

动车组轴箱轴承在线监测可靠性评估模型研究<sup>\*</sup>高明亮 赵 明 高 珊<sup>\*\*</sup> 孙洪亮 于 闯 刘德权 石海明

(中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 针对进行状态监控的动车组轴箱轴承提出了一种在线评估可靠性的新方法: 动车组轴箱轴承系统以及部件的退化过程受具有时移的非线性维纳过程影响, 该过程作为协变量集成到比例风险模型中用以描述故障时间的危险率; 将退化路径和时间轴进行离散化, 通过转移概率矩阵获得可靠性量的闭式解; 与仅适用于少数退化状态的传统方法不同, 该方法只需对转移矩阵进行基本操作即可完成, 计算效率高, 适用于实时可靠性状态的计算。该方法可进行转向架轴箱轴承的在线可靠性评估、预测和健康管理, 以及剩余使用寿命预测等。

**关键词** 动车组; 轴箱轴承; 在线监测; 可靠性; 评估模型

**中图分类号** U266.2; U270.331<sup>\*2</sup>

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.02.006

## Online Reliability Evaluation Model of EMU Axle Box Bearing

GAO Mingliang, ZHAO Ming, GAO Shan, SUN

Hongliang, YU Chuang, LIU Dequan, SHI Haiming

**Abstract** A new method of online reliability assessment for EMU axle box bearing under condition monitoring is proposed.

Since the degradation process of the EMU axle box bearing and components is affected by the nonlinear Wiener process with time drift, it is integrated into the proportional hazard model as a covariate to describe the hazard rate of failure time. By way of discretizing the degradation path and the time axis, the closed-form approximation of the reliability value could be obtained through the transition probability matrix. Unlike the traditional method that is only suitable for a few degraded states, this method can be completed only by performing basic operations on the transition matrix with high computational efficiency, and therefore is suitable for real-time reliability state calculation. The method proposed in this paper can perform online reliability assessment, prediction, health management, and the remaining service life prediction of bogie axle box bearing.

**Key words** EMU; axle box bearing; online monitoring; re-

liability; evaluation model

**Author's address** National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

动车组轴箱轴承运行环境复杂, 其机理特征很难评价, 运营服务商对此类系统提出了高可靠性要求来避免灾难性意外故障的发生。过去几年来, 人们对动车组轴箱轴承的 PHM (故障预测与健康管理) 研究给予了极大的关注, PHM 为状态监控、健康评估和转向架的最佳控制提供了全面的解决方案<sup>[1]</sup>。通过实施 PHM 技术, 动车组轴箱轴承可避免即将发生的故障, 因此可显著提高其可用性和可靠性。文献[2-3]表明, PHM 的重要部分集中在可靠性评估上, 尤其是剩余使用寿命预测。由于测试仪器技术的进步, 相关系统的运行状态和环境的信息采集能力已大大增强。因此, 开发了一种简便的可靠性评估模型——PH (比例风险) 模型<sup>[4]</sup>来监控系统性能以及评估系统的健康状态。该模型采用信息伴随的寿命效应对可靠性进行评估, 是非常有前景的轴承可靠性预测方法。该模型已在各种关键工程系统的可靠性分析领域中被广泛使用, 例如飞机发动机、牵引车的传动、铁路货车轴承<sup>[5-7]</sup>等领域。

退化过程作为协变量在 PH 模型中起着至关重要的作用。通常将退化过程建模为随机过程, 例如: 维纳过程<sup>[8]</sup>, 伽玛过程<sup>[2]</sup>, 连续时间马尔可夫链<sup>[9]</sup>。其中, 维纳过程在处理时间上具有异常出色的能力, 目前已被广泛应用于退化过程的建模中。

此外, 评估方法旨在进行在线可靠性评估, 特别是对于转向架轴承, 实时计算能够有效提供健康状况评估支持和系统优化。综上, 本文提出了一种

<sup>\*</sup> 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题 (P2009J001)

<sup>\*\*</sup> 通信作者

以寿命因素和维纳退化作为协变量的转向架轴箱轴承在线状态监测的可靠性评估方法。

该评估方法重点体现在:

1) 将具有时移的非线性维纳退化过程作为协变量集成到 PH 模型中。

2) 采用提出的近似技术,可以从整个生命周期的角度得出所有相关的可靠性量转移概率矩阵。

## 1 动车组轴箱轴承在线监测可靠性评估方法

### 1.1 联合退化过程的技术研究

定义一个在线状态监控系统,采用 PH 模型评估其可靠性特征。其危害率函数取决于系统寿命和监视信息。

危险函数  $h(\cdot)$  可以表示为:

$$h(t, X(t)) = h_0(t) \psi(X(t); \gamma) \quad (1)$$

式中:

$h_0(t)$ ——基准风险方程;

$t$ ——监视时间;

$\gamma$ ——回归系数向量;

$\psi(\cdot)$ ——生存函数;

$X(t)$ ——协变量过程。

根据定义,在给定监视状态  $X(t)$  的情况下,监视时间  $t(t \in R_+)$  的条件危害率函数可以定义为:

$$h(t | X(t)) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} P(t < T_f \leq t + \Delta t | T_f > t, X(t)) / \Delta t \quad (2)$$

式中:

$T_f$ ——失效时间;

$P(\cdot)$ ——累计生存概率函数。

式(2)中,  $\{X(t), t \in R_+\}$  表示系统的退化过程。

由式(2)可以推导出条件可靠度函数  $R(\cdot)$ :

$$R(t | X(u), 0 \leq u \leq t) =$$

$$P(T_f > t | X(u), 0 \leq u \leq t) =$$

$$\exp\left(-\sum_0^t h(u | X(u)) du\right) \quad (3)$$

式中:

$u$ ——漂移参数。

从应用角度出发,维纳过程适合于退化建模,因为系统的退化程度可以看作是大量正态分布增量的总和。

因此,将退化过程  $X(t)$  建模为:

$$X(t) = X_0 + \sigma W(A(t)) + uA(t) \quad (4)$$

$$A(t) = t - t_0 \quad (5)$$

式中:

$t_0$ ——初始监视时间;

$X_0$ ——初始退化量;

$W(\cdot)$ ——标准布朗过程;

$\sigma$ ——标准偏差。

考虑到  $X(t)$  的时变和随机特征,计算式(3)的期望时难以通过积分实现可靠性的评估。因此,为了解决该问题,应引入一些变量的近似值。

### 1.2 状态和时间的近似计算

针对状态空间和时间提出了一种近似技术。

首先,将状态空间的长度以等间距  $d$  分割,将连续的退化路径划分为  $M$  个离散状态,在临界水平  $Y$  存在的情况下,合理选择其为  $d = 2Y / (2M - 3)$ 。通过这种近似,可以将连续退化过程表示为马尔可夫链。其状态空间  $\Omega$  由  $M$  个离散状态组成,其中  $S_0, S_1, \dots, S_{M-2}$  表示退化状态下的生存概率,  $S_{M-1}$  表示吸收状态下的生存概率。

图1显示了系统退化过程随时间变化的曲线。从图1可以看出,  $X(t)$  的范围为  $[id - d/2, id + d/2], i \in \Omega$ 。

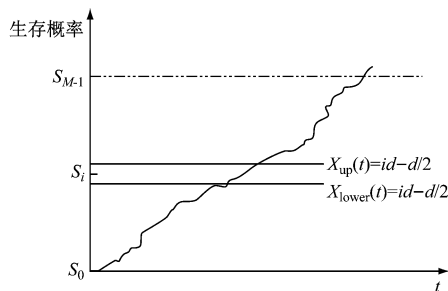


图1 退化过程的离散化曲线

Fig.1 Discretization curve of degraded process

结合  $T_f$  定义联合退化过程  $V(t) = (T_f > t, X(t)) > t$ 。则对于所有  $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < s < t$  ( $s$  表示大于  $t_1, t_2$  的任意值) 和  $i_1, i_2, \dots, i, j$ , 可得到:

$$P(T_f > t, X(t) = j | T_f > s, X(s) = i, X(t_2) = i_2, X(t_1) = i_1) = P(T_f > t, X(t) = j | T_f > s, X(s) = i) = \mathbf{A}_{i,j}(s, t) \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{A}_{i,j}(s, t)$  是联合分解过程  $V(t)$  的转移概率。该过程体现了退化系统的特征,并且随机行为可由转移概率矩阵  $\mathbf{A}_{ij}(s, t)$  描述。

对于等间距为  $\delta$  ( $\delta > 0$ ) 的区间,采用  $\delta$  来离散时间轴。

当退化系统运行时间的长度大于选定的寿命

期限时,认为该系统(尤其是关键系统)不适合继续操作。

假设当退化系统的执行时间大于整个生命周期  $T$  时,退化系统的  $R_{UL}$  (剩余使用寿命)为零,其中  $T = N\delta$ ,  $N$  为间隔数。

因此,考虑离散时间  $t_w = w\delta$ 。其中,  $w$  表示从开始到当前时刻  $t_w$  的步数,  $w = 0, 1, \dots$ 。

对于该时间的离散化,可以将  $V(t)$  转移到其离散时间对应项  $V(w\delta)$ , 由此转换概率可以写为:

$$A_{ij}(w_1\delta, w_2\delta) = P(T_f > w_2\delta, X(w_2\delta) = j | T_f > w_1\delta, X(w_1\delta) = i) \quad (7)$$

式(7)中,  $0 \leq w_1 < w_2 \leq N$ 。因此,考虑式(4)中维纳过程的性质,区间  $[w\delta, (w+1)\delta]$ , 即  $\Delta X(w\delta) = X((w+1)\delta) - X(w\delta)$  的正态分布为  $N(u(A((w+1)\delta) - A(w\delta)), \sigma^2(A((w+1)\delta) - A(w\delta)))$ 。

因此,退化过程从状态  $i$  到状态  $j$  的单步转移概率可以表示为:

$$P(X((w+1)\delta) = j | T_f > (w+1)\delta, X(w\delta) = i) = P(l_b < \Delta X(w\delta) \leq u_b) = \int_{l_b}^{u_b} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2(A((w+1)\delta) - A(w\delta))}} \exp\left(-\frac{(x - u(A((w+1)\delta) - A(w\delta)))^2}{2\sigma^2(A((w+1)\delta) - A(w\delta))}\right) dx, i \leq j \quad (8)$$

$l_b$  和  $u_b$  定义如下:

1) 当  $i, j \in [0, M-2]$  时,  $l_b = \max(0, (j-i)d - d/2)$ ,  $u_b = (j-i)d + d/2$ ;

2) 当  $i \in [0, M-2]$  时,  $M = M-1$ , 则  $l_b = (M-$

$$P = \begin{pmatrix} 0 & A(0) & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 1 - A(0)U_M \\ 0 & 0 & A(\delta) & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 1 - A(\delta)U_M \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & A(w\delta) & \cdots & 0 & 1 - A(w\delta)U_M \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & A((N-1)\delta) & 1 - A((N-1)\delta)U_M \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

式(11)的最后一列表示故障状态的转移概率。

由式(11)可见,矩阵的结构实质上可加速矩阵的运算,例如乘法和求逆等运算。

### 1.3 退化系统可靠性量的推导

式(11)中  $P$  的最后一列给出了该退化过程直接从状态  $i \in \{0, 1, \dots, M-1\}$  过渡到故障状态的可

能性。因此,  $P$  可划分为:

因  $M-1$  是吸收状态,故  $P(X((w+1)\delta) = M-1 | T_f > (w+1)\delta, X(w\delta) = M-1) = 1$ 。退化系统不是自恢复的,并且对  $\sigma$  和  $u$  的适当选择将导致自恢复的概率可以忽略。

与系统的整个生命周期相比,  $\delta$  是足够小的值。因此,在给定当前状态  $X(w\delta) = i$  的情况下,该系统在下一个长度为  $\delta$  的时间间隔中存活概率可以近似为:

$$P(T_f > (w+1)\delta | T_f > w\delta, X(w\delta) = i) = E\left[\exp\left(-\int_{w\delta}^{(w+1)\delta} h_0(t) \cdot \psi(X(t)) dt | X(w\delta) = i\right)\right] \approx \exp\left(-\int_{w\delta}^{(w+1)\delta} h_0(t) \cdot \psi(X_i) dt\right) \quad (9)$$

式(9)中,  $w \in [0, N-2]$ ,  $X_i$  表示退化水平的对应状态  $S_i$ 。

另外,假设系统的整个生命周期为  $N\delta$ , 这意味着在  $P(T_f > N\delta | T_f > (N-1)\delta, X((N-1)\delta) = i) = 0$  之后继续运行是不合适的。基于式(5)和式(6),联合失效时间过程  $V(w\delta)$  的单步转移概率矩阵的元素可以写成:

$$A_{i,j}(w\delta) = P(T_f > (w+1)\delta, X_{(w+1)\delta} = j | T_f > w\delta, X_{w\delta} = i) = P(X((w+1)\delta) = j | T_f > (w+1)\delta, X(w\delta) = i) \cdot P(T_f > (w+1)\delta | T_f > w\delta, X(w\delta) = i) \quad (10)$$

结合单步转移概率矩阵  $A(w\delta)$ , 可以将联合退化过程的整个生命周期跃迁概率矩阵组织为式(11)。其中,  $U_M$  是  $M$  个元素的单位向量,  $N$  是步骤数。

能性。因此,  $P$  可划分为:

$$P = \begin{bmatrix} B & P_F \\ 0^T & I \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中,  $B$  是  $MN \times MN$  矩阵;  $0$  是  $MN$  个元素的零向量;  $P_F = (I - B)U_{MN}$ ,  $I$  是单位矩阵,  $U_{MN}$  是  $MN$  个元素的单位向量。

应注意,  $B$  是次随机矩阵, 即存在  $i$  使得  $0 <$

$\sum_{j=1}^{M-1} A_{i,j}(w\delta) \leq 1$ , 且至少 1 个  $i$  使得  $0 < \sum_{j=1}^{M-1} A_{i,j}(w\delta) < 1$ . 当然,  $I - B$  总是可逆的. 由矩阵的乘法可以直接得出剩余寿命的概率  $P_r$ :

$$P_r = \begin{bmatrix} B & (I - B)U_{MN} \\ 0^T & I \end{bmatrix} \quad (13)$$

基于划分的整个生命周期转移概率矩阵  $P$ , 可以得出  $R_{UL}$  的概率.

## 2 结语

本文提出了一种用于动车组轴箱轴承的在线监测可靠性评估方法.

该方法采用具有时移的非线性维纳过程来表示退化, 然后将其作为协变量并入 PH 模型来描述转向架轴箱轴承故障时间的分布. 利用所提出的近似技术, 使用转移概率矩阵导出了相关可靠性量的封闭形式公式. 与传统方法相比, 这些可靠性量的计算可以通过较少的计算工作来完成, 并且能够获得实时可靠性评估.

## 参考文献

- [1] 张海涵. 航空电子系统预测与健康管理 (PHM) 设计研究[J]. 河南科技, 2020(8): 43.  
ZHANG Haihan. Avionics system prediction and health management (PHM) design and research[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2020(8): 43.
- [2] 徐扬. 电子产品 PHM 方法开发和验证实验平台研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.  
XU Yang. Research on the experimental platform to develop and verify electronic product PHM methods[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.

versity, 2013.

- [3] 宋磊. 军用电子设备预测与健康管理体系结构及关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.  
SONG Lei. Research on PHM architecture and key technology of military electronic equipment[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [4] 白宇晨. PHM 系统在空管电子设备中的应用研究[J]. 中国新通信, 2018(4): 104.  
BAI Yuchen. Research on the application of PHM system in air traffic control electronic equipment[J]. China New Telecommunications, 2018(4): 104.
- [5] 彭宇, 刘大同, 彭喜元. 故障预测与健康管理工作综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2010(1): 1.  
PENG Yu, LIU Datong, PENG Xiyuan. A review: prognostics and health management[J]. Journal of Electronic measurement and Instrument, 2010(1): 1.
- [6] 张栋善, 张涛. PHM 技术在综合航空转向架中的应用[J]. 电子测试, 2017(22): 117.  
ZHANG Dongshan, ZHANG Tao. Application of PHM technology in integrated avionics system[J]. Electronic Test, 2017(22): 117.
- [7] 李向前. 复杂装备故障预测与健康管理工作关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.  
LI Xiangqian. Research on key technology of fault prognostic and health management for complex equipment[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- [8] JIANG Y X, ZHAO X H. PNN and BP neural network fault diagnosis research on electronic accelerator pedal detection[J]. Recent Patents on Engineering, 2020, 14(2): 205.
- [9] 孙坤伦, 夏秀渝, 孙文慧. 基于听觉掩蔽效应的改进型维纳滤波算法[J]. 计算机与网络, 2020(13): 68.  
SUN Kunlun, XIA Xiuyu, SUN Wenhui. Improved Wiener filtering algorithm based on auditory masking effect[J]. Computer & Network, 2020(13): 68.

(收稿日期: 2021-08-25)

(上接第 21 页)

- [6] CENELEC. Railway applications—Wheelsets and bogies—Monobloc wheels—Technical approval procedure—Part 1: Forged and rolled wheels; EN 13979-1: 2003 + A2: 2011 [S]. Brussels; CENELEC, 2011.
- [7] 吴宁, 倪纯双, 刁晓明. 国家铁路产品质量监督检验中心检测报告: (2017)GTJ(JL)字第 W-0439 号[R]. 北京: 机车车辆检测

验站, 2017.

WU Ning, NI Chunshuang, DIAO Xiaoming. National railway product quality supervision and inspection center, test report: (2017)GTJ(JL), NO. W-0439[R]. Beijing: Locomotive & Car Branch, 2017.

(收稿日期: 2021-08-25)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: [tougao. umt1998. com](http://tougao. umt1998. com)