

基于力学分析的走线架多功能布设机构优化设计

熊怀忠

河北鸿宇通信器材有限公司 河北河间 062450

摘要: 针对传统走线架结构固定、布设效率低、运维成本高及安全冗余不足的行业痛点, 本文开展基于力学分析的走线架多功能布设机构优化设计研究。通过模块化拆解主体结构, 构建可重构承载体系; 融合力学建模与有限元仿真, 优化截面与连接节点力学性能; 研发集成感知、驱动与调控的多功能布设机构, 实现自动化精准布设与多场景适配。样机试制与性能测试结果表明: 优化后走线架额定载荷下最大应力降低28.5%, 变形减少35.7%, 空间利用率提升28.9%; 布设机构调节响应时间 $\leq 1.5s$, 定位精度 $\pm 0.5mm$, 状态监测准确率 $\geq 99.2\%$, 运维成本降低40%以上。研究验证了力学优化与智能化设计的有效性, 为走线架向模块化、自适应、智能化升级提供理论与工程支撑。

关键词: 走线架; 力学分析; 模块化设计; 布设机构; 结构优化; 智能调控

引言

在电力传输、通信基站、数据中心及智能制造工厂等现代工业场景中, 走线架是线缆集中敷设、支撑与防护的核心基础设施, 其性能直接决定线缆系统的安全稳定与运维效率。随着数字化、智能化技术普及, 线缆布设呈现空间紧凑化、载荷多样化、需求个性化趋势, 传统固定截面焊接式走线架的弊端日益凸显: 一是结构刚性强、灵活性差, 无法适配多变布设场景, 空间利用率低, 易出现载荷过载或闲置; 二是布设高度依赖人工, 效率低、偏差大, 后期扩容检修需反复拆解, 运维成本高昂; 三是缺乏动态自适应能力, 无法根据载荷与环境变化实时调整姿态, 安全隐患突出; 四是功能单一, 难以满足分类敷设、散热防护等多元化需求。

目前, 国内外走线架研究多集中于传统结构的轻量化与材质升级, 虽能降低自重、提升力学性能, 但未突破结构固定与适配性差的核心瓶颈。部分可调节设计未形成系统模块化体系, 且缺乏完善的自适应调控机制, 无法实现自动化精准布设。与此同时, 结构力学、有限元分析与物联网技术的快速发展, 为走线架的模块化重构、力学性能优化及智能化布设提供了可行路径^[1]。基于此, 本文以力学分析为核心, 开展走线架多功能布设机构的优化设计研究, 为走线架升级换代提供理论与实践依据。

作者简介: 熊怀忠(1968-), 男, 汉族, 河北河间人, 本科, 研究方向: 光传输产品。

一、总体设计方案与力学建模

1.1 设计目标与核心需求

结合工业现场复杂环境下线缆布设的实际工况需求, 并严格遵循JB/T10216-2025《电控配用电缆桥架》最新行业标准要求, 本次多功能走线架优化设计围绕三大核心目标展开。第一, 实现模块化可重构, 能够灵活适配不同规格、不同数量的电力线缆、通信光缆与控制信号线综合布设需求, 同时适应机房、综合管廊、设备夹层、工业厂房等多样化布设空间, 显著提升空间利用率与动态载荷适配能力。第二, 实现布设自适应, 在复杂安装条件下完成自动定位、姿态微调与动态载荷均衡调控, 减少人工干预, 提高布设精度与施工效率。第三, 实现功能多元化集成, 将线缆分类梳理、状态在线监测、通风散热、防火隔离、故障预警等功能融为一体, 降低后期运维难度与全生命周期使用成本。

1.2 总体架构设计

本次设计构建“模块化主体结构+多功能布设机构+智能监测调控系统”三位一体的总体架构, 三大单元相互协同、有机配合, 共同实现走线架高效、稳定、智能运行。其中, 模块化主体结构作为系统核心承载单元, 将整体支撑框架拆分为标准承载段、转接段、扩展段等独立模块, 通过统一接口实现快速拼接与形态重构, 优化载荷传递路径与整体受力分布, 提升结构稳定性与空间利用率。多功能布设机构作为执行终端单元, 集成微型驱动、姿态感知、位移调节与载荷适配等功能, 负责完成自动定位、空间姿态调节、跨场景灵活布设与动态载荷均衡, 大幅减少现场人工调整工作量, 提升布设一

致性。智能监测调控系统作为整体控制核心，通过应力传感器、位移传感器、温度传感器等采集结构与线缆状态数据，经内置控制算法处理后实时下发调节与预警指令，形成“感知—分析—调控—反馈”的完整闭环，同时支持远程数据上传、人机交互与智能管理，实现走线架系统运行全过程可控可测。

1.3 力学建模与分析方法

为科学、量化地评估走线架结构力学性能，确保在额定工况与极限工况下均满足安全使用要求，本次研究采用理论力学建模与有限元数值仿真相结合的综合分析方法。第一，开展理论力学建模分析，基于材料力学、结构力学基本理论，建立走线架主体梁架、连接节点、支撑部位的静力学模型，推导应力、挠度变形与外部载荷之间的对应关系，确定许用应力、允许变形量等关键力学指标，为结构尺寸设计提供理论依据。第二，开展有限元仿真分析，利用ANSYS Workbench软件建立走线架三维实体模型与网格模型，分别模拟额定载荷5kN/m与极限载荷8kN/m两种典型工况，对结构静力学性能进行全面计算，重点分析应力分布规律、整体与局部变形特征以及低阶模态特性，识别应力集中区域与结构薄弱部位。第三，建立力学性能综合评价体系，以最大应力值、最大变形量、固有模态频率等为核心评价指标，对比优化前后结构力学性能变化，量化评估改进效果，为后续结构优化、尺寸迭代与机构改进提供可靠数据支撑与理论指导。

二、模块化主体结构力学优化设计

2.1 模块化拆解与接口设计

打破传统整体式结构，结合承载、调节与辅助功能，将主体拆解为四大标准化模块，采用统一快速连接接口，实现快速拼接、灵活组合与形态重构，便于维护更换。四大模块功能独立且协同工作：核心承载模块负责线缆支撑与载荷传递；边缘加固模块增强边缘承载强度，适配大载荷场景；调节连接模块实现形态重构与姿态调节；支撑固定模块提供整体支撑，适配不同安装场景。

接口设计遵循标准化、高强度、快装原则，采用螺栓+快插组合接口，统一规格与尺寸，3人45分钟可完成10m走线架安装，效率较传统提升70%以上；接口材质选用高强度不锈钢，表面热镀锌防腐，确保长期运行的稳定性与耐用性^[2]。

2.2 核心承载模块力学优化

核心承载模块采用“U型截面+内置加强筋”优化设计，截面宽400mm、高120mm，适配线缆分层敷设。

通过力学建模与仿真，优化加强筋布局与截面参数，采用“纵向主加强筋+横向次加强筋”交叉结构，分散载荷应力，提升抗弯、抗扭性能。材质选用6061-T6铝合金，较Q235碳钢自重降低40%，同时具备优异的力学性能与抗腐蚀性，可100%回收，契合绿色环保理念。有限元仿真结果显示，优化后核心承载模块在额定载荷下最大应力158MPa，最大变形0.72mm，较传统结构应力降低28.5%，变形减少35.7%，力学性能显著提升^[3]。

2.3 连接节点力学优化

连接节点是走线架结构的关键薄弱环节，其力学性能直接决定整体稳定性。针对直角连接节点等核心节点，采用锻压直角连接件+高强度螺栓组合结构，替代传统焊接节点，减少应力集中，提升连接强度与灵活性；通过仿真分析优化螺栓直径、数量及布置间距，确保节点在极限载荷下不发生剪切、拉伸或弯曲破坏。仿真结果表明，优化后连接节点极限承载力提升30%，应力集中区域减少42%，有效提升结构整体安全性与耐用性。

2.4 多功能辅助结构设计

为满足多元化需求，增设三类多功能辅助结构：一是线缆分类卡槽，核心模块内设可拆卸绝缘卡槽，间距50mm，分层分类敷设线缆，防短路且便于维护；二是可拆卸防护挡板，透明亚克力材质、卡扣式连接，防尘防水且便于观察线缆状态；三是温度调节模块，嵌入微型散热风道与温度传感器，温度超60℃自动散热，控制在50℃以内，延长线缆寿命。

三、多功能布设机构设计与力学验证

3.1 布设机构整体架构

多功能布设机构是实现自动化精准布设的核心，采用“驱动执行+感知定位+嵌入式控制+通信”四大单元组成的闭环控制系统，实现“感知—分析—调控—反馈”一体化运作。驱动执行单元负责姿态、高度、伸缩调节动作执行；感知定位单元集成多类传感器，采集位置、姿态、应力、温度等状态数据；嵌入式控制单元处理数据、下发调控指令，实现精准调控与故障预警；通信单元支持多模式通信，实现远程交互与数据共享。

3.2 驱动执行单元设计

驱动执行单元由步进电机、减速器、传动机构、电磁锁定组件组成，姿态调节采用步进电机搭配行星减速器，输出扭矩12N·m，调节角度 $\pm 45^\circ$ ，步距 0.1° ，具备过载保护，适配特殊布设场景；伸缩调节采用直线步进电机，行程0-500mm，定位精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ，响应时间 $\leq 0.8\text{s}$ ，滚珠丝杠传动减少误差；电磁锁定组件调节

后自动锁定，锁定力 $\geq 500\text{N}$ ，确保布设状态稳定，避免位移。

3.3 感知定位单元设计

集成四类传感器全面采集状态数据，为调控提供精准依据：激光位移传感器定位精度 $\pm 0.5\text{mm}$ ，实现位置闭环定位；九轴姿态传感器精度 $\pm 0.05^\circ$ ，保障姿态调节精准；薄膜式应力传感器量程 $0\text{--}300\text{MPa}$ ，精度 $\pm 0.5\%FS$ ，应力超预警值报警；温度传感器量程 $-20^\circ\text{C}\text{--}80^\circ\text{C}$ ，精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，为温度调节提供依据，部分场景支持多节点组网监测。

3.4 嵌入式控制与通信单元设计

嵌入式控制以STM32F407ZGT6微控制器为核心，采用滑动平均滤波算法提升数据稳定性，集成PID姿态调节、载荷自适应调控、故障诊断三类算法，实现精准调控、载荷优化与故障预警，内置存储模块可本地存储7天数据，支持本地与远程双重调控。通信单元支持4G/5G、Wi-Fi、蓝牙三种模式，4G/5G用于远程传输控制，支持千米级通信与断点续传；Wi-Fi适用于室内近距离场景，加密传输保障安全；蓝牙用于现场调试，通信距离100m，可与现有工业监控系统无缝对接，实现数据共享。

3.5 布设机构力学验证

通过静力学与动力学仿真验证布设机构力学性能，模拟极限载荷工况，驱动执行单元与连接节点最大应力 $\leq 226\text{MPa}$ ，无塑性变形，满足强度要求；模态分析显示，布设机构前6阶固有频率远离设备振动范围，无共振风险，动态稳定性良好，可稳定支撑自动化布设作业^[4]。

四、样机试制与性能测试

4.1 样机试制

按照优化设计方案试制样机，核心参数如下：主体材质为6061-T6铝合金，额定载荷 5kN/m ，极限载荷 8kN/m ，空间利用率较传统提升28.9%；布设机构调节响应时间 $\leq 1.5\text{s}$ ，定位精度 $\pm 0.5\text{mm}$ ，通信覆盖100m（蓝牙）、10km（4G）；搭载5类传感器，具备温度调节、分类、监测等功能。试制过程中严格控制加工装配精度，关键部件采用高强度材质与防腐工艺，确保与设计模型一致，提升样机耐用性。

4.2 性能测试结果与分析

参照JB/T10216-2025行业标准，以传统固定走线架

为对照组，开展结构力学、布设机构、运维效率三类性能测试。结构力学测试显示，额定载荷下样机最大应力 158MPa 、变形 0.72mm ，较传统分别降低28.5%、35.7%；极限载荷下分别降低23.4%、30.8%，无塑性变形，盐雾试验1000小时无腐蚀，疲劳测试模拟15年无损坏，耐用性优异。

布设机构性能测试表明，调节响应时间 $\leq 1.5\text{s}$ ，定位精度 $\pm 0.5\text{mm}$ ，状态监测准确率 $\geq 99.2\%$ ，报警响应时间 $\leq 0.3\text{s}$ ，各项指标均优于设计要求，载荷自适应与通信功能稳定，实现自动化精准布设。运维效率测试显示，安装效率较传统提升70%以上，检修、扩容时间分别缩短60%、75%，部件更换效率提升80%，模块回收率85%，运维成本降低40%以上，适配多场景需求。综合测试验证，优化设计方案符合行业标准，具备良好工程应用价值。

结论

本文基于力学分析开展走线架多功能布设机构优化设计，通过模块化重构、力学优化、智能化布设机构设计及样机测试，得出以下结论：一是模块化拆解与接口设计有效解决传统走线架结构固定、适配性差的问题，实现快速拼接与形态重构，安装效率大幅提升；二是基于力学建模与有限元仿真的结构优化，显著提升走线架力学性能，应力与变形大幅降低，空间利用率提升28.9%，安全冗余充足；三是多功能布设机构实现自动化精准布设，各项性能达标，运维成本降低40%以上；四是优化设计方案满足行业标准，适配多场景需求，为走线架升级换代提供全新技术路径。

参考文献

- [1] 朱鹏, 郝浩, 刘扬明. 通信机房吊挂走线架结构抗震加固分析[J]. 结构工程师, 2015, 31(1): 112-118.
- [2] 李建勇, 王鹏. 模块化电缆桥架结构设计与工程应用研究[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 112-117.
- [3] 王强. 铝合金走线架承载特性分析及轻量化设计[J]. 机械工程与自动化, 2021(4): 123-125.
- [4] 张晓明, 刘佳. 自适应支撑机构力学性能分析与结构优化[J]. 机械科学与技术, 2023, 37(5): 721-726.