

Decision and Verification on Reliability Index of PSD in Rail Transit

Junmin Du*, Dengyun Hao

The 713 Research Institute of CSIC, Zhengzhou Henan
Email: [*dujunmin713@163.com](mailto:dujunmin713@163.com)

Received: May 28th, 2015; accepted: Jun. 16th, 2015; published: Jun. 19th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Aiming at the conditions that PSD (platform screen door) lacks quantitative analysis and verification of reliability in traditional design, the test method of goodness-of-fit index of life and the procedure determining reliability model of PSD are studied; the way determining quantitative indicators of reliability is put forward; the influence of reliability verification results on the number of failure and the level of confidence is analyzed; accordingly the reliability anticipation of PSD at a special time and a special condition is given out. The research shows that the reliability of PSD has much to do with its use frequency. During the engineering design, the reliability of PSD and the failure rate of every PSD should be determined according to its using characteristic.

Keywords

Rail Transit, PSD (Platform Screen Door), Reliability, Failure Rate, Confidence Interval

轨道交通屏蔽门可靠性指标的确定及验证

都军民*, 郝登运

中国船舶重工集团公司第七一三研究所, 河南 郑州
Email: [*dujunmin713@163.com](mailto:dujunmin713@163.com)

收稿日期: 2015年5月28日; 录用日期: 2015年6月16日; 发布日期: 2015年6月19日

*通讯作者。

摘要

针对屏蔽门产品在传统设计中缺乏可靠性定量分析和验证的不足,研究了指数寿命拟合优度检验方法及确定屏蔽门可靠度模型的一般程序,提出了确定可靠性定量指标的基本方法,分析了不同故障次数、不同置信度水平对可靠性验证结果的影响,从而给出了屏蔽门在特定时间和特定条件下可靠工作的预期。研究表明:屏蔽门在一定时间内的可靠度与其使用频率有较大关系,工程设计中应根据屏蔽门的应用特点,确定屏蔽门可靠性以及单台屏蔽门的故障率。

关键词

轨道交通, 屏蔽门, 可靠性, 故障率, 置信区间

1. 引言

轨道交通屏蔽门(以下简称屏蔽门)作为城市轨道交通的重要组成设备,安装于地铁、轻轨等轨道交通站台边缘,将轨道与站台候车区隔离,具有节能、安全、美观等功能[1]。在平时使用过程中,屏蔽门承受活塞风压、人为挤压和撞击等载荷,因此工作环境非常恶劣。同时,又要求屏蔽门具有非常高的可靠性,一旦发生故障,轻则影响交通正常运行,重则可能危及乘客人身安全。因此,屏蔽门的可靠性不仅是屏蔽门产品设计的重要指标,也是轨道交通系统中关注的重要因素。

但目前国家标准对屏蔽门可靠性的定量指标并没有严格规定,CJ/T 236-2006《城市轨道交通站台屏蔽门》中与屏蔽门可靠性相关的指标是型式试验中的加速寿命测试,规定“屏蔽门在设定的速度曲线下运行 10^6 次无重大故障发生”。该指标存在以下不足:

1) 该指标只是对屏蔽门寿命指标进行了定义,并不能定量表述产品的工作可靠度,也就是说即使产品满足该指标要求,也无法确定屏蔽门在一定时期内(例如1天、1月或1年)的工作可靠性;

2) 验证该指标采取的是抽样检验方法,并没有描述个体抽检合格后整批产品合格的概率,也就无法确定使用方所承受的批产品性能不满足要求的风险。

研究屏蔽门的可靠性定量指标,阐明产品在特定时间、特定条件下的工作可靠度是非常必要的;同时,也需要确定产品抽样检验中给使用方带来的风险,这对使用方综合考虑产品性能与成本具有重要意义。

2. 屏蔽门可靠度分布形式

对某一产品开展可靠性分析,首先需要确定其可靠度分布形式。从理论上讲,假设一个产品由很多部分组成,不论各组成部分的可靠度是什么分布,只要产品的任一部分出现故障后,能及时予以修复后并再次投入使用,则在较长时间后,产品的可靠度基本上服从指数分布。但是这个假设能否应用于屏蔽门产品,还需要通过对试验数据进行检验,以确定其可靠性是否服从指数分布。

可采用指数寿命拟合优度检验方法来确定屏蔽门可靠性是否服从指数分布,所谓拟合优度是指描述观测值与假定的分布(模型)之间符合程度的具体数值[2],该方法的具体步骤如下:

1) 投入 n 个屏蔽门产品进行试验,按定时截尾方法,规定到某一时间试验截止;

2) 记录到试验截止时出现故障的每个时刻,故障时刻从前到后依次记录为: $t_1, t_2, \dots, t_{r-1}, t_r$ (r 为试验期间故障总数);

3) 计算统计量

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r 2 \ln \frac{T^*}{T_i} \quad (1)$$

式中: T^* 为总试验时间, $T^* = \sum_{k=1}^r (n-k+1) \cdot (t_k - t_{k-1})$, 令 $t_0 = 0$;

T_i 为出现第 i 次故障时的累积试验事件, $T_i = \sum_{k=1}^i (n-k+1) \cdot (t_k - t_{k-1})$

4) 给定显著性水平 α , 若 $\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(2d) \leq \chi^2 \leq \chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(2d)$, 则不能以显著性水平 α 拒绝产品寿命服从指数分布的假设, 此时可结合一定的物理分析, 接受该产品的指数寿命假设。

3. 可靠性定量指标的确定与分析

屏蔽门加速寿命测试中要求屏蔽门在设定的速度曲线下运行 10^6 次无重大故障发生, 可将此试验看作是定时截尾的可靠性鉴定试验, 据此数据开展可靠性定量指标的确定和分析。根据 IEC 的建议, 当试验子样较多而试验过程中无故障时, 故障率的点估计值按式(2)计算[3]:

$$\hat{\lambda} = 1/3T^* \quad (2)$$

计算可得, 通过 10^6 次无故障试验屏蔽门的故障率点估计值为 0.33×10^{-6} 。

在给定置信水平 γ 条件下, 屏蔽门故障率的单侧置信上限按式(3)计算:

$$\lambda_U = \frac{\chi_{\gamma}^2(2r+2)}{2T^*} \quad (3)$$

令 $\gamma = 0.7$, 将 $T^* = 10^6$ 带入式(3), 并查 GB4086.2-83, 计算可得 $\lambda_U = 1.21 \times 10^{-6}$, 因此屏蔽门一次工作的可靠度为 $R = e^{-\lambda t} = e^{-1.21 \times 10^{-6}} = 0.9^{(5)}879$ 。

但在更多情况下, 使用方关注的并不是屏蔽门一次工作可靠度, 而是在一定时期内的工作可靠性, 例如 1 天、1 个月甚至 1 年。由于用于不同场合屏蔽门的工作频率相差较大, 因此在一定时间内, 相同状态屏蔽门的工作可靠性差别也非常大。图 1 表示了屏蔽门 1 年工作的可靠性与其使用频率之间的关系。屏蔽门按每天工作 15 h, 每年工作 365 d 计算, 当屏蔽门每 2 min 工作一次时, 其 1 年工作可靠度只有 0.820; 而当屏蔽门每 30 min 工作一次时, 其 1 年工作可靠度可达 0.987。因此不考虑屏蔽门的工作特点, 笼统地规定屏蔽门开展 10^6 次寿命试验存在一定的不合理性。

可靠性指标合理的确定方法应是根据屏蔽门工作场合的重要程度、维修便捷程度、全寿命周期费用等特点, 提出屏蔽门在一定时期内的工作可靠性[4], 然后根据屏蔽门的使用频率, 反算求出屏蔽门故障率要求, 作为单台设备鉴定或验收的指标。若屏蔽门工作场合重要性强, 维修困难, 故障后带来的相关费用高, 则可靠性应适当取高, 反之则可适当降低。

图 2 给出了不同使用频率下, 屏蔽门 1 年可靠性与故障率的关系。由图 2 可知, 当屏蔽门使用频率较小时, 故障率的降低对可靠性的影响并不明显; 但当屏蔽门使用频率较高时, 故障率的变化对可靠性作用非常明显, 也就是说, 当屏蔽门使用频率较低时, 可适当降低故障率要求, 从而实现产品可靠性和成本之间的平衡。其次, 屏蔽门在一定时间内的可靠性与故障率基本成线性关系, 而使用频率则是决定该直线斜率的主要因素。

4. 屏蔽门可靠性的验证

确定屏蔽门故障率后, 需要对屏蔽门产品开展可靠性试验, 以验证其故障率指标是否满足设计要求。

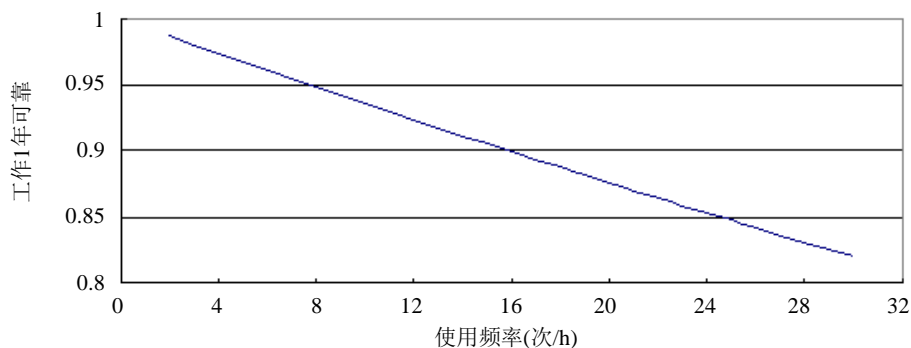


Figure 1. Relationship between reliability and use frequency of PSD

图 1. 屏蔽门可靠性与使用频率关系

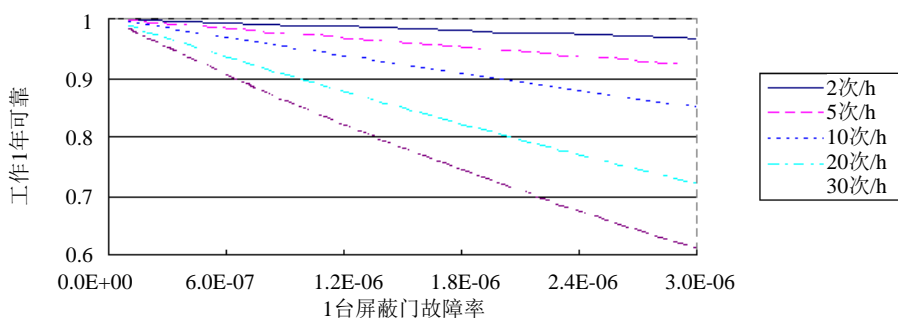


Figure 2. Relationship between reliability and failure rate of PSD

图 2. 屏蔽门可靠性与故障率的关系

设一批屏蔽门产品中投入 n 个样品开展试验，到达一定时间试验截止。当出现第 k 个故障时，全体产品累积试验次数为：

$$T_k = T_{k-1} + \sum_{m=1}^n t_{m,k-1} \quad (4)$$

式中： T_{k-1} 表示出现第 $k-1$ 个故障时的，全体受试产品的累积试验次数，因此 T_k 是一个按式(4)迭代计算的过程； $t_{m,k-1}$ 表示参试品 m 在故障 $k-1$ 与故障 k 之间的试验次数。

由式(4)可知试验次数为： $T^* = T_k + \sum_{m=1}^n t_{m,k}$

根据试验次数 T^* 、故障次数 k ，可计算屏蔽门故障率的点估计值：

$$\hat{\lambda} = T^*/k \quad (5)$$

点估计值仅仅是对产品可靠性的初步估计，没有考虑样本数量大小对评估结果的影响，也不能从概率角度给出产品可靠性的分布。因此，如果需要更加准确、全面地评估可靠性，应采用区间估计的方法。计算产品的可靠性区间估计，首先需要明确相应的置信水平 γ (γ 表示真值在评估区间的概率大小， $1-\gamma$ 也就是接受该评估结果风险的大小)；此外，还需考虑的是采用单侧置信区间估计还是双侧置信区间估计，所谓单侧置信区间估计只考虑产品的可靠性下限值，而双侧置信区间估计则同时考虑产品的可靠性上、下限。当给定置信水平 γ 时，屏蔽门故障率可靠性单侧置信上限按式(3)计算，双侧置信区间按式(6)计算：

$$\lambda_U = \frac{\chi_{(1+\gamma)/2}^2(2r+2)}{2T^*}, \lambda_L = \frac{\chi_{(1-\gamma)/2}^2(2r)}{2T^*} \quad (6)$$

考虑屏蔽门产品特点, 本文按单侧置信区间分析可靠性。在一定置信水平 $\gamma=0.7$ 条件下, 不同故障次数, 试验次数与故障率之间的关系如图 3 所示; 在故障次数 $k=1$ 条件下, 不同置信水平, 试验次数与故障率之间的关系如图 4 所示。

从图 3 可以看出, 屏蔽门进行可靠性定量指标验证时, 在置信度一定条件下, 试验次数、故障次数两个因素决定了最终的评价结果。例如当 $k=0$, 即试验过程中时未出现故障时, 进行 8×10^5 次试验可得出屏蔽门的故障率置信上限为 1.5×10^{-6} ; 但如果在试验过程中出现 1 次故障, 则需进行 1.62×10^6 次试验才能得出相同的评估结果, 试验中故障的出现将会导致试验周期的大大延长。此外, 在一定试验次数范围内, 故障率会随着试验次数的变化而发生较大变化, 但是当超过一定试验次数范围时, 故障率随试验次数的变化便不再明显, 这也是统筹考虑可靠性指标、试验周期和成本中需要重点考虑的因素。

此外, 如图 4 所示, 可靠性结果的验证还与选取的置信水平有很大关系, 以试验中出现 1 次故障为例, 当 $\gamma=0.7$ 时, 需进行 1.62×10^6 次试验可得出屏蔽门故障率置信上限为 1.5×10^{-6} 的评估结果; 但如果 γ 取 0.8, 则需进行 2.0×10^6 次试验才能得到相同结果。置信水平实际表征的是可靠性评估结果的置信程度, 因此子样数越多, 评估结果就越可信; 反之, 若希望对可靠性评价出可信性更高的结果, 就需要更多的子样。

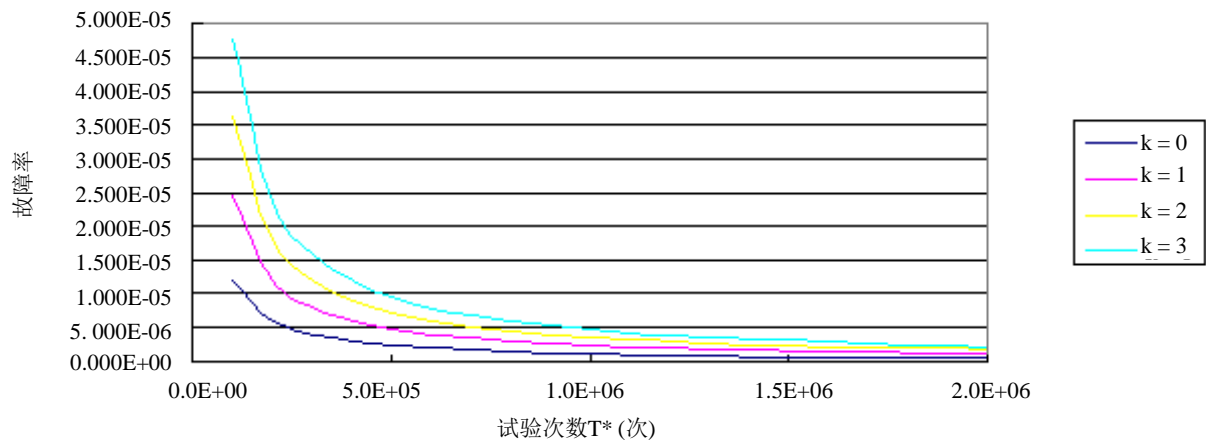


Figure 3. Relationship between failure rate and failure times, experiment times ($\gamma=0.7$)

图 3. 不同故障次数, 试验次数与故障率之间的关系(置信水平 $\gamma=0.7$)

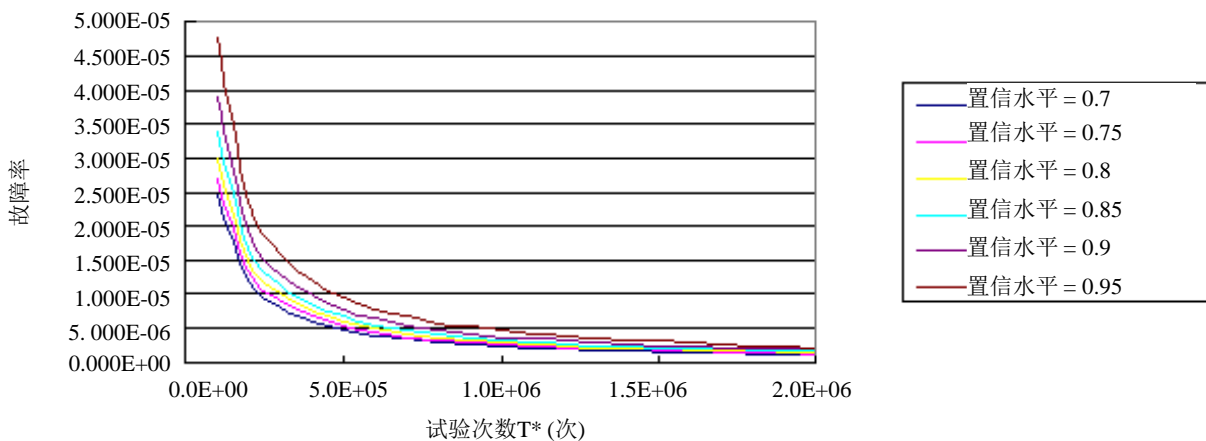


Figure 4. Relationship between failure rate and confidence level, experiment times (failure times $k=1$)

图 4. 不同置信水平, 试验次数与故障率之间的关系(故障次数 $k=1$)

5. 结论

采用可靠性定量指标能够从概率角度给出屏蔽门产品可靠工作的定量描述,对屏蔽门可靠工作的预期更加科学、直观。通过采用指数寿命拟合优度检验方法,能够分析确定屏蔽门产品是否服从指数分布寿命模型。此外,通过计算分析表明,屏蔽门在一定时间内的可靠度与其使用频率有很大关系,因此应根据屏蔽门工作频率、重要程度、维修便捷性等特点,确定屏蔽门在一定时期内的可靠性,然后再反求得单台屏蔽门的故障率。采用单侧置信区间评估方法,不仅能够给出屏蔽门在一定时间内可靠工作的预期,而且能够定量说明使用方在接受抽样结果时所承担的风险。

参考文献 (References)

- [1] 胡志晖,叶霞飞,蔡蔚 (2002) 城市轨道交通屏蔽门系统的适用性分析. *城市轨道交通研究*, **3**, 62-65.
- [2] 于泳江 (1998) 仿真数据的产生和分布拟合优度检验. *系统工程与电子技术*, **3**, 10-16.
- [3] 何国伟,戴慈庄 (1995) 可靠性试验技术. 国防工业出版社, 北京, 110-112.
- [4] 都军民,蔡民,戴宗妙 (2007) 基于可靠性安全系数的结构设计方法研究. *舰船科学技术*, **3**, 134-136.