

障发生后 15ms 内的暂态电流突变量,为暂态量差动保护提供精确数据支撑。例如,当发生高阻接地故障(过渡电阻 $1.5k\Omega$)时,PMU 可检测到仅 $0.18I$ 的故障电流,而传统保护装置的启动阈值为 $0.2I$,有效解决了小故障漏判问题。

4.2.2 暂态量保护的技术突破

传统定时限保护依赖故障稳态电流,动作时间普遍超过 300ms,而暂态量差动保护通过分析故障初期的电流变化率(dI/dt)和幅值突变量(ΔI),将故障识别时间缩短至 15ms。保护装置内置线路参数在线计算模块,每 50ms 更新一次保护整定值:当负荷电流超过额定值 1.2 倍时,自动提高灵敏度系数;当负荷低于 0.5 倍额定值时,动态调整延时阈值,彻底解决了负荷波动导致的保护性能漂移问题。

4.2.3 快速自愈系统的实现路径

配套开发的故障自愈系统由智能开关矩阵与路径优化算法组成:

智能开关矩阵:采用固态继电器与机械开关组合设计,分闸时间 $<30ms$,合闸时间 $<50ms$,支持 200 次/秒的高频操作,可在复杂网络中快速隔离故障点;

路径优化算法:基于改进的 Dijkstra 算法,预先生成 10 条以上备用供电路径,当检测到故障时,系统在 80ms 内计算出最优恢复路径,优先保障通风机、排水泵等一级负荷供电,重要负荷不间断供电率达 99.9%。

4.3 多物理量融合监测体系

构建覆盖“电缆-设备-环境”的立体监测网络,通过多维度数据采集与深度融合,实现设备状态的精准感知与早期故障预警。

4.3.1 全场景传感器部署策略

电缆监测:在所有电缆接头处植入光纤光栅温度传感器,采用波分复用技术实现 50m 间隔密集测温,测量精度 $\pm 0.5^\circ C$,可捕捉到 $0.1^\circ C$ /分钟的细微温升变化;在长距离电缆本体部署分布式光纤测温(DTS),每 10m 设置一个测温点,实时绘制电缆温度场分布,有效识别因敷设不当导致的局部散热不良问题;

设备监测:在开关柜内安装特高频局放传感器(检测灵敏度 $<5pC$),实时监测绝缘放电信号,结合振动传感器(测量频率 10-20kHz)捕捉断路器机械卡涩异响,实现设备机械故障与绝缘缺陷的双重监测;在变压器油箱内置油色谱传感器,连续监测 H_2 、 CH_4 等 7 种特征气体浓度,当氢气浓度超过 150ppm 时自动触发绝缘劣化预警;

环境监测:在巷道关键位置部署温湿度复合传感器(湿度精度 $\pm 2\%RH$,温度精度 $\pm 1^\circ C$),结合粉尘浓度传感器,实时评估环境对设备绝缘的影响,例如当湿度超过 95%RH 且持续 4 小时以上时,自动增加电缆绝缘电阻的监测频次。

4.3.2 数据传输与处理技术

监测数据通过“5G+光纤”混合网络传输:在巷道开阔区域采用 5G 无线传输,时延 $<20ms$,满足高频数据(如局放信号)的实时上传;在电磁干扰严重或长距离传输区段采用矿用阻燃光纤,通过工业环网实现数据汇聚,构建包

含 128 个特征参量的实时数据库。数据处理层采用改进的 DBN(深度信念网络)算法,首先通过受限玻尔兹曼机对电缆温度、局放幅值、振动能量等多维数据进行降维,提取 7 类典型故障的特征向量(如绝缘劣化特征向量包含温度梯度、放电相位、振动主频等 12 个维度),再通过 softmax 层实现故障分类,模型训练准确率达 96.3%,对电缆接头早期过热故障的预警提前量可达 72 小时^[2]。

5 故障排查的智能诊断技术体系

5.1 多源数据融合的故障定位方法

采用双端行波定位与低频脉冲注入相结合的复合定位技术:正常运行时利用故障行波(采样率 10MHz)实现高阻故障的精确定位(误差 $<50m$);当行波信号受干扰时,注入 100Hz 低频脉冲(幅值 100V),通过分析反射波形识别高阻接地故障。

5.2 基于知识图谱的故障诊断模型

构建包含 3000+ 故障案例的知识图谱,整合设备参数(如电缆型号、长度)、运行数据(历史负荷曲线)、环境参数(湿度变化趋势)等多维信息。当监测到电压骤降时,系统自动调用相似案例库,通过图神经网络(GNN)计算最可能的故障类型及位置。

5.3 故障应急处置的闭环管理

建立“预警—定位—处置—评估”的闭环流程:当预警系统检测到局部放电量连续 3 天增长超 15% 时,自动生成巡检工单;故障发生后,智能穿戴设备(AR 眼镜)实时推送故障点三维位置及处置步骤;处置完成后,系统根据历史数据评估维修质量,预测复发概率。某矿应用该流程后,平均故障处置时间从 120 分钟缩短至 45 分钟,重复性故障下降 60%^[3]。

6 结语

本文构建的煤矿远程供电稳定性优化与故障排查体系,通过架构重构、智能控制与数据驱动诊断的协同作用,有效解决了长距离供电中的技术瓶颈。该技术体系可将远程供电系统可靠性提升 70% 以上,有效减少非计划停电时间,为煤矿深部开采与智能化建设提供了稳定的能源保障。未来,随着数字孪生技术在供电系统全生命周期虚拟建模中的应用、边缘计算对海量监测数据本地处理能力的强化,以及量子通信在极端环境下抗干扰控制链路的突破,煤矿远程供电系统将进一步向“全状态感知、自决策优化、全场景自愈”的智能供电网络演进,为智慧矿山的安全高效发展注入更强动力。

参考文献

- [1] 蔚新. 煤矿井下机电设备安全供电技术应用研究[J]. 自动化应用, 2024, 65(14): 94-96.
- [2] 毛自新. 煤矿智能化工作面远程供电供液配套技术[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023, (22): 51-53.
- [3] 张宇杰. 煤矿井下供电自动化监控技术的研究与应用[J]. 自动化应用, 2023, 64(16): 60-62.

Finite Element Analysis and Optimization Design of Brake Clamp Lever for Railway Passenger Cars Based on Creo Simulate

Xun Zuo

Liuzhou Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Liuzhou, Guangxi, 545007, China

Abstract

Disc braking has gradually become the main braking method for conventional railway passenger cars. During repeated braking, the force on the brake caliper lever causes destructive cracks at different service cycles. Based on the statistics of the crack situation of the brake caliper lever in actual application, this paper establishes a brake caliper lever model with the help of Creo Parametric. The static force analysis and fatigue analysis of the lever were carried out by using the Creo Simulate simulation analysis module, generating the equivalent stress, maximum stress cloud map and fatigue safety factor distribution, and obtaining the conclusion of the consistent trend compared with the actual crack. Further, through Creo Simulate sensitivity analysis, the main design size parameters of the brake caliper lever that are more sensitive to stress changes were confirmed, and the optimization design of the main size parameters was carried out. The optimization analysis results achieved the expected reduction of failure stress.

Keywords

Creo Simulate; Railway passenger car; Brake caliper lever “Optimized design

基于 Creo Simulate 的铁道客车制动夹钳杠杆有限元分析及优化设计

左迅

柳州机车车辆有限公司, 中国·广西柳州 545007

摘要

铁路普速客车车辆采用盘型制动逐渐成为主要列车制动方式, 在反复制动过程中制动夹钳杠杆受力在不同使用周期内出现破坏性裂纹, 在统计实际运用中制动夹钳杠杆裂纹情况的基础上, 本文借助Creo Parametric建立制动夹钳杠杆模型, 运用Creo Simulate仿真分析模块进行杠杆受力静态分析、疲劳分析, 生成等效应力、最值应力云图以及疲劳安全因子分布, 得出与实际裂纹相比较的一致性趋势结论。进一步通过Creo Simulate敏感度分析, 确认制动夹钳杠杆受应力变化较敏感的主要设计尺寸参数, 并进行主要尺寸参数优化设计, 优化分析结果达到降低失效应力的期望。

关键词

Creo Simulate; 铁道客车; 制动夹钳杠杆; 优化设计

1 引言

盘型制动轮对是目前铁路普速客车常见行走结构和主要制动方式, 通过连挂机车提供 600kPa 列车主管压力^[1], 经过车辆制动管系、单元制动缸、制动夹钳杠杆、制动闸片将制动力传递到轮对制动盘上形成制动摩擦阻力, 实现车辆制动减速。

制动时主要受力部件为内、外侧杠杆, 单元制动缸作为动力元件, 活塞向外伸出、对外杠杆施加作用力的同时, 同样大小、方向相反的力作用到内侧杠杆上, 杠杆以转动副

为支点转动将制动闸片压紧轮对制动盘^[2], 此时制动盘分别对制动闸片产生相应反作用力, 因而杠杆受到来自单元制动缸与制动盘的外部作用力。

某单位通过统计, 2024 年度检修总数 6186 件铸钢 (ZG230-450) 制动夹钳杠杆夹钳中发现 523 处裂纹, 其中杠杆尺寸比 (制动倍率 1.38) 为 174/126 的杠杆占比超过 80%, 因而本文以杠杆尺寸比为 174/126 的夹钳杠杆作为研究对象。裂纹大多发生于内侧圆角处、中孔外端立面处, 裂纹部位占比分别为内侧圆角处 51.05%、中孔外端立面处 36.33%, 其他部位 12.62%。

2 杠杆受力工况分析

列车牵引机车为每辆客车提供的列车主管风压, 在制

【作者简介】左迅 (1976-), 男, 壮族, 中国广西田林人, 工程师, 从事铁道车辆研究。

动时列车主管减压后副风缸高压空气推动分配阀主活塞改变气路，使压缩空气进入单元制动缸从而为活塞杆向制动夹钳杠杆提供推力，力在杠杆作用下传递给闸片实施在制动盘上，形成闸片与制动盘之间的摩擦阻力，从而起到制动作用，制动夹钳杠杆受力工况如图 1。

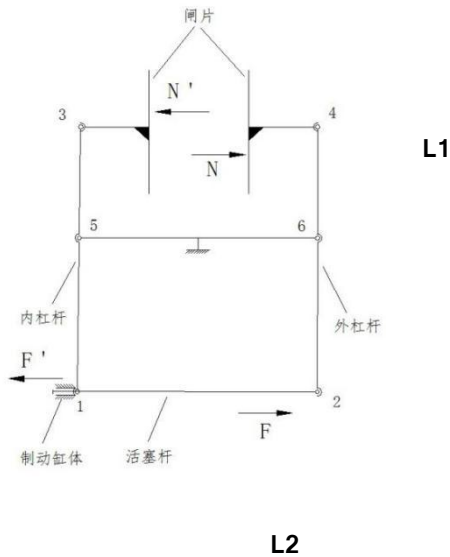


图 1 受力工况

单元制动缸鞣鞣杆推力 F 作用于外杠杆 24 转动副节点 2，同时其反作用力作用于单元制动缸体与内杠杆 13 以转动副方式连接的节点 1，内杠杆、外杠杆分别通过转动副节点 5 和 6 顺时针、逆时针向制动盘转动，经过制动闸片形成对轮对制动盘的“压紧”，为制动盘提供制动摩擦阻力。列车在行驶过程中，进站停车、进入桥隧制动减速产生对制动盘正压力 N 与推力 F 及其相应的反作用力 N' 与 F' ，往返运行一次分段制动力^[1]叠加作用将加速削弱制动受力件的疲劳强度。

3 压力计算

3.1 单元制动缸的输出压力

在既有普速铁道客车中，经过统型后 SP13 单元制动缸广泛装用于盘形制动转向架上，本文以 SP13 单元制动缸作为风力源计算输出压力。压缩空气从进气口进入气腔通过腹板推动活塞杆作用于夹钳杠杆，此时推力 F 可按下列公式计算：

$$F = p \times A \times \eta \quad (1)$$

式中： p 是制动缸空气压力； A 是活塞面积； η 是制动夹钳单元总机械效率，制动缸机械效率 η 取 0.95。

铁道客车在制动时，分配阀向制动缸提供的压力为 420kPa 至 480kPa，以极大值计算单元缸输出的压力 F ，腹板有效工作面积 $A \approx 0.04\text{m}^2$ （直径约 235 mm），将各参数代入公式计算外侧杠杆受到的推力 18.24kN，根据力的相互作用原理，此时内侧杠杆受到的推力 F' 同样是 18.24kN。

3.2 杠杆输出端受到的压力

以图 1 受力工况为例以外侧杠杆作为力的计算对象，计算闸片对制动盘产生的压力，也就是该压力对外侧杠杆的反作用力 N 。

$$N = p \times A \times \gamma \quad (2)$$

式中式中： γ 是制动倍率，即 $L2/L1$ 的比值，本文研究杠杆比为 174/126 即制动倍率 1.38，计算出的闸片压力为 25.17kN。

4 有限元分析

4.1 静态分析

铁道客车铸造式的制动夹钳杠杆其材质为 ZG230-450，其物理性能为：屈服强度 230 MPa，抗拉强度 450 MPa，泊松比 0.3，弹性模量 200 GPa，密度 7800kg/m^3 。

运行 Creo Simulate 分析软件打开制动夹钳杠杆零件模型，进入结构模式。为杠杆零件模型设置材料 ZG230-450，定义杠杆零件模型中间孔的移动约束和转动约束，在杠杆零件模型与单元制动缸连接端施加制动推力 18.24kN，杠杆零件模型与闸片连接端施加 25.17kN 作用力，启动分析和研究，得到以下杠杆零件模型的应力图 2。

从图 2 云图中可知，杠杆零件模型应力主要集中在受力状态下能使模型容易产生强度衰减的圆角处及中部销孔外立面部位，这与统计的铸钢制动夹钳杠杆裂纹情况基本相符；应力图显示最大主应力达到 367.4 MPa ~ 414.5 MPa 之间，与极限抗拉应力 450 MPa 临界值相差不大。

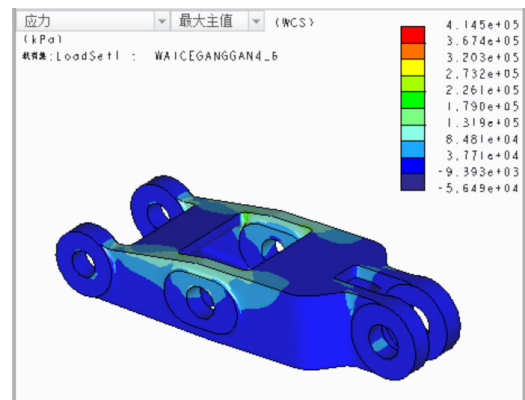


图 2 应力云图

4.2 疲劳分析

在静态应力分析基础上，分析研究产生应力集中的圆角处及中部销孔外立面部位区域的疲劳倾向。运行 Creo Simulate 分析软件打开制动杠杆零件模型，进入结构模式，在材料定义界面输入材料 ZG230-450 的拉伸屈服应力、拉伸极限应力，设置塑性材料的失效准则以及对应的疲劳材料类型、表面粗糙度适应条件、铸钢材料失效强度衰减因子，完成后建立疲劳分析。

以最大主应力和最小主应力^[2]计算铸钢制动夹钳杠杆