

基于剩余寿命可靠度的地铁车辆设备 多部件趋近机会维修策略*

杨艳娟 徐永能 董瑞超

(南京理工大学自动化学院, 210094, 南京//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 当前地铁车辆的检修存在着过修和欠修的现象。在分析车辆设备全寿命的基础上, 以全寿命周期单位时间维修费用最低为目标, 建立了基于剩余寿命可靠度的预防性维修周期模型, 并针对多部件维修周期问题提出了应用于多部件整体的趋近机会维修策略。通过算例分析, 验证了模型的合理性和可用性, 以及趋近机会维修策略的有效性。

关键词 地铁车辆; 全寿命周期; 剩余寿命可靠度; 多部件维修; 趋近机会维修策略

中图分类号 U279.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.03.010

Approaching to Multi-component Opportunity Maintenance Strategy for Metro Vehicle Equipment Based on Residual Life Reliability

YANG Yanjuan, XU Yongneng, DONG Ruichao

Abstract At present, there are the over-repair and the under-repair phenomena in metro vehicle maintenance. For this reason, based on a vehicle equipment full life analysis, and taking the lowest maintenance cost per unit time of the full life cycle as the goal, an equipment preventive maintenance cycle model based on the residual life reliability is set up, and regarding the multi-component maintenance cycle, an approaching to multi-component opportunity maintenance strategy is put forward. Through example analysis, the rationality and availability of the model, the effectiveness of the approaching to opportunity maintenance strategy are verified.

Key words metro vehicle; full life cycle; residual life reliability; multi-component repair; approaching to opportunity maintenance strategy

Author's address School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, 210094, Nanjing, China

在保证列车安全性、可靠性的基础上如何减少维修费用, 对车辆设备全寿命周期内的维修周期进

行优化^[1], 对不同车辆部件实施统筹维修, 成为现阶段一个值得深入研究的问题。学者们对城市轨道交通车辆的维修周期进行了深入研究, 特别是以预防维修模式为出发点, 考虑了关键部件的可靠性, 优化维修周期模型^[2-4]。本文主要是在对地铁车辆设备全寿命分析的基础上, 建立以全寿命周期单位维修费用最小化为目标函数、以设备剩余寿命可靠度为约束条件的预防性维修周期模型, 并对多部件整体维修提出趋近机会维修策略。

1 地铁车辆设备全寿命分析

本文将设备末次预防性维修后的时间纳入到设备全寿命范围内, 利用地铁车辆设备大多服从威布尔分布这一特征, 推导设备在末次预防性维修后的剩余寿命时间。

定义地铁车辆设备的可靠度函数为 $R(t)$, 寿命分布函数为 $F(t)$, 则 $R(t)$ 的计算公式为:

$$R(t) = 1 - F(t) = P\{X > t\}, t \geq 0 \quad (1)$$

式中:

t ——设备的运行时间;

$P\{X > t\}$ ——在规定条件下时刻 t 以前设备正常工作的概率。

对于服从威布尔分布的产品, 其可靠度为:

$$R(t) = \exp(-(t/\eta)^\beta), (\eta, \beta > 0) \quad (2)$$

式中:

η ——尺度参数;

β ——形状参数。

根据寿命期望值 (MTTF) 含义定义设备平均寿命为 $E(t)$, 其计算公式为:

$$E(t) = \int_0^\infty t dF(t) = \int_0^\infty R(t) dt \quad (3)$$

对于服从二参数威布尔分布的设备其剩余寿

* 国家重点研发计划项目 (2017YFB1001801); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (30917012102)

命函数 $\mu(t)$ 的计算公式为:

$$\mu(t) = E(X - t | X > t) = \frac{E(x) - \int_0^t R(x) dx}{R(t)} \quad (4)$$

则设备的全寿命函数 T_z 可以表示为:

$$T_z = \sum_{i=1}^N T_i + \mu(t) \quad (5)$$

式中:

i ——预防性维修的次数;

N ——设备全寿命周期内的预防性维修总次数;

T_i ——设备的第 i 次维修时距上次维修的时间间隔;

$\mu(t)$ ——第 N 次预防性维修后设备的平均剩余寿命。

2 预防性维修周期优化模型

本模型在充分考虑车辆设备可靠性水平的基础上,建立了以单位时间维修费用最低为目标的预防性维修周期模型。

2.1 模型假设

由于地铁车辆设备是由多个部件组成,假定各部件均有以下几个性质:① 部件投入使用时是全新的;② 部件的故障率是独立的,遵循威布尔分布,且只考虑部件之间的维修周期与经济相关性;③ 预防性维修使部件的故障率下降到偶然故障阶段的故障率(即修复如新),但同时增大了故障率函数的变化率;④ 对于预防性维修周期内发生的故障只采取故障维修措施,不改变部件的故障率及其故障率函数;⑤ 部件可靠性随着役龄时间增加而下降。

2.2 剩余寿命可靠度约束

根据可靠性函数的含义,可以定义设备剩余寿命可靠度函数 $R_t(u)$ 如下^[5]:

$$R_t(u) = P(X_t \geq u) = \frac{R(t+u)}{R(t)} \quad (6)$$

式中:

X_t ——设备已服役时间 t 后的剩余寿命时间。即:设备在 t 时刻进行了一次上述规定的预防性维修后,再经过时间 u ,在时刻 $t+u$ 正常工作的概率。

当设定剩余寿命可靠度应大于或等于某一阈值 α 时, $R_t(u)$ 可在式(6)的基础上表示为:

$$R_t(u) = \frac{R(t+u)}{R(t)} \geq \alpha \quad (7)$$

式中:

α ——剩余寿命可靠度阈值。

求解上述方程,可求得 u 的值。当设备寿命服从二参数威布尔分布时,预防性维修周期的求解方程为:

$$\exp\left[\left(\frac{\sum_{i=1}^{N-1} T_i}{\eta}\right)^\beta\right] \cdot \exp\left[-\left(\frac{\sum_{i=1}^{N-1} T_i + T_N}{\eta}\right)^\beta\right] = \alpha \quad (8)$$

式中:

T_N ——待求的下一一次维修周期。

2.3 预防性维修周期的确定

在地铁车辆设备的全寿命服役期间,其总维修费用 C_z 主要由五部分组成:预防性维修费用 C_1 、在预防性维修周期内出现的故障维修费用 C_2 、因进行预防性维修而造成的损失 C_3 、因进行故障维修而造成的损失 C_4 和在拆卸故障部件时造成的间接损失费用 C_5 。总维修费用及其组成费用的计算公式为:

$$C_z = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \quad (9)$$

$$C_1 = \sum_{i=1}^N C_{ep}(\varphi, t_i, T_i) \quad (10)$$

$$C_2 = C_{em} F \quad (11)$$

$$C_3 = \sum_{i=1}^N C_{t_i} \quad (12)$$

$$C_4 = \sum_{j=1}^F C_{q_j} \quad (13)$$

$$C_5 = C_w F \quad (14)$$

式中:

C_{ep} ——每次预防性维修的费用;

φ ——故障率递增因子;

t_i ——第 i 次预防性维修所花费的时间;

C_{em} ——预防性维修周期内每次故障维修的费用;

F ——设备全寿命周期内预期发生的故障维修总次数;

C_1 ——因预防性维修而使设备停用造成的单位时间损失;

C_q ——因故障维修而使设备停用造成的单位时间损失;

t_j ——第 j 次故障维修所花费的时间;

C_w ——因故障维修而拆卸故障部件造成的间接经济损失,最主要的包括拆卸费用。

其中, C_1 、 C_q 和 C_w 根据经验法取其理想情况,

假设每次造成的经济损失为一固定值。

$$R = \frac{C_z}{T_z} = \frac{\sum_{i=1}^N C_{ep}(\varphi, t_i, T_i) + C_{em}F + \sum_{i=1}^N C_{li}t_i}{\sum_{i=1}^N T_i + \mu(t)} + \frac{\sum_{i=1}^N C_{qt_j} + C_wF}{\sum_{i=1}^N T_i + \mu(t)} \quad (15)$$

混合式故障率需要考虑综合役龄递减因子 ω 和故障率递增因子 φ 两种因子,在每次预防维修后设备故障率减小到维修前的某一水平,然后以更快的速度增长^[6]。这两个参数取文献[6]所取数值。根据混合式故障率函数的递推关系,可以得第 i 次预防维修周期内的故障率 $\lambda_i(t)$ 为:

$$\lambda_i(t) = \varphi \lambda_{i-1}(t + \omega T_{i-1}) \quad (16)$$

其中, $i=1,2,\cdots,N; 0 < t < T_i$ 。
式中:
 $\lambda_i(t)$ ——第 i 次预防性维修周期内的故障率。

3 地铁车辆的多部件趋近机会维修策略

机会维修策略的特点是可以整合多个部件,对于具有相同维修间隔的两个或多个部件,进行整体维修。但是,这种维修策略必须建立在各部件维修时间已经确定的基础上^[7]。

本文的策略是在建立预防性维修周期的同时,考虑机会维修的策略,将机会维修的“被动性”转变为“主动性”。趋近机会维修策略具体流程如下:

步骤 1:计算不同 α 情况下各部件相关函数,改变剩余寿命可靠度约束的阈值 α ,可以得到不同 α 值的各部件预防性维修周期 $T_b(i)$ 、全寿命周期平均费用 $R_b(i)$ 和已运行时间 $T_{b,add}(i)$ 。其中:参数 b 表示相应的部件($b=1,2,\cdots,S$), S 表示设备的部件总数。

步骤 2:选取各部件的初始相关函数,根据专家系统法,得到部件 b 的初始 α 以及允许的阈值改变绝对值 $\Delta\alpha$ 。计算初始 α 情况下的 $T_b(i)$ 、 $R_b(i)$ 、 $T_{b,add}(i)$,所得结果分别作为最优维修周期 $T_{b,best}(i)$ 、最优全寿命周期平均费用 $R_{b,best}(i)$ 和每个部件的最优已运行时间 $T_{b,add_best}(i)$ 。

步骤 3:初始化 $m=1$, m 表示第 m 个方案($m=1,2,\cdots,S$),即趋近第 m 个部件维修周期时进行整体维修的情况。

步骤 4:初始化 $i=1$ 。

步骤 5:选择情况 m 下的最优相关参数,即 $T_{m,best}(i)$ 、 $R_{m,best}(i)$ 和 $T_{m,add_best}(i)$ 。

步骤 6:初始化 $z=\min(Z)$, Z 为不包含第 m 个部件的其他部件的集合(z 表示第 z 个部件的维修周期趋近部件 m 的维修周期,用来判断其余 $S-1$ 个部件是否趋近 m 情况)。

步骤 7:计算当前的维修周期,根据 $\Delta\alpha$ 计算 $T_{z,\alpha_{min}}(i)$ 和 $T_{z,\alpha_{max}}(i)$,计算 $T_{m,add_best}(i)$ 和 $T_{z,add}(i-1)$ 的差值得到 $T_{z,m}(i)$ 。其中, $T_{z,m}(i)$ 表示部件 z 在方案 m 的情况下第 i 次维修,判断 $T_{i,(z,m)}$ 是否位于 $T_{z,\alpha_{min}}(i)$ 和 $T_{z,\alpha_{max}}(i)$ 之间,如果满足要求,则 $T_{z,m}(i)$ 正确;否则判断 $T_{z,m}(i)$ 与 $T_{z,\alpha_{min}}(i)$ 和 $T_{z,\alpha_{max}}(i)$ 之间的欧几里得距离,选择欧几里德距离最小值。

步骤 8:判断 z 是否等于集合 Z 中最后一个部件。如果满足,进行下一步;否则, z 指向集合 Z 中的下一个部件,返回步骤 7。

步骤 9:判断 i 是否为最大维修次数。如果满足要求,则进行下一步;否则 $i=i+1$,执行步骤 5。

步骤 10:计算方案 m 下的 $R_{m,div}(i)$ ($R_{m,div}(i)$ 为将所有部件看作整体考虑时机会维修的平均费用)。

步骤 11:判断 m 是否满足全部情况。如果是,执行下一步;否则 $m=m+1$,执行步骤 4。

步骤 12:选择 $R_{m,div}(i)$ 的最小值为最优结果。

4 算例分析

4.1 设置车辆转向架的关键部件参数

以地铁车辆转向架的轴承、轮对、轴箱、减震装置、抗侧滚扭杆等 5 个关键部件^[8]为例,将部件分别编号为 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#],构成一个串联结构,各部件服从威布尔分布的具体参数如表 1 所示。本算例仅考虑理想情况,转向架各部件的故障率服从威布

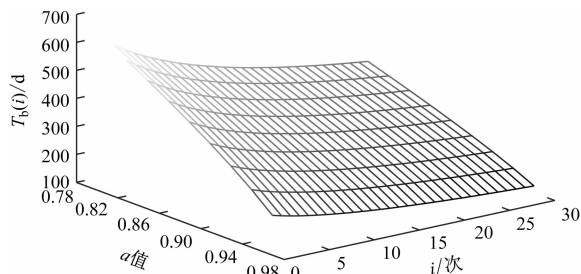
表 1 地铁车辆转向架各部件维修参数

部件编号	部件名称	形状参数 β	尺度参数 η
1 [#]	轴承	1.645 3	37 403.384
2 [#]	轮对	2.004 6	36 502.624
3 [#]	轴箱	1.456 3	38 706.667
4 [#]	减震装置	1.749 7	35 295.778
5 [#]	抗侧滚扭杆	1.297 7	39 378.669

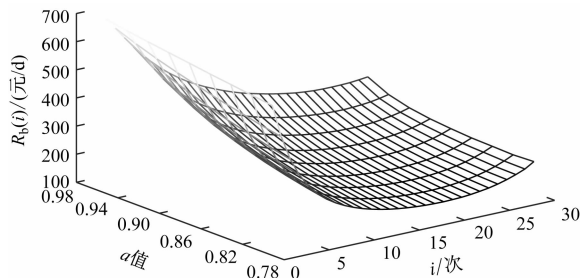
尔分布,且各部件均以全新的状态运行。部件的相关单位维修费用均采用平均值,设 C_{ep} 为 1 500 元/次、 C_{em} 为 2 000 元/次、 C_l 为 1 500 元/d、 C_q 为 750 元/d、 C_w 为 600 元/次。

4.2 确定各部件预防性维修周期的初始 α 值

采用剩余寿命可靠度方法,计算部件 b 的预防性维修周期 $T_b(i)$ 、全寿命周期平均维修费用 $R_b(i)$ 。以部件 1[#] 为例,其仿真结果如图 1 所示,图中 $T_b(i)$ 表示部件 1[#] 第 i 次的预防性维修周期, $R_b(i)$ 表示部件 1[#] 前 i 次的全寿命周期平均维修费用。



a) 预防性维修周期



b) 全寿命周期平均维修费用

图1 部件 1[#] 的仿真结果

从图 1 a) 可以看出,在 α 值固定的情况下,部件 1[#] 的预防性维修周期 $T_b(i)$ 随着维修次数 i 的增加而降低,并且 $T_b(i)$ 降低的速率也随着维修次数 i 的增加而降低;在 i 相同的情况下,部件 1[#] 的 $T_b(i)$ 随着 α 的增加而降低,降低的速率基本维持在某一固定值;从图 1 b) 可以看出,在 α 值固定的情况下,部件 1[#] 的全寿命周期平均维修费用 $R_b(i)$ 随着维修次数 i 的增加呈现先减少后增加的趋势, $R_b(i)$ 的最小值对应的维修次数即为部件 1[#] 的最佳维修次数 $N_{b,best}(i)$;在 α 值由小变大的过程中, i 相同的情况下 $R_b(i)$ 在逐渐增大,但是部件 1[#] 的最佳维修次数也在增加。

仿真发现,部件 2[#] ~ 5[#] 的特征与部件 1[#] 相似,这里就不再赘述。在部件 b 初始 α 值的选取上,本

文采用专家系统法,将 $R_b(i)$ 和 $N_{b,best}(i)$ 的权重各设为 0.5,从而得到的初始 α 值为 0.85。

4.3 转向架各部件趋近机会维修策略仿真

根据专家系统法,选取各部件允许的维修策略 α 值的变换范围。基于初始 α 值为 0.85,本文选择 α 值的范围为 $[0.83, 0.87]$ 。当初始 α 值为 0.85 时,转向架各部件的仿真结果如图 2 所示。

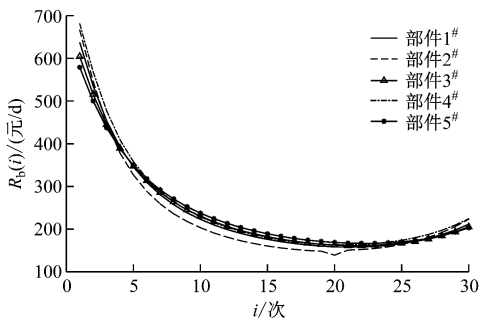


图2 各部件的全寿命周期平均维修费用($\alpha=0.85$ 时)

从图 2 可以看出,当 5 个部件互不相关时,其 $R_b(i)$ 可满足实际要求。而在实际维修过程中,通常把相关的部件看作一个整体,在计算多部件整体的全寿命周期平均费用 $R_{m,div}(i)$ 时,通常考虑机会维修策略。本文对该转向架采用趋近机会维修策略进行整体维修,将趋近第 m 个部件维修周期进行整体维修的情况,表示为第 m 个方案,看作情况 m ,例如情况 1 表示,部件 2[#]、部件 3[#]、部件 4[#]、部件 5[#] 趋向部件 1[#] 维修周期的情况,分别趋近于部件 1[#]、部件 2[#]、部件 3[#]、部件 4[#]、部件 5[#] 等 5 种情况的多部件整体全寿命周期平均维修费用 $R_{m,div}(i)$,如图 3 所示。

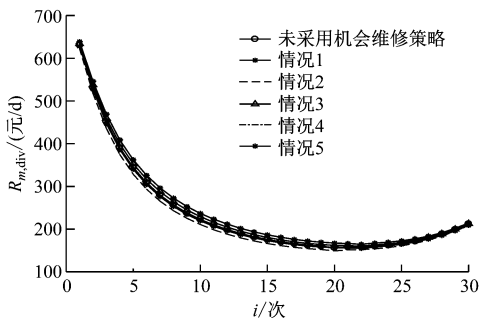


图3 不同情况的趋近机会维修策略的全寿命周期平均维修费用($\alpha=0.85$)

将每种情况得到的全寿命周期平均费用与不采用机会维修策略进行对比分析,计算出不同情况的优化结果如图 4 所示。

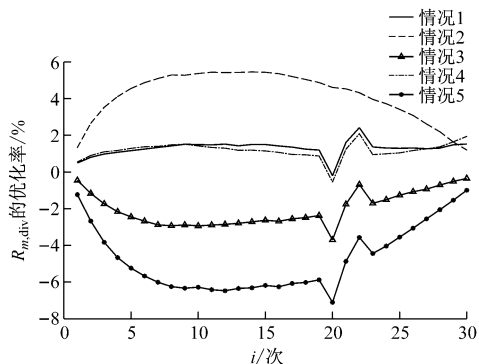


图4 全寿命周期平均维修费用的优化率结果

从图4可以看出:

1) 情况1和情况4相比于不采用机会维修策略的优化结果相似。当 N 达到22或23时,得到的最大优化率为2%左右。在设备整体的最佳维修次数 N_{best} 为20时,情况1和情况4基本没有优化;

2) 情况2所对应的 $R_{m,\text{div}}(i)$ 优化最大,其优化率随着维修次数呈现先增后减的趋势:在 N 达到15时,其优化率达到最高,约为5%;当 N_{best} 为20时,情况2的优化率在4%左右;

3) 情况3和5相比于不采用机会维修策略费用有所上升。当维修次数达到 N_{best} 为20时,情况5多消耗了约7%的费用的,情况3多消耗了约4%的费用。

通过上述结果可以看出,情况2的优化效果最好,在 N_{best} 为20时,优化率高达4%左右,即全寿命周期平均费用降低了约4%。因此,对地铁车辆的多部件采用趋近机会维修策略,可在保证其安全可靠性的基础上,减少全寿命周期平均费用,提高维修效率。

5 结语

在城市轨道交通车辆设备制定维修计划时,选择科学合理的维修策略可以帮助运营公司节约时间与成本。本文基于剩余寿命可靠度,建立了地铁车辆设备的预防性维修周期模型,并针对多部件维修提出了趋近机会维修策略。通过算例仿真可以看出,该预防性维修周期模型能得到合理的部件维修周期,选择合适的趋近情况可以降低多部件整体全寿命周期的单位时间维修费用,其费用优化率最高可达5%,从而验证了趋近机会维修策略的合理性和有效性。

参考文献

- [1] 于丹丹. 基于可靠性的城市轨道交通车辆架修模式优化及方法研究[D]. 南京:南京理工大学,2017.
- [2] LAGGOUNE R, CDATEAUNEUF A, AISSANI D. Opportunistic policy for optimal preventive maintenance of a multi-component system in continuous operating units[J]. Computers & Chemical Engineering, 2009, 33(9): 1499.
- [3] 谷玉波,贾云献,张英波. 基于Gamma退化过程的剩余寿命预测及维修决策优化模型研究[J]. 轴承, 2013(4): 44.
- [4] 孙超,徐永能. 城市轨道交通车辆走行部维修周期优化模型[J]. 城市轨道交通研究, 2015(1): 81.
- [5] 李进宁,王顺鹏,周鲁宁,等. 基于剩余寿命可靠度的地铁供电设备预防性维修研究[J]. 铁道标准设计, 2017(10): 149.
- [6] 李雨晗,李永华,宫琦. 基于可靠性的地铁车辆齿轮箱维修周期优化[J]. 大连交通大学学报, 2018(4): 37.
- [7] 狄鹏,黎放,杨元. 基于机会维修策略的预防性维修优化模型研究[J]. 工程设计学报, 2012(4): 263.
- [8] 贺德强,罗安,邓建新,等. 列车转向架关键部件预防性维修决策优化模型[J]. 计算机集成制造系统, 2018(5): 1155.

(收稿日期:2019-07-01)

广州铁路首次试用“健康防疫核验系统”

1月31日,铁路广州站、广州南站、广州东站“健康防疫核验系统”首次试用。该系统针对没有或不会使用智能手机、无法出示电子健康码的群体,通过出示居民身份证查询实时健康防疫状态,用于替代电子健康码(绿码)核验后进站。据了解,该系统具备4大亮点:无需手机扫码,只需刷身份证就能通行;通行效率从以前的“分钟级”压缩到“秒级”(仅需2s);人、证、码“三合一”查验,有效降低个人信息泄露风险;具有良好示范意义,未来可在全国推广,方便常态化疫情防控下的旅客出行。

“为更好服务旅客出行,减少‘亮码’时间,创造安全健康的出行环境,我们在广州站、广州南站、广州东站分别设立了‘无码进站’专用通道。”广铁集团客运部相关负责人表示,旅客可通过该通道快速进站候车,大大提高了进站速度。

(摘自2021年2月1日中国新闻网,记者郭军、李思琪、黎磊报道)