

磁浮交通轨道梁线形精密控制算法与施工误差补偿技术

程相鑫、李孔逸

摘要：磁浮交通凭借无接触运行、能耗低、舒适性佳的独特优势，已成为现代轨道交通高质量发展的重要方向。轨道梁作为磁浮列车运行的核心承载与导向结构，其线形精度直接决定列车运行的安全性、平稳性与舒适性，其中高速磁浮交通对轨道梁线形的控制精度要求严格达到毫米级标准。针对磁浮轨道梁施工过程中线形偏差控制难度大、误差来源复杂且易产生累积效应的突出问题，本文重点研究线形精密控制算法与施工误差补偿技术。通过系统分析磁浮轨道梁线形控制的核心要求与各类误差来源，设计基于多源数据融合的线形精密控制算法，提出针对性强、可操作性高的施工误差补偿技术，并通过实际工程应用验证该算法与技术的可行性和有效性。研究结果表明，所提出的精密控制算法与误差补偿技术能够有效降低施工过程中的线形偏差，将轨道梁线形精度稳定控制在设计允许范围内，为磁浮交通轨道梁的高效、高精度施工提供可靠的技术支撑。

关键词：磁浮交通；轨道梁；线形控制；精密算法

1 引言

磁浮交通依托电磁悬浮、导向与驱动核心技术，实现列车与轨道梁的无接触运行，彻底摆脱轮轨黏着的限制，其运行速度可稳定达到 600km/h 及以上，在长距离城际运输和城市快速通勤中展现出显著优势。轨道梁作为磁浮交通系统的关键承重与导向结构，其平面线形、高程线形和断面线形的精度的优劣，直接影响电磁悬浮间隙的稳定性、导向系统的工作性能，以及列车运行过程中的动力学响应。

与传统轮轨铁路轨道相比，磁浮轨道梁的线形控制精度要求大幅提高，毫米级的线形偏差就可能导致悬浮间隙出现异常波动、导向力失衡，进而引发列车振动、噪声增大等问题，严重时甚至会影响列车的运行安全。在实际施工过程中，轨道梁线形易受模板安装、混凝土浇筑、环境变化等多种因素影响，各类误差相互叠加，极易产生累积性偏差。

2 磁浮交通轨道梁线形控制核心要求与误差来源

2.1 线形控制核心要求

磁浮轨道梁线形控制以“高精度、高平顺、高稳定”为核心目标，结合磁浮列车的运

行特性与工程设计标准，需重点保证平面中心线、高程和断面尺寸严格符合设计规范。其中，高速磁浮轨道梁的线形精度有着明确的量化要求：平面中心线偏差不大于2mm、高程偏差不大于1mm、断面尺寸偏差不大于1.5mm，相邻轨道梁接头处的线形平顺性偏差不大于0.5mm，以此确保列车运行过程中悬浮间隙的稳定性。

2.2 施工误差主要来源

磁浮轨道梁施工误差来源复杂多样，主要可分为施工工艺误差、环境因素误差、设备精度误差和人为操作误差四大类，各类误差在施工过程中相互影响、相互叠加，极易导致线形偏差的累积，影响施工质量。

其中，施工工艺误差是最主要的误差来源，主要包括模板安装定位偏差、混凝土浇筑过程中的收缩变形偏差，以及预应力张拉过程中的应力与顺序偏差；环境因素误差主要来源于温度变化导致的材料热胀冷缩，以及地基沉降引发的支撑点高程变化；设备精度误差源于测量设备与施工机械的校准不及时、精度不足；人为操作误差则来自测量人员、施工人员的操作不规范、流程不标准。

3 磁浮交通轨道梁线形精密控制算法设计

针对磁浮轨道梁线形控制精度要求高、误差来源复杂的问题，本文设计基于多源数据融合的线形精密控制算法，通过整合测量数据、施工工艺数据与环境数据，实现线形偏差的实时识别、精准预测与动态控制，形成“采集-融合-识别-预测-控制-反馈”的闭环控制流程，该算法主要分为五个关键环节，各环节协同配合，确保控制精度与响应速度。

3.1 多源数据采集

数据采集是线形精密控制的基础，采用“多设备、多点位、实时化”的采集模式，联合全站仪、激光跟踪仪、水准仪等多种设备，获取轨道梁施工过程中的三类关键数据。包括反映线形状态的测量数据、体现施工过程的工艺数据和影响线形变化的环境数据，根据不同施工阶段的特点调整采集频率，确保数据的实时性、完整性与准确性，为算法的后续运算提供坚实的数据支撑。

3.2 多源数据融合处理

多源数据融合处理的核心是消除各类采集数据中的冗余信息与系统误差，整合有效特征信息，提升数据精度，为偏差识别与预测提供可靠依据。该环节采用分层融合策略，首先对原始数据进行筛选、校正与标准化预处理，剔除异常数据并补充缺失数据；随后提取各类数据的关键特征并进行融合；最后通过模糊决策方法，对轨道梁线形状态进行综合判断，消除单一数据判断的局限性。

3.3 线形偏差识别与预测

线形偏差识别通过将融合后的实际线形数据与设计线形数据进行逐点对比，精准识别偏差的大小、位置与具体类型，明确偏差集中区域及产生的主要原因。线形偏差预测则采用时间序列预测方法，基于历史偏差数据、施工工艺数据与环境数据，构建偏差预测模型，精准预测后续施工过程中线形偏差的发展趋势与变化规律，提前识别偏差累积风险，为动态控制提供提前干预依据。

3.4 动态控制调节

动态控制调节基于偏差识别与预测结果，结合施工进度与现场实际情况，制定针对性的分级控制策略。对轻微偏差采用局部微调方式快速消除；对中度偏差通过调整施工工艺参数逐步修正；对重度偏差则立即停止当前施工，分析偏差根源并采取整改措施，整改合格后再恢复施工，同时实时反馈控制效果、调整控制参数，确保线形精度符合要求。

4 磁浮交通轨道梁施工误差补偿技术

基于前述线形精密控制算法，结合磁浮轨道梁施工误差的来源与偏差类型，遵循“预防为主、防治结合、精准补偿”的核心原则，提出一套覆盖施工全过程的误差补偿技术，该技术主要分为误差预防、误差识别分类、精准补偿实施三个关键环节，有效减少误差累积，提升轨道梁线形精度。

4.1 误差预防措施

误差预防是减少施工误差、降低偏差累积的基础，重点从设备、人员、工艺、环境四个方面制定针对性预防措施。施工前，对所有测量设备与施工机械进行全面校准，确保精度符合要求；对施工与测量人员进行专业培训，规范操作流程、提升操作技能。施工过程中，优化模板设计与定位、混凝土配合比及预应力张拉方案，同时针对温度变化、地基沉降等环境因素采取针对性防护措施，从源头控制误差产生。

4.2 误差识别与分类

误差识别与分类以多源数据融合结果和线形偏差识别结果为基础，精准明确误差的大小、类型、位置与产生原因，为后续精准补偿提供科学依据。采用分级分类的方式，将误差分为轻微、中度、重度三级，同时按误差来源分为施工工艺、环境因素、设备精度、人为操作四类，清晰界定各类误差的危害程度与成因，提升补偿工作的针对性与有效性。

4.3 精准补偿实施

针对各类误差的特点与成因，采用差异化的精准补偿方法，重点覆盖模板安装、混凝土收缩、预应力张拉、温度、地基沉降五类核心误差。补偿完成后，采用多设备联合检测的方式，对轨道梁线形进行全面检测，验证补偿效果，若偏差仍未达到设计要求，需重新分析误差原因并再次进行补偿，直至线形精度完全符合标准。

参考文献

- [1] 龚俊虎,谢海林,鄢巨平.高速磁浮梁轨分离式桥梁与轨道设计和创新[J].铁道科学与工程学报,2021,18(3):564-571
- [2] 李建伟.城市轨道交通工程中节段箱梁预制拼装及线形控制关键技术研究[J].建筑机械,2024(12):40-45