

基于威布尔分布及海因里希法则的动车组车门系统维修周期优化研究

李建新^{1,2} 牛 刚¹

(1. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海;

2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 266111, 青岛//第一作者, 工程师)

摘 要 根据动车组客室车门系统故障数据对车门进行寿命分析, 获得了其故障间隔符合威布尔分布的结论。在车门系统可靠性满足运营要求的条件下, 建立以单位时间维修费用最低为目标的维修模型。结合所提维修模型, 对中国铁路上海局集团有限公司的 CRH2A 型动车组客室车门系统维修周期进行优化, 并验证了优化后维修模型的实用性和经济性。

关键词 动车组; 车门系统; 维修周期; 威布尔分布; 海因里希法则

中图分类号 U279.1; U266.2; U270.38⁺6

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.01.034

Maintenance Cycle Optimization of EMU Vehicle Door System Based on Weibull Distribution and Heinrich's Law

LI Jianxin, NIU Gang

Abstract The vehicle door lifespan is analyzed according to EMU (electric multiple units) compartment door system fault data, a conclusion that the fault interval conforms to Weibull distribution is obtained. Under the condition that vehicle door system reliability meets operation requirements, a maintenance model aiming at the lowest maintenance cost per unit time is established. With the mentioned maintenance model, maintenance cycle of China Railway Shanghai Bureau Group CRH2A EMU compartment door system is optimized. The practicability and economy of the optimized maintenance model is verified.

Key words EMU; door system; maintenance cycle; Weibull distribution; Heinrich's law

First-author's address Institute of Rail Transit, Tongji University, 201804, Shanghai, China

由于技术条件限制或考虑到制造与运营成本, 动车组客室车门系统(以下简称“车门系统”)并未安装大量传感器用于监控车门系统的健康状态, 所

以无法对车门系统的健康状态进行全面监控与评估。目前, 较难对动车组车门系统进行精准状态维修, 预防维修仍然是车门系统维修的主要手段。

当预防维修周期制定不当时, 会造成维修不足和维修过剩等, 进而会导致次生灾害风险和维修成本升高。我国动车组的维修模式参考德国、日本等动车技术起步较早的国家, 对我国的路况、运行环境、维修条件等实际情况考虑较少。目前, 我国动车组已有十几年的运行经验, 积累了大量宝贵的检修、运营等数据, 因此有必要根据动车组车门系统历史故障数据进行 FTA(故障树分析)和 FMECA(故障模式影响及危害度分析)分析, 找出车门系统的薄弱环节。

本文利用威布尔分布和海因里希法则对车门系统进行可靠性分析。在车门系统可靠性满足运营要求的前提下, 建立了以车门系统单位时间维修费用最低为目标的维修模型。通过对中国铁路上海局集团有限公司 CRH2A 型动车组车门维修周期进行优化, 验证了该维修模型的实用性和经济性, 也为动车组其他子系统的维修周期优化提供了借鉴与指导。

1 可靠性分析方法

1.1 FTA 和 FMECA 可靠性分析

FTA 是一种图形演绎方法, 将最不希望发生的事件作为顶事件, 然后分析可能导致顶事件发生的全部原因。FMECA 是一种设计分析方法, 其按照一定步骤, 通过分析产品各组成部件潜在的故障模式、故障原因及对产品功能的影响, 提高产品的可靠性。根据 FTA 和 FMECA 可以将 CRH2A 型动车组车门系统分为 5 个子系统, 这 5 个子系统可以进一步被分解为 23 个最小故障单元(即最小可更换单元)。5 个子系统分别为: 驱动装置系统、压紧装

置系统、电气元器件系统、信号反馈系统和基础辅助设备系统。

1.2 威布尔分布可靠性特征量

威布尔分布是一种包括 3 个参数的概率密度分布函数,其 3 个参数分别为形状参数 α 、尺度参数 β 和位置参数 γ ^[1]。由于车门系统投入运用后随时可能发生故障,所以选择两参数威布尔分布进行分析^[2]。可靠性特征量主要包括可靠度函数 $R(t)$ (t 为设备运行时间)、故障概率密度函数 $f(t)$ 、累计故障概率密度函数 $F(t)$ 及故障率函数 $\lambda(t)$ 等。可靠度函数 $R(t)$ 可以表示为:

$$R(t)=\exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}\right]$$

(1)

1.3 威布尔分布参数求解

1.3.1 平均秩次法

由于样本中存在删失数据,无法预测这部分数据中的故障时间,此时若直接用近似中位秩公式,往往存在较大误差。为了提高经验分布函数精度,平均秩次法是一种较为有效的方法。用平均秩次法求解经验分布函数的公式为:

$$F_n(t_i)=\frac{A_i-0.3}{n+0.4}$$

(2)

式中:

- i ——故障设备顺序号;
- t_i ——故障设备 i 的运行时间, d;
- A_i ——故障设备 i 的平均秩次;
- n ——故障样本总数, 个。

1.3.2 最小二乘法

最小二乘法通过用一条直线拟合离散的数据 (x_i, y_i) ($i=1, 2, \cdots, r$), 对威布尔分布进行对数转换, 将其转换为 $y=ax+b$ 的形式 (a, b 为回归系数), 使计算出的回归估计值与样本观测值之间的偏差最小, 计算当 $\sum (y_i - a - bx_i)^2$ 最小时, 参数 a 和 b 的值。对两参数威布尔累计分布函数进行变换可得:

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right]=\alpha\ln t-\alpha\ln\beta$$

(3)

令: $y=\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right], x=\ln t, a=\alpha$

则有: $b=-\alpha\ln\beta$

式(3)可以变换为 $y=ax+b$ 。根据最小二乘法原理, 可获得 a 和 b 的最小二乘估计及相关系数 r_{xy} , 进而获得 α, β 。

1.4 经验分布

根据样本数据估计出失效分布模型后, 需要对所得分布模型与实际分布的拟合程度进行检验, 常用的检验方法有 χ^2 检验, K-S 检验等^[3]。其中, χ^2 检验适用范围更广, 不仅适用于离散型分布和连续型分布的检验, 也适用于不规则截尾数据。

2 建立维修周期优化模型

2.1 海因里希法则

海因里希通过对事故进行概率统计分析, 提出每一起严重事故背后都有 29 起轻微事故及 300 起没有造成事故的险情。该理论被称为海因里希法则。根据海因里希法则, 将车门故障按照其影响分为 A、B、C 3 个等级, A 级影响最高, B 级次之, C 级最弱。故障等级划分原则如表 1 所示。由于产品故障多种多样, 影响程度各不相同, 因此在可靠性分析领域, 一般将不同等级故障进行归一化处理, 按照海因里希法则 1:29:300 的比例关系^[4], 不同故障等级转换原则如表 2 所示。

表 1 故障等级划分原则

Tab. 1 Fault grade classification principle

故障等级	严重程度
A 级	故障可能影响行车安全或秩序, 或造成铁路安监报, 短时间内无法修复
B 级	未影响行车秩序或安全, 但可能造成本次列车晚点, 影响乘客换乘或降低服务质量
C 级	一般不会造成本次列车晚点或影响乘客体验等不良影响

表 2 不同故障等级转换原则

Tab. 2 Fault grade conversion principle

故障等级	故障换算系数
A 级	1
B 级	1/29
C 级	1/300

2.2 历史可靠度评估

历史可靠度 R_r 指产品在统计期内完成规定功能, 而没有发生 C 级及以上故障的概率。历史可靠度计算公式为:

$$R_r=\frac{m-m_1}{m}$$

(4)

$$m_1=m_A+\frac{m_B}{29}+\frac{m_C}{300}$$

(5)

式中:

m ——统计期内产品发生故障的总数量, 个;

m_1 ——统计期内可能发生 A 级故障的数量,个;
 m_A ——统计期内发生 A 级故障的数量,个;
 m_B ——统计期内发生 B 级故障的数量,个;
 m_C ——统计期内发生 C 级故障的数量,个。

2.3 构建优化模型

在制定维修策略时,既不能一味追求可靠性,也不能只追求经济性,而应该将可靠性与经济性进行综合考虑,在追求经济性的同时要保证可靠性在可接受范围内。对车门系统维修成本进行优化时,以历史可靠度作为最低容许可靠度,即 $R(t) \geq R_r$ 。假设车门系统预防维修周期为 T ,车门系统在单位时间内的维修费用期望损失为 $C(t)$,可以表示为:

$$C(t) = \frac{C_{pf}}{t_{MTBF}} \tag{6}$$

$$C_{pf} = C_p + C_f \int_0^T \lambda(t) dt \tag{7}$$

$$t_{MTBF} = \int_0^T tf(t) dt + \int_0^\infty Tf(t) dt = \int_0^T R(t) dt \tag{8}$$

式中:
 C_{pf} ——一个间隔周期内的维修费用期望损失;
 t_{MTBF} ——一个间隔周期内平均无故障运行时间;
 C_p ——车门系统进行一次预防维修的费用;
 C_f ——车门系统进行一次事后维修所需的费用。

每列动车车门系统在单位时间内的维修费用模型可以转化为:

$$C(t) = \frac{C_p + C_f \int_0^T \lambda(t) dt}{\int_0^T R(t) dt} \tag{9}$$

此时,可将求解最佳维修周期的问题转换为可靠度在满足历史可靠度的条件下,求解车门系统单位时间内的维修费用期望损失最小值的问题。由此可得车门系统最佳维修周期模型为:

$$C(t) = \frac{C_p + C_f \int_0^T \lambda(t) dt}{\int_0^T R(t) dt}$$

s. t. $R(t) \geq R_r$ (10)

3 实例分析

3.1 威布尔分布参数计算

选取中国铁路上海局集团有限公司 2016 年 1

月—2019 年 12 月的 5 列 CRH2A 型动车组客室车门系统故障数据,有效故障条数为 679 条,删失故障条数为 39 条。利用平均秩次法及最小二乘法求解威布尔分布参数。平均秩次法及其经验分布函数取值如表 3 所示。

表 3 平均秩次法及其经验分布函数取值
Tab. 3 Empirical distribution function calculated by mean rank order

i	平均秩次参数			$x_i = \ln t y_i = \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right]$	
	t_i/d	A_i	$F_n(t_i)$		
1	3	1.000	0.001 4	1.099	-6.576
2	4	2.000	0.002 8	1.386	-5.882
3	5	3.000	0.004 2	1.609	-5.476
4	6	4.001	0.005 6	1.791	-5.187
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
678	1 402	715.617	0.996 7	7.246	1.742
679	1 454	717.309	0.999 0	7.282	1.938

采用最小二乘法对利用平均秩次法求得的车门系统各故障时间离散点数据 (x_i, y_i) 进行拟合,根据拟合直线可以获得回归系数 a (斜率)和 b (截距),以及 95% 置信区间和线性相关系数 r_{xy} 。最小二乘法拟合数据相关参数如表 4 所示。由表 4 可知,威布尔分布中 α 为 1.331, β 为 282.132。最小二乘法拟合仿真图如图 1 所示。由图 1 可知, $r_{xy} = 0.993\ 6$, 当 r_{xy} 越接近于 1 时说明回归直线拟合得越好。则车门系统可靠度函数 $R(t) = \exp[-(t/282.132)^{1.331}]$, 故障率函数 $\lambda(t) = 1.331t^{0.331}/282.132^{1.331}$ 。

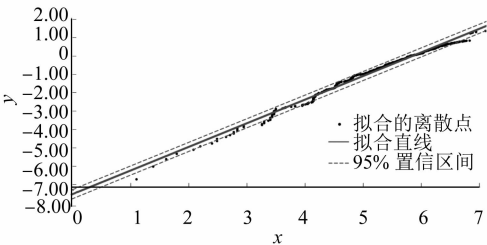


图 1 最小二乘法拟合仿真图
Fig. 1 Diagram of least squares method fitting simulation

表 4 最小二乘法拟合数据相关参数表
Tab. 4 Relevant parameters of least squares method fitting data

拟合曲线参数	估计值	95%置信区间
a	1.331	(1.323, 1.339)
b	-7.510	(-7.553, -7.468)

3.2 威布尔分布拟合优度检验

对威布尔分布模型进行检验,验证其是否满足拟

合优度要求。根据 χ^2 检验分组要求,将整个统计周期分为 11 组,统计发生故障时落在各组内的故障数量。故障分布模型 χ^2 检验如表 5 所示。由表 5 可知,11 组模型的 $\chi^2=11.809\ 2$ 。当检验显著水平取 $\alpha=0.05$ 时,查 χ^2 检验分布表可知 $\chi_{0.05,8}^2=15.507$,其接受域 $W=\{\chi^2<15.507\}$ 。因此以威布尔分布模型对动车组车门系统故障分布类型进行分析是可以接受的。

表 5 故障分布模型 χ^2 检验						
Tab. 5 χ^2 verification of fault distribution model						
组号	时间间隔/d	c_i	X_i	nX_i	$(c_i-nX_i)^2$	χ^2
1	0~133	37	0.041 2	27.839	83.923 9	3.014 6
2	133~266	46	0.063 3	42.307	13.638 2	0.322 3
3	266~399	45	0.073 6	50.246	27.520 5	0.547 7
4	399~532	48	0.082 4	56.221	67.584 8	1.202 1
5	532~665	71	0.089 8	61.101	97.990 2	1.603 7
6	665~798	67	0.095 7	65.319	2.825 8	0.043 2
7	798~931	66	0.101 6	69.054	9.326 9	0.135 0
8	931~1 064	82	0.108 9	72.381	92.525 1	1.278 3
9	1 064~1 197	62	0.110 4	75.437	180.553 0	2.393 4
10	1 197~1 330	83	0.116 3	78.288	22.202 9	0.283 6
11	1 330~1 463	72	0.117 8	80.930	79.744 9	0.985 3

注: c_i ——故障数; X_i ——理论频率; nX_i ——理论频数。

3.3 车门系统最佳维修周期

根据海因里希法则划分车门系统故障等级。据统计,车门系统故障总数为 679 条,其中,A 级故障 81 条,B 级故障 194 条,C 级故障 404 条。由此计算可得,统计期内 A 级故障数为 89.036,历史可靠度为 0.869。

根据调研,中国铁路上海局集团有限公司 CRH2A 型动车组车门系统的预防维修费用为 500 元,事后维修费用为 1 500 元。将车门系统的故障率函数、可靠度函数、 $R_t=0.869$ 、 $C_p=500$ 元、 $C_f=1\ 500$ 元代入维修周期优化模型,可得:

$$C(t)=\frac{500+1\ 500\int_0^T\frac{1.331t^{0.331}}{282.132^{1.331}}dt}{\int_0^T\exp\left[-\left(\frac{t}{282.132}\right)^{1.331}\right]dt}\quad(11)$$

s. t. $R(t)\geq 0.869$

对上述目标函数进行求解。为更直观地表现最佳维修模型,绘制单位时间维修费用期望损失函数及可靠度函数曲线,如图 2 和图 3 所示。由图 2 可知,单位时间维修费用期望损失随时间先降低后升高,即:维修周期小于 159 d 时的维修费用期望损失单调递减;维修周期大于 159 d 时的维修费用期望损失单调递增;若不考虑系统可靠度,当维修周

期为 159 d 时,维修费用有最小值。由图 3 可知,当 $R(t)=0.869$ 时, $T=65\text{ d}$,即维修周期在 $(0,65]$ 区间才能满足 $R(t)\geq 0.869$ 的条件。而单位时间维修费用期望损失函数在维修周期小于 65 d 时也是单调递减的,因此可获得车门系统最佳维修周期为 65 d。

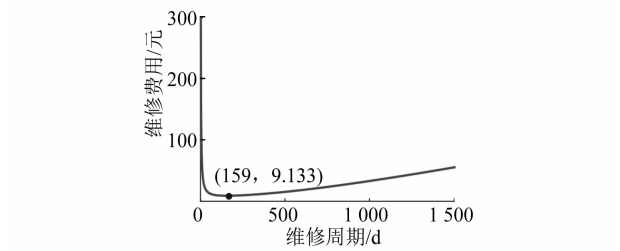


图 2 单位时间维修费用期望损失曲线
Fig. 2 Expected loss curve of maintenance cost per unit time

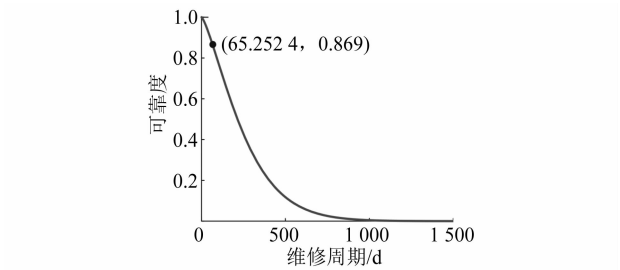


图 3 可靠度函数曲线
Fig. 3 Reliability function curve

3.4 结果分析

当维修周期为 65 d 时,一个维修周期单位时间内的维修费用期望损失为 11.6 元/d,而优化后的一个维修周期内的维修费用期望损失为 754 元。目前,动车组车门系统的维修周期为 30 d,一年维修 12 次。当维修周期为 30 d 时,平均每天维修期望损失为 19.6 元/d,以一个月为周期的维修费用为 588 元。不同维修间隔时,单位时间内的维修期望损失如图 4 所示。

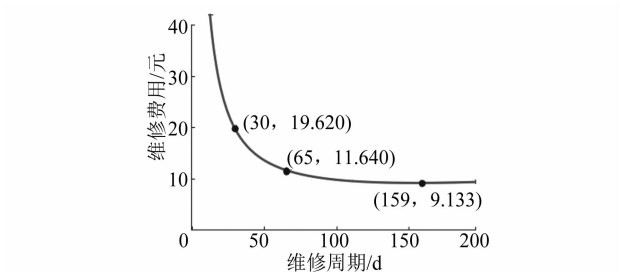


图 4 不同维修间隔下单位时间内的维修费用期望损失
Fig. 4 Expected loss of maintenance cost per unit time for different maintenance intervals