

【自动化技术】

轨道交通车辆维修周期优化模型^{*}刘述芳¹, 徐永能², 陈城辉², 傅晓莉²

(1. 南京地铁科技咨询有限公司, 南京 210008; 2. 南京理工大学, 南京 210094)

摘要:以轨道交通车辆维修周期为研究对象,提出了车辆系统设备的寿命数据收集和处理方法,通过数据分布检验把握了分析对象的寿命分布规律,并在此基础上以设备可靠性和维修经济性为优化目标,结合多目标优化方法,建立了轨道交通车辆维修周期优化模型。具体实例说明了模型的合理性,对提高轨道交通车辆维修决策水平具有指导意义。

关键词:轨道交通; 车辆; 维修周期优化; 维修决策

中图分类号: U239.5

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2010)06-0071-03

城市轨道交通由于具有大运量、快速、准时、舒适、安全、环保的特点,目前在世界范围内得到了迅猛发展。然而,建设安全、高效、经济的轨道交通这一可持续发展战略目标,也使轨道交通管理部门面临车辆维护与管理的巨大挑战。一方面,作为大运量的公共客运载体,城市轨道交通对车辆安全性、可靠性提出了更高的要求;另一方面,车辆维修费用已经不再是一项辅助性投入,而是构成企业成本的重要部分。因此,如何在保障车辆技术状态稳定的基础上实现维修周期结构优化,提高设备维修管理经济效益,已成为轨道交通设备维修管理领域亟待研究的重要课题。

车辆的寿命估计是确定其最佳维修周期的基础,而寿命数据的收集则直接关系到设备的寿命评估^[1]。由于轨道交通车辆主体部件仍未实现国产化,故进行设备寿命试验以获得准确的寿命数据,其代价是昂贵的;另外,考虑到车辆在实际运行中出现的故障实际上也是一种寿命状态数据。因此,本文中充分利用已有车辆的故障数据,通过统计分析确定相应的故障分布类型及分布参数,并结合多目标优化决策方法,在可靠性和经济性二者之间寻找维修周期的最佳平衡点,以期能建立起轨道交通车辆设备维修周期优化模型。

1 车辆故障数据分析

1.1 故障数据收集

设备寿命指的是设备从投入使用至出现故障的时间跨度。考虑到轨道交通车辆并非全天候运行,故较为精确的寿命数据统计单位应为行走的里程数。因此,在收集故

障寿命数据时,应记录设备投入运行时的里程和因故障终止运行时的里程。在利用这些寿命数据进行统计分析时,要保证数据的充足有效,即样本容量充足,以确保数据统计分析的精度。

仅当所分析设备的寿命里程数据量满足最少样本容量要求时,数据的统计分析以及维修周期的优化决策才具有合理性。而对于故障数据量不满足该限制条件的设备,可通过寿命预测或插值手段获得更多的数据量。

1.2 数据处理与分布检验

在工程上,设备的寿命都是服从一定统计规律的随机变量,一般用寿命的分布函数来描述^[2]。掌握了设备的寿命分布,就可依据其规律预测设备的故障趋势,这对指导设备的维修决策具有重要意义。对轨道交通车辆具体设备而言,根据不同的故障机理,有2种主要的分布类型:指数分布和威布尔分布。指数分布主要应用于电子设备的寿命和复杂系统的故障时间统计。威布尔分布最早在1939年由瑞典物理学家威布尔提出^[3]。由于威布尔分布因参数的不同而同时涵盖不同的分布形式,这就使得其迅速发展成可靠性工程中重要的分布类型。2者的概率密度函数如下所示。

1) 数分布为

$$f(t) = \frac{1}{\theta} \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) (\theta > 0)$$

2) 参数威布尔分布为

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

式中: m 为形状参数; η 为尺度参数。

* 收稿日期:2010-03-20

作者简介:刘述芳(1972—),女,博士研究生,主要从事车辆工程研究。

对于指数分布类型的检验,可采用多种检验统计量,常用的为英国统计学家 K·皮尔逊(K·Pearson)于 1900 年提出的 χ^2 检验^[2];而对于威布尔分布类型的检验,则更多的采用由夏皮诺(Shapiro)和维尔克(Wilk)在 1965 年提出的 W 检验方法。

2 维修周期优化建模

2.1 影响因素分析

维修被描述为“为确保设备(包括设施和装备)能履行其期望功能或恢复其期望功能所进行的所有活动^[4]”,简单地说,就是指为保持“对象”完好工作状态所进行的一切工作^[5]。显然,维修的首要目的是保障城市轨道交通车辆技术状态的稳定性和可靠性,故不同的维修周期影响着车体设备的可靠程度^[6]。

另外,随着设备经济技术的发展,设备复杂化、精细化程度也越来越高。越来越多的企业意识到在总体生产经营成本中,维修成本所占的比重正在不断上涨,降低了维修费用也就节约了维修成本,故维修已成为了企业潜在的利润源泉。同时,由于维修周期间隔直接影响着维修成本,维修周期越短,维修成本投入越大。因此,合理的维修周期间隔对车辆设备状态的可靠性以及维修成本具有直接的相互影响关系。本文将 2 者作为轨道交通车辆维修周期的优化目标。

2.2 周期优化模型

假设通过故障数据的收集处理,能在一定程度上把握车辆技术状态及寿命分布规律,并且这里的维修成本仅考虑故障修复成本 c_1 和周期维护成本 c_2 ,且 2 者相对固定。

通过以上的影响因素分析可知,车辆维修周期优化属于多目标决策问题,即满足可靠性的同时也期望其维修成本最低,因此,利用多目标决策方法可构建如下优化模型:

$$\begin{aligned} \text{Min } \text{fun}(T) &= \alpha \times [1 - R(t)]/T + \beta \times \\ & [c_1 + c_2 \times F(t)]/(c_1 + c_2)/T \\ \text{s. t. } R(T) &\geq R_r \end{aligned}$$

式中: α, β 表示设备可靠性与维修经济性之间的权重,且 2 者之和为 1; $R(t)$ 为设备可靠度函数; $F(t)$ 为设备不可靠度函数; R_r 为期望的可靠度,如 0.8; T 为维修周期变量; $[c_1 + c_2 \times F(t)]/(c_1 + c_2)$ 是为使得可靠度与经济性评价在数量级上有可比性而构造的维修成本系数,即实际可能的维修总成本与周期内 1 次故障的维修成本的比值。

目标函数表示单位周期内设备不可靠度和维修成本系数的加权最小。结合可靠度条件约束,通过模型求解可得到最佳的维修周期 T ,使得在该维修周期下,设备可靠性和维修经济性达到合理的优化平衡。

2.3 模型参数选择

要进行以上车辆维修周期优化模型的求解,首先需要确定相应的模型参数,如可靠度分布函数等。如上文中所

述的方法,可对城市轨道交通车辆关键设备的故障数据进行统计分析,并借助相应的统计检验方法确定其寿命分布类型及主要的分布参数,包括 $f(t)$ 、 $R(t)$ 、 $F(t)$ 等。

除此之外,模型中还包含权重系数参数以及期望可靠度参数,可根据实际设备对车辆运行安全以及成本的影响程度来确定。如对于影响行车安全的关键设备,则需要权重和可靠度约束上给予一定的倾斜,可令 $\alpha = 0.7, \beta = 0.3, R_r = 0.9$ 等。

3 辅助信息系统开发

为便于设备故障记录与统计分析,开发了轨道交通车辆设备维修辅助决策与管理信息系统,其功能结构如图 1 所示。

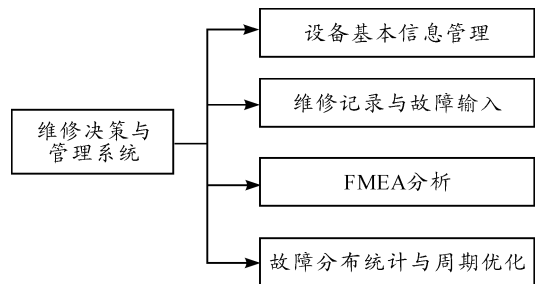


图 1 维修决策软件功能组成

在故障分布统计与周期优化模块中,通过寿命数据的分布拟合可获得该设备寿命分布类型的参数及相应的可靠度曲线、不可靠度曲线等分布规律。输入周期优化模型中的其他参数,如期望可靠度以及维修成本等,系统会自动给出最佳的维修周期,操作界面如图 2 所示。

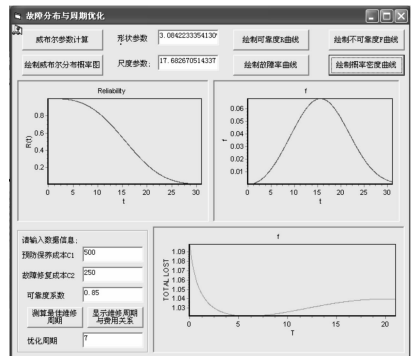


图 2 维修周期优化软件界面

图 2 中上半部分分别为可靠度函数曲线、概率密度函数曲线,右下部分为模型目标函数与周期 T 的变化关系。

4 实例分析

南京地铁车辆某设备通过故障数据的积累与处理,其寿命数据如表 1 所示。

表1 车辆某设备寿命里程统计表

编号	1	2	3	4	...	61	62
运行里程/(10 ³ km)	3 896	6 068	8 173	3 969	...	4 936	6 637

假设置信度为 $\alpha = 0.05$, 则依照数理统计检验方法, 可确定该设备寿命数据服从威布尔分布。因此, 可充分利用这组寿命数据通过图形法进行分布参数的估计, 具体步骤可见文献[2]。由此计算得到该行车设备的故障概率密度函数和可靠度函数等。

利用所开发的维修决策信息系统统计分析其使用寿命数据, 可得到威布尔分布 2 个参数的估计分别为: 形状参数 $m = 3.401 6$, 尺度参数 $\eta = 6 834.7$ 。另外, 通过维修台帐记录^[7], 并结合该设备对地铁整车运行安全的影响程度, 可确定维修周期优化模型中的相应参数, 具体如表 2 所示。

表2 轨道交通车辆某设备模型参数

α/β	c_1	c_2	R_r	m	η
0.7/0.3	25	50	0.7	3.401 6	6 834.7

由此, 可得到最优的维修里程周期为 $T = 5 438$ km。目标函数与维修周期里程 T 之间的对应关系如图 3 所示。

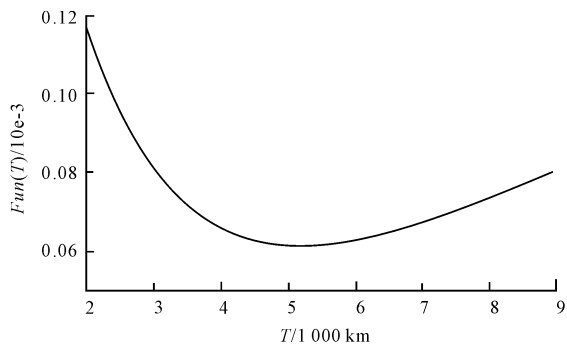


图3 优化目标与维修周期关系曲线

同样, 可对轨道交通车辆系统其他关键设备, 通过以上方法进行寿命分析, 并利用所构建的周期优化模型确定最佳的维修周期。这样, 既能保障设备的可靠性, 又能降

低维修成本, 具有良好的实际意义。

5 结束语

本文中对轨道交通车辆设备的寿命数据提出了收集和处理方法, 并通过统计检验确定了寿命数据的分布类型, 同时以轨道交通车辆设备可靠性和维修成本 2 者为优化目标, 结合多目标优化决策方法, 建立了维修周期优化模型, 给出了具体应用实例, 说明了该方法的有效性, 从而克服了以往凭经验估算和推断的弊端, 使得维修工作进一步科学化、合理化。

参考文献:

- [1] 周大伟, 何宝民, 冯楠. 基于预知维修技术的装备维修管理[J]. 四川兵工学报, 2007(2): 18-20.
- [2] 叶慈南, 曹伟丽, 应用数理统计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [3] 周津慧, 重大设备状态检测与寿命预测方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
- [4] 孙立贤, 孙磊, 张波. 故障停机时间不可忽略情况下的延迟时间维修建模[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(10): 74-76.
- [5] 陈学楚. 现代维修理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [6] 王建, 柳辉, 郝建平. 维修需求研究[J]. 四川兵工学报, 2009(2): 97-98.
- [7] 毛一轩. 南京地铁设施设备 RCM 系统规划与实施[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

(责任编辑 周江川)