

机电设备预防性维修周期间隔优化研究

齐群, 熊律, 邱元钊, 肖赐麟, 杜铭涛

(广东交通职业技术学院 轨道交通学院, 广东 广州 510650)

摘要: 科学规划机电一体化设备预防性维修计划的关键, 在于确定其预防性维修时间间隔。本文通过引入役龄递减因子和故障率递增因子, 采用混合式故障率演化规则描述故障分布符合威布尔分布的机电一体化设备的故障率, 并分别计算得出了完美维修和非完美维修策略下机电一体化设备的预防性维修时间间隔表达式。最后, 通过算例分析验证了所提出方法的有效性, 并得出结论。

关键词: 机电一体化; 维修时间间隔; 混合式故障率; 威布尔分布

中图分类号: TH-39

文献标识码: A

Research on the Optimization of Preventive Maintenance Intervals for Mechatronics Equipment

QI Qun, XIONG Lyu, QIU Yuanzhao, XIAO Cilin, DU Mingtao

(School of Rail Traffic, Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou 510650, Guangdong, China)

Abstract: The key to scientifically planning the preventive maintenance plan for mechatronics equipment is determining its preventive maintenance interval. By introducing the service age reduction factor and failure rate increase factor, this paper adopts a hybrid failure rate evolution rule to describe the failure rate of mechatronics equipment with a failure distribution conforming to the Weibull distribution. It also calculates and obtains the expressions for the preventive maintenance time intervals of such equipment under perfect maintenance and imperfect maintenance strategies, respectively. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by example analysis, and conclusions are drawn.

Key words: mechatronics; maintenance interval; hybrid failure rate; Weibull distribution

机电一体化技术是将机械技术、电工电子技术、微电子技术、信息技术、传感器技术、接口技术、信号变换技术等多种技术有机结合, 并应用到实际中的综合技术。现代化的自动生产设备几乎都是机电一体化的设备, 其在现代生产制造体系中扮演着重要的角色。然而, 随着机电一体化设备服役时间的增长, 其可靠性逐渐降低、故障率逐渐升高, 这将严重影响生产进程。因此, 科学规划机电一体化设备的维修间隔具有较高研究价值, 相关学者已对此展开诸多探索。

周晓军^[1]通过引入设备衰退因子来描述设备的故障率演化过程, 并提出了一种顺序预防性维修策略^[2-3], 从而实现了对生产设备预防性维修时间间隔的科学规划。齐群^[4]等通过建立等周期预防性维修策略模型和基于可靠性的预防性维修策略模型, 依据部件故障对动车组运行安全性影响的大小差异, 采取不同维修策略模型对动车组部件的维修间隔进行决策, 进而提升了动车组多部件系统的维修经济性。侯大立等^[5]通过引入FMECA方法^[6-7], 对输气管网球阀设备的故障模

收稿日期: 2025-09-05

作者简介: 齐群, 副教授, 硕士, 研究方向为城市轨道交通机电技术

基金项目: 广东省哲学社会科学规划项目(编号: GD23XGL036); 广东省普通高校重点科研平台和项目(编号: 2024KCXTD084; 2024KTSCX382); 广东省科技创新战略专项资金项目(编号: pdjh2025bk335)

型进行科学分析,筛选出主要故障模式;随后对阀座进行可靠度建模,可靠度 $R=0.9$ 为约束条件,综合考量阀门阀座和密封面故障两种因素,采用模糊综合评价方法为阀座损坏和密封面失效分配权重,进而构建了阀门内漏故障的维修周期决策模型。最终,该模型将输气站球阀的检修周期由 365 天延长至 459 天,降低了输气站的维修成本。黄志宇等^[8]通过引入役龄回退因子^[9-10]和故障率递增因子^[11-12]对加氢站设备进行故障率演化建模,依据加氢站设备的重要程度,为加氢站多设备系统制定最优的预防性维修间隔。李冀晖等^[13]针对多设备串联系统,将能耗和环保成本纳入设备全寿命周期总成本模型,通过引入机会维修方法^[14-15],以机会维修阈值 ΔT 优化多设备串联系统内各设备的维修时间间隔,进而得到系统层的最优预防性维修间隔序列。

上述研究针对生产设备预防性维修时间/里程间隔分析,研究成果有效降低了生产设备的维修成本或提高了设备的可靠度水平。本文选取故障分布服从威布尔(Weibull)分布的机电一体化设备作为研究对象,采用混合式故障率演化模型描述其故障率演化规律,分别对完美维修策略与非完美维修策略下机电设备的维修间隔的优化进行了建模分析与计算,最后通过算例分析验证了所提模型的正确性。

1 常见故障分布及参数估计

常见的故障分布模型主要包括指数分布、Weibull 分布、正态分布,具体如下。

(1) 指数分布。指数分布的特点是故障率恒定且为常数,适用于产品工作时间内故障发生概率呈偶然性且趋近于某一稳定值的场景。指数分布模型及可靠性指标如下:

$$\begin{aligned} & \text{可靠度函数 } R(t): \\ R(t) &= e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, λ 表示故障率; t 表示时间变量。

$$\begin{aligned} & \text{累积分布函数 } F(t): \\ F(t) &= 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \text{故障率密度函数 } f(t): \\ f(t) &= -\frac{dR(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (3)$$

(2) Weibull 分布。Weibull 分布被称为“万能分布”,具有很强的适应性,它是可靠性分析中最常用的概率分布模型之一。

Weibull 分布模型及可靠性指标如下:

可靠度函数 $R(t)$:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m} \quad (4)$$

式中, m 表示形状参数; η 表示尺度参数。

累积分布函数 $F(t)$:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m} \quad (5)$$

故障率密度函数:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m} \quad (6)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \quad (7)$$

(3) 正态分布。正态分布是数理统计中最基本的概率分布。在可靠性分析中,通常被用于对产品的疲劳和磨损现象进行建模。正态分布模型及可靠性指标如下:

故障率密度函数 $f(t)$:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

式中, μ 、 σ^2 分别为分布的均值和方差。

累积分布函数 $F(t)$:

$$F(t) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \quad (9)$$

可靠度函数 $R(t)$:

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \quad (10)$$

式中, $\Phi(t)$ 是标准正态分布的累积分布函数。(注:当 $\mu=0$, $\sigma=1$ 时,正态分布称为标准正态分布。)

故障率函数 $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{1}{\sigma} \times \frac{\psi[(t-\mu)/\sigma]}{1 - \Phi[(t-\mu)/\sigma]} \quad (11)$$

式中, $\psi(t)$ 是标准正态分布的概率密度函数。

上述三类故障分布模型,只需知道其可靠度函数 $R(t)$ 、累积分布函数 $F(t)$ 、概率密度函数 $f(t)$ 和故障率函数 $\lambda(t)$ 中的任意一个,就可以唯一且完整地描述整个故障过程,进而确定不同的可靠性评价指标^[16]。

2 故障率分布与维修间隔的确定

2.1 设备故障率分布函数

混合式故障率演化模型表达式为:

$$\lambda_{i+1}(t) = b_i \lambda_i(t + a_i T_i) \quad (0 < t \leq T_{i+1}) \quad (12)$$

式中, i 表示第 i 个预防性维修周期; T_i 表示预防性维修时间间隔; a_i 为役龄递减因子; b_i 为

故障率递增因子。

式(12)在对设备进行故障率建模时并未考虑运行工况对其故障率演化的影响,故可通过引入设备运行工况因子 γ_i 进一步完善设备的故障率演化模型,如式(13)所示。由于设备实际运行过程中,高温、振动等工况通常会加速设备退化,因此,运行工况因子 $\gamma_i \geq 1$ 。

$$\lambda_{i+1}(t) = \gamma_i b_i \lambda_i(t + a_i T_i) \quad (0 < t \leq T_{i+1}) \quad (13)$$

设备在第 $i+1$ 个维修周期内的故障率函数可表示为:

$$\lambda_{i+1}(t) = \prod_{k=1}^i (\gamma_k b_k) \lambda_1(t + \sum_{k=1}^i a_k T_k) \quad (14)$$

由于机电一体化系统的故障率分布服从Weibull分布,因此,采用Weibull分布描述其故障率分布,其表达式为:

$$\lambda_i(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{m-1} \quad (15)$$

2.2 预防性维修间隔的确定

伴随着设备服役时间的增加,其故障率逐渐累积,可靠度逐渐降低,可靠度 R 与故障率 λ 之间的转换关系如下:

$$R = \exp \left[- \int_0^{T_{i+1}} \lambda_{i+1}(t) dt \right] \quad (16)$$

将式(14)和(15)代入式(16),并对式(16)两边取对数,则有:

$$\begin{aligned} \ln R &= - \int_0^{T_{i+1}} \lambda_{i+1}(t) dt \\ &= - \prod (\gamma_i b_i) \left(\frac{t + \sum a_i T_i}{\eta} \right)^m \Big|_0^{T_{i+1}} \quad (17) \end{aligned}$$

计算可得:

$$T_{i+1} = \left[\left(\sum a_i T_i \right)^m - \frac{\ln R}{\prod (\gamma_i b_i) \eta^m} \right]^{\frac{1}{m}} - \sum a_i T_i \quad (18)$$

由式(18)可知,在已知第 i 个预防性维修周期的役龄递减因子 a_i 、预防性维修时间间隔 T_i 、预防性维修可靠度阈值 R 、运行工况因子 γ_i 、故障率递增因子 b_i 、形状参数 m 和生命特征参数 η 的情况下,可求取第 $i+1$ 个周期的预防性维修时间间隔,这为机电一体化系统预防性维修计划计算提供了理论依据。

3 预防性维修策略

3.1 完美维修策略维修间隔的确定

完美维修即修复如新,其故障率演化如图1

所示(图中, λ^- 表示设备预防性维修前的故障率)。由图可知,完美维修策略下,设备第1、2和第 i 个预防性维修周期的故障率起点均为0,即每次完美维修后,设备的状态都将恢复到最新状态。

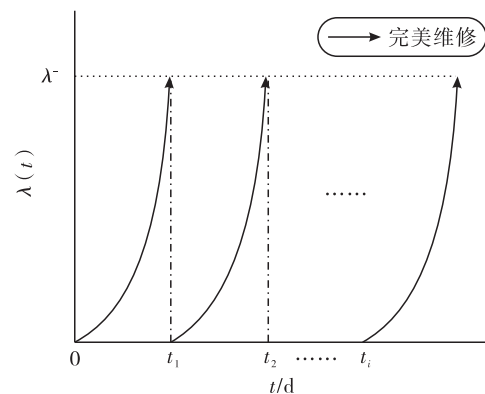


图1 完美维修故障率演化规则

完美维修策略下,设备的役龄递减因子 $a_i = 0$,故障率递增因子 $b_i = 1$,则式(18)可表达如下:

$$T_{i+1} = \left[\frac{\ln R}{\prod (\gamma_i)} \eta^m \right]^{\frac{1}{m}} \quad (19)$$

由式(19)可知,完美维修策略下设备的预防性维修间隔只与第 i 个预防性维修周期的预防性维修可靠度阈值 R 、运行工况因子 γ_i 、形状参数 m 和生命特征参数 η 有关,与役龄递减因子 a_i 、故障率递增因子 b_i 和预防性维修时间间隔 T_i 无关。

3.2 非完美维修策略维修间隔的确定

相较于完美维修,非完美维修认为随着设备服役时间的增长,其可靠度逐渐降低,即使采取维修措施后也无法使设备状态恢复到初始状态,非完美维修故障率演化规则如图2所示。依据非完美维修故障率演化规则,设备第1次非完美维修后的故障率低于第1次非完美维修前的故障率,有 $\lambda_1^+ < \lambda_1^-$,同理有 $\lambda_i^+ < \lambda_i^-$;第 $i+1$ 次非完美维修后的故障率高于第 i 次非完美维修后的故障率,有 $\lambda_i^+ < \lambda_{i+1}^+$,同理有 $\lambda_i^+ < \lambda_{i+1}^+$ 。其中, λ_i^+ 和 λ_i^- 分别表示设备第 i 次预防性维修前和第 i 次预防性维修后的故障率。

非完美维修策略下,设备的役龄递减因子 $a_i > 0$,故障率递增因子 $b_i > 1$,因此,非完美维修策略下,设备的预防性维修时间间隔求解公式见式(18)。

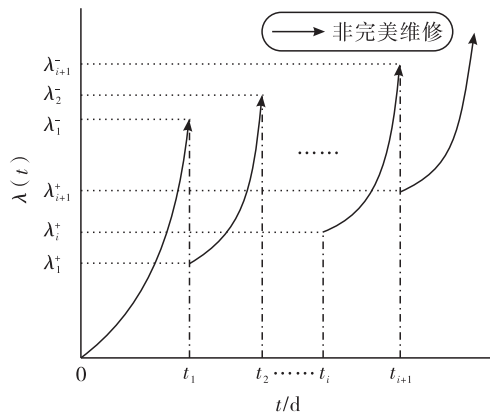


图2 非完美维修故障率演化规则

4 算例分析

周晓军等^[2]以机电设备为对象开展算例分析,且同样以 Weibull 分布描述机电设备的故障率分布规律,因此,本文算例分析的参数选取参考了其研究假设,具体取值如表1所示。

表1 参数取值

参数名称	完美维修取值	非完美维修取值
役龄递减因子 a_i	0	$i/3i + 7$
故障率递增因子 b_i	1	$12i + 1/11i + 1$
运行工况因子 γ_i	1	1
形状参数 m	3	3
生命特征参数 η	100	100

通过计算系统在完美维修和非完美维修策略下的预防性维修时间间隔,获得其在260天内的维修时间序列。选取预防性维修可靠度阈值 R 为 0.80、0.75、0.70、0.65 和 0.60 五种情形,该机电一体化系统的维修时间间隔计算结果如表2所示。

表2 算例结果

序号	R 值	完美维修时间序列/天	非完美维修时间序列/天
1	0.80	61-61-61-61	61-53-43-34-25-18-12-7-4-2
2	0.75	66-66-66-66	66-58-47-36-27-19
3	0.70	71-71-71	71-62-51-39-29
4	0.65	76-76-76	76-66-54-42
5	0.60	80-80-80	80-71-57-44

由表2可得出以下结论:

(1) 完美维修策略下,可靠度阈值 R 确定后,设备的维修时间间隔为恒定值。这是由于完美维修每次都能将设备状态修复如新,因此完美

维修不会影响设备下一周期的维修时间间隔。

(2) 非完美维修策略下,可靠度阈值 R 确定后,设备的维修时间间隔逐渐缩短。这是由于非完美维修策略下,设备的故障率会随服役时间的增长而逐渐积累,因此设备性能衰退得越来越快,故而需要更高频率的维修来维持设备具有足够的可靠性。

(3) 无论完美维修还是非完美维修策略,随着可靠度阈值 R 的降低,设备的维修频率逐渐降低。这是由于可靠度阈值 R 代表了对机电设备的可靠度要求水平,可靠度要求越低,对应的设备维修要求也随之降低。

5 结论

对于故障分布服从 Weibull 分布的机电一体化设备,当采用混合式故障率模型描述其故障率演化规则时,可得出如下结论:

(1) 完美维修策略下,其第 $i + 1$ 个预防性维修时间间隔 T_{i+1} 是关于预防性维修可靠度阈值 R 、运行工况因子 γ_i 、形状参数 m 和生命特征参数 η 的函数,与役龄递减因子 a_i 、故障率递增因子 b_i 、预防性维修时间间隔 T_i 无关。因此,完美维修策略下,设备各预防性维修周期的维修时间间隔为恒定值。

(2) 非完美维修策略下,其第 $i + 1$ 个预防性维修时间间隔 T_{i+1} 是关于役龄递减因子 a_i 、故障率递增因子 b_i 、预防性维修时间间隔 T_i 、预防性维修可靠度阈值 R 、运行工况因子 γ_i 、形状参数 m 和生命特征参数 η 的函数。因此,非完美维修策略下,设备各预防性维修周期的维修时间间隔逐渐缩短,即维修频率逐渐升高。

(3) 对于可靠度要求越高的机电一体化设备,其预防性维修措施执行得越频繁;反之,则越稀疏。

参考文献:

[1]周晓军. 生产系统智能维护决策及优化技术研究[D]. 上海:上海交通大学,2006.
 [2]周晓军,奚立峰,李杰. 一种基于可靠性的设备顺序预防性维护模型[J]. 上海交通大学学报,2005,39(12): 2044-2047.
 [3]ZHOU XIAOJUN, XI LIFENG, LI JIE. Reliability-centered predictive maintenance scheduling for acontinuously monitored system subject to degradation[J]. Reliability

- Engineering and System Safety, 2007, 92(4): 530-534.
- [4] 齐群, 熊律, 严世开, 等. 基于混合维修机制的动车组多设备系统维修策略优化[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(10): 200-206.
- [5] 侯大立, 赵淞, 成凡, 等. 输气管网设备维修策略优化方法研究[J]. 机械设计与制造, 2024(4): 81-89.
- [6] 陈磊, 温小明, 郭金妹, 等. 基于改进 FMECA 与维修性的数控机床可靠性分配方法[J]. 机床与液压, 2024, 52(11): 231-236.
- [7] 于涵, 张和生. 基于模糊综合评价的动车组牵引传动系统改进 FMECA [J]. 铁道学报, 2022, 44(9): 33-41.
- [8] 黄志宇, 袁卫华, 王海清, 等. 成组维修策略下加氢站预防性维修策略优化[J]. 太阳能学报, 2025, 46(5): 37-43.
- [9] 伊成山, 王红. 考虑 RAMS 的动车组部件预防性维修策略[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(2): 309-319.
- [10] 熊律, 齐彦昆, 宁善平, 等. 基于两级维修机制的动车组设备预防性维修优化策略[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(9): 119-124.
- [11] 黎家靖, 张宁. 基于环境影响的城轨设备预防性维修方法研究[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(11): 184-192.
- [12] 熊律, 王红. 风险视角下的动车组部件多级非完美维修策略[J]. 中国机械工程, 2021, 32(4): 399-406.
- [13] 李冀晖, 林志健, 梁丽莎, 等. 考虑节能减排的生产系统多级机会维修策略[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2024, 49(5): 214-224.
- [14] ZHENG X. All opportunity-triggered replacement policy for multiple-unit systems [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1995, 44(4): 648-652.
- [15] 王红, 熊律, 何勇, 等. 考虑故障风险的动车组部件机会维修优化策略[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 79-85.
- [16] 朱湘. 基于寿命周期费用和可靠性评估的动车组维修策略优化[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2023.

(上接第 47 页)

参考文献:

- [1] 王涛, 乔杨, 郭永兴, 等. 基于光纤光栅传感器的高支模安全监测[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2024, 56(2): 311-316.
- [2] 胡长明, 王娟, 梅源, 等. 扣件式钢管高大模板支架抗连续倒塌分析[J]. 建筑钢结构进展, 2019, 21(3): 50-55.
- [3] 李航宇, 龚杰, 陶玉菲, 等. 基于轻量化多目标视觉感知的高大模板系统位移监控[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(7): 69-79.
- [4] 张永春, 秘红丹, 师宝禄, 等. 高大模板支架施工技术关键问题分析及处理[J]. 铁道建筑, 2016(9): 54-56.
- [5] 聂荣, 赵灿. 高架支模施工技术在石化冷却塔中的应用[J]. 人民长江, 2021, 52(S2): 196-200.
- [6] 梅源, 胡长明, 周正永, 等. 高大模板支撑体系在结构施工期内所受荷载统计分析[J]. 工业建筑, 2010, 40(2): 42-46.
- [7] 江新, 简丽, 彭佳雨, 等. 基于 SNA-SD 的高支模施工安全风险演化规律研究[J]. 人民长江, 2025.
- [8] 魏欢, 张辉. 基于 BIM 技术的高支模安全风险管理研究[J]. 项目管理技术, 2024, 22(2): 105-110.
- [9] 陈斌, 汪京辉, 龙海涛. 基于 ABC 分类管理法的高支模体系施工风险分析与防控[J]. 建筑安全, 2022, 37(10): 53-56.
- [10] 高欣, 何舰, 兰春光, 等. 斜撑布设方案对高支模抗倒塌性能的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(6): 1657-1664.
- [11] 宋世军, 芦继忠, 牛山, 等. 高支模坍塌安全监测模型研究[J]. 中国工程机械学报, 2018, 16(5): 453-456, 461.
- [12] 邓聚龙. 灰色系统综述[J]. 世界科学, 1983(7): 1-5.
- [13] 方俊, 郭佩文, 朱科, 等. 基于结构方程模型-模糊认知图的矿山地铁隧道施工安全风险分析[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(7): 2191-2202.
- [14] 王连广, 姚博, 高海洋, 等. 基于云模型改进 AHP 的桥梁施工风险评估[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2025, 46(2): 118-125.