

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.059

地铁车辆车门关键部件检修周期研究

李宁宁

(西安交通工程学院 机械与电气工程学院,陕西 西安 710399)

摘 要:针对地铁车辆车门因结构及工作环境复杂等原因造成的故障频发问题,利用专家打分法确定车门关键部件,结合 RAMS 中的可靠性理论,提出了确定车门关键部件检修周期的方法。根据车门故障概率分析并通过专家打分评议,确定继电器、中央控制阀以及行程开关为车门检修的关键部件,利用威布尔可靠度分析,建议继电器检修周期为 160 d,中央控制阀检修周期为 180 d,行程开关检修周期为 225 d。

关键词:地铁车门;RAMS;关键部件;检修周期

中图分类号:U269 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)05-0303-06

Research on Maintenance Cycle of Key Components of Subway Vehicle Doors

LI Ningning

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Traffic Engineering Institute, Xi'an 710399, China)

Abstract: In response to the frequent failure of subway vehicle doors due to complex structures and working environments, an expert scoring method was used to determine the key components of the door, and combining with the reliability theory in RAMS, a method determining the maintenance cycle of key components of the door was proposed. Based on the probability analysis of door failure and expert scoring evaluation, relays, central control valves, and travel switches were determined as the key components for door maintenance. Using Weibull reliability analysis, it is recommended that relay maintenance cycle be 160 days, the central control valve maintenance cycle 180 days, and the travel switch maintenance cycle 225 days.

Keywords: subway doors; RAMS; key components; maintenance cycle

0 引言

近年来,随着我国城市化进程的加快,城市轨道交通列车数量剧增,列车的运行速度及运载量也在不断提升,RAMS 技术在城轨交通的应用也受到越来越多国内外学者的重视。现阶段,RAMS 技术在车辆项目全寿命周期中的各个阶段均有应用,对车辆系统、子系统和主要部件进行 RAMS 分析(故障模式影响分析;系列化、模块化分析;风险评估分析;维修策略分析;寿命周期成本分析等),并取得了显著成效^[1]。肖静等^[2]通过项目 RAMS 管理搭建设计与故障桥梁,构建 FRACAS 系统以实现故障闭环管理,把故障考虑融入到车辆全系统,对车辆产品的薄弱环节进行源头治理。杜平海^[3]通过分析车辆、系统、部件之间 RAMS 特性关系,围绕安全相关的危害事件,分析了通过系统部件的可靠性设计与可维护性设计以提高系统与列车功能的可用性及安全性。王铁民等^[4]通过对市域轨道车辆实际线路的 RAMS 数据以及关键

零部件寿命的匹配性进行分析,从安全性、经济性等角度,以匹配车辆最优的修程模式。王大平等^[5]基于中国标准地铁的技术特点,全方位探讨无人驾驶轨道交通车辆全寿命周期内 RAMS 应用技术路线及关键技术,为轨道交通 RAMS 工程研究提供参考。同时学者们基于 RAMS 技术对车辆关键部件状态进行评估,确定部件维修时间间隔,可用性判断部件维修状态。夏清等^[6]应用 RAMS 技术,建立柴田式密接车钩系统的 NFFTA,确定车钩的关键部件,基于马尔可夫模型评估关键部件的可靠度、MTBF 等 RAMS 指标,为车钩的维修工作提供指导。肖静等^[7]以跨座式单轨转向架为研究对象,通过构建 RAMS 指标体系,分析影响 RAMS 指标体系各因素,推导转向架各子系统设计可用性,以达到对转向架系统主要隐患的全过程控制目标。

地铁客室车门系统是轨道交通系统设备中最为重要的子系统之一,其在日常工作中执行开关门动作较为频繁且所处环境复杂,加之乘客上下

基金项目:2024 年度陕西省教育厅重点项目(24JR104);西安交通工程学院中青年基金项目(2024KY-06)

作者简介:李宁宁(1987—),女,甘肃庆阳人,工程师,讲师,本科,研究方向为轨道车辆制造及检修,564511321@qq.com。

车对其干扰因素较多导致车门频繁出现故障,据地铁运营公司对地铁部件故障的数据分析可看出,车门故障约占列车故障总数的 20% 以上^[8]。但车门是乘客上下车必经之处,一旦发生故障将导致车门无法正常开关,或在运行过程中在非安全环境下因车门故障出现意外开门,这不仅影响整个地铁系统的正常运营,甚至在极端条件下会导致事故的发生从而危及乘客安全。因此,及时建立车门故障诊断系统,及早发现车门故障,准确识别车门故障类型,及时更换故障器件,不仅可保证车门系统安全稳定运行,同时可极大避免灾难的发生,这对提高车门系统安全性、可靠性、降低故障率具有重要意义。但对车门关键部件的寿命预测不准确,会造成“过维修”或“欠维修”的情况,进而影响车门的安全可靠运行。故及时发现并更换易故障部件,可有效保障城轨列车的运营安全。朱文明等^[9]构建了轨道车辆车门系统 RAMS 管理体系,将 RAMS 管理理念与产品设计开发、生产制造和使用维护过程的各项工作相结合,在产品整个生命周期中卓有成效地开展 RAMS 工作。建立了信息化 RAMS 设计平台和 FRACAS(故障报告、分析及纠正措施系统)平台,以优化资源提高工作效率,进一步提升产品质量,有效控制新产品研制、产品国产化等过程中的风险。宗志祥^[10]以预防和减少车门故障为目的,利用指数分布函数对近 3 年车门故障的 RAMS 中的可靠性利用,提出车门失效率决定车门的可靠性,建议列车车门除日常维护外,要根据车门故障数据进行动态预防性维修周期,以提高车门的可靠性。目前车门系统的故障主要有车门的易损易耗件故障、机械部件的动作异常不到位、电子元件故障、乘客因素以及其他非人为因素导致的故障^[11]。

1 地铁车门及故障简介

1.1 塞拉门结构及工作原理

地铁塞拉门系统主要由驱动传动装置(带轮、螺母构件、传动丝杆等)、承载导向装置(电机、携门、导柱、压轮导向轮、轴承、摆臂组件)、锁闭装置(LS 闭锁装置)、内外操作装置(内部紧急解锁与外部紧急入口)、电动控制装置(EDCU、行程开关、开关按钮等)以及基础部件(橡胶条、密封胶条、指示灯、定位销)等子系统组成。

塞拉门工作原理如图 1 所示。当门控器收到

开关门信号,门扇进行开关门动作。动作过程为:电机—丝杆螺母—携门架、挂架等带动门页做开关门动作。当门页处于完全打开或关闭状态时,通过机械运动,与门页相互接触的各个相关器件碰触到车门到位开关;车门开关发出开门结束信号给 DCU;DCU 控制电源,发给电机停止信号;电机停止转动。同时,车门系统配备有紧急解锁装置,通过紧急解锁装置可切换手、自动控制模式,在遇到紧急情况或开关门动作无效时可通过紧急解锁装置手动打开车门。

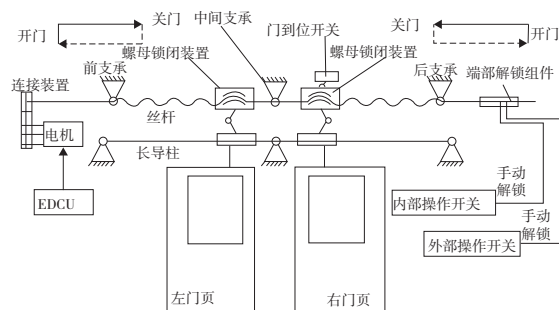


图 1 塞拉门动作原理图

1.2 塞拉门典型故障分析

车门常见的故障类型有车门导轨变形、车门驱动机构机械部件断裂磨损、车门各状态指示灯故障、车门复位风缸断裂、端子排及连接器连接可靠性不足、车门行程锁钩断裂、密封装置脱离等^[12]。车门常见故障部件如图 2 所示,车门典型的故障类型及故障产生的原因如表 1 所示。

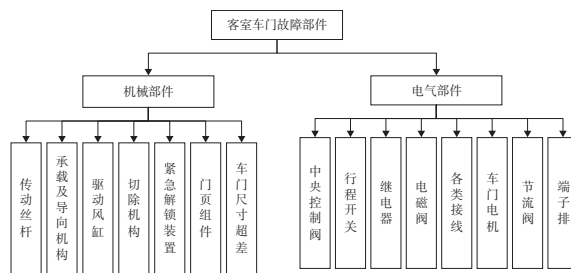


图 2 车门故障部件组成图

本文以 A 地铁公司 21 列 B 型地铁列车为例,对其车门系统主要部件进行故障分析。经统计,近几年的车门典型部件故障统计数据如表 2 所示(注:外部人为原因及机械参数故障不纳入统计范围)。统计结果表明,继电器、中央控制阀、行程开关、驱动风缸故障发生概率分别为 27.69%、24.10%、21.54%以及 10.26%,超过了车门各典型结构故障频数的 84%。

表 1 车门典型故障类型

故障类型	故障子类型	故障原因
机械故障	机械构件形变引起的故障	人为拥挤以及碰撞可能导致机械构件形变,造成塞拉门系统与承载门之间产生干涉
	子部件零件损坏	由于使用时间太久造成零件疲劳磨损,同时由于金属材料特性,产生自然老化而损坏
	行程开关故障	车门在日常开关门较为频繁,致使车门上的行程开关重复动作,从而导致行程开关出现故障
电气设备故障	电机故障	电机日常缺少维护及检修,轴承润滑不充分,导致轴承转动时引起振动等故障
	信号线路故障	时间过久或日常检修的疏忽,导致信号线路接口松动或线路老化,从而使信号线路出现故障
	外部指示灯故障	指示灯日常清洁常使用高压水枪进行冲洗,若在冲洗过程中操作人员操作不当,会导致水进入指示灯,引起电路板进水从而发生短路

表 2 车门系统故障概率

序号	部件名称	年平均故障次数/次	发生概率/%
X1	继电器	54	27.69
X2	中央控制阀	47	24.10
X3	行程开关	42	21.54
X4	驱动风缸	20	10.26
X5	节流阀	7	3.59
X6	紧急解锁装置	6	3.08
X7	滚轮	4	2.05
X8	驱动电机	3	1.54
X9	螺母组件	2	1.03
X10	传动丝杆	2	1.03
X11	其他	8	4.10

1.3 车门关键部件筛选

针对关键部件评估原则,顾超^[13]从可靠性、安全性以及经济性 3 个角度入手,通过数理统计法,依据部件维修间隔作为关键部件评估的依据。针对关键部件筛选方法,国内外学者展开了大量的研究,包括针对机电产品数字仓储储配优化方面、精细化管理方面、耗材的分类管理等采用 ABC 分类法,通过研究证明了此方法的有效性^[14-16]。在轨道交通车辆方面,丁思畅等^[17]针对故障树诊断分析得到影响车门系统可靠性的关键部件,以

对车门的维修周期和维修方式进行决策研究。徐文彬^[18]针对地铁车辆维修周期优化方面,主要结合层次分析法对城市轨道交通车辆部件进行了 ABC 分类,选取关键部件。有学者以地铁转向架为研究对象,以列车现场故障数据为基础,通过专家综合评议法对转向架的各个部件进行评分并按 ABC 分类法的分配比例,对转向架的部分部件进行分类,分析各备件的故障危害度及故障影响严重程度^[19-21]。结合相关研究成果,本文依据国内地铁车辆检修项目管理的先进经验及管理实践,利用 ABC 分类法结合专家评分法对车门的关键部件进行筛选。其中 A 表示关键部件(占比前 20%的部件),B 表示重要部件,C 表示一般部件。围绕管理目标,并结合部件特点,根据部件常见故障状态对部件进行评分,评分细则如表 3 所示。

A 地铁公司车门系统为电控气动门,主要故障表现为电控制部件失效、气动控制部件损坏及传动机构机械疲劳等。依据 A 地铁公司历年的车门故障统计,选定车门控制继电器、中央控制阀、行程开关、驱动风缸、节流阀、钢丝绳、滚轮、驱动电机、螺母组件、传动丝杆进行筛选。专家依据表 3 中每项指标评分细则对车门系统中选定部件的各项指标进行评分,每个部件的指标评分结果按表 3 中各项指标权重加权计算,按总得分由高到低排序,取前 20%为关键部件并利用 RAMS 进行分析。经过专家评分后,统计结果如表 4 所示,确定继电器、中央控制阀以及行程开关为车门系统的 A 类部件。

表 3 关键部件筛选指标评分细则

指标	评分细则	分值/分	指标权重/%
运营重要性	发生故障不影响运行	1-2	30
	造成地铁限速运行	3-4	
	造成地铁小交路运营	5-6	
	造成地铁停运不超过 15 min	7-8	
	造成地铁停运超过 15 min	9-10	
维修经济性	超过预计成本 15% 以内	1-2	25
	超过预计成本 15%~20%	3-4	
	超过预计成本 20%~25%	5-6	
	超过预计成本 25%~30%	7-8	
	超过预计成本 30% 以上	9-10	
故障频率	发生故障占比排序为 70% 之后	1-2	15
	发生故障占比排序为前 50%~70%	3-4	
	发生故障占比排序为前 30%~50%	5-6	
	发生故障占比排序为前 10%~30%	7-8	
	发生故障占比排序为前 10%	9-10	
技术复杂性	维修复杂度最低	1	15
	维修复杂度中等	6	
	维修复杂度最高	10	
维修能力	维修技术最简单	1	15
	维修技术中等	6	
	维修技术最复杂	10	

表 4 车门关键部件筛选

部件名称	运营重要性	维修经济性	故障频率	技术复杂性	维修能力	部件评分	部件等级
继电器	7	8	10	6	10	8.0	A
中央控制阀	10	8	8	6	10	8.6	A
行程开关	5	3	8	6	6	5.3	A
驱动风缸	7	5	5	1	1	4.4	B
节流阀	7	3	5	1	1	3.9	B
钢丝绳	1	3	5	1	1	2.1	C
滚轮	3	3	5	1	1	2.7	C
驱动电机	3	5	1	6	6	4.1	B
螺母组件	3	3	3	1	1	2.4	C
传动丝杆	3	3	3	3	1	2.7	C

2 车门关键部件故障时间间隔分布规律

对部件运行阶段进行可靠性分析,首先按需要处理大量历史数据,除了故障模式,还要拟合确定部件故障时间间隔分布函数。常用的可靠度分布函数如表 5 所示。

2.1 威布尔分布

车门系统主要由机械部件、电气部件组成,根据可靠度分布函数的应用范围,本文利用威布尔

分布函数对车门关键部件时间间隔进行描述。
令车门关键部件时间间隔为随机变量 t ,其概率密度函数为

$$f(t)=\frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}\exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right] \tag{1}$$

式中: β 为形状参数; η 为尺度参数。

故障分布函数为

$$F(t)=1-\exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right] \tag{2}$$

表5 常用可靠度分布函数

分布形式	可靠度函数	应用范围
指数分布	$R(t) = \exp^{-\lambda t}$	随机失效的情况下
正态分布	$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$	常用于分析由于磨损(如机械装置)而发生故障的产品
威布尔分布	$R(t) = \exp^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$	通过调整分布参数可以构成各种不同的分布,可以为不同类型的各种产品的寿命特性建立模型

2.2 数据处理及参数估计

根据 A 地铁公司某一年的车门检修数据,随机选取 5 列车车门检修数据,对继电器、中央控制阀以及行程开关故障进行统计汇总,如表 6 所示。

中位秩计算公式: $F_i(t_{i,j}) = \frac{j-0.3}{n+0.4}$, 其中 n 为样本数, j 为样本序号。

表6 车门关键零部件故障统计表

部件名称	样本序号	运行时间/d	中位秩
继电器	1	2	0.001 2
	2	5	0.002 8
	⋮	⋮	⋮
中央控制阀	600	365	0.998 8
	1	3	0.002 3
	2	9	0.005 6
行程开关	⋮	⋮	⋮
	300	348	0.997 7
	1	2	0.000 6
行程开关	2	7	0.001 4
	⋮	⋮	⋮
	1 200	362	0.999 4

依据表 6 可得中央控制阀、行程开关以及继电器故障时间间隔拟合曲线如图 3 所示。

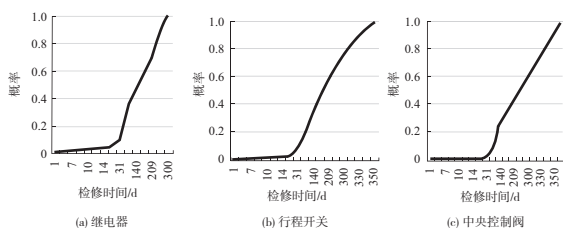


图3 关键部件故障时间间隔拟合曲线图

根据近似中位秩公式的计算值作为估计值,并利用回归分析法,代入继电器、中央控制阀以及

行程开关的故障数据,计算得每一种部件对应威布尔分布的形状参数 β 和尺度参数 η ,如表 7 所示。

表7 威布尔分布参数值

部件名称	形状参数 β	尺度参数 η
继电器	2.875 8	2 402.1
中央控制阀	3.214 5	2 156.5
行程开关	2.241 3	2 245.2

2.3 车门关键部件检修周期研究

RAMS 中的可靠性是产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。结合 RAMS 中的可靠性理论,车门关键部件故障分布符合威布尔分布,其可靠度函数 $R(t)$ 可表示为

$$R(t) = \exp^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3)$$

车门关键部件在列车运行时需要保证其可靠性,在这个前提下,需要解决的问题即是如何确定合理的检修周期,并且在这个检修周期内,部件不会失效。

以可靠度为目标的车门预防性检修周期 T_0 为

$$R_0(T_0) = R_d(T_0/T) \quad (4)$$

式中: $R_0(T_0)$ 是在地铁正线运行的时间段内不发生故障,要求车门关键部件需要达到的可靠度要求值; $R_d(T_0/T)$ 是要求车辆关键部件在时间段 T 内不发生失效,即不更换零部件,车门关键部件在正线工作时间段 T_0 内不发生失效时达到的可靠度要求值,即条件可靠度。

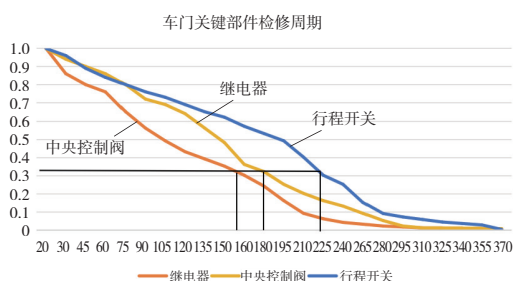
$$R_d(T_0/T) = \frac{R_d(T_0+T)}{R_d(t)} \quad (5)$$

在地铁车门检修项目中,因检修的项目众多且每个项目的可靠度要求不尽相同,取继电器、中央控制阀以及行程开关的可靠度为 0.99,根据 A 地铁公司列车数量,即可得出 A 地铁公司列车的综合可靠度为 0.32。根据图 4 可知,继电器检修周期为 160 d,中央控制阀检修周期为 180 d,行程开关检修周期为 225 d。

3 结语

依据 A 地铁公司车门系统检修规程,主要包括日常维护、半年检以及年检(现阶段暂未有线路车辆达到架修周期),依据各关键部件的运行条件及使用寿命,规定车门继电器以及行程开关架修

- [8] 高伟民, 茅飞. 地铁车门 PHM 系统应用[J]. 城市轨道交通交通, 2019(5): 33-35.
- [9] 朱文明, 曹芳芳, 刘润波. RAMS 管理体系在轨道车辆车门系统中的构建和实施[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(10): 61-65.
- [10] 宗志祥. 基于指数分布和 RAMS 的地铁列车车门可靠性研究[J]. 上海工程技术大学学报, 2021, 35(3): 248-252.
- [11] 韦兆洪, 王军, 陈涛, 等. APM 线列车车门系统上导轨轴承故障分析[J]. 机电工程技术, 2023, 52(7): 277-282.
- [12] 于丹丹, 李翔宇, 李静, 等. 基于威布尔分布的地铁车门系统可靠性研究[J]. 人民公交, 2025(6): 166-168.
- [13] 顾超. 基于关键部件状态分析的地铁车辆使用寿命评估[J]. 科学技术创新, 2022(3): 18-21.
- [14] 朱宝昌, 钱乐平, 钟锁铭, 等. 基于 ABC 分类法的机电产品数字仓储储配优化模型[J]. 机电工程, 2025, 42(7): 1350-1357.
- [15] 齐钰, 明新国, 商易安, 等. 基于 AHP 的 ABC 分类模型的实验室耗材库存分类管理[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(9): 269-272.
- [16] 张博轩, 王书晟, 张航. 基于改进 FSND 分类法的机场库存物料分类优化研究[J]. 物流科技, 2025, 48(2): 75-80, 94.
- [17] 丁思畅, 严俊. 基于故障树和蒙特卡罗方法的地铁车门可靠性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(10): 188-192, 198.
- [18] 徐文彬. 基于 FMECA 分析方法的地铁车辆维修备件分类法[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(增刊 1): 85-88, 104.
- [19] 周念玫, 贺德强, 苗剑, 等. 基于改进 HHO 算法的城轨列车关键部件可靠性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(6): 1753-1762.
- [20] 徐文彬. 基于 FMECA 分析方法的地铁车辆维修备件分类法[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(S1): 85-88, 104.
- [21] 李昱霖, 贺德强, 孙海猛, 等. 基于 DDQN 的列车转向架部件维护和备件库存联合优化研究[J/OL]. 铁道科学与工程学报. (2025-01-20) [2025-04-26]. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20241877>.



- [1] 杨劼. RAMS 技术在轨道车辆改进项目管理中的应用研究[D]. 上海: 东华大学, 2016.
- [2] 肖静, 王舜, 谢川, 等. 基于城轨车辆故障管理的 RAMS 设计综述[J]. 机车车辆工艺, 2023(3): 21-24.
- [3] 杜平海. 城轨车辆网络系统 RAMS 设计分析[J]. 项目管理技术, 2019, 17(5): 122-126.
- [4] 王铁民, 万铁军, 刘文波, 等. 市域轨道交通车辆修程模式研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(2): 37-41, 47.
- [5] 王大平, 肖红霞, 华鹏. 中国标准地铁 RAMS 技术研究与应用[J]. 铁道机车与动车, 2024(7): 11-13, 18, 61.
- [6] 夏清, 胡超群, 宫琦. 某动车组柴田式密接车钩 RAMS 分析[J]. 铁道技术标准(中英文), 2023(9): 23-32.
- [7] 肖静, 杨百岭, 叶珍珍, 等. 双轴跨座式单轨转向架 RAMS 指标体系构建研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022(7): 39-43.