

基于故障树和蒙特卡罗方法的地铁车门可靠性分析

丁思畅¹ 严俊²

(1. 上海海事大学商船学院, 201306, 上海; 2. 上海地铁维护保障有限公司, 200070, 上海)

摘要 [目的] 车门系统是车辆运行过程中使用频率最高的关键系统, 故有必要对其可靠性和故障特性进行研究, 以保障城市轨道交通运行安全。[方法] 基于上海轨道交通 2021 年 2 月至 2022 年 2 月间各线路车门的故障状况的数据, 在给定的状态转移规则下, 建立了基于 FTA (故障树分析) 的门系统仿真模型。在此模型的基础上, 采用蒙特卡罗方法对未知故障模式进行可靠性模拟: 进行静态仿真, 利用线性全等法产生伪随机数来代替真实随机数, 计算顶事件的失败率和基本事件的重要度; 进行动态仿真, 通过多次分布拟合, 得到其可靠性分布和各部分寿命的采样值; 由仿真试验绘制出系统的密度分布曲线和可靠性曲线。[结果及结论] 数值结果表明, 因为服从指数分布和韦布尔分布的基本事件在某些时间区间内失效概率很高, 故系统在运行到该时间区间时很可能发生故障。

关键词 地铁; 车门; 故障树分析; 蒙特卡罗方法; 可靠性
中图分类号 U270.38+6:TP3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.032

Reliability Analysis of Metro Doors Based on Fault Tree and Monte Carlo Methods

DING Sichang¹, YAN Jun²

(1. Merchant shipping college, Shanghai maritime university, 201306, Shanghai, China; 2. Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200070, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Door system is the most frequently used critical system during vehicle operation, so it is necessary to study its reliability and failure characteristics to ensure the safe operation of urban rail transit. [Method] Based on the data of door system failure conditions across various Shanghai Rail Transit lines from February 2021 to February 2022, a simulation model based on FTA (fault tree analysis) is established under given state transition rules. Based on this model, the Monte Carlo method is used to simulate the reliability of unknown failure modes: by performing static simulation, the pseudo-random numbers are generated using the linear congruence method to replace real random numbers, and the failure rate of top events and the importance of basic events are calculated; by performing dynamic simulation, the reliability distribution and lifetime sampling values of each component are ob-

tained through multiple distribution fittings; by simulation experiments, the density distribution curves and reliability curves of the system are plotted. [Result & Conclusion] Numerical results show that, because the failure probability of basic events that obey exponential distribution and Weibull distribution within certain time intervals is very high, thus the system is very likely to fail when it runs into this time interval.

Key words metro; train doors; fault tree analysis; Monte Carlo method; reliability

可靠性分析作为跨领域的关键任务, 其核心方法包括框图法、FTA (故障树分析) 法及 GO 法等。其中 FTA 作为最常用和经典的方法, 以树形图结构为模型^[1], 由基本事件和指示事件之间关系的逻辑门组成。采用树模型, 通过定性和定量分析可得到可靠性结果。其特点是故障描述详细, 过程推导清晰明了, 可以证明系统故障的原因; 清楚地展示了系统及其部件的故障模型, 以及它们之间的逻辑关系。但是 FTA 对已知的故障模式效果较好, 而对新的故障模式适用性较差, 因此本文引进蒙特卡罗方法^[2], 按抽样调查法求取统计值来推定未知故障模式特性量。

为深入研究地铁车辆门系统的可靠性, 本文综合运用了 FTA 与蒙特卡罗模拟两种技术。本研究以上海轨道交通系统在 2021 年 12 月至 2022 年 2 月期间发生的车门故障数据为基础, 构建了基于 FTA 的系统仿真模型。该模型不仅实现了对车门故障模式的定性剖析, 还借助蒙特卡罗模拟进行了深入的定量分析, 为地铁车辆门系统的可靠性评估与提升提供了有力的数据支持与科学依据。

1 FTA 模型

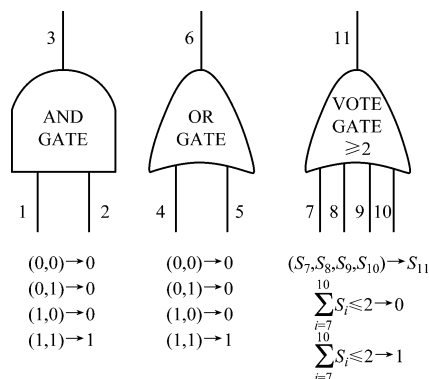
1.1 事件状态

FTA 模型中的事件包括基本事件、中间事件和顶事件。所有的事件只有两种状态, 即失败和正常。对应的概率是失败率和成功率, 对应的状态值

用 0 和 1 表示。

1.2 逻辑门及其状态转换算法

模型中常见的逻辑门^[3]包括与门、或门和表决门。下面分析这些门的状态转移。门的输入和输出状态均用 S_i 表示。逻辑门的状态转换见图 1。



注:AND GATE 表示与门;OR GATE 表示或门;VOTE GATE 表示表决门;图中 1~11 均表示一种状态,其中 1~2、4~5、7~10 表示输入,3、6、11 表示输出。

图 1 逻辑门的状态转换

Fig. 1 State transitions of logic gates

对于与门,当 $S_1 + S_2 = 0, S_3 = 0$; 当 $S_1 + S_2 > 0$ 时, $S_3 = 1$ 。只有一种情况可以判断输出失败;其他情况则相反。

对于或门,当 $S_1 + S_2 = 2$ 时, $S_3 = 1$; 当 $S_1 + S_2 < 2$ 时, $S_3 = 0$ 。

对于表决门(VOTE GATE),当 $S_7 + S_8 + S_9 + S_{10} < 3, S_3 = 0$, 当 $S_7 + S_8 + S_9 + S_{10} \geq 3, S_3 = 1$ 。通过失败(正常)的情况可以判断输出为 0(1);其他情况则相反。

1.3 故障数据分析

本文主要对 2021 年 12 月 10 日到 2022 年 2 月 10 日的上海轨道交通各线路的车门故障状况进行分析,具体的故障情况如图 2 所示。

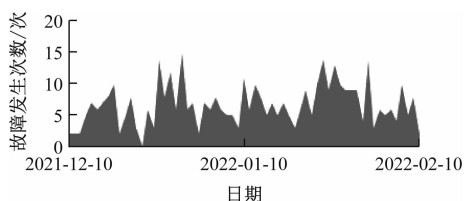


图 2 各线路车门故障情况

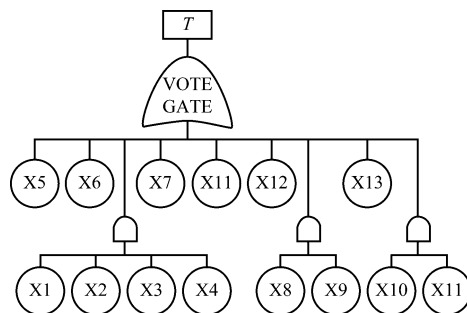
Fig. 2 Door failure conditions across various lines

1.4 车门系统模型

车门系统是地铁车辆关键系统中使用频率最高的系统^[4]。它的可靠性关系到车辆的安全性。

因此,对车门系统进行可靠性分析,深入研究其故障特性,对于保障城市轨道交通安全具有重要意义。

车门系统的 FTA 模型如图 3 所示。它的图形包含与门、或门和表决门。



注: T 表示故障发生的最终结果 $X_1 \sim X_{12}$ 表示代码。

图 3 车门系统故障树简化模型

Fig. 3 Simplified model of door system fault tree

图 3 中的代码所代表的事件如表 1 所示。

表 1 事件代码对应表

Tab. 1 Event code correspondence table

代码	名称	瞬时故障率
X1	1 轴速度传感器	0.001 152
X2	2 轴速度传感器	0.001 152
X3	3 轴速度传感器	0.001 152
X4	4 轴速度传感器	0.001 152
X5	车门锁闭行程开关	0.000 500
X6	EDCU 故障	0.000 813
X7	电磁阀开关	0.000 356
X8	紧急解锁手柄	0.001 250
X9	电磁阀解锁	0.000 749
X10	解锁信号	0.000 962
X11	螺丝/螺母故障	0.000 100
X12	电机故障	0.000 058
X13	耦合系统故障	0.000 250

2 模型仿真

2.1 静态仿真

2.1.1 产生随机数

在连续随机分布中,均匀分布是最简单、最基本的一种分布,因此,从均匀分布中抽取的子样本在蒙特卡洛模拟方法中总是被视为基本量。产生伪随机数的常用方法包括 LCG(线性全等)法、反馈位移存储法等。其中,LCG 被广泛使用,它通过数论的同余算子生成随机数。

在研究中,计算机生成伪随机数的机制是 LCG,并且使用系统时间作为种子,随机数不会循环。为了确保它们一致,必须对数列进行假设检验。

将系统视为可修复系统,基本事件的生命周期满足指数分布。

作为均匀分布的定义,每个随机数以相同的概率 $p_i = \frac{1}{k}$, (i, k 均为自然序数)落在任意区间中。假设总共产生 n 个随机数,测试的统计量为:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - np_i)^2}{np_i} \quad (1)$$

其中: $\alpha = 0.05$, $k = 10$, $\chi_{0.05}^2(9) = 18.31$; 当 $\chi^2 < 18.31$ 时,随机数以 0.05 的显著性水平服从均匀分布;反之,当 $\chi^2 > 18.31$ 时,它不会服从该分布,并且应该需要另一组随机数。

在模拟的第一步需要测试随机数的分布,这很容易被忽略。随机数的偏差会在模型的计算中被放大,特别是在复杂的模型中,会导致结果精度降低。

2.1.2 顶事件故障率仿真

顶事件故障率计算的意义在于,通过给定每个基本事件的瞬时故障率,能够计算出顶事件在任何时刻发生的概率。在之前的定性分析中,得到了系统的简化树,并将所有基本事件的故障率列于表中。随后,利用这些数据和仿真结果来实现顶事件故障率的计算。简化后的树包括 2 个与门、1 个表决门和 8 个或门。仿真算法流程图如图 4 所示。

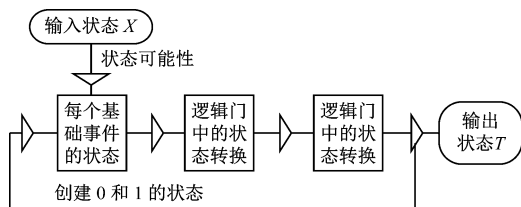


图 4 仿真算法流程图

Fig. 4 Simulation flow chart

通过图 4 仿真结果数据可知:系统故障发生的次数和总次数的比率,可以接近系统发生故障时的概率。接着基于所采集的瞬时故障率数据,计算得到顶事件等的故障率:

$$P(T) = 3.224\,706 \times 10^{-3} \quad (2)$$

本文进行了 100 000 次仿真,并观察到系统故障发生了 319 次。基于这些仿真数据,过模拟逼近

的方法得出了系统故障的概率,具体为:

$$P(T_1) = 3.19 \times 10^{-3} \quad (3)$$

对比仿真结果与分析结果发现,两者几乎一致,这充分说明了仿真方法是可行的。

2.1.3 重要度

基本组件的重要性可以被定义为:

$$W(X_i) = \frac{N_{\Phi, X_i=0}}{N_{X_i=0}} \quad (4)$$

式中:

Φ ——系统的状态函数,反映系统的运行情况;

$N_{X_i=0}$ ——基本部件的故障总数;

$N_{\Phi, X_i=0}$ ——由 X_i 引起的系统故障总数。

基本组件的重要性表示系统中组件的重要性。当 $W(X_i) = 1$ 时,说明如果 X_i 失效,系统将不可避免地发生故障。为了提高系统的可靠性^[5],必须关注基本组件重要性较大的基本事件。

模型的重要性可以被定义为:

$$W_{M, X_i} = \frac{N_{\Phi, X_i=0}}{N_{X_i=0}} \quad (5)$$

式中:

$N_{\Phi, X_i=0}$ ——由 X_i 引起的系统故障总数;

$N_{X_i=0}$ ——系统故障总数;

W_{M, X_i} ——由 X_i 引起的系统故障在所有系统故障中所占的百分比。

计算基本事件的重要度如表 2 所示。

表 2 基本事件重要度

Tab. 2 Importance of basic events

代码	基本组件重要性指数	模型重要性指数
X1	0.003 42	0.004 620 000
X2	0.003 42	0.004 620 000
X3	0.003 42	0.004 620 000
X4	0.003 42	0.004 620 000
X5	1.000 00	0.000 500 000
X6	1.000 00	0.000 813 000
X7	1.000 00	0.000 356 000
X8	0.001 71	0.000 002 140
X9	0.001 25	0.000 000 936
X10	0.001 25	0.000 001 200
X11	1.000 00	0.000 100 000
X12	1.000 00	0.000 580 000
X13	1.000 00	0.000 250 000

2.2 动态仿真评估

系统动态仿真在设计和试运行阶段尤为重要,因为此时系统的各个组成部分均为全新。可靠性分析的核心在于评估系统首次发生故障的时间,这一指标能够直观地反映出系统设计与制造的可靠性水平^[6]。在此情境下,模型中的基本事件在初始状态下的工作时间被设定为零,随后,其工作状态将随着各自寿命分布的变化而演变,这一过程直接影响着整个系统的状态。

为了确定基本事件正常工作时间的分布,采用了分布拟合的方法,这一过程不仅涵盖了测试数据,还融入了其他历史故障数据。故障率并非恒定不变,而是受到特定分布规律的影响^[7]。通过精确的拟合分析,能够获得这些分布的参数,进而为系统的可靠性评估提供更为精准的依据。

2.2.1 系统可靠性的概念

由 $R(t)$ 表示的可靠性是时间 t 之前不发生系统故障的概率。设 T_0 为对象的生命周期,则:

$$R(t) = P(t > T_0) \quad (6)$$

式中:

$P(T_0 > t)$ ——对象生命周期大于首次出现故障时间的概率;

$R(t)$ —— t 的非增函数, $R(0) = 1, R(\infty) = 0$ 。

故障率 $\lambda(t)$ 是系统工作 t 单位时间后,单位时间内系统发生故障的概率。根据定义可知, $\lambda(t)$ 为条件概率。因此有:

$$\lambda(T_0) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T_0 \leq t + \Delta t)}{P(t > T_0)}$$

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \quad (7)$$

可靠性可以表示为:

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right) \quad (8)$$

2.2.2 指数分布

部分基本事件未发生的时间分布服从指数分布,其分布密度函数为:

$$p(t) = \lambda e^{-\lambda t}, t > 0 \quad (9)$$

分布函数为:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, t > 0 \quad (10)$$

进行仿真分析,首先要提取系统寿命分布的特征参数。元素分量的分布参数如表 3 所示。

2.2.3 韦布尔分布 (Weibull distribution)

部分基本事件未发生的时间分布服从韦布尔

分布,其分布密度函数为:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} t^{\beta-1} e^{-(\frac{t}{\eta})^\beta}, t > 0 \quad (11)$$

分布函数为:

$$F(t) = 1 - e^{-(\frac{t}{\eta})^\beta}, t > 0 \quad (12)$$

式中:

β ——形状参数;

η ——尺度参数。

元素分量的分布参数(β, η)如表 3 所示。

表 3 基本事件的分布参数

Tab.3 Distribution parameters of basic events

代码	均匀分布参数 λ	韦布尔分布参数(β, η)
X1	0.001 152	
X2	0.001 152	
X3	0.001 152	
X4	0.001 152	
X5		(3.45, 2.145)
X6	0.000 813	
X7	0.000 356	
X8		(6.06, 8.096)
X9	0.000 749	
X10	0.000 962	
X11		(8.31, 10.507)
X12	0.000 058	
X13		(3.89, 4.278)

2.2.4 随机分布采样

随机变量的抽样^[8],意味着从分布已知的整体中生成简单的样本。假设随机变量 t 具有分布函数 $F(t)$,则 $y = F(t)$ 是 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的随机变量,其反函数 $t = F^{-1}(y)$ 是分布函数为 $F(t)$ 的随机变量。

服从指数分布的随机变量的采样值可以由式(10)中随机函数 $y = F(t)$ 生成。有:

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln[1 - F(t)] \quad (13)$$

服从韦布尔分布的随机变量的采样值可以由式(12)中随机函数 $y = F(t)$ 生成。有:

$$t = \eta(-\ln[1 - F(t)])^{\frac{1}{\beta}} \quad (14)$$

其中, $1 - F(t) \in [0, 1]$, 满足均匀分布,可由计算机生成的伪随机数拟合。经过如上转换后,得到各部件寿命的采样值。

3 仿真结果分析

仿真过程用 C++ 编程实现,算法框图如图 5 所示。

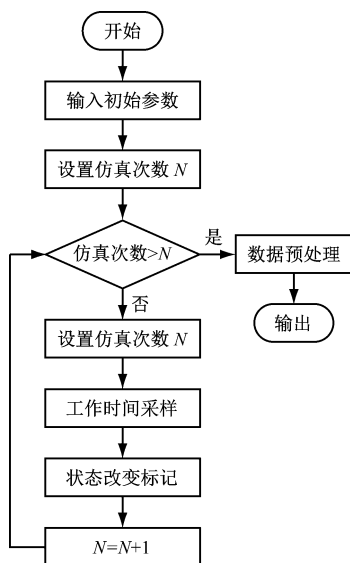


图 5 算法流程图

Fig. 5 Algorithm flow chart

经过 100 00 次仿真,得到一系列仿真数据。模拟数据的处理结果如图 6 所示。

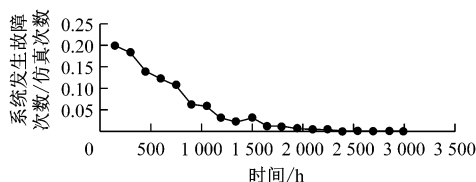


图 6 密度分布曲线

Fig. 6 Density distribution curve

系统故障发生在不同时间间隔的可能性如图 7 所示。曲线的斜率变化表示基本事件的可靠性变化。对于服从指数分布和韦布尔分布的基本事件在某些区间内很容易失效,系统在运行到该时间区间时故障的概率很大。

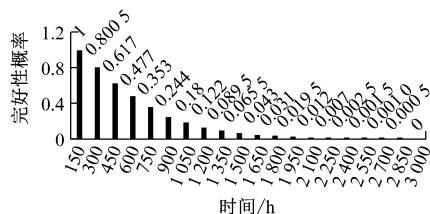


图 7 可靠性曲线

Fig. 7 Reliability curve

4 结语

本文提出了一种基于 FTA 的 Monte Carlo 故障预测算法,并利用上海轨道交通车门故障数据建立车门故障系统模型,通过该模型的静态和动态分析,验证了该模型预测列车车门故障状态的可靠性和准确性。通过分析所计算模拟出来的系统密度曲线和可靠性曲线,结果表明,对于服从指数分布和韦布尔分布的基本事件在某些时间区间内失效概率比较高,系统在运行到该时间区间时很可能发生故障。

上述模型在列车车门故障预测中实现了比较好的性能,仍然存在一些局限性,需要下一步进行改进。比如,故障数量较少情况下,可能导致该算法存在数据过拟合,这种情况下可通过数据拼接和生成方法扩大数据集,进而采用集成对抗生成网络或半监督学习等方法来优化该算法模型的泛化性和普适性。

参考文献

- [1] GOFUKU A, KOIDE S, SHIMADA N. Fault tree analysis and failure mode effects analysis based on multi-level flow modeling and causality estimation [C] // 2006 SICE-ICASE International Joint Conference. New York: IEEE, 2006: 497.
- [2] 石奋义,高旭东,邢宗义,等. 基于蒙特卡洛的地铁车门系统可靠性分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(8): 104.
SHI Fenyi, GAO Xudong, XING Zongyi, et al. Reliability analysis of the subway door system based on Monte Carlo[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015(8): 104.
- [3] 夏军,邢宗义,王晓浩. 基于 FTA 的地铁车门故障诊断研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(4): 76.
XIA Jun, XING Zongyi, WANG Xiaohao. Fault diagnosis research for metro door based on FTA[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2014(4): 76.
- [4] 段亚美. 基于故障树的 CBTC 车载信号子系统的可靠性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(增刊 2): 127.
DUAN Yamei. Reliability analysis of CBTC on-board signal subsystem based on fault tree[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(S2): 127.
- [5] 刘萍,程晓卿,秦勇,等. 基于模糊故障树的塞拉门系统可靠性分析[C] // 中国智能自动化学术会议论文集. 杭州:中国自动化学会智能化专业委员会, 2013: 315.

(下转第 198 页)

4 结语

本文设计并实现了一个快速可靠的地铁站台门异物检测系统,该 FAO 系统提供了列车进站/离站的安全联锁指令。在检测系统的开发过程中,本研究进行了硬件和软件两大方向的创新。具体而言,采用了激光雷达和摄像头点云融合算法,并辅以 PointNet 等新型算法,对地铁站台门间隙的异物进行了有效检测。此外,还创新性地提出了传感器交叉叠装分层安装的方法,实现了站台门间隙异物的冗余检测功能,通过交叉互检提高了检测装置的可靠性。特别值得一提的是,通过使用 2D 激光雷达传感器实现了 3D 检测效果。在天津市地铁站的实际测试中,试运行结果表明,该系统在地铁站台门间隙黑色异物反射率为 10% 时,检测分辨力可达到 16 mm,为地铁的全自动驾驶提供了坚实的安全保障。

参考文献

- [1] 刘实秋. 重庆市郊铁路璧铜线采用 FAO 系统必要性分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(6): 63.
LIU Shiqiu. Analysis of necessity of using FAO system for Bishan-Tongliang Line of Chongqing suburban railway[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(6): 63.
- [2] LIU H. Introduction of the train unmanned driving system[M]// Unmanned Driving Systems for Smart Trains. Amsterdam: Elsevier, 2021: 1.
- [3] NAYAK R, PATI U C, DAS S K. A comprehensive review on deep learning-based methods for video anomaly detection[J]. Image and Vision Computing, 2021, 106: 104078.
- [4] 胡寅川. 基于图像识别的站台间隙异物探测方法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
HU Yinchuan. Research on detection method of foreign bodies in platform gaps based on image recognition[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [5] 孔德龙, 蒲凡. 基于深度残差神经网络的地铁站台门与列车门间异物自动检测方法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(12): 66.
KONG Delong, PU Fan. Research on automatic detection method of foreign objects between platform screen door and train door based on deep residual neural network[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(12): 66.
- 收稿日期:2022-09-02 修回日期:2023-12-20 出版日期:2024-10-10
Received:2022-09-02 Revised:2023-12-20 Published:2024-10-10
· 通信作者:于庆广,副教授,yuqingguang@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
- [6] 刘爱明. 轨道交通车辆门系统可靠性设计技术的研究与应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
LIU Aiming. Research and application of reliability design technology for rail vehicle door system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [7] 杜洁. 基于故障树技术的铁路信号设备故障诊断专家系统的实现方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
DU Jie. Research on the implementation method of railway signal equipment fault diagnosis expert system based on fault tree technology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [8] 高翔. 地铁门控系统的故障树诊断方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
GAO Xiang. Research on fault tree diagnosis method of underground iron gate control system[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015.
- 收稿日期:2022-07-04 修回日期:2022-10-24 出版日期:2024-10-10
Received:2022-07-04 Revised:2022-10-24 Published:2024-10-10
· 第一作者:丁思畅,本科生,1979224911@qq.com
通信作者:严俊,正高级工程师,yanjun@shmtro.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

(上接第 192 页)