

地铁站站台门系统可靠性分析与维保策略优化^{*}

魏东华¹ 李正中¹ 李利² 李晟²

(1. 天津市交通科学研究院, 300200, 天津; 2. 天津三号线轨道交通运营有限公司, 300300, 天津)

摘要 [目的] 站台门作为乘客上下车的重要通道, 对乘客的安全出行起着至关重要的作用。为确保站台门系统的安全稳定运行, 基于故障数据对站台门系统进行可靠性分析, 并依据分析结果对其维保策略进行优化调整。[方法] 基于天津某地铁运营线路 2018—2021 年地铁车站站台门的故障数据, 结合站台门系统的结构和功能, 对站台门系统的常见故障进行分类统计。采用数理统计、故障分布拟合等方法确定系统可靠度函数, 在可靠度约束下构建以设备平均维修费用最小为目标的维修周期优化模型, 优化站台门系统维保策略。[结果及结论] 根据故障数据拟合结果, 站台门机械系统和电气系统的故障分布均服从 Weibull 分布。在现有设备运行状态下, 站台门机械系统的最佳维修周期为 20 d, 电气系统的最佳维修周期为 7 d。站台门系统的维保策略可以调整为整体实施三周检, 电气系统实施周检。

关键词 地铁车站; 站台门系统; 可靠性分析; 维保策略

中图分类号 U291.1⁺2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.05.044

Reliability Analysis and Maintenance Strategy Optimization of Subway Station Platform Screen Door System

WEI Donghua¹, LI Zhengzhong¹, LI Li², LI Sheng²

(1. Tianjin Transportation Research Institute, 300200, Tianjin, China; 2. Tianjin Metro Line 3 Operation Co., Ltd., 300300, Tianjin, China)

Abstract [Objective] As an important passage for passengers to get on and off the train, the platform screen door (PSD) plays a crucial role in passenger safety. To ensure the safe and stable operation of the PSD system, a reliability analysis of this system is carried out based on fault data, and its maintenance strategy is optimized and adjusted as per analysis results. [Method] Based on the fault data of subway station PSD of a certain Tianjin subway line from 2018 to 2021, and combined with the structure and function of the PSD system, common failures of the PSD system are classified and counted. The system reliability function is determined through methods like mathematical statistics and fault distribution fitting. With

the goal of minimizing the equipment average maintenance cost, a maintenance cycle optimization model is constructed under reliability constraints to optimize the PSD system maintenance strategy. [Result & Conclusion] According to fault data fitting results, the fault distribution of both the PSD mechanical system and the electrical system obey the Weibull distribution. Under the existing equipment operation status, the optimal maintenance cycle of the PSD mechanical system is 20 days, and that of the electrical system is 7 days. Therefore, the PSD system maintenance strategy can be adjusted to a three-week whole system inspection with weekly electrical system inspections.

Key words subway station; platform screen door system; reliability analysis; maintenance strategy

站台门系统作为地铁车站机电设备的重要组成部分, 其能否正常运行将直接影响地铁运营安全。随着站台门系统运行时间的增加, 其机械部件和电子元器件性能会逐渐下降, 进而导致相关设备的故障率有所增加。

已有较多文献对此类问题进行了研究。文献[1]基于站台门故障发生频次对站台门故障进行分类, 同时采用站台门系统结构框图对站台门进行可靠性分析, 获得了地铁站台门系统的可靠性函数。文献[2]通过构建站台门系统故障树来分析站台门故障的发生模式及原因, 对站台门进行故障分布拟合, 以确定站台门的可靠度函数。文献[3]分析了站台门安全回路的工作原理和常见故障, 并对不同故障进行了可靠性研究, 提高了站台门安全回路的可靠性。文献[4]对站台门关键部位加装传感器, 采集并处理相关数据, 建立相应的数学模型, 实现了对站台门关键设备的实时监测与故障预警, 提高了站台门的运维效率, 降低了维修成本。

目前, 我国对地铁车站站台门系统可靠性分析与维保策略的优化研究尚不成熟, 还未将站台门系

^{*} 天津市交通运输科技发展项目(2024-B12)

统可靠性与维保策略优化结合起来进行研究与分析。鉴于此,本文以某开通 10 年的地铁线路车站站台门系统为例,基于其实际运营过程中产生的故障数据,对站台门系统进行可靠性分析。同时,根据相关设备的可靠性函数建立维保策略优化模型,确定设备的最佳维修周期,对站台门不同设备子系统进行精确维保。本文研究可为机电设备维保部门科学合理地规划地铁站台门系统的维修周期提供技术指导。

1 站台门系统结构与功能

站台门系统是一套安装于地铁沿线车站站台边缘的机电一体化系统,能够提高地铁运营安全系数,改善乘客候车环境,节约地铁运营成本。当列车进站时,站台门系统与列车车门进行联动,为乘客提供上下车的通道。地铁站台门系统一般由机械部分和电气部分构成,机械部分包括门体结构和门机传动系统,电气部分包括门机系统的电子元器件、控制系统和电源系统。站台门系统结构示意图如图 1 所示。

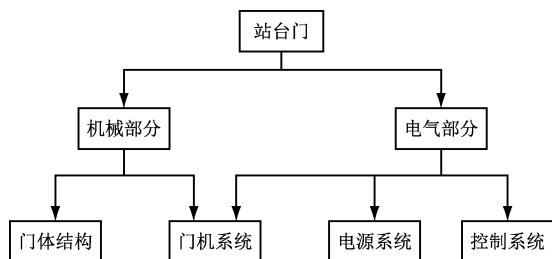


图 1 站台门系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PSD system structure

门体结构主要由支撑结构、门槛、滑动门、固定门、应急门、端门和顶箱组成。其中,滑动门是正常乘客上下列车的通道,有系统级、站台级、手动操作 3 种控制模式。

门机传动系统主要由门控单元、电动机与减速箱组件、传动机构、门锁紧装置组成。其中:门控单元属于电子元器件,是列车开关门的中枢控制装置;电动机与减速箱组件、传动机构和门锁紧装置属于机械部件。

电源系统主要由驱动电源 UPS(不间断电源)、控制电源 UPS、系统配电柜和站台门接轨线组成。其中:驱动电源 UPS 为门机系统提供门头电源;控制电源 UPS 主要为系统控制线路提供电源;系统配电柜主要包含系统总开关、主隔离变压器、门单元

分路负荷开关等部件;站台门金属门体构件通过接轨线与轨道连接,使站台门金属构件与列车车体等电位。

控制系统主要由站台门主控制器、站台操作盘、火灾模式控制回路和站台门监视器组成。其中,站台门主控制器主要实现系统内部信息的收发、采集、汇总和分析,实现其与系统内部站台操作盘、站台门监视器、门控单元之间,以及与其他系统之间的信息传输。其他部件受主控制器管辖,与站台门主控制器共同完成开关门功能。

2 站台门系统可靠性分析

2.1 站台门故障数据统计分析

本文研究的地铁车站所属线路于 2012 年开通运营,相关站台门设备也于 2012 年投入使用。目前,随着运行时间的增加,站台门系统机械部件与电气部件的性能在不同程度上均有所下降,设备出厂时的维修规程已不能满足正常运行的需求。因此,有必要重新确定设备的运行状态,并根据设备运行状态调整其维保策略。对该线路 2018 年 5 月—2021 年 4 月的站台门故障数据进行统计分析,其中:门体结构及门机系统故障占比为 92%,为主要故障;控制系统故障占比为 4%;电源系统故障占比为 4%。

根据站台门系统的故障发生情况,对故障数据进一步进行分类统计。根据统计结果可知:由站台门机械部件引起的故障占总故障的 48%,为主要故障;由电气部件引起的故障占总故障的 25%;由人为原因和机器虚报引起的故障占总故障的 27%,由于这些故障均不是由系统自身原因引起的故障,故下文进行可靠性分析时对这些故障数据进行了数据清洗。

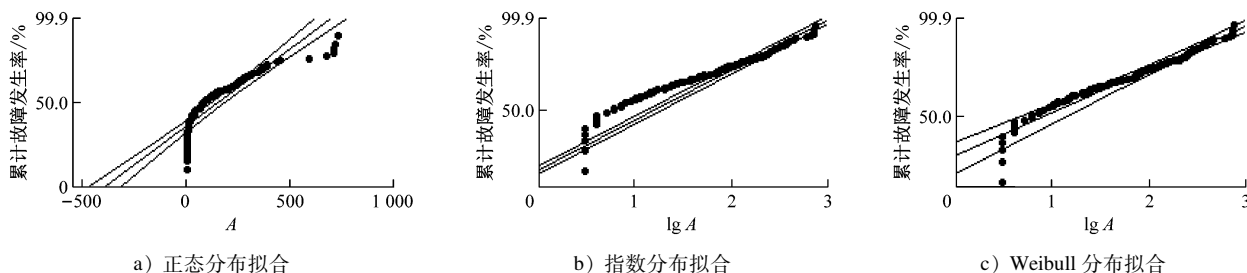
2.2 站台门系统故障分布拟合

站台门系统常见的故障分布拟合方法有极大似然估计法、矩估计法、最小二乘法等。极大似然估计法与矩估计法、最小二乘法等相比具有收敛性好、结果准确度高、容易通过计算机语言实现等特点。故本文采用极大似然法进行参数估计,并通过安德森-达令检验法进行拟合度检验,以确定最优的故障分布类型^[5]。

以系统故障的时间间隔为参数,通过 Minitab 软件进行可靠性拟合。根据拟合原则,在进行拟合优度检验时,A-D(安德森-达令)值越小,分布拟合

效果越好。同时,为了检验故障数据是否满足所选择的分布类型,以 P 值(观察到的统计量大于等于样本统计量的概率)进行假设检验,如果 P 值小于所选的显著性水平 α (α 通常取为 0.05 或 0.10),则

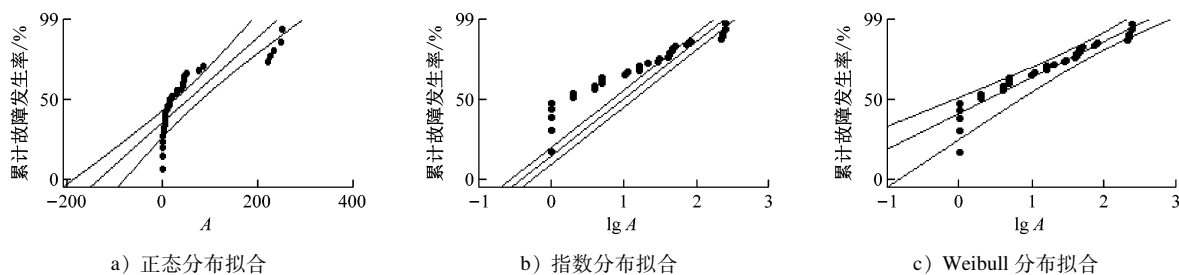
拒绝数据来自该类型分布的原假设。 P 为 $[0,1]$, P 值越大,则说明该类型分布与数据拟合得越好。站台门机械系统和电气系统的可靠性拟合结果如图 2 和图 3 所示。



注:正态拟合分布的 A-D 值为 6.912, P 值 <0.005 ;指数拟合分布的 A-D 值为 4.226, P 值 <0.003 ;Weibull 分布的 A-D 值为 0.735, P 值为 0.053; A 为故障时间间隔,单位为 d。

图 2 站台门机械系统故障可靠性拟合结果

Fig. 2 Fault reliability fitting results of PSD system



注:正态拟合分布的 A-D 值为 4.805, P 值 <0.005 ;指数拟合分布的 A-D 值为 5.984, P 值 <0.003 ;Weibull 分布的 A-D 值为 0.631, P 值为 0.093。

图 3 站台门电气系统故障可靠性拟合结果

Fig. 3 Fault reliability fitting results of PSD electrical system

由图 2 可知:在站台门机械系统的故障分布拟合中,Weibull 分布的 A-D 值最小,且其 P 值大于 0.05;正态分布和指数分布的 P 值均小于 0.05。由此可知,站台门机械系统的最优故障分布为 Weibull 分布。根据拟合结果,Weibull 分布的比例参数为 134.72,形状参数为 0.797。在 t 时刻,站台门机械系统对应的可靠度函数 $R_{me}(t)$ 可以表示为:

$$R_{me}(t) = e^{-\left(\frac{t}{134.72}\right)^{0.797}} \quad (1)$$

由图 3 可知:在站台门电气系统的故障分布拟合中,Weibull 分布的 A-D 值最小,且其 P 值大于 0.05;正态分布和指数分布的 P 值均小于 0.05。由此可知,站台门电气系统的最优故障分布为 Weibull 分布。根据拟合结果,Weibull 分布的比例参数为 37.5,形状参数为 0.628。在 t 时刻,站台门电气系统对应的可靠度函数 $R_{el}(t)$ 为:

$$R_{el}(t) = e^{-\left(\frac{t}{37.5}\right)^{0.628}} \quad (2)$$

确定站台门机械系统与电气系统的可靠度函

数后,通过 MATLAB 软件对站台门机械系统与电气系统进行可靠性拟合。站台门机械系统与电气系统的可靠性曲线如图 4 所示。

3 站台门系统维保策略建模与优化

3.1 维修周期优化模型

目前,我国地铁公司对站台门的维护大多采用预防修加故障修的维保策略,这种维保策略大多是由维保部门通过站台门维护管理标准和维修人员经验得到的。然而,随着站台门运行时间的增加,各部件的运行性能均有所下降,其原有的维修规程已不能满足站台门系统现有的工作状态需求,故有必要结合站台门系统的工作状态对维保策略进行优化,以降低站台门系统各部件的故障率,减少维修成本,保障地铁运营安全。

本文改进了文献[6]中的维修周期优化模型,在一定可靠度约束下,建立单个维修周期内站台门

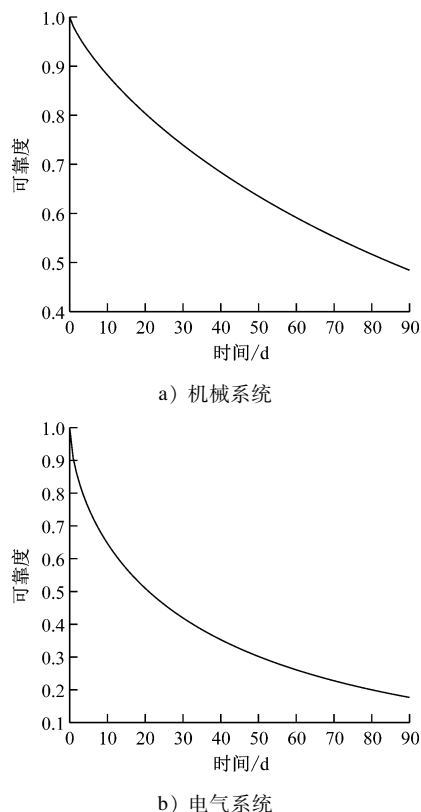


图4 站台门机械系统与电气系统可靠性曲线

Fig.4 Reliability curves of PSD mechanical and electrical systems

系统维修费用最小的维修周期优化模型。考虑到站台门系统发生损坏后对车站乘客的影响,此处的维修成本不仅包括了材料费用和人工费用,还包括了设备停机造成的费用损失等。

维修周期优化模型可以表示为:

$$\begin{cases} \min C(T) = \frac{c_p R(T) + c_f F(T)}{TR(T) + F(T) \int_0^T R(t) dt} \\ R_e \geq R(T) \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$C(T)$ ——系统单个维修周期所需的维修成本;

c_p ——单次定期检修所需费用,包括预防性更换费用(不可修复元件)、修复性维护费用(可修复元件);

c_f ——单次故障性维修所需费用,包括故障设备更换费用、停机损失费用等;

T ——维修周期;

$R(T)$ ——到达维修周期 T 时的系统可靠度;

$F(T)$ ——到达维修周期 T 时的系统不可靠度,数值上等于 $1 - R(T)$;

$\int_0^T R(t) dt$ ——单个维修周期内站台门系统的可靠运行时间;

R_e ——可靠度约束值,即设备可靠度下限。

将文献[6]的数据代入所提维修周期优化模型,通过计算可知,电气系统的最佳维修周期为 7 d,机械系统的最佳维修周期为 14 d,与文献[6]中的最佳维修数据基本符合。由此可知,本文所提维修周期优化模型具备一定的准确性和合理性。

3.2 站台门系统维保优化策略

站台门不同子系统的故障率有所不同,为了更有针对性地对站台门进行维修,可对机械系统和电气系统设置不同的维修周期。假设站台门机械系统的维修周期为 T_1 ,可靠度函数为 $R_1(t)$,对应的维修成本应为 $C_1(T_1)$;站台门电气系统的维修周期为 T_2 ,可靠度函数为 $R_2(t)$,所对应的维修成本为 $C_2(T_2)$ 。站台门的机械系统和电气系统应为串联结构,则其对应的站台门总维修成本为 $C_{all}(T_1, T_2)$ 。对式(3)进行改进,可以获得考虑不同子系统维修差异的站台门系统维修周期优化模型,则有:

$$\begin{cases} \min C_{all}(T_1, T_2) = \min(C_1(T_1) + C_2(T_2)) \\ R_1(T_1)R_2(T_2) \geq R_e \\ T_1, T_2 \in \mathbf{N} \end{cases} \quad (4)$$

对地铁公司设备故障发生后的维修费用进行统计,站台门不同系统的维修费用如表 1 所示。通过与现场工程师交流可知,站台门机械系统的可靠度下限为 0.8,电气系统的可靠度下限为 0.7。将站台门 2 个子系统的可靠性函数、维修费用、可靠度约束等参数代入维修周期优化模型,采用 MATLAB 软件进行编程求解可知,站台门机械系统的最佳维修周期为 20 d,电气系统的最佳维修周期为 7 d,优化后的车站站台门系统维保策略可以定为站台门系统整体实施 3 周检,站台门电气系统实施周检。站台门系统维修成本与维修周期期间的关系如图 5 所示。

表 1 站台门不同系统的维修费用

Tab.1 Maintenance cost of different PSD systems

站台门子系统	定期修平均维修费用/元	故障修平均维修费用/元
机械系统	800	1 200
电气系统	600	900

目前,该线路站台门大部分机械部件实施月检

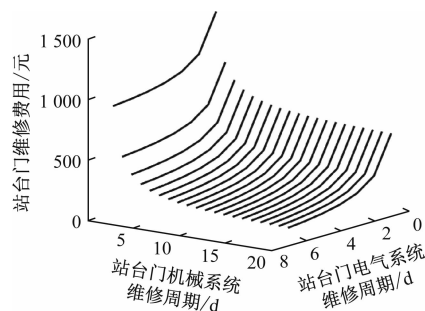


图5 站台门系统维修成本与维修周期之间的关系

Fig.5 Relationship between maintenance cost and maintenance cycle of PSD systems

维修模式,大部分电气部件实施半月检维修模式。对站台门系统维修周期优化前后的可靠度进行对比分析,结果如图6所示。由图6可知:维保策略优化调整后,站台门系统的可靠度得到了较好的保持。

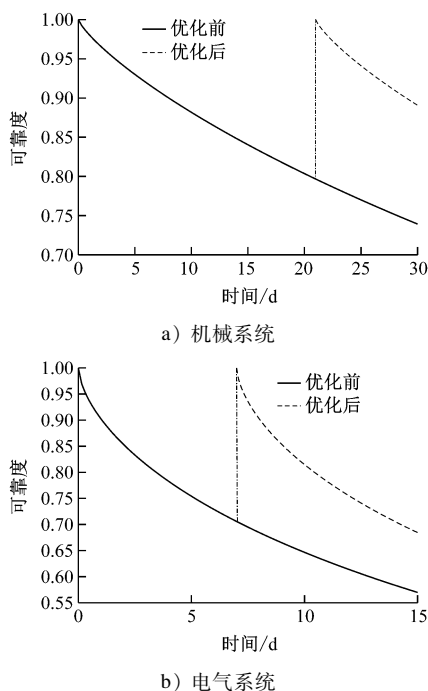


图6 站台门机械系统与电气系统维保策略优化前后的可靠度对比

Fig.6 Reliability comparison of PSD mechanical and electrical systems before and after maintenance strategy optimization

4 结语

本文针对车站机电设备中故障频发的站台门系统进行了可靠性分析和维保策略优化,采用统计分析与故障拟合相结合的方法对站台门系统进行了可靠性分析,得到了相关设备随时间变化的可靠

性曲线。在维保策略优化方面,建立了在可靠度约束下,单个维修周期费用最小的维修周期优化模型。以某地铁公司运营线路的站台门系统为例进行分析,将站台门系统分为机械系统和电气系统两部分进行维保策略优化。在现有设备运行状态下,站台门机械系统的最佳维修周期为20 d,电气系统的最佳维修周期为7 d。站台门系统的维保策略可以调整为整体实施三周检,电气系统实施周检。本文研究可为地铁站台门系统的维保提供更加合理的检修建议,在提高地铁运营安全的同时,防止设备发生欠修或过修情况。

参考文献

- [1] 田琪. 某型号地铁屏蔽门系统可靠性和维修性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
TIAN Qi. Study on the reliability and maintainability of a metro screen door system[D]. Changsha: Hunan University, 2021.
- [2] 高一凡, 靳守杰, 李赛, 等. 地铁车站机电设备可靠性分析及维保策略研究[J]. 中国铁路, 2020(11): 107.
GAO Yifan, JIN Shoujie, LI Sai, et al. Reliability analysis and maintenance strategy research for mechanical and electrical equipment of metro station[J]. China Railway, 2020(11): 107.
- [3] 刘春梅, 李振清, 韦巍, 等. 地铁站台门安全回路的可靠性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(12): 77.
LIU Chunmei, LI Zhenqing, WEI Wei, et al. On the reliability of safety circuit used for subway platform door[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(12): 77.
- [4] 徐思亮. 轨道交通屏蔽门智能运维系统方案研究[J]. 交通世界, 2022(增刊1): 27.
XU Siliang. Research on intelligent operation and maintenance system of rail transit screen door[J]. Transpo World, 2022(S1): 27.
- [5] 郑津楚. 高速列车转向架系统的运用可靠性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
ZHENG Jinchu. Study on operation reliability of bogie system of high-speed train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [6] LI S, WEI X, ZHANG Z, et al. Subway station capacity maintained by optimizing a maintenance schedule of key equipment[J]. Applied Sciences, 2019, 9(7): 1386.

· 收稿日期:2023-03-29 修回日期:2023-07-14 出版日期:2025-05-10

Received:2023-03-29 Revised:2023-07-14 Published:2025-05-10

· 第一作者:魏东华,工程师,13755753262@163.com

通信作者:李正中,正高级工程师,lizhengzhonglzz@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license