

基于数据驱动的城市轨道交通车辆冷凝风机 修程优化

徐俊驰¹ 朱慷弘¹ 孔佳麟¹ 姜仕军² 王 勇² 兰洪财² 孟琳山² 于洪彬²

(1. 上海地铁维护保障有限公司车辆分公司, 200235, 上海;

2. 中车青岛四方车辆研究所有限公司, 266011, 青岛//第一作者, 工程师)

摘 要 城市轨道交通列车空调冷凝风机运行时间少,除夏季外基本不运行,目前修程存在过度修的情况,需要对冷凝风机修程进行优化。针对该问题,基于数据驱动提出适用于冷凝风机的修程优化策略。通过该策略,依据城市轨道交通车辆实际运行中冷凝风机部件的有效服役里程,得到其故障数据。对故障数据进行假设检验判断部件寿命符合的分布类型,采用双参数威布尔分布拟合故障数据,引入适用于冷凝风机故障数据类型的支持向量回归机对故障数据拟合求解分布参数,依据参数构建可靠性模型,求解得到可靠性下降时的可靠性间隔约束。依据冷凝风机预防性维修所需的人工成本及故障后所需的人工成本及部件维修成本,分别计算该部件预防性维修和修复性维修的成本,得到部件的维修总成本模型。通过综合可靠性模型及维修成本模型分析得到最佳检修修程,即在满足部件可靠性的情况下,总维修成本最小的使用里程即为最佳的维修里程。结果表明,优化后的车辆冷凝风机修程比原修程更合理,既能保证列车安全运行,又能降低检修运维成本。

关键词 城市轨道交通; 车辆; 冷凝风机修程; 数据驱动

中图分类号 U270.38⁺3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.030

Data-driven Condenser Fan Maintenance Schedule Optimization of Urban Rail Transit Vehicle

XU Junchi, ZHU Kanghong, KONG Jialin, JIANG Shijun, WANG Yong, LAN Hongcai, MENG Linshan, YU Hongbin

Abstract The running time of urban rail transit train air-conditioning condenser fan is quite little, basically turned-off except in summer, and the maintenance schedule may have arranged excessive repair for this condition, therefore the air-conditioning condenser fan maintenance schedule needs to be optimized. Targeting this issue, a data-driven maintenance schedule optimization strategy for condenser fan is proposed. Through this strategy, based on the effective service mileage of

condenser fan components during the actual operation of urban rail transit vehicles, the fault data is obtained. A hypothesis test is carried out on the fault data to determine the distribution type suitable for the component lifespan. The two-parameter Weibull distribution is used to fit the fault data, and the support vector regression machine suitable for the fault data types of condenser fan is introduced to fit the fault data to solve the distribution parameters. Then the reliability model is constructed according to the parameters, and the reliability interval constraint is obtained when the reliability decreases. According to the labor cost required by condenser fan preventive maintenance, the labor and component maintenance costs in case of failure, the preventive maintenance and repair maintenance costs of the component are calculated separately, and the total maintenance cost model of the component is obtained. Through the analysis of comprehensive reliability model and maintenance cost model, the optimal maintenance schedule is obtained, that is, under the condition of meeting the reliability of components, the service mileage with the minimum total maintenance cost is the optimal maintenance mileage. Results show that the optimized vehicle condenser fan maintenance schedule is more reasonable than the original schedule, which can not only ensure the safe operation of the train, but also reduce the inspection and operation-maintenance cost.

Key words urban rail transit; vehicle; condenser fan maintenance schedule; data-driven

First-author's address Vehicle Branch of Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China

目前,我国城市轨道交通车辆设备的维修存在着欠修或过修问题,确定合理的修程可以有效降低设备维修成本。新材料及新工艺在城市轨道交通车辆中的应用,一定程度上可以提高车辆配件的使用寿命,然而在现有的修程中并未得到充分体现^[1]。对于空调冷凝风机而言,目前修程规定间隔

6个月对其进行检查,大修时须对电机进行更换。然而冷凝风机运行时间少,除了夏季外基本不运行,因此存在过度修的情况^[2]。过度修不仅会使部件未充分使用,还会导致车辆检修成本增加。因此,为冷凝风机可靠性设置合理的修程,既能保证列车安全运行,又能降低列车运维成本。本文基于冷凝风机实际运行故障数据,通过建立可靠性及经济性模型,得到冷凝风机最佳检修间隔。

1 冷凝风机修程优化模型

1.1 可靠性模型

在冷凝风机的修程优化中,可靠性是确定修程的重要依据之一,修程须始终满足冷凝风机的可靠性要求。威布尔分布具有使用广泛、拟合精度较高等优点,是可靠性工程中重要的分布类型。威布尔分布的概率密度 $f(t)$ 的计算公式为^[3]:

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

式中:

t ——设备的运行时间或运营里程;

β ——形状参数;

γ ——位置参数;

η ——尺度参数。

式(1)中, β 决定了威布尔分布的形状参数,同时也代表了不同的故障类型。不同 β 值对 $f(t)$ 的影响如图1所示。当 $\beta < 1.0$ 时,部件属于早期故障模式;当 $\beta > 1.0$ 时,部件属于后期故障模式;当 $\beta = 1.0$ 时,部件属于随机故障模式^[4]。

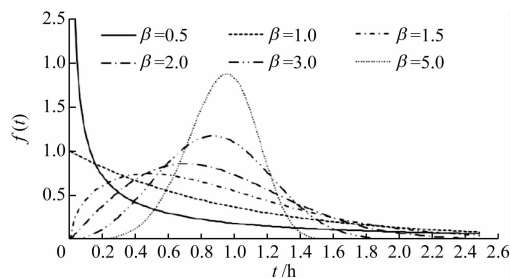


图1 不同 β 对 $f(t)$ 的影响

Fig. 1 Effect of different β values on probability density

工程中一般假设 $\gamma=0$,对于服从 β 及 η 的双参数的威布尔分布而言,其可靠度 $R(t)$ 可依据式(2)计算^[5]:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (2)$$

1.2 维修成本模型

对冷凝风机修程进行优化时,除了要对其进行可靠性分析外,还需对其维修成本进行分析。冷凝风机维修成本 $C(t)$ 的计算公式为:

$$C(t) = \frac{C_p + F(t)C_r}{t} + F(t)\lambda_e C_f \quad (3)$$

式中:

C_p ——预防性维修成本;

C_r ——部件维修成本;

λ_e ——结合事件的概率;

C_f ——修复性维修成本;

$F(t)$ ——累计故障概率。

冷凝风机的维修成本呈先减后增的变化趋势:当部件使用里程较低时,预防性维修的必要性较低;随着使用里程增加,部件的故障概率逐渐增大,此时修复性维修的成本较高。在满足部件可靠性的情况下,总维修成本最小的使用里程即为最佳的维修里程。

2 威布尔分布参数估计方法研究

确定威布尔分布参数是分析部件可靠性的关键。常用的威布尔分布参数估计方法可以分为图解法和解析法^[6]。传统的秩回归估计法中部件故障数据中使用里程 t_i 对应的中位秩 $F_0(t_i)$ 的计算公式如下:

$$F_0(t_i) = \frac{(i-0.3)}{(n+0.4)} \quad (4)$$

式中:

i ——关联故障模式的秩次;

n ——故障数据的数量。

为简化分析,令:

$$\begin{cases} y_i = \ln \{ -\ln [1 - F_0(t_i)] \} \\ x_i = \ln t_i \end{cases} \quad (5)$$

式中:

x_i, y_i ——分别为每个故障数据对应的横、纵坐标。

求得 (x_i, y_i) 后,传统的秩回归估计法可采用最小二乘法进行回归分析得到所需参数。然而冷凝风机故障数量较少,该方法对模型参数的估计结果不准确。本研究结合冷凝风机实际运维情况,引入线性SVR(支持向量回归机)对参数进行估计。设误差系数 $\varepsilon > 0$,超平面 $y = wx + b$ (w, b 皆为系数)的 ε 通过式(6)计算^[7]:

$$\{(x, y) \mid wx + b - \varepsilon < y < wx + b + \varepsilon\} \quad (6)$$

对于不在 ε 范围内的点,采用惩罚系数 C_0 来评估此类点对回归结果的影响。

$$\begin{cases} \min_{w,b} \left(\frac{1}{2} \|w\|^2 + C_0 \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_{i,0}) \right) \\ \text{s. t.} \begin{cases} wx_i + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_{i,0} \\ y_i - wx_i - b \leq \varepsilon + \xi_i \\ \xi_i, \xi_{i,0} \geq 0, i = 1, 2, \dots, l \end{cases} \\ \xi_i = \max \{0, [y_i - f(x_i) - \varepsilon]\} \\ \xi_{i,0} = \max \{0, [f(x_i) - y_i - \varepsilon]\} \end{cases} \quad (7)$$

式中:

$\xi, \xi_{i,0}$ ——松弛变量。

通过评估函数 R^2 判断拟合结果是否准确。 R^2 的计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{i,p} - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

式中:

$y_{i,p}$ ——估计值;

y_i ——实际值;

\bar{y} ——实际值的平均值。

一般而言,计算结果越接近 1,表示拟合结果和实际值越接近。

3 冷凝风机修程优化策略

本文的策略是在检查冷凝风机检修任务的基础上,选择任务相关的冷凝风机作为分析对象,基于列车实际维修数据,利用 SVR 回归分析求解分布参数,搭建部件的可靠性模型和经济性模型,同时综合两种模型求得部件满足可靠性且维修成本最小的修程,从而达到修程优化的目的。冷凝风机修程优化策略主要如下:

1) 针对空调冷凝风机检修任务,筛选任务相关的冷凝风机作为分析对象,在后续分析中针对该部件开展故障数据收集。

2) 对检修记录中的数据进行筛选并用于后续分析,排除由意外情况导致的故障,从中筛选出反映部件寿命和可靠性的数据。部件的归零里程为目前里程减去上車里程,即有效服役里程。

3) 在对部件可靠性参数进行计算前,依据统计的关联故障模式,采用假设检验方法识别故障是否服从威布尔分布,即置信水平不低于 95% 时对满足

的分布类型进行验证。

4) 将故障数据和补充的删失数据代入式(4),求解每个数据对应的中位秩 $F_0(t_i)$,删失数据的中位秩为 0。将 $F_0(t_i)$ 代入式(5),得到每个故障数据的坐标。

5) 依据式(7)对关联故障数进行回归拟合,求解威布尔分布的参数。

6) 将求得的 β 和 η 代入式(2),计算部件的可靠性 $R(t)$,得到可靠性的最佳维修里程 T_r 。此外还需计算模型维修的维修成本曲线,得到部件维修成本最低里程 T_c 。综合 T_r 和 T_c 判断,得到部件维修的最佳里程。

4 案例分析

4.1 数据收集及标记

选取我国某城市轨道交通线路列车客室的空调冷凝风机为研究对象,对其进行修程优化。通过对该线路实际运维的故障报单与检修记录进行筛选,得到空调冷凝风机故障数据(见表 1),从而对部件的可靠性进行分析。

在冷凝风机修程优化中,除了考虑部件的故障时间、里程等数据外,还需考虑更换部件的费用,即预防性维修成本和修复性维修成本。通过查询全寿命周期费用文件,得到空调冷凝风机的预防性维修时间为 1 h,所需维修人数为 1 人;修复性维修时间为 2 h,所需维修人数为 1 人,部件修理成本为 735 元。

4.2 数据收集及标记

按照冷凝风机修程优化策略步骤,在进行数据分析前需判断部件寿命符合的分布类型:假设 H_0 为故障数据服从双参数威布尔分布, H_1 为故障数据不服从双参数威布尔分布。对故障数据进行计算后,得到统计量 $M = 0.2608$ 。假设检验的临界值 F_{crit} 由关联故障模式的数量确定,在满足置信水平不低于 95% 时,通过查表^[8]得到 $F_{\text{crit}} = F(0.05, 2.00, 2.00) = 19.0$ 。由此可见, M 小于 F_{crit} ,接受假设 H_0 ,即部件寿命满足双参数威布尔分布。计算不同样本数量的置信水平。为满足置信水平不低于 95%,计算得到最小样本量 m 为 24。当故障数据不满足 m 时,应当补充删失数据,即在规定的试验时间和失效数量之外未发生故障的数据。

在对故障数据进行回归分析前,需得到每个数据对应的 $F_0(t_i)$ 及坐标。依据关联故障数据和补充

的删失数据计算得到每个数据的 $F_0(t_i)$ 及对应的坐标。表 1 仅展示了故障数据所对应的参数, (x, y) 为每个故障数据对应的坐标。

表 1 冷凝风机故障数据回归分析结果

Tab.1 Regression analysis results of condenser fan fault data

次序	归零里程/km	数据类型	$F_0(t_i)$	(x, y)
4	292 497	故障	0.056 0	(12.586 2, -2.853 5)
6	449 472	故障	0.192 6	(13.015 8, -1.541 9)
14	483 887	故障	0.356 6	(13.089 6, -0.818 9)

得到每个故障数据的坐标后,依据 SVR 回归分析对故障点进行回归分析,其中惩罚系数取值为 50,损失函数取值为 0.12。SVR 回归分析能够对故障点进行拟合,通过计算得到拟合结果的 R^2 为 0.951 5,接近于 1。因此,SVR 回归分析适用于拟合冷凝风机故障数据的变化趋势,且能有效分析部件的可靠性。

4.3 冷凝风机修程优化分析

利用回归分析结果,计算得到双参威布尔分布的参数 $\eta = 638\,493.01$ 和 $\beta = 3.70$ 。冷凝风机的可靠性曲线如图 2 所示。由图 2 可见:随着使用里程增加,冷凝风机的可靠性不断减小,即发生故障的概率会越来越大。

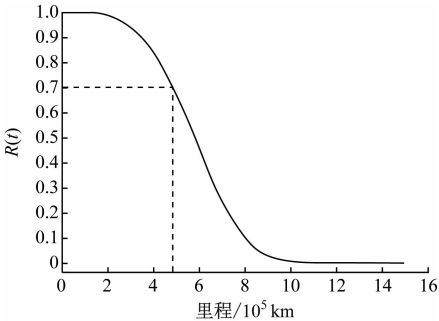


图 2 冷凝风机的可靠性曲线

Fig.2 Curve of condenser fan reliability

对冷凝风机进行修程优化时必须确保其可靠性满足要求,维修任务决策报告中可靠度约束 $R(t) = 0.7$ 。因此,冷凝风机应当在其可靠性低于 $R(t)$ 前进行更换,即图 2 中虚线所对应的里程为 483 300 km。图 3 为冷凝风机的维修成本曲线,最佳的维修成本应为图 3 中虚线之间的里程,即 237 420 ~ 290 180 km。冷凝风机原检修规程是 6 个月,相比于原修程,新检修规程延长了检修任务间隔,这样既能保证冷凝风机在运行期间的可靠性,又能降低维修成本。

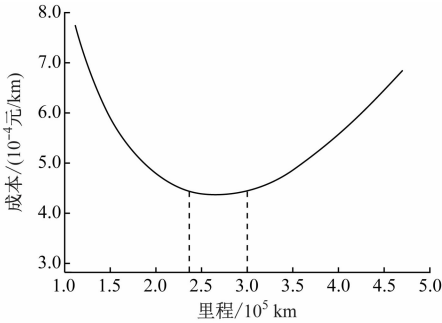


图 3 冷凝风机的维修成本曲线

Fig.3 Curve of condenser fan maintenance cost

5 结语

优化修程可以避免出现过修的问题,从而使部件利用率上升,降低维修成本。通过对空调冷凝风机进行分析,判断其存在过修情况。针对冷凝风机检修任务,综合可靠性和维修成本两方面分析,得到冷凝风机可靠性在满足要求情况下维修成本最小的修程。由于原先的修程中空调冷凝风机存在过修的问题,因此新修程相比于原修程进行检查的时间间隔更长。此外,对采用新修程的部件的维修总成本进行了分析,得到的新维修里程也同样在维修总成本最小的里程范围内。综合而言,基于数据驱动的空调冷凝风机检修任务的新修程比原修程更加合理,避免了过修并降低了列车的运维成本。

参考文献

[1] 李萌. 新形势下铁路机车检修修程修制改革优化探析[J]. 化学工程与装备, 2020(12): 228.
LI Meng. Analysis on the reform and optimization of railway locomotive maintenance system under the new situation[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2020(12): 228.

[2] 周波, 高博, 李进. 轨道车辆空调系统维修模式应用与探讨[J]. 电子质量, 2021(9): 56.
ZHOU Bo, GAO Bo, LI Jin. Application and discussion on maintenance mode of air conditioning system for rail vehicles[J]. Electronics Quality, 2021(9): 56.

[3] 叶慈南, 曹伟丽. 应用数理统计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
YE Cinan, CAO Weili. Applied mathematical statistics[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

[4] 曾国桓. 两参数威布尔分布下定时截尾试验的参数评估方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
ZENG Guohuan. Study on parameter evaluation method of timed censoring test under two-parameter Weibull distribution [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.

(下转第 173 页)

及坡度等确定,因此分相区设置应由接触网专业及信号专业协同设计。

4.2.1 入口位置信号机的设置

分相区与分相区前方最近的信号机间的距离应满足列车在该信号机前方停车再起动车后,过分相区起点达到的入口速度能保证出分相区终点的出口速度不能太低。

一般出口速度由运营需求、线路条件及列车参数等确定。根据出口速度、分相区长度、线路条件、列车参数等共同确定信号机的布置位置。

4.2.2 出口位置信号机的设置

如分相区出口位置需设置信号机,原则上分相区与分相区出口处最近的信号机之间的距离应满足列车在该信号机前方停车时车尾部能完全出清分相区所在的轨道区段,即信号机至分相区所在轨道区段最外方之间的最小距离为最大列车长度。

5 结语

本文在对当前城市轨道交通车载自动过分相方案进行分析的基础上,结合电气化铁路自动过分相方案,阐述了无源 RFID 精确定位及信息传递的原理,分析了无源 RFID 精确定位技术在自动过分相控制方案中应用的可行性和合理性,最后提出了基于无源 RFID 精确定位技术的车载自动过分相控制方案,并对其系统组成、设备配置和工作原理,以及降级模式下的控制方案进行了详细阐述。结果表明,该方案能实现列车安全、可靠及平稳自动过分相。

参考文献

[1] 许群芳,汪波. 印度新孟买地铁1号线车辆自动过分相系统

(上接第169页)

[5] 张栋梁. 基于威布尔分布的列车齿轮箱可靠性评估[J]. 轨道交通装备与技术, 2021(5): 12.

ZHANG Dongliang. Reliability evaluation of train gearbox based on Weibull distribution[J]. Rail Transportation Equipment and Technology, 2021(5): 12.

[6] 顾梦元. 威布尔分布与正态分布两种条件概率密度曲面比较研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.

GU Mengyuan. A comparative study of Weibull conditional probability density distribution surface and normal conditional probability density distribution surface[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.

设计[J]. 技术与市场, 2020, 27(11): 46.

XU Qunfang, WANG Bo. Design of automatic passing-through system for vehicles in new Mumbai Metro Line 1, India[J]. Technology and Market, 2020, 27(11): 46.

[2] 孙鹏程. 一种新型地面开关过分相技术的系统方案研究[J]. 铁道机车车辆, 2017, 37(3): 72.

SUN Pengcheng. Study on a new type ground switch passing neutral section[J]. Railway Locomotive & Car, 2017, 37(3): 72.

[3] 蒋林,洪娟. CTCS-2级高铁线路动车组过分相研究[J]. 铁道通信信号, 2019, 55(6): 34.

JIANG Lin, HONG Juan. Research on EMUs with CTCS-2 passing through neutral zone in high-speed railway[J]. Railway Signalling & Communication, 2019, 55(6): 34.

[4] 陈曦,田密,张亮. 动车组ATP车载设备自动过分相问题分析研究[J]. 铁道通信信号, 2020, 56(3): 9.

CHEN Xi, TIAN Mi, ZHANG Liang. Analysis and research on passing neutral zone automatically for EMU with on-board ATP equipment[J]. Railway Signalling & Communication, 2020, 56(3): 9.

[5] 张宏宽,田红玉,胡权,等. 一种RFID定位的无人驾驶车辆精准停车制动辅助系统[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2021, 21(1): 69.

ZHANG Hongkuan, TIAN Hongyu, HU Quan, et al. Brake assist system for precise parking of driverless cars on rail transit based on RFID positioning[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2021, 21(1): 69.

[6] 王忠勤. 基于无源RFID的目标位置感知及多标签互耦干扰抑制研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.

WANG Zhongqin. Research on target location awareness and multi-tag mutual coupling interference suppression based on passive RFID[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.

(收稿日期:2021-02-22)

[7] 尹浩霖. 清洁能源发电系统预防性维修决策技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

YIN Haolin. Research on preventive maintenance decision technology of clean energy power generation system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.

[8] 茆诗松,周纪芄,张日权. 概率论与数理统计[M]. 4版. 北京: 中国统计出版社, 2020.

MAO Shisong, ZHOU Jixiang, ZHANG Riquan. Probability and mathematical statistics[M]. 4th ed. Beijing: China Statistics Press, 2020.

(收稿日期:2022-03-14)