

芜湖市跨坐式单轨 2 号线无人驾驶车辆车门紧急解锁装置的设计优化

荣 军¹ 刘敏敏¹ 徐旺锋² 吴社杰²

(1. 中车浦镇庞巴迪运输系统有限公司, 241060, 芜湖;

2. 南京康尼机电股份有限公司, 210046, 南京//第一作者, 工程师)

摘 要 基于芜湖市跨坐式单轨 2 号线无人驾驶系统下的特定场景, 对传统的紧急解锁与隔离装置分开设计的控制方式进行了深入分析, 提出了一种新的特定条件下车门紧急解锁装置及联动解除隔离的设计。通过验证分析, 新设计方案能够解决传统的车门紧急解锁装置及隔离装置在无人驾驶轨道车辆上的缺陷。

关键词 跨坐式单轨; 无人驾驶; 车辆; 紧急解锁装置

中图分类号 U270.38+6; U232

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.10.029

Optimization Design of Emergency Door Unlock Device for the Driverless Vehicle of Wuhu Straddle Monorail Line 2

RONG Jun, LIU Minmin, XU Wangfeng, WU Shejie

Abstract Based on specific scenarios of the straddle monorail in driverless operation mode on Wuhu Line 2, the traditional emergency door unlock device and the design of linkage isolation disengagement device are analyzed in depth. On this basis, a new solution to these problems under new specific conditions is proposed. Through verification and analysis, the new solution is proved to solve the traditional vehicle defects of straddle monorail in driverless operation mode.

Key words straddle monorail; driverless mode; vehicle; door emergency unlock device

First-author's address CRRC Puzhen Bombardier Transportation Systems Ltd., 241060, Wuhu, China

无人驾驶作为轨道交通行业的新兴浪潮, 是未来发展的方向。无人驾驶轨道交通车辆的运行条件与有人驾驶情况下的运行条件存在着根本性的差异: 无人驾驶下的轨道交通车辆在正常运行过程中所有作业均由系统自动实施, 不需司机或站务员进行干预。客室车门作为车辆系统中安全

级别较高的系统, 其设备可靠性直接关系到乘客的出行安全。因此, 无人驾驶车辆的车门紧急解锁装置需要进行专门的设计, 以确保在正常运营和紧急情况下都能可靠保障乘客的生命安全。芜湖市跨坐式单轨 2 号线(以下简称“芜湖 2 号线”)采用了 PBTS 跨坐式单轨车辆, 列车不设置司机室, 采用无人驾驶(UTO)模式运营。本文对芜湖 2 号线无人驾驶车辆车门紧急解锁装置的设计优化方案进行介绍。

1 城市轨道交通车辆车门紧急解锁装置现状^[1]

目前国内轨道交通车辆的车门紧急解锁装置大多采用机械式解锁。车门紧急解锁装置和车门隔离装置独立设计, 隔离装置在车门系统中拥有最高优先级。车门紧急解锁装置的操作把手仅通过易碎的透明保护盖进行防护, 日常运行过程中需要司机进行一些辅助操作:

1) 车门内紧急解锁装置的透明保护盖为易碎品, 从设计上就要求容易打破, 因此不能防止个别乘客对车门紧急解锁装置实施非法操作。一旦车门紧急解锁装置在车辆运行过程中被操作, 列车将触发紧急制动, 此时需要司机将被操作的车门紧急解锁装置实施手动复位并关闭车门, 车辆方可继续运行。

2) 隔离装置安装在车体内部, 在乘客视野内完全隐蔽, 且只能通过乘务员专用钥匙操作。当车门被隔离时, 一旦发生如火灾等紧急情况, 需要司机先将车门系统解除隔离, 再操作车门紧急解锁装置将门系统解锁并打开, 乘客才能从该门疏散。

无人驾驶轨道交通在运行时不配备司机, 而以上设计在没有司机辅助操作下, 功能的安全性完全

丧失。因此,如何有效阻止乘客非法操作紧急解锁,以及在紧急情况下乘客如何快速解锁被隔离的门系统,是无人驾驶轨道交通车辆在设计阶段时需要考虑的重点内容。

2 无人驾驶车辆车门紧急解锁装置的功能需求分析

常规轨道交通车辆的紧急解锁功能在优先级设计和动作许可设置方面均无法满足无人驾驶的运行条件,因此,芜湖 2 号线的车辆在设计时,重新对无人驾驶车辆的车门紧急解锁装置进行了功能需求分析,并与有人驾驶的常规轨道交通车辆进行了功能差异对比,如表 1 所示。

表 1 车门紧急解锁装置的功能差异对比		
门系统状态	常规制式轨道交通车辆	无人驾驶轨道交通车辆
未隔离,解锁车门	乘客可以操作解锁	乘客可以操作解锁
隔离情况下,内部解锁车门	乘客无法完成解锁	乘客可以完成解锁
隔离情况,外部解锁车门	司机无法完成解锁	乘客可以完成解锁
阻止非法操作	凭乘客自觉,无法杜绝	可完全阻止乘客随意操作解锁装置

根据对车门紧急解锁装置功能的分析和比较,芜湖市 2 号线按照以下设计原则对列车的车门紧急解锁装置进行了设计优化:

- 1) 增加了操作把手的抑制功能。列车在运行过程中禁止乘客通过操作车门紧急解锁装置打开车门;
- 2) 紧急解锁功能拥有着最高优先级。在发生紧急情况时,即便车门被隔离,也能通过操作紧急解锁装置来实现解锁开门动作。

3 芜湖 2 号线车辆车门内紧急解锁的功能及其原理

根据车门紧急解锁装置的功能需求和设计原则,芜湖 2 号线车辆针对车门紧急解锁装置进行了设计优化。优化后车门紧急解锁装置主要由车门内解锁机构、车门外解锁装置和车门解锁装置等 3 大机械组件构成(见图 1),机械组件间通过钢丝实现车门紧急解锁装置触发、复位的传动和同步。现对这 3 大机械组件的相关功能进行介绍。

3.1 车门内紧急解锁抑制功能

芜湖 2 号线车门车内紧急解锁装置增加了紧急

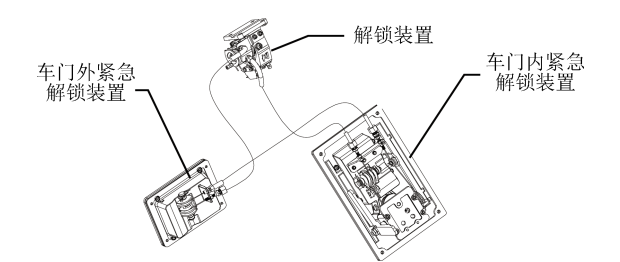


图 1 芜湖 2 号线车辆车门紧急解锁装置互连示意图

解锁抑制功能,可彻底防止乘客随意操作车门内部紧急解锁开关,实现在非指定场景(如非逃生疏散通道侧)乘客无法操作车门车内紧急解锁进行机械解锁的功能。该抑制功能通过“门抑制”信号控制电磁铁的得、失电来实现(见图 2)。考虑到车辆在紧急情况下有断电的可能性,因此默认设计电磁铁在失电状态下“门抑制”功能失效。

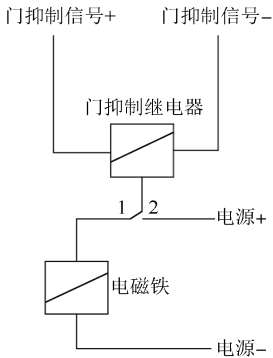


图 2 电磁铁“门抑制”功能原理

1) “门抑制”信号无效。如图 3 所示,电磁铁失电释放状态下,制动杆在过渡盘之外,车门车内紧急解锁功能可以正常使用,紧急情况下乘客可操作紧急解锁把手至解锁位置,此时过渡盘转动,实现车门解锁。

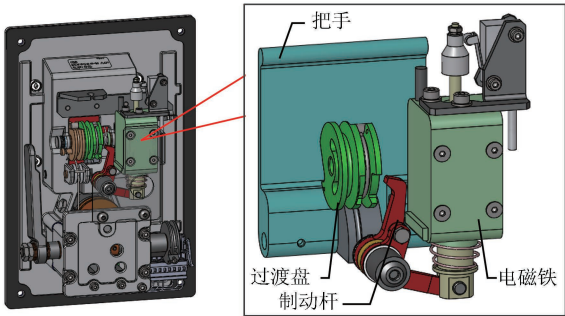


图 3 电磁铁失电状态

2) “门抑制”信号有效。如图 4 所示,电磁铁得电吸合状态下,制动杆因电磁铁吸合作用发生转动并插入到过渡盘预留缺口中,实现对过渡盘的制

动,乘客无法操作车内紧急解锁把手,从而实现了抑制功能。

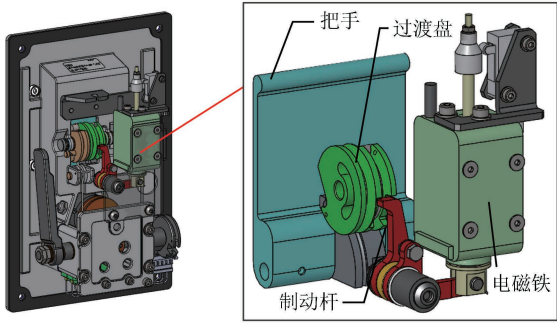


图4 电磁铁得电状态

3.2 隔离及解锁联动功能

2 号线车门车内紧急解锁装置设计时集成了车门隔离装置功能的特点,在车内紧急解锁正面有一个供司机操作的隔离装置,可以使用专用的司机钥匙进行操作(见图 5)。该设计既能实现车门故障时将车门隔离的功能,同时解锁钢丝绳连接解锁轮(见图 6)也能实现车门被隔离后操作车内及车外车门紧急解锁装置联动解锁隔离的功能。具体功能原理描述如下:

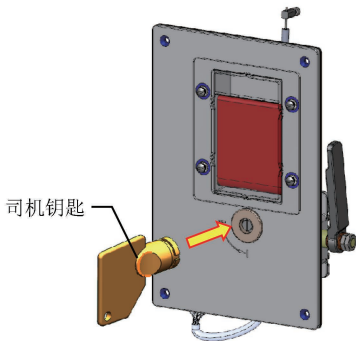


图5 车门隔离操作示意图

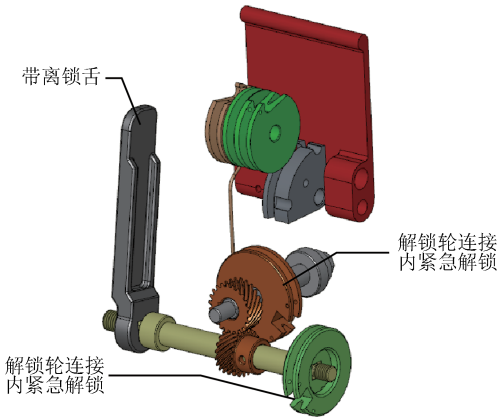


图6 车门内紧急解锁装置未隔离状态

考虑到芜湖 2 号线为无人驾驶的运营场景,发生紧急情况时车内没有司机协助将隔离的车门复位,而未受过专业培训的乘客对车门结构并不了解,唯一醒目且可操作的装置是车门内紧急解锁手柄,因此,车门内紧急解锁的优先级必须要高于隔离装置。鉴于以上情况,芜湖 2 号线车辆将紧急解锁与隔离装置进行了联动,具有即使车门被隔离后,也可以操作车门内紧急解锁或车外紧急解锁将门系统打开的功能(即联动功能)。

如图 6 所示,隔离锁轴上有两个解锁轮,分别与车门内紧急解锁装置和外紧急解锁装置相连接。在非隔离状态下,操作紧急解锁把手后,因为差动连接设计,解锁轮不会发生动作;一旦车门被隔离,隔离锁舌的转动会带动解锁轮转动,差动连接被补偿,此时操作车门内紧急解锁装置或者车门外紧急解锁装置,隔离锁舌均会复位,车门退出隔离并同时完成解锁。

4 安全验证与计算

芜湖 2 号线在正常运营中,电磁铁必须处于常得电的状态。电磁铁功能不能受到自身的温升、高低温、高低压等环境状态的影响。一旦电磁铁失效,将导致抑制功能失效。因此电磁铁的可靠性和安全性十分重要,需要分别进行测试。

4.1 温升测试

电磁铁在 DC 110 V 电压下连续通电 4 h 后,电磁铁壳体温度稳定在 68.6 ℃,未超过 80 ℃,符合设计要求。

4.2 环境测试

设置环境测试箱交变环境循环,其中:低温环境为-25 ℃,0%湿度,持续 1 h;高温环境为 70 ℃,95%湿度,持续 1 h;

测试时,每 2 h 完成 1 次高低温循环,累计测试时间为 48 h。使用外部电路控制电磁铁 0.5 s 吸合,1.5 s 释放。持续循环测试 48 h 后验证得知,电磁铁功能正常。

4.3 寿命试验

在工作电压下,设置电磁铁 0.05 s 吸合、0.95 s 释放,反复循环试验了 2.07×10^6 次后电磁铁功能正常,满足不低于 2.00×10^6 次的试验要求。

4.4 风险评估

以上所有相关试验已确定当前电磁铁可以满

足设计需求。除此以外,还需要通过可靠性指标对电磁铁整体的安全性进行评估。

- 电磁铁安全性分析基于以下 5 个假设:
- 1) 每 3 个月进行一次安全检查,包括检查车门内紧急解锁的功能检查。所以,任务隐蔽故障在定期检查时,100%可以被探测出。
 - 2) 假设 1 天内单个电磁铁需要持续运营 16 h,1 年运营 365 天,即 1 年累计运营 5 840 h,3 个月累计运营时间1 460 h。
 - 3) 车辆软件安全等级满足 SIL2 级,假设软件失效率为 1×10^{-6} 次/h。
 - 4) 列车在运行过程中始终有“门抑制”信号。
 - 5) 不考虑列车信号错误。
- 表 2 为参照相关标准明确定义的 4 种严重性等级^[2]及 6 个危险发生频度^[2]。表 3 为不同危险发生频度对应的取值区间。
- 利用故障树分析法对“列车运行时,乘客操作紧急解锁,车门被打开”风险进行分析(见图 7)。评定该风险事件的失效率为 4.269×10^{-12} 次/h。则由表 3 可知,因“列车运行时,乘客操作紧急解锁,车

表 2 故障风险矩阵^[2]

危险发生频度	不同严重性等级下的综合风险等级			
	I	II	III	IV
A-频繁的	R4	R4	R4	R3
B-可能的	R4	R4	R3	R2
C-偶然的	R4	R3	R3	R2
D-极小的	R3	R3	R2	R1
E-不可能的	R2	R2	R1	R1
F-难以置信的	R1	R1	R1	R1

注: R1—可忽略的;R2—可容忍的;R3—不希望有的;R4—无法接受的;I—灾难性的;II—严重的;III—不严重的;IV—无关紧要的

表 3 危险发生频度的取值

频度等级	取值(次/h)
A-频繁发生	$\geq10^2$
B-可能发生	$10^1\leq\cdot<10^2$
C-偶然发生	$10^{-2}\leq\cdot<10^1$
D-极小的	$10^{-4}\leq\cdot<10^{-2}$
E-不可能	$10^{-6}\leq\cdot<10^{-4}$
F-难以置信	$<10^{-6}$

门被打开”的危险发生频度为“F-难以置信”。故根据表 2,将该风险事件严重性等级定义为 II 级,其综合风险等级为 R1,即“可忽略的”风险。

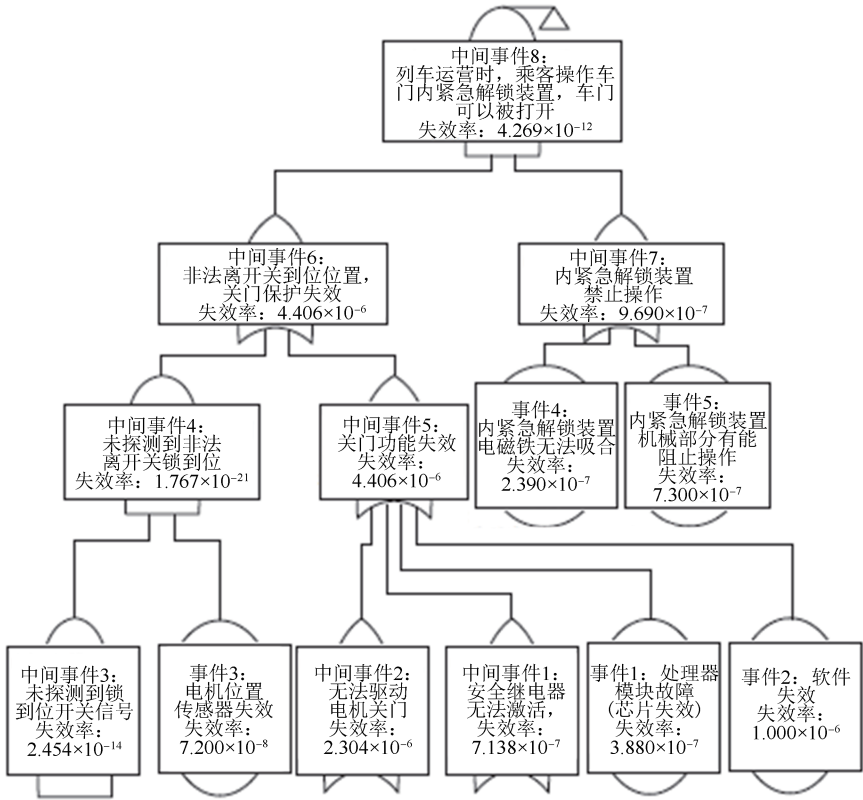


图 7 “列车运行时,车门内紧急解锁被打开”场景故障树分析

控制模块上(见图 11);

4) 对称调节工装各处夹紧螺杆,以满足产品尺寸要求,然后进行定位焊接;

5) 移除 y 向控制模块,进行后续满焊作业。

采用自带刻度的夹紧螺杆完成各夹紧位置的调节后,编号记录调节量。通过与构架最终结果进行对比,在下一构架组装时进行微调完善,待产品尺寸稳定控制后,把各处刻度读数就近标识与对应位置形成工艺标准。再次组装时根据标示值实现快速调节,以提高工作效率。

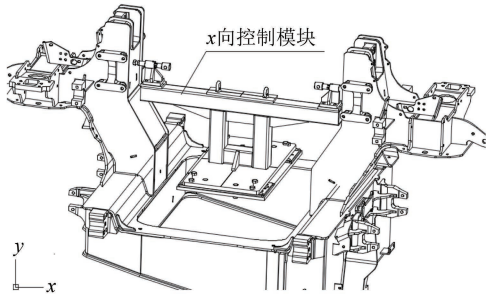


图 10 x 向控制模块组装

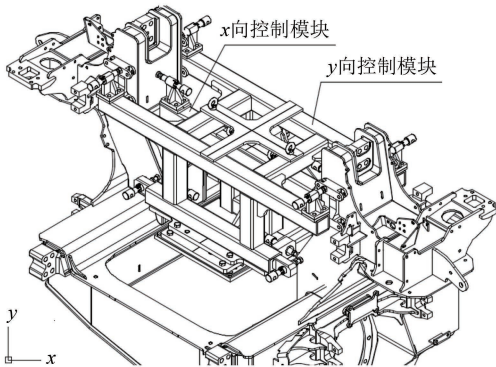


图 11 y 向控制模块组装

2.4 优化前后的结构对比

首先,优经后的工装提高了生产效率,组装时间由原来的 194 min 减少至约 62 min,生产效率提升了约2倍;其次,优化后的工装可以进行精确

(上接第 117 页)

5 结语

芜湖市跨坐式单轨 2 号线车辆车门的紧急解锁装置和隔离装置在设计上充分考虑了无人驾驶车辆的特点,既保证了紧急情况下乘客从车门紧急疏散的可用性,也保证了非疏散平台侧车门不可被解锁的安全性,可以作为未来无人驾驶车辆车门紧急

组装定位、焊接变形控制及量化预变形,可实现对构架侧梁尺寸有效控制。选取工装优化前后的组焊构架各三件进行焊后尺寸检测对比,结果如表 1 所示。

表 1 优化前后构架关键尺寸处偏差测量结果对比 mm

项目	构架 编号	位置 1 偏差	位置 2 偏差	位置 3 偏差	位置 4 偏差	1001 ⁰ ₋₃ 处偏差	249 ⁰ ₋₃ 处偏差
优化前	1 [#]	-2.6	3.0	3.2	-2.5	-2.2	1.2
	2 [#]	-1.8	1.2	2.1	-1.5	1.4	-1.8
	3 [#]	-3.2	2.4	-1.5	2.3	1.5	-1.0
优化后	4 [#]	-1.4	0.5	1.6	-1.2	1.4	-1.5
	5 [#]	-0.5	-1.0	1.0	-1.0	-1.2	1.0
	6 [#]	-1.2	-0.8	-0.5	1.0	1.0	-1.3

注:构架关键尺寸见图 3

3 结语

本文设计制作的组合式工装,实现了跨坐式单轨车辆转向架构架的侧梁精确组装定位、焊接过程变形控制及预变形量化,有效控制了产品 x 方向和 y 方向的尺寸。该组合式工装结构可以在定位完成后移除干涉焊接作业的模块,从而为后续的焊接作业预留出足够的作业空间。

刻度螺杆的创新采用,实现了组装尺寸及焊接变形的量化,满足组装过程对尺寸记录、可追溯性方面的要求,为组装尺寸的对比分析、优化、预变形量设置等提供了有效的数据支撑。通过不断优化调节量,可实现产品尺寸的有效快速控制,以及产品质量的稳步提升。

参考文献

[1] 仲建华.跨坐式单轨交通在我国的应用和创新[J].都市轨道交通,2014(2): 1.
[2] 肖俊.单轨交通应用性分析[J].电力机车与城轨车辆,2013(4): 20.
[3] 成金娜,周劲松,王超冉.跨坐式单轨弹性车体和转向架耦合振动分析[J].机械设计与制造工程,2018,47(9): 27.

(收稿日期:2019-05-12)

解锁设计的参考。

参考文献

[1] 梁汝军,林业.车门紧急解锁装置在地铁车辆中的应用探讨[J].铁道车辆,2014,52(8): 32.
[2] 中华国家标准化管理委员会.轨道交通可靠性、可用性、可维修性和安全性规范及示例:GB/T 21562—2008[S].北京:中国标准出版社,2008:11

(收稿日期:2019-05-07)