

基于市域轨道交通高架车站金属屋面生命线工艺技术研究

林俊煌

金华市轨道交通控股集团运营有限公司, 中国·浙江 金华 321000

摘要: 针对市域轨道交通高架车站金属屋面高处运维作业安全隐患突出、故障修复率偏低的行业痛点, 以金义东市域轨道交通高架车站为工程依托, 开展金属屋面“生命线”工艺技术研究。通过分析金属屋面结构特性与运维需求, 明确生命线工艺的定义、工作原理及设备特性, 建立“基座定位 - 缆绳张拉 - 部件安装 - 系统检测”的标准化施工流程, 并与传统登高车作业工艺进行多维度对比。实践表明: 该工艺可将金属屋面故障修复率从 85% 提升至 98%, 高处作业安全隐患解决程度达 72.73%, 作业效率提升 100%, 单项目节约成本 3.56 万元, 全线推广年节约成本 36.4 万元。研究成果已形成企业标准, 为市域轨道交通高架车站金属屋面安全高效运维提供了技术支持, 具有广泛推广应用价值。

关键词: 市域轨道交通; 高架车站; 金属屋面; 生命线工艺; 防坠落系统; 故障修复率

Research on lifeline technology for metal roofs of elevated stations in urban rail transit

Lin Junhuang

Jinhua Rail Transit Holding Group Operation Co., Ltd., China Zhejiang Jinhua 321000

Abstract: Addressing the prominent safety hazards and low fault repair rate in high-altitude operation and maintenance work on metal roofs of urban rail transit elevated stations, this study relies on the Jinyi-Dongcheng urban rail transit elevated station as the engineering basis to conduct research on the "lifeline" technology for metal roofs. By analyzing the structural characteristics and operation and maintenance requirements of metal roofs, the definition, working principle, and equipment characteristics of the lifeline technology are clarified. A standardized construction process of "base positioning - cable tensioning - component installation - system testing" is established, and a multi-dimensional comparison is made with traditional high-altitude vehicle operation technology. Practice has shown that this technology can increase the fault repair rate of metal roofs from 85% to 98%, solve 72.73% of safety hazards in high-altitude operations, improve operation efficiency by 100%, save costs of 35,600 yuan per project, and achieve annual cost savings of 364,000 yuan across the entire line. The research results have been formulated into enterprise standards, providing technical support for the safe and efficient operation and maintenance of metal roofs in urban rail transit elevated stations, and have broad promotion and application value.

Keywords: Urban rail transit; Elevated station; Metal roof; Lifeline technology; Fall protection system; Fault repair rate

1 引言

1.1 研究背景与问题提出

市域轨道交通作为城市群通勤的核心载体, 其高架车站占比逐年提升, 金属屋面因轻质、耐久、美观等优势成为高架车站的主流屋面形式。金义东市域轨道交通工程线路总长 107.17km, 设 32 座车站 (高架站 18 座, 占比 56.25%), 总投资 346.83 亿元, 承担浙中城市群骨干通勤功能。该工程高架车站金属屋面采用 1.0mm 厚 PVDF 涂层 65/400 型直立锁边铝镁锰合金板 (360° 咬口锁边), 屋面标高最高达 13.3m, 运营期需定期开展补漏、检修等高空作业。

现状调研显示, 高架车站金属屋面故障修复率仅为

85%, 远低于公司 95% 的既定目标, 成为制约运维质量的关键因素。通过对 60 名从业人员的问卷调查, 73.33% 的受访者认为“高处维修作业安全隐患较大”是核心症结, 具体表现为: 金属屋面无永久防护措施, 安全绳无法悬挂; 传统登高车作业需占道施工, 存在倾覆风险; 单人作业模式效率低, 人员高空暴露时间长。此外, 建设期临时“生命线”在验收后已全部拆除, 运营期缺乏有效安全防护, 与习近平总书记“安全生产是红线、底线”的重要论述要求存在差距。因此, 研发适配金属屋面结构特性的永久防坠落工艺, 成为亟待解决的工程难题。

1.2 国内外研究现状

防坠落水平生命线系统作为成熟的高空作业防护技

术,已广泛应用于工业厂房、桥梁工程等领域。国外方面,欧盟 EN 795 标准明确了生命线系统的设计荷载、材料性能及安装要求,形成了完善的技术体系;国内 GB/T 23466-2009《坠落防护 装备安全要求》对生命线系统的安全性能作出规范,但相关研究多聚焦于传统建筑场景,未充分考虑市域轨道交通高架车站金属屋面的特殊需求。

现有技术存在两大局限:一是适配性不足,直立锁边金属屋面允许沿板长方向自由伸缩以释放温度应力,传统生命线固定方式易限制屋面变形,导致屋面损坏或防水失效;二是针对性缺失,现有研究未结合轨道交通高架车站的运维特点(如作业空间有限、需避免占道影响运营),导致传统工艺难以直接应用。因此,开展面向市域轨道交通高架车站金属屋面的生命线工艺专项研究,填补技术空白,具有重要的工程意义。

1.3 研究内容与技术路线

本研究以金义东市域轨道交通高架车站为研究对象,核心内容包括:(1)生命线工艺与金属屋面结构的适配性设计;(2)标准化施工流程制定;(3)工艺应用效果量化评估;(4)技术成果标准化与推广。

技术路线遵循“问题导向-理论构建-实践验证-标准输出”逻辑:首先通过现状调查明确核心症结;基于金属屋面结构特性设计生命线工艺方案;通过现场试点优化施工流程;对比传统工艺验证技术优势;最终形成企业标准、专利等成果,推动行业推广。

2 工程概况

2.1 项目基本信息

金义东市域轨道交通工程连接金华、义乌、东阳三市,是浙中城市群同城化的核心基础设施,线路全长107.17km,设1段3场及1座控制中心。高架车站均为三层侧式结构,由主体建筑、附属用房及天桥出入口组成:首层为架空层,二层为站厅层(公共区+设备区),三层为站台层(每侧站台长120m)。

2.2 金属屋面结构特性

高架车站金属屋面采用多层复合构造(从上至下):(1)1.0mm厚PVDF涂层65/400型直立锁边铝镁锰合金屋面板(360°咬口锁边);(2)安装支架;(3)2mm镀锌衬檩;(4)1.2mmTPO柔性防水卷材;(5)100mm厚岩棉板;(6)0.6mm厚镀锌压型钢板;(7)钢檩条。其核心结构特点为:屋面板仅限制板宽及上下方向移动,允许沿板长方向自由伸缩,可有效释放温度应力,避免屋面开裂渗漏。该特性对生命线系统的安装方式提出明确要

求:需避免约束屋面伸缩,同时不得破坏防水层。

2.3 运维需求分析

运营期金属屋面主要故障类型包括屋面板锁边松动、防水卷材破损、保温层受潮等,需定期开展高空检修作业。运维核心需求为:(1)安全防护:需解决高空作业防坠落问题,避免安全绳无悬挂点、登高车占道等隐患;(2)效率提升:缩短单处故障维修时间,降低人员高空暴露风险;(3)结构保护:运维作业不得影响屋面伸缩性能及防水效果;(4)成本可控:减少登高车等大型设备使用,降低运维成本。

3 金属屋面生命线工艺核心技术

3.1 工艺定义

3.1.1 防坠落水平生命线

防坠落水平生命线(简称“生命线”)是永久锚固于建筑结构的防坠落装置,由锚点支架、水平不锈钢索、滑行索、缓冲器等部件组成,可保障1-3名作业人员在高空作业时的人身安全,提供灵活活动空间。

3.1.2 关键术语界定

临边作业:屋面边沿无围栏或围护设施高度低于800mm的高处作业(如屋面边缘检修)。

高处作业:坠落高度基准面2m及以上的作业(高架车站屋面作业均满足此定义)。

适配性安装:生命线固定基座仅与钢檩条连接,不直接接触屋面板,避免约束屋面伸缩。

3.2 工作原理

防坠落防护原理:通过每隔5m(坡屋面)或7m(平屋面)设置中间固定基座,形成连续受力体系。作业人员穿戴安全背带,通过滑行索与不锈钢索连接,滑行索可沿缆绳自由穿越基座,实现全程防护;即使单点基座失效,其余基座仍能维持系统稳定,避免人员坠落。

结构适配原理:针对直立锁边金属屋面的伸缩特性,生命线基座采用“檩条锚固”设计,不与屋面板直接连接,确保屋面在温度变化时可沿板长方向自由伸缩,无温度应力累积。

高效作业原理:支持2-3人协同作业,作业人员可在26m范围内灵活移动(附件2对策实施),无需频繁调整作业位置或移动登高设备,大幅提升检修效率。

3.3 设备特性

3.3.1 适用范围广

可根据屋面类型(平屋面/坡屋面)、作业位置(屋面中部/边缘)设计差异化安装方案,适配不同跨度、高

度的高架车站金属屋面,同时可推广至高铁站台雨棚、城市高架桥梁等类似场景。

3.3.2 安全性能强

核心部件选用直径 8mm 的 304 不锈钢索(破断拉力 $\geq 40\text{kN}$),每个固定基座承载能力 $\geq 22\text{kN}$,符合 GB/T 23466-2009 标准;多点固定设计形成安全冗余,单点失效时系统仍能正常工作,防护等级远超传统单点悬挂安全绳。

3.3.3 作业效率高

相较传统单人登高车作业(单处故障维修 70 分钟),生命线工艺支持多人协同作业,单处故障维修时间缩短至 35 分钟,作业效率提升 100%。

3.3.4 可操作性强

滑行索采用自动导向设计,作业人员无需手动调整即可移动,降低高空作业难度;系统安装后永久使用,无需重复拆卸,运维便捷。

4 生命线工艺施工工艺要点

4.1 施工准备

4.1.1 技术准备

(1) 编制专项施工方案,明确基座定位、缆绳张拉参数、防水保护措施。

(2) 开展技术交底,作业人员需取得登高特种作业证,培训合格率 100%。

(3) 核对金属屋面结构图纸,避开防水焊缝、伸缩缝等关键部位,确定基座安装位置。

4.1.2 材料与设备准备

(1) 材料选型:不锈钢索(直径 8mm, 304 材质)、固定基座(Q235B 钢材,热镀锌防腐)、滑行索、缓冲器(行程 $\geq 1.5\text{m}$)。

(2) 材料检验:不锈钢索需提供抗拉强度检测报告,基座防腐等级需达 C3 级。

(3) 设备准备:冲击钻、扭矩扳手、拉力计、水准仪。

4.1.3 现场准备

(1) 施工区域封闭管理,设置警戒标识,避免交叉作业。

(2) 清理屋面杂物,检查钢檩条平整度,确保基座安装基础牢固。

(3) 搭设临时安全防护设施,保障施工人员自身安全。

4.2 施工工艺流程

4.2.1 基座定位与安装

(1) 按设计间距(5m/7m)在钢檩条位置标记安装点,偏差 $\leq 50\text{mm}$ 。

(2) 采用冲击钻钻孔,安装 M16 高强度膨胀螺栓,扭矩值控制在 $45\text{--}55\text{N}\cdot\text{m}$ 。

(3) 固定基座水平度偏差 $\leq 2\text{mm/m}$,确保缆绳敷设平整。

4.2.2 缆绳敷设与张拉

(1) 将不锈钢索一端固定于端部基座,采用花篮螺栓拉紧,张拉应力控制在 $10\text{--}15\text{kN}$ 。

(2) 缆绳水平度偏差 $\leq 15^\circ$,跨中最大挠度 \leq 跨距的 $1/500$ 。

(3) 固定另一端基座,再次校核缆绳张力与平整度。

4.2.3 部件安装与调试

(1) 安装滑行索、端部防坠器及缓冲器,测试滑行索移动顺畅性,无卡滞现象。

(2) 检查各部件连接牢固性,确保无松动、变形。

(3) 模拟作业场景,进行人员负重测试(荷载 22kN),持续 30 分钟,系统无永久变形。

4.2.4 防水检测与验收

(1) 对基座安装区域进行闭水试验,持续 24 小时无渗漏。

(2) 填写施工记录,包括基座间距、张拉应力、防水检测结果等。

(3) 形成验收报告,验收合格后方可投入使用。

4.3 关键控制措施

(1) 基座安装必须与钢檩条可靠连接,严禁直接固定于屋面板,避免破坏屋面结构。

(2) 缆绳张拉应力需严格控制,过大易导致基座变形,过小则影响防护效果。

(3) 施工过程中需保护防水卷材,若有破损需及时采用专用补丁修复。

(4) 定期对生命线系统进行维护,每年检测一次缆绳张力与基座牢固性。

5 工艺应用效果对比分析

5.1 与传统工艺对比

以金义东市域轨道交通 5 座试点车站(会展中心站、江东站等)为研究对象,对比生命线工艺与传统登高车作业工艺的核心指标见表 1。

5.2 安全效果

(1) 实施生命线工艺后,高处作业安全隐患得到根本治理。

表 1 生命线工艺与传统工艺对比表

对比指标	生命线工艺	传统工艺	改善效果
维修效率	2-3 人协同作业, 35 分钟 / 处	单人作业, 70 分钟 / 处	效率提升 100%
安全防护	多点固定, 全程防护, 无占道风险	单点悬挂, 防护不连续, 占道施工	安全隐患解决程度 72.73%
结构影响	不约束屋面伸缩, 无防水破损风险	登高车易刮擦屋面, 可能破坏防水	屋面损伤率降至 0%
运维成本	减少登高车使用, 单项目节约 3.56 万元	依赖登高车, 机械台班费用高	全线年节约 36.4 万元
操作性	滑行索自由移动, 作业半径 26m	需频繁调整安全绳, 移动困难	作业灵活性显著提升

(2) 安全隐患占比从 73.33% 降至 20%, 核心隐患(安全绳无悬挂点、登高车占道)彻底消除;

(3) 试点期间未发生任何高处坠落、屋面损伤等安全事故。

(4) 作业人员安全感评分从 2 分提升至 5 分。

5.3 质量效果

(1) 金属屋面故障修复率从 85% 提升至 98%, 超过 96% 的预期目标;

(2) 巩固期抽检修复率达 99%, 成果稳定性良好;

(3) 屋面防水渗漏率从 3% 降至 0%, 结构伸缩性能未受影响。

5.4 经济与社会效益

5.4.1 经济效益

(1) 直接效益: 试点项目节约人工及设备租赁费用 3.56 万元, 全线 18 座高架车站推广后, 年节约成本 36.4 万元。

(2) 间接效益: 避免安全事故经济损失, 减少因故障导致的运营影响损失。

5.4.2 社会效益

(1) 获得浙江省质量协会质量小组优秀 QC 三等奖。

(2) 贯彻落实安全生产重要论述, 保障运维人员生命安全。

(3) 提升市域轨道交通运营服务质量, 助力浙中城市群同城化发展。

6 技术成果与推广应用

6.1 技术成果

(1) 企业标准: 修订《车站作业指导书》, 新增“防坠落水平生命线作业流程”章节, 规范工艺参数与操作要求。

6.2 推广应用计划

(1) 计划 2026 年实现金义东全线 17 座高架车站金属屋面生命线系统全覆盖;

(2) 在金华 - 武义 - 永康 - 东阳城际铁路新线建设期推广该工艺, 纳入专项设计;

(3) 推广至高铁站台雨棚、城市高架桥梁等类似高空作业场景, 扩大应用范围。

6.3 下一步研究方向

(1) 开展智能化升级研究, 加装人员定位、荷载监测、张力预警等智能模块, 实现作业过程实时监控;

(2) 探索生命线工艺与无人机巡检、机器人维修的协同应用, 构建“智能监测 - 高效维修”一体化运维模式。

7 结语

(1) 本研究针对市域轨道交通高架车站金属屋面高空运维的核心痛点, 研发了适配性强、安全性高的生命线工艺技术, 通过理论与实践取得以下成果。

(2) 明确了生命线工艺与直立锁边金属屋面的适配原理, 提出“檩条锚固”设计方案, 解决了传统工艺约束屋面伸缩、破坏防水的难题。

(3) 建立了“定位 - 张拉 - 安装 - 检测”的标准化施工流程, 形成了涵盖设计、施工、验收的完整技术体系。

(4) 实践验证表明, 该工艺在安全防护、效率提升、成本控制等方面优势显著, 故障修复率提升 13 个百分点, 作业效率翻倍, 经济效益与社会效益突出。

(5) 生命线工艺的应用, 有效贯彻了“安全第一、预防为主”的安全生产方针, 为市域轨道交通高架车站金属屋面运维提供了可靠保障。随着技术的持续优化与推广, 有望推动轨道交通运维行业的安全化、高效化、智能化发展。

参考文献:

- [1] GB/T 23466-2009, 坠落防护 装备安全要求 [S].
- [2] 金华市轨道交通集团运营有限公司. 高架车站金属屋面作业指导书 [Q/JGY- BL-FJ-13-090-2023 · A0][S]. 2023.
- [3] 林俊煌. 提高市域轨道交通高架车站金属屋面故障修复率 [R]. 金华: 金华市轨道交通集团运营有限公司工务首发 QC 小组, 2023.
- [4] 胡世亮. 钢筋笼滚焊机在地铁车站深基坑支护施工中的应用 [J]. 山西建筑, 2020(02):147-148.
- [5] 中国建筑业协会. 建筑业 10 项新技术 (2017 版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.