

自动扶梯梯级相关间隙存在的问题及其对策

杨鹏远

亚龙智能装备集团股份有限公司, 浙江 温州 325105

[摘要] 自动扶梯作为地铁站、商业综合体等高人流场所的核心运输设备, 其安全性直接关联乘客安全与公共空间运营效能。梯级相关间隙问题是机械故障与事故的主要诱因, 贯穿设计、制造、安装及运维全生命周期。聚焦梯级水平啮合间隙、围裙板垂直防护间隙及梳齿板动态过渡间隙三类典型问题, 系统分析隐患成因, 涵盖设计冗余不足、材料疲劳劣化、安装累积误差与运维响应滞后等复合因素。提出分阶段设计优化(模块化公差匹配、抗形变材料)、数字化安装校准(激光补偿、多工况调试)、智能化运维监测(振动频谱分析、自适应润滑)及主动安全防护(多模态传感预警、边缘钝化改造)的集成方案, 形成覆盖全周期的技术体系。通过跨学科理论与工程验证, 为自动扶梯安全阈值提升与运行效能优化提供方法论支撑, 推动行业标准迭代与技术创新。

[关键词] 自动扶梯; 梯级间隙; 安全防护

DOI: 10.33142/ucp.v2i2.16255

中图分类号: TH236

文献标识码: A

Problems and Countermeasures of Gap Related to Escalator Steps

YANG Pengyuan

Yalong Intelligent Equipment Group Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang, 325105, China

Abstract: As the core transportation equipment in high flow places such as subway stations and commercial complexes, the safety of escalators is directly related to passenger safety and the operational efficiency of public spaces. The gap issue related to the steps is the main cause of mechanical failures and accidents, which runs through the entire life cycle of design, manufacturing, installation, and operation. Focusing on three typical problems: the horizontal meshing gap of the steps, the vertical protection gap of the apron plate, and the dynamic transition gap of the comb plate, a systematic analysis of the causes of hidden dangers is conducted, covering composite factors such as insufficient design redundancy, material fatigue degradation, cumulative installation errors, and delayed operation and maintenance response. Propose an integrated solution for phased design optimization (modular tolerance matching, anti deformation materials), digital installation calibration (laser compensation, multi condition debugging), intelligent operation and maintenance monitoring (vibration spectrum analysis, adaptive lubrication), and active safety protection (multimodal sensing warning, edge blunting transformation), forming a technical system covering the entire cycle. Through interdisciplinary theory and engineering verification, provide methodological support for improving the safety threshold and optimizing the operational efficiency of escalators, and promote industry standard iteration and technological innovation.

Keywords: escalator; step gap; safety protection

引言

自动扶梯作为现代城市垂直运输的核心设施, 其安全运行直接影响公众生命财产安全与社会秩序稳定。梯级作为自动扶梯的关键运动部件, 与围裙板、梳齿板及导轨等固定部件间的间隙控制, 是平衡机械效率与乘员安全的决定性因素。合理间隙设计不仅能保障梯级链条传动的稳定性、降低部件磨损速率, 还可有效避免乘客足部、衣物或随身物品被意外卷入的潜在风险。近年来, 梯级间隙超标或动态失衡引发的夹伤事故与设备急停故障频发, 暴露出部分设备在设计冗余不足、制造精度偏差、安装调试疏漏及运维响应滞后等环节的综合性缺陷。此类问题在客流密集的地铁站、购物中心等场景下尤为显著, 瞬时载荷突变或长期疲劳积累易导致间隙参数的不可逆劣化, 威胁公共安全。结合机械动力学原理与安全工程理论, 基于国内外

技术标准(如 EN 115、GB 16899)的合规性框架, 系统分析梯级间隙异常的成因机制与演化规律, 涵盖材料疲劳、装配误差及动态载荷等多重因素。通过设计优化、工艺升级与智能运维的集成化解决方案, 提出全生命周期风险管控策略, 为自动扶梯的安全管理提供理论与实践参考, 助力行业技术标准迭代与安全事故预防体系的完善。

1 自动扶梯的梯级结构及相关间隙

自动扶梯的梯级是承载乘客并实现连续运行的核心组件, 其结构主要由踏面、踢板、梯级边框、支撑架及梯级滚轮等部件组成。踏面作为乘客的直接接触面, 需具备防滑与耐磨损特性; 踢板位于踏面前端, 通过垂直挡板防止鞋物嵌入梯级间隙; 梯级滚轮通过驱动链条与导轨连接, 确保梯级沿预设轨道平稳移动。根据结构型式, 梯级可分为组合型与整体型: 组合型梯级因生产工艺复杂且运行中

易出现部件松动等问题,实际应用极少;主流自动扶梯普遍采用整体型梯级,其由铝合金一次性压铸成型,经机械加工后形成高精度结构,踏面边缘常涂覆黄色警示条或镶嵌黄色塑料带,以引导乘客站立于安全区域。梯级表面设计有齿槽结构,与前后相邻梯级及梳齿板形成啮合关系,保障运行连贯性。在梯级链驱动与滚轮轨道的约束下,梯级两侧需与围裙板紧密贴合,同时保持动态间隙的稳定性。国家标准(如 GB 16899)对梯级与围裙板的垂直间隙、梯级间的水平啮合间隙及梳齿板啮合深度等参数设定了严格的阈值范围与检测方法。尽管设备在安装调试阶段可通过精密校准控制初始间隙,但在长期运行中,因梯级滚轮的微动磨损、驱动链条的节距拉长、围裙板材料的疲劳形变或外部载荷的周期性冲击,间隙可能逐渐偏离安全范围。例如,梯级齿槽与梳齿板的啮合面因长期摩擦导致间隙扩大,或围裙板支撑结构的应力松弛引发单侧间隙收缩。此外,环境粉尘侵入、润滑剂劣化等运维疏漏会加速间隙异常的形成。因此,需通过全周期监测与动态调整,结合材料性能优化与工艺升级,系统性抑制因部件磨损、形变或装配误差引发的安全隐患。

2 自动扶梯梯级相关间隙存在的问题及其成因分析

2.1 梯级与梯级之间的间隙

梯级间的水平间隙超标是自动扶梯运行中的常见问题,主要表现为相邻梯级在运行过程中出现错位或间隙不均匀。其成因复杂且多源于设备全生命周期的综合作用:驱动链条长期承受动态载荷易发生塑性变形或节距拉长,导致梯级运动轨迹偏离理论设计轴线;导轨支撑结构的局部变形则可能因材料疲劳或外部冲击产生,进一步破坏梯级队列的同步性。安装阶段若未严格按照工艺要求校准导轨水平度与链条张紧度,可能造成初始间隙分布不均,在后续运行中因应力集中加速部件磨损。部分制造商为降低成本,采用低精度模具加工梯级滚轮或简化链条热处理工艺,导致组件配合公差超出安全阈值,在温度变化或高频振动下诱发间隙波动。此类问题具有渐进性和隐蔽性,初期可能仅表现为轻微异响或振动,但随着间隙异常扩大,梯级间动态啮合失效风险显著上升,不仅可能引发梯级卡阻或踏板断裂,还会因运动干涉加剧链条与导轨的磨损,形成恶性循环。同时,间隙超标区域易在乘客乘梯时形成局部陷阱,鞋尖、裙摆等细小物品可能被卷入梯级啮合面,轻则造成设备急停,重则导致人身伤害,对公共安全构成潜在威胁。

2.2 梯级与围裙板之间的间隙

围裙板与梯级侧面的垂直间隙是防止乘客脚部被夹伤的关键参数,其稳定性直接依赖于设计、安装与维护的多环节协同。实际应用中,围裙板若因安装基座螺栓松动或校准工具精度不足发生倾斜,会导致梯级侧面与围裙板

间的单侧间隙局部收缩或扩张,形成非对称夹缝。梯级侧向导轨的磨损问题在长期高负荷运行中尤为突出,滚轮与导轨接触面的摩擦损耗会削弱梯级横向定位精度,使梯级在运动中产生横向漂移,加剧间隙的随机性波动。重载工况下,梯级踏板因承受集中载荷可能发生轻微塑性变形,导致其与围裙板的瞬时间隙超出静态标定值,这种动态变化在客流高峰时段易引发突发性夹入风险。围裙板材料的耐磨损性不足则会加速间隙失控进程,例如普通工程塑料在频繁摩擦下易产生表面划痕或热变形,破坏与梯级侧面的平整接触,而金属围裙板若未进行表面硬化处理,其边缘可能因磨损形成锐利毛刺,进一步扩大间隙并增加异物卡入概率。此外,环境温湿度变化引起的材料膨胀系数差异,可能导致围裙板与梯级框架产生季节性间隙偏移,此类隐患在缺乏周期性调整的设施中尤为显著,最终威胁乘梯安全与设备寿命。

2.3 梯级与梳齿板之间的间隙

梳齿板与梯级踏板的啮合间隙异常会引发梯级卡滞或梳齿板断裂,其成因贯穿设备安装、使用与维护的全过程。安装调试阶段若未采用高精度水平仪校准梳齿板基座,可能导致其与梯级踏板的水平对位偏差,在运行中形成局部干涉或脱离现象。梳齿板齿部与梯级踏板的啮合深度需严格匹配,若初始调试时未模拟实际载荷进行动态测试,轻载与重载工况的形变差异将导致间隙随运行状态波动。材料方面,低强度复合材料制成的梳齿板在长期交变应力作用下易发生齿根微裂纹扩展,而金属梳齿板若未进行防腐处理,在潮湿环境中可能因锈蚀削弱结构完整性,加剧齿部变形风险。润滑不足会显著增加梳齿与梯级踏板的摩擦系数,尤其在高速运行场景下,干摩擦产生的瞬时高温可能引发材料热膨胀,破坏原有间隙平衡。设备启停阶段,驱动系统的惯性作用会使梯级踏板与梳齿板间产生冲击载荷,若缓冲装置设计不合理或老化失效,反复的瞬时应力将加速啮合面磨损,甚至导致梳齿断裂后嵌入梯级间隙,引发机械卡死或急停故障。此外,梳齿板固定螺栓的松动或预紧力衰减可能造成整体位移,使间隙异常从局部扩展至整机范围,进一步放大安全隐患。

3 应对梯级相关间隙问题的对策与解决方案

3.1 设计与制造优化

梯级组件的设计与制造优化是控制间隙问题的核心策略,需从结构创新、材料升级与工艺革新三方面协同推进。模块化设计通过标准化接口提升梯级与围裙板、梳齿板的匹配精度,例如可调式滚轮支架采用滑轨微调机构,允许装配阶段对水平对位与垂直间隙进行毫米级修正,适配不同工况下的形变补偿需求。基于三维仿真的动态载荷模拟技术可复现梯级在峰值载荷、紧急制动及温度交变等复杂场景下的形变趋势,结合热力学分析优化围裙板公差带设计,精准预判材料热膨胀系数差异对长期间隙稳定性

的影响。材料创新层面,碳化硅颗粒增强铝基复合材料替代传统铸铁滚轮,在保持同等强度的前提下降低惯性质量,抑制高速运行中的振动幅值,同时通过晶界强化效应提升抗蠕变性能;围裙板表面采用等离子喷涂氧化铬涂层,在降低摩擦系数的同时赋予表面自清洁特性,有效抑制粉尘静电吸附引发的间隙堵塞^[1]。滚轮轴承引入石墨镶嵌自润滑技术,利用石墨层间滑移特性实现低摩擦传动,或采用聚醚醚酮(PEEK)高分子衬垫,在高温高湿环境下保持尺寸稳定性,配合全封闭式迷宫密封结构阻断粉尘与潮气侵入,显著降低润滑失效导致的间隙偏移风险。精密铸造工艺结合五轴数控加工,可消除踏板因冷却收缩产生的残余应力,确保踏面平面度误差小于0.1mm,踢板垂直度偏差控制在 $\pm 0.5^\circ$ 以内,从源头减少安装调试阶段的补偿工作量。制造环节在梯级关键承力部位植入MEMS微型传感器或激光刻录RFID芯片,实时采集形变、温升等参数,构建全生命周期质量溯源数据库,为运维阶段提供部件退化规律预测与精准换件决策支持,形成设计-制造-运维闭环管控链路。

3.2 安装与调试规范

安装与调试是保障梯级间隙符合设计标准的核心环节。安装前需评估建筑结构稳定性,消除支撑梁偏移对导轨基准面的干扰,采用激光跟踪系统对导轨进行多轴校准,确保与围裙板的垂直度及水平平直度达到微米级精度。梯级间隙检测需结合红外扫描与接触式探针技术,实时捕捉运动轨迹的三维偏差,通过自适应算法修正导轨角度,避免局部应力引发的间隙畸变^[2]。调试阶段通过液压加载装置模拟变载工况,优化梳齿板啮合深度与踏板相位匹配,并利用闭环反馈调节链条张紧力阈值,确保空载至满载的间隙波动处于弹性补偿范围。验收环节需建立数字化档案,记录激光校准数据、间隙热力图及载荷测试曲线,借助区块链技术实现数据防篡改存储,为运维提供可追溯基准。安装人员需通过VR模拟器进行复杂工况下的间隙调整训练,结合技能认证体系提升操作规范性,从技术与管理层面保障安装质量。

3.3 运维管理强化

运维管理强化需建立全生命周期监测维护体系,通过技术融合与管理优化实现间隙主动防控。传感器网络可实时监测梯级链条张力与围裙板摩擦温度,结合算法分析预测间隙劣化阈值。针对高频磨损区域,采用等离子喷涂或原位聚合技术修复磨损面,避免停机更换造成的效率损失。润滑管理需按环境与负载制定策略,如高粉尘环境采用高黏附润滑脂,并部署自动注油系统提升精度。人员培训需依托虚拟仿真平台,模拟间隙异常故障,强化振动、噪声与轨迹偏移的关联分析,建立标准化应急处置流程。运维

数据数字化归档与趋势分析可优化备件库存与维护计划,形成长效闭环机制。

3.4 安全防护改进

安全防护改进需结合主动预警与被动防护策略,系统性降低间隙风险。设备本体可集成多级传感与响应装置,围裙板边缘采用高弹性硅胶防夹条,内嵌导电纤维层实现接触式报警,通过形变吸收挤压力并触发急停信号;梳齿板前端部署多光谱传感阵列,实时监测异物侵入轨迹,联动控制系统实现毫秒级制动或反向运行。针对乘客行为,利用智能视频分析技术识别危险动作(如儿童攀爬、行李滞留),通过动态投影与定向语音提示引导乘客远离高危区域^[3]。老旧扶梯改造需兼顾安全与结构稳定,例如采用热压成型工艺将围裙板锐角转为渐进式圆弧过渡,或在梳齿板啮合面嵌入尼龙缓冲层吸收冲击能量。模块化防护组件(如磁吸式防夹挡板、可拆卸导流罩)可快速加装至现有设备,提升防护适应性而不影响主体结构。通过监测一预警一阻断闭环机制与人机协同安全教育,显著增强间隙异常工况的主动防御能力。

4 结语

自动扶梯梯级间隙安全管理需贯穿设计、制造、安装及运维全生命周期,通过多环节协同与技术升级实现风险可控。设计阶段借助仿真优化与新材料研发提升结构稳定性,制造环节依托精密加工与质量溯源保障部件精度,安装调试通过激光校准与动态载荷测试消除累积误差,运维周期引入智能监测与预防性维护动态调整间隙参数。技术防护、行为引导与制度约束的整合可提升安全效能,例如物联网预警平台实时监控间隙变化,虚拟现实培训系统强化乘客安全意识,数字化评级标准量化梯级健康状态。未来,数字孪生技术可动态模拟间隙演变趋势,边缘计算支持实时风险决策,高耐磨材料的应用将增强部件形变恢复能力,推动安全防护向智能化发展。行业需建立制造商、运维方与监管机构的协同创新机制,促进标准规范与技术革新同步迭代,实现间隙风险的源头治理与长效管控,为公共交通安全提供可靠保障。

【参考文献】

- [1] 邱郡. 自动扶梯梯级相关间隙存在的问题及其对策[J]. 中国电梯, 2024, 35(5): 58-61.
 - [2] 毕晓林. 自动扶梯常见故障的分类及其原因分析[J]. 中国电梯, 2024, 35(7): 78-80.
 - [3] 王进, 梁峻欣, 周显元, 等. 新型自动扶梯围裙板防夹开关的设计[J]. 中国电梯, 2024, 35(11): 15-17.
- 作者简介: 杨鹏远(1981.7—), 男, 单位名称: 亚龙智能装备集团股份有限公司, 毕业学校和专业: 电子科技大学/机械制造与自动化。