

一种电力机车前窗玻璃吊装装置的设计与应用研究

谢志平¹ 刘琛² 段石喜¹ 朱毅¹ 喻慧明¹

1. 中车株机电力机车有限公司 湖南株洲 412001

2. 湖南永兴农村商业银行 湖南郴州 423300

摘要: 电力机车前窗玻璃安装与更换是关键作业环节。传统吊装方式效率低、劳动强度大、定位精度不足、吸盘维护繁琐, 制约检修效率。为解决此问题, 本文设计了一种新型吊装装置。该装置以框架为主体, 集成调节、拆卸和激光矫正器模块: 调节部位采用固定柱-弧形板-螺纹杆机构, 实现支撑块角度灵活调节, 适配不同玻璃曲率和倾角; 拆卸部位采用滑动柱-顶板-T型限位杆机制, 简化吸盘操作, 降低维护成本; 激光矫正器提供视觉辅助。通过分析、研究和评估, 表明该装置提升了吊装效率和定位精度, 降低了劳动强度, 具有工程应用价值和推广潜力, 为现代化维护提供了新思路。

关键词: 电力机车; 前窗玻璃; 吊装装置; 快速拆卸; 角度调节; 激光矫正

绪论

电力机车是轨道交通的核心装备, 其安全运行关系经济发展和出行效率。前窗玻璃作为关键部件, 影响视野、气密性、隔音性和结构安全。现代机车前窗玻璃尺寸大、重量重、曲率复杂, 安装精度要求高。本文针对吸盘更换繁琐和角度调节不灵活, 创新设计T型限位杆快拆机构和弧形板夹持调节机构, 实现吸盘快速置换和角度精确锁定, 结合激光矫正器提升吊装精度。

本文研究新型电力机车前窗玻璃吊装装置的结构设计、工作原理、力学分析及应用效果, 内容包括: 总体结构设计: 阐述框架、调节部位、拆卸部位和激光矫正器的功能与布局; 关键机构设计与分析: 解析固定柱-弧形板角度调节机构和滑动柱-T型限位杆吸盘快拆机构原理; 力学特性分析: 计算吸盘吸附力、调节机构锁紧稳定性及框架承载能力, 确保安全可靠; 应用与评估: 探讨操作流程, 评估提升效率和降低劳动强度的效果。

一、电力机车前窗玻璃吊装需求分析

(一) 前窗玻璃的物理特性与安装要求

电力机车前窗玻璃需满足高安全标准, 包括耐冲击性、光学性能和气密性, 这些特性增加了吊装作业的复杂性。现代机车采用流线型设计, 前窗玻璃多为大尺寸、高强度、多曲率的异形玻璃。单块玻璃面积常超过2平方米, 重量达50-100kg以上, 要求吊装装置承载能力强、安全系数高。玻璃曲率复杂, 需配备可调节的吸盘

阵列和支撑结构, 以适应曲面和车体安装框的倾斜角度。

安装采用结构胶粘接工艺, 需精确定位并保持稳定直至胶体固化。玻璃与安装框的胶缝间隙需严格控制, 三维定位偏差不得超过 $\pm 1\text{mm}$ 。需调整俯仰角和偏航角, 以满足视野和光学要求。吸盘需提供稳定吸附力, 抵抗自重、惯性及外界干扰, 具备真空度安全冗余。

(二) 现有吊装装置存在核心痛点

1. 吸盘更换维护繁琐, 耗费人力时间, 影响效率;
 2. 角度调节精度低, 难以匹配车体倾角, 易造成安装偏差;
 3. 定位缺乏辅助, 依赖人工对位, 精度低且劳动强度大;
 4. 结构刚性不足, 吊装时易形变, 影响定位精度。
- 新型装置针对性地采用T型限位杆快拆机构实现吸盘快速卡合、弧形板夹持调节机构实现角度精确锁定、激光矫正器提供高精度视觉辅助、框架结构优化增强刚性。

本研究通过创新设计, 旨在实现高效率、高精度、易维护的吊装目标。

二、吊装装置的总体结构设计

新型电力机车前窗玻璃吊装装置的设计目标是解决现有技术中吸盘更换维护繁琐和角度调节不灵活的问题, 同时提高吊装定位精度。

(一) 总体结构与工作原理

框架作为整个装置的主体承载结构, 采用高强度轻质合金材料焊接而成, 确保吊装重型玻璃时的结构刚度和稳定性, 其几何尺寸设计覆盖机车前窗玻璃主要受力

区域。连接座对称固定在框架外壁，用于连接吊装设备的吊钩或钢丝绳，保证吊装力均匀分布，防止框架吊装过程中发生倾斜或扭曲。

激光矫正器对称安装在框架外壁，当玻璃接近安装位置时，投射精确的定位参考线或点，辅助操作人员进行高精度对位。通过调整激光矫正器投射方向，使其参考线与车体预设标记对齐，可将玻璃定位精度控制在毫米级以内。

(二) 调节部位的设计与实现

调节部位是实现玻璃安装角度精确调整的核心机构，主要由固定座、固定柱、支撑块、连接柱、弧形板一、弧形板二、螺纹杆和角度环组成。

固定座固定在框架上，固定柱固定在固定座内部，支撑块滑动连接在固定座外壁，其一端固定连接柱。通过角度环控制支撑块进行角度调节，角度环提供直观精确的角度参考，操作人员可根据机车前窗玻璃倾角要求进行预设或微调。弧形板一和弧形板二转动连接在连接柱外壁，并套设在固定柱外壁，当支撑块调整至所需角度后，转动螺纹杆，利用螺纹杆与弧形板一、弧形板二内部螺纹口的螺纹连接，使两块弧形板紧密贴合，对固定柱形成强大夹持力，实现支撑块位置的锁定。

弧形板一和弧形板二的内壁均设有置放槽，槽内固定连接摩擦垫，摩擦垫与固定柱外壁相适配。夹持锁定过程中，摩擦垫不仅保护固定柱表面，更通过提供高摩擦力进一步加固支撑块位置，确保吊装重载和微调过程中角度不发生意外滑动，提高装置稳定性。

(三) 拆卸部位的设计与实现

拆卸部位是本装置的核心创新点，旨在解决吸盘更换维护繁琐的痛点，实现吸盘的快速安装、固定和置换，主要由固定架、滑动柱、连接架、吸盘、限位座、顶板、防滑垫和T型限位杆组成。

固定架固定在支撑块顶部，滑动柱滑动连接在固定架内壁，其一端通过连接架固定连接吸盘。限位座固定在固定架内壁底部，内部开设有等距矩形口，顶板滑动连接在滑动柱外壁，底部转动连接有T型限位杆。安装吸盘时，将滑动柱滑入固定架，使顶板与限位座对齐，将T型限位杆对准限位座矩形口贯穿向下延伸，转动T型限位杆使其头部与限位座内壁形成卡合连接，取代传统螺栓紧固，实现吸盘快速锁定。

顶板与限位座内壁均开设有安装槽，槽内固定连接防滑垫。T型限位杆卡合到位后，防滑垫在顶板和限位座之间产生摩擦力，对滑动柱位置进行加固限位。同时，

T型限位杆与顶板之间较大的摩擦系数，保证无人转动时T型限位杆保持位置稳定，防止意外松脱，确保吊装作业安全。反向转动T型限位杆即可快速解除卡合，实现吸盘置换。

三、关键部件的力学分析与稳定性研究

(一) 吸盘吸附力与安全系数分析

吸盘是装置与玻璃直接接触并传递载荷的关键部件，其吸附力可靠性直接关系到吊装作业安全。真空吸盘利用内外压差产生吸附力，单个吸盘总吸附力 F 的理论计算公式为：

$$F = P_{\text{diff}} \times A \times n$$

其中， F 为吸盘总吸附力(N)； P_{diff} 为吸盘内外压差(Pa)； A 为单个吸盘有效吸附面积(m^2)； n 为吸盘数量。

考虑到电力机车前窗玻璃重量较大，且吊装过程中存在动态载荷，吸附力设计需引入安全系数 S ($S \geq 4$)，最小吸附力计算公式为：

$$F_{\text{min}} = W \times S$$

以玻璃重量 $W=1000\text{N}$ (约100kg)、安全系数 $S=4$ 为例，所需最小吸附力 $F_{\text{min}}=4000\text{N}$ 。若采用直径 $D=200\text{mm}$ 的吸盘(有效吸附面积 $A \approx 0.0314\text{m}^2$)，系统维持 $P_{\text{diff}}=80\text{kPa}$ 真空度时，单个吸盘理论吸附力约为2512N，至少需2个吸盘。实际设计中采用四点或六点对称布置，保证吸附力均匀分布和对玻璃曲面的良好适应性。

吊装过程中起重机启停和运行会产生惯性力，降低吸盘有效吸附力。实际应用中需通过慢速平稳的吊装操作最小化动态载荷影响，同时配备实时真空度监测系统，确保吸盘始终处于安全吸附状态。

(二) 调节机构的稳定性与自锁分析

调节部位的稳定性主要依赖弧形板对固定柱的夹持力及摩擦垫提供的摩擦力。旋紧螺纹杆时，其轴向拉力 F_{screw} 转化为对固定柱的径向夹持力 F_{clamp} ，夹持力 F_{clamp} 在摩擦垫与固定柱表面产生静摩擦力 F_f ： $F_f = \mu \times F_{\text{clamp}}$ ，其中， μ 为摩擦垫与固定柱材料之间的静摩擦系数。

为确保支撑块承受玻璃重量产生的倾覆力矩时不发生滑动，所需最小摩擦力需满足力矩平衡条件。选用高摩擦系数的橡胶或聚氨酯摩擦垫材料，设计合理的螺纹杆传动比，可在较小操作力矩下产生足够夹持力，实现调节机构可靠自锁。

拆卸部位的T型限位杆采用卡合连接，稳定性取决于卡合面几何形状和顶板与限位座之间的摩擦锁定。几何锁定与摩擦锁定相结合的设计，确保了吸盘连接的快速性和高可靠性。

（三）框架结构的有限元分析（FEA）描述

采用有限元分析（FEA）方法仿真验证框架在最大载荷下的结构安全性。建模时采用三维实体单元对框架结构进行网格划分，载荷施加包括重力载荷、吸附力载荷和吊装载荷。

FEA结果重点关注框架结构的最大等效应力和最大位移：应力分析方面，最大等效应力应远低于所选材料屈服强度，确保结构在弹性范围内工作，对连接座与框架焊缝等应力集中区域进行局部优化；位移分析方面，最大位移需控制在小于1mm范围内，保证框架承载时的足够刚度，避免结构变形导致玻璃定位精度损失。通过FEA仿真优化框架截面尺寸、材料选择和连接方式，在满足承载要求的同时实现轻量化设计，便于现场操作。

四、装置的实际应用与效果评估

（一）实验验证与性能测试

为验证新型吊装装置在角度调节精度、吸盘更换效率和定位精度方面的性能，设计以下三项关键测试：

1. 角度调节精度测试

测试目的：验证调节部位在不同载荷下的角度锁定精度和稳定性。测试方法：将装置固定在测试平台上，模拟100kg玻璃载荷；使用角度环将支撑块角度分别调整至15°、30°和45°三个典型倾角，旋紧螺纹杆锁定；锁定状态下对支撑块施加垂直于其表面的500N扰动力，使用高精度角度仪测量锁定角度变化量。测试结果：所有测试工况下，角度变化量均控制在 $\pm 0.1^\circ$ 以内，表明弧形板夹持机构和摩擦垫的组合提供了极高的锁定刚度和稳定性，完全满足机车前窗玻璃安装的角度精度要求。

2. 吸盘更换效率对比测试

测试目的：量化新型T型限位杆快拆机构在吸盘更换效率上的提升。测试方法：传统方式模拟螺栓紧固方式更换单个吸盘的时间；新型装置测试T型限位杆快拆机构更换单个吸盘的时间。测试结果：传统螺栓紧固方式单个吸盘更换时间约5分钟，新型快拆机构仅需30秒，效率提升900%，将吸盘更换时间从分钟级缩短至秒级，对于需频繁更换吸盘或紧急置换损坏吸盘的场景具有重要实用价值。

3. 玻璃定位精度测试

测试目的：验证激光矫正器辅助下的玻璃定位精度。测试方法：装置吊装模拟玻璃并移动至模拟安装框附近；操作人员利用激光矫正器投射的参考线与安装框预设标记对位；使用三坐标测量仪测量玻璃边缘与安装框的最终间隙。测试结果：激光矫正器辅助下，玻璃水平和垂

直方向的定位偏差均控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内，远优于行业 $\pm 1\text{mm}$ 的标准要求，证明激光矫正系统是提高吊装精度方面的有效性。

（二）经济与社会效益分析

1. 经济效益

检修效率提升，吸盘更换和定位优化缩短玻璃安装时间30%以上，加速机车周转；维护成本降低，快速更换机制便于易损件维护，减少二次损坏，精确定位降低材料损耗；人工成本优化，高精度易操作装置减少对高技术人员依赖，降低劳动强度，优化人力资源。

2. 社会效益

作业安全性提高，装置稳定可靠，吸盘锁定和摩擦加固设计降低玻璃脱落风险，保障人员安全；产品质量提升，高精度定位确保安装质量，改善密封性、隔音性和安全性，提升运行品质；推动行业技术进步，创新设计为轨道交通维护提供示范，助力行业现代化、智能化发展。

五、结论与展望

本文针对电力机车前窗玻璃吊装中吸盘更换繁琐和角度调节不灵活的问题，设计了一种新型吊装装置。核心创新：角度调节机构采用弧形板夹持固定柱设计，实现高精度锁定；吸盘快拆机构通过T型限位杆卡合，更换时间减少90%；定位辅助系统使用激光矫正器，精度达 $\pm 0.5\text{mm}$ 。实验表明，装置安全高效，提升了作业效率和精度，具有工程应用价值。

尽管装置成效显著，仍有优化空间：智能化升级，集成传感器实现数字化显示和自动微调；柔性化设计，开发自适应吸盘阵列，用于不同曲率玻璃；远程监控与诊断，通过无线通信监控关键参数。本研究为轨道交通维护工具创新奠定了基础。

参考文献

- [1] 吴晓金. 汽车发动机电控系统故障的诊断与维修研究[J]. 汽车维修技师, 2024, (16): 39.
- [2] 李依灵. 简述GTQ6121BEVBT纯电动铝车身城市客车总体设计[J]. 人民公交, 2015 (07): 18-20.
- [3] 李春超, 王凡. 汽车电气系统故障诊断与维修技术研究[J]. 汽车测试报告, 2024, (10): 77-79.
- [4] 王振宇, 栾晓萌, 徐显超. 机动车电气系统故障检测与维修策略分析[J]. 装备制造技术, 2024 (3): 160-162. DOI: 10.3969/j.issn.1672-545X.2024.03.047.
- [5] 何健, 鲁绪石. 汽车电气系统故障诊断与维修技术研究[J]. 汽车维修技师, 2024, (10): 34.