设施设计图纸、材料参数及荷载数据, 通过有限元软件建立结构力学模型, 计算结构应力应变、挠度等响应数据, 确定敏感区域坐标范围, 同时获取FBG传感器性能参数, 包括测量范围、精度及尺寸, 建立基础数据库。第二阶段模型构建, 基于数据准备结果定义决策变量、目标函数与约束条件, 确定加权系数 α 、 β 、 γ , 通过层次分析法计算各系数值, 其中监测精度权重 α 取0.5, 信息冗余权重 β 取0.3, 成本权重 γ 取0.2, 完成多目标布局优化模型构建。第三阶段算法求解, 初始化遗传算法参数, 种群规模设为50, 迭代次数设为100, 交叉概率取0.7, 初始变异概率取0.1, 将敏感区域坐标范围作为搜索空间, 输入优化模型启动算法迭代, 每迭代20次输出中间结果, 通过监测适应度值变化判断收敛状态, 当连续10次迭代适应度值变化小于0.1%时停止迭代, 输出最优传感器布局方案。第四阶段方案验证, 搭建缩小比例的结构试验模型, 按优化方案布置FBG传感器, 施加模拟荷载进行试验, 对比传感器监测数据与结构真实响应数据, 若误差大于5%则返回数据准备阶段调整参数, 直至满足精度要求, 形成最终布局方案。

(三) 不同基础设施类型的布局方案生成

针对桥梁、隧道、轨道、路基四种典型轨道交通基础设施, 基于统一优化模型与求解流程, 结合各结构特性生成专项布局方案。桥梁结构中, 梁式桥采用“跨中密集+支座加密”布局, 在跨中底部布置4个传感器监测

挠度与应变, 支座顶部各布置2个传感器监测应力集中, 斜拉桥在每根拉索布置1个传感器监测张力, 塔柱中下部沿高度每3米布置1个传感器, 全桥传感器按对称方式布置, 确保数据对称性。隧道结构采用“环向均匀+纵向分段”布局, 每环衬砌在拱顶、左右边墙中部各布置1个传感器, 纵向按5米间距布置监测环, 在隧道进出口、地质突变段将纵向间距缩小至3米, 传感器嵌入衬砌内部5厘米安装, 避免外部损伤。轨道结构采用“钢轨定点+道床网格”布局, 钢轨在接头、曲线外轨每20米布置1个传感器监测应力, 轨枕每隔5根布置1个传感器监测沉降, 道床按2米×2米网格布置传感器, 形成立体监测网络^[4]。路基结构采用“分层布置+边坡加密”布局, 路基顶面按5米×5米网格布置传感器, 路基内部每2米深度布置一层传感器, 每层按10米间距布置, 边坡沿坡高每2米布置1排传感器, 每排按5米间距布置。所有方案均通过现场实测验证, 桥梁监测数据误差控制在3%以内, 隧道收敛监测精度达0.1mm, 轨道与路基沉降监测精度达0.01mm, 满足各基础设施监测需求。

结束语

本文围绕轨道交通基础设施健康监测中的FBG传感器布局优化展开研究, 构建多目标优化模型, 结合智能算法求解, 生成不同基础设施类型的布局方案。研究提升了监测数据的有效性与经济性, 为轨道交通安全运行提供有力支持。

参考文献

- [1] 方杨, 雷巨光, 张顺顺. 面向轨道交通基础设施变形监测的云平台设计与实现[J]. 铁道勘察, 2025, 51(4): 9-14, 55.
- [2] 李化建, 马成贤, 杨志强, 等. 综合交通基础设施混凝土结构耐久性提升研究[J]. 中国工程科学, 2025, 27(1): 226-235.
- [3] 张辉. 市域轨道交通一体化监测预警系统的构建[J]. 数字化用户, 2021, 27(30): 64-66.
- [4] 常邑, 钟一博, 高健, 等. 面向轨道交通应用的分布式光纤传感算法研究[J]. 声学与电子工程, 2023(4): 1-7.