



华中科技大学学报(自然科学版)

Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)

ISSN 1671-4512,CN 42-1658/N

## 《华中科技大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目: 执行器隐含退化下系统寿命预测与延寿方法  
作者: 李炜, 王成文  
DOI: 10.13245/j.hust.201204  
收稿日期: 2020-01-09  
网络首发日期: 2020-10-10  
引用格式: 李炜, 王成文. 执行器隐含退化下系统寿命预测与延寿方法. 华中科技大学学报(自然科学版). <https://doi.org/10.13245/j.hust.201204>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13245/j.hust.201204

# 执行器隐含退化下系统寿命预测与延寿方法

李 炜 王成文

(兰州理工大学 a. 电气工程与信息工程学院; b. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室;  
c. 电气与控制工程国家级实验教学示范中心, 甘肃 兰州 730050)

**摘要** 针对执行器退化监测数据存在测量误差的闭环控制系统寿命预测与延寿控制问题, 首先, 以带测量误差的非线性Wiener模型描述了不确定测量值与执行器隐含退化状态之间的关系, 并基于卡尔曼滤波技术估计出实际退化状态; 其次, 通过定义因执行器隐含退化而驱使控制系统退化的三个阶段, 结合动态与稳态性能约束集确定系统退化失效阈值, 并据此及执行器退化状态的估计值得到了控制系统剩余寿命预测分布的解析解; 然后, 将执行器退化状态纳入LQR控制器设计中, 提出了基于执行器实时退化状态的自适应延寿控制策略, 通过折衷平衡系统性能与控制作用来延缓执行器的退化, 从而实现延长控制系统生命周期的目的; 最后, 通过双容水箱液位系统验证了所提出方法的有效性.

**关键词** 执行器; 延寿控制; 剩余寿命; 测量误差; 隐含退化状态

中图分类号 TP202; TP207

文献标志码 A

## Research on remaining useful life prediction and life extension of control system with implicit degradation of actuators

LI Wei WANG Chengwen

(a. College of Electrical and Information Engineering; b. Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes;  
c. National Demonstration Center for Experimental Electrical and Control Engineering Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract** Aimed at the problems of life prediction and extended life control of closed-loop control systems with measurement errors in actuator degradation monitoring data, firstly, the relationship between the uncertain measurement data and the implied degradation state of the actuator is described by the nonlinear Wiener model with measurement error, and the actual degradation state is estimated by Kalman filtering technique. Secondly, combined the dynamic and steady-state performance constraint sets, the system's degradation failure threshold is determined by the three degradation stages that drive the control system to be degraded due to the actuator's implicit degradation. Through the estimation of system degradation threshold and actuator degradation state, the analytical solution of residual life prediction distribution of control system is obtained. Then, the actuator degradation state was incorporated into the design of the LQR controller, and an adaptive life extension control strategy based on the real-time degradation state of the actuator was proposed. By the trade-offs between control system performance and control action to slow degradation the actuator, thus achieving the purpose of extending the life cycle of the control system. Finally, the validity of the method in the paper is verified by the double-tank water tank level system.

**Key words** actuator; life extension control; remaining useful life; measurement error; implied degradation state

收稿日期 2020-01-09.

作者简介 李 炜 (1963-), 女, 教授, E-mail: liwei@lut.cn.

基金项目 国家自然科学基金资助项目(61763027, 61364011).

受工作环境和长期运行等的影响, 控制系统元件尤其是执行器不可避免会发生腐蚀、磨损、冲击等退化问题, 这类元件的退化失效会对控制系统性能甚至是控制任务的完成造成严重影响<sup>[1]</sup>. 而缺乏针对性地实时维护给控制系统运行带来诸多安全隐患的同时, 也增加了不必要的维护成本<sup>[2]</sup>. 如若能在执行器退化之初预测控制系统剩余寿命, 并采用适当的控制策略, 通过延缓执行器的退化过程进而延长控制系统的寿命, 这对系统安全运行和维修维护更具有实际意义<sup>[3]</sup>. 因此, 近年来控制系统剩余寿命预测 (Residual Useful Life, RUL) 及延寿控制正逐渐成为预测与健康管理的 (Prognostics and Health Management, PHM) 领域热切关注的问题.

目前, 关于元部件退化的随机过程建模方法主要有基于 Gamma 过程、Markov 过程、逆高斯过程以及基于 Wiener 过程等方法<sup>[4]</sup>, 许多学者应用前述方法对不同类型的独立部件都进行退化建模和寿命预测的广泛研究, 并取得了丰硕的成果<sup>[5-7]</sup>. 但是将部件组合于系统中并进行退化建模和寿命预测方法的研究才刚刚起步. 执行器作为控制器与被控对象之间的物理连接存在于系统中, 这类关键部件的退化失效必然影响着控制系统的有效寿命或平均维护时间<sup>[8]</sup>, 因此人们首先关注了由其退化引起的系统退化问题. 在基于随机退化过程的系统寿命预测中, 确定控制系统不满足性能要求的退化阈值是进行寿命预测的关键. Aggab 等<sup>[9]</sup>认为执行器退化会影响控制系统某些参数的变化, 需根据历史数据估计系统状态和退化模型参数, 并依据系统性能指标确定退化阈值并得到其剩余寿命. Shi 等<sup>[10]</sup>将执行器退化建模为退化速率与控制负载相关的随机过程, 利用粒子滤波算法进行系统和退化状态的联合估计, 在确定合理失效阈值后推导得出控制系统寿命分布. 但上述研究在确定退化阈值时, 或对性能指标的描述不尽清晰, 或仅考虑了稳态误差, 在探究退化对系统其它性能指标的影响方面尚有不足.

随着传感器技术的快速发展, 许多设备的退化数据可以测量获取<sup>[11]</sup>. 但由于测量过程受噪声干扰、记录失误、测量设备精度等因素影响, 执行器等部件退化过程的监测数据与实际退化量间存在偏差, 直接应用该监测数据预测得到的系统寿命必然存在较大的误差, 进而应用于控制系统健康管理时就会对维护决策产生一定负面影响<sup>[12]</sup>. 虽然现阶段的研究已对单个部件的退化数据存在测量误差的寿命预测进行了探讨, 如 Shen 等<sup>[13]</sup>在测量误差下推导了

Wiener 过程的寿命分布解析解, 得到更为普遍测量误差情形下的寿命预测结果; Wan 等<sup>[14]</sup>提出了存在测量误差的随机过程的自适应寿命预测方法, 得到的寿命预测值相对误差较小. 但当将退化的元部件置入系统且退化数据存在测量误差时, 如何更为准确估计其退化状态并对控制系统寿命进行预测, 同时据此制定合理维护策略, 这些不仅是控制系统的健康维护面临的新问题, 也是延长系统运行时间的关键所在.

为能在部件退化或早期故障情形下尽可能延长系统寿命、增加其可靠工作时间. 上世纪 90 年代, NASA 路易斯研究中心首先提出了延寿控制 (Life Extending Control, LEC) 的概念<sup>[15]</sup>. 传统控制系统的执行器维护过程是被动的, 即在执行器故障下系统性能不能满足时, 或者达到预定维护时间时才采取相应维护措施; 而延寿控制则是一种主动管理执行器的方法, 是在执行器出现退化或微小故障时, 通过改变控制作用或者控制器结构、参数来自主延长系统的工作时间, 提高设备的可用性. Li 等<sup>[16]</sup>针对锅炉系统设计了方差约束模型预测控制器, 通过约束温度的变化达到延长锅炉系统运行寿命的目的, 但所建立的热力学退化模型与实际不尽一致. Langeron 等<sup>[17]</sup>通过调节 LQR 控制器参数来减小控制作用, 进而缓解执行器压力达到延寿的目的, 但在退化建模过程中未考虑测量误差的影响, 也未考虑控制参数的调整与退化程度的关联性.

鉴于此, 本文首先将执行器可测量的退化过程建模为一类具有测量误差的非线性 Wiener 隐含退化过程, 并借助于 Kalman 滤波技术估计执行器的实际退化状态; 其次, 同时考虑系统稳态和动态性能约束, 将系统不满足两方面性能指标时执行器退化阈值确定为控制系统退化阈值, 并依据其概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) 预测控制系统寿命; 在此基础上, 基于执行器实时退化状态的自适应延寿控制策略 (Adaptive Extending Life Control Strategy based on On-Line Degradation State of Actuator, AELCS-ODSA), 根据执行器退化程度在线调整 LQR 控制参数, 通过折衷平衡系统性能与控制作用来保证执行器的健康水平, 延长系统运行时间, 以期在执行器的全生命周期内, 为控制系统提供主动的维护延寿保障.

# 1 问题描述

## 1.1 执行器退化下反馈控制系统描述

由于控制系统中执行器的工作环境、类型等因素的不同,且不同执行器的退化过程存在较大差异,导致多个执行器退化对系统寿命的影响较为复杂.因此,本文仅以单一执行器退化下的线性系统为研究对象,其状态方程可描述为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B(I - C_a(t))u(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned}$$

式中:  $x(t) \in R^n$  为  $n$  维状态向量,  $u(t) \in R^r$  为控制输入,  $y(t) \in R^m$  为系统输出,  $A, B, C$  表示适当维数的系统状态矩阵、控制矩阵和输出矩阵. 执行器能否实现控制作用  $u(t)$  取决于其健康水平. 当设计的控制器适当且执行器健康时, 控制作用能在其饱和和约束下正常实现, 控制系统可以稳定安全运行; 但由于执行器退化量逐渐累积, 完成控制作用  $u(t)$  的能力会逐渐减弱, 用数学关系可以表示为  $(I - C_a(t))$ , 其中  $C_a(t) = \{diag(0, \dots, c_i(t), \dots, 0)\}_{r \times r}$  为执行器效能损失矩阵,  $c_i(t) = K_a(t)/K_a(t_0)$  表示  $t$  时刻第  $i$  个执行器的执行能力  $K_a(t)$  与初始执行能力  $K_a(t_0)$  之比.

考虑全生命周期内执行器退化过程对系统性能的影响, 同时为更清晰描述执行器执行能力与系统性能之间的关系, 这里将退化过程描述为图 1 所示的三个阶段, 其中  $L_n$  表示系统性能正常时的执行器执行能力阈值,  $L_{sf}$  表示执行器退化至系统失效时的阈值,  $L_{af}$  表示执行器失效阈值, 显然  $L_{sf} < L_{af}$ .  $s$  表示系统效率的最小值,  $a$  表示执行器效率的最小值.

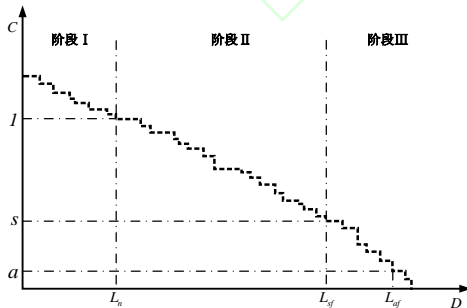


图 1 执行器退化阶段示意图

阶段 I: 控制系统设计之初执行器留有裕量, 此阶段执行器发生退化时, 可保证系统不受退化影响, 退化量  $D(t) \leq L_n$  且  $c_i(t) = 1$ ;

阶段 II: 由于执行器磨损疲劳等退化的发生,

系统性能也随之无法达到所要求的性能指标, 此阶段  $L_n < D(t) \leq L_{sf}$ ,  $c_i(t) = 1 - b_i$ ,  $b_i \in (s, 1]$   $b_i \in (s, 1]$ ;

阶段 III: 因执行器持续退化使系统性能处于不可接受的范围内, 此阶段  $L_{sf} < D(t) \leq L_{af}$ ,  $c_i(t) = 1 - a$ , 执行器只能以最小执行能力使系统运行.

在现代控制理论中, LQR 因反馈控制律简单、控制过程易于实现的特点, 已在控制工程中获得了广泛应用<sup>[18]</sup>, 也因其可通过调整  $Q$  与  $R$  矩阵折衷平衡系统性能与控制作用, 本文将其选为系统控制器. LQR 要求确定最优的控制作用  $u(t)$ , 在区间  $[t_0, t_h]$  使以下二次型性能指标极小:

$$J = \int_{t_0}^{t_h} [y(t) - r(t)]^T Q [y(t) - r(t)] + u(t)^T R u(t) dt$$

其中,  $Q$  和  $R$  分别表示状态量权重和控制量权重,  $y(t)$  为实际输出,  $r(t)$  为设定参考点. 根据 LQR 控制理论<sup>[19]</sup>, 系统控制作用  $u(t)$  可表示为:

$$u(t) = -Kx(t) + [C(B_l K - A)^{-1} B_l]^{-1} r(t)$$

其中  $K$  表示使性能指标最小的增益矩阵,  $B_l = B(I - C_a(t))$  为执行器退化下的控制矩阵.

控制系统的性能以其时间响应来衡量, 包括动态性能指标和稳态性能指标. 在执行器连续缓慢退化的过程中执行能力会逐渐减弱, 初期由于执行器裕量, 系统性能可以达到期望水平; 但随着退化逐渐累积, 当执行器退化到某一阈值时, 系统的动态、静态性能均会迅速恶化而无法达到期望值, 此时控制系统发生失效. 为更加全面地判断控制系统是否失效并依此确定系统退化阈值, 文中采用稳态误差  $e_{ss}$  和调节时间  $t_s$ 、超调量  $\sigma\%$  等动态性能指标同时作为系统失效的评价准则, 分别为:

$$\begin{aligned} e_{ss} &= r - y_{\infty} \\ t_s &= \inf \left\{ t : \frac{|y(t) - y_{\infty}|}{y_{\infty}} < 0.05 \right\} \\ \sigma\% &= \frac{(y_{max} - y_{\infty})}{y_{\infty}} \times 100\% \end{aligned}$$

## 1.2 执行器退化过程描述

执行器通常由阀门、电机等物理设备组成, 其性能参数在长期运行和工作环境影响下会发生缓慢退化, 因此, 可以利用连续的随机过程对执行器退化进行建模. 因 Wiener 过程的首达时间分布具有解析解形式的良好数学特性, 便于对产品寿命和可靠



度进行分析计算、适合建模具有线性趋势的非单调退化过程等优势,成为目前退化过程建模中应用最广泛的一类模型<sup>[12]</sup>.而且对于测量数据存在误差的情况,可以借助 Wiener 过程构建退化测量值与隐含退化状态的关系,进而建立状态空间模型,采用各类滤波技术进行处理,为控制系统的寿命预测、视情维护决策以及延寿控制提供可靠的依据和实现途径<sup>[20]</sup>.

考虑一类非线性随机过程  $\{D(t), t \geq 0\}$  来描述执行器的随机退化过程.用  $D(t)$  表示  $t$  时刻的退化量,则有以下数学描述<sup>[12]</sup>

$$D(t)=D(0)+\int_0^t \mu(\tau; \theta) d\tau + \sigma_B B_M(t)$$

式中:  $\{B_M(t), t \geq 0\}$  表示标准布朗运动,  $\mu(\tau; \theta)$  和  $\sigma_B$  分别表示退化过程的漂移系数和扩散系数,在描述金属疲劳和机械设备磨损退化方面  $\mu(\tau; \theta)$  的两种典型形式:幂函数形式和指数函数形式应用最为广泛<sup>[12]</sup>,本文采用幂函数形式  $\mu(\tau; \theta)=\alpha\beta t^{\beta-1}$  表征模型的非线性特性.假设退化的首达阈值为  $l_{af}$ ,则其对应的寿命分布为

$$f_T(t|\theta) \approx \frac{l_{af} - \alpha t^\beta (1 - \beta)}{\sigma_B \sqrt{2\pi t^3}} \exp\left\{-\frac{(l_{af} - \alpha t^\beta)^2}{2\sigma_B^2 t}\right\}$$

测量误差在实际测量过程中是不可避免的,用退化过程的监测数据也就难以真实完整地反映执行器退化过程.因此,在控制系统寿命预测中,需首先考虑存在测量误差时,如何更为准确估计真实退化状态.定义测量过程  $\{\tilde{D}(t), t \geq 0\}$  来描述  $t$  时刻不确定测量值与执行器隐含退化之间的关系,其测量方程数学表达为<sup>[4]</sup>

$$\begin{aligned} \tilde{D}(t) &= D(t) + \varepsilon \\ &= D(0) + \int_0^t \mu(\tau; \theta) d\tau + \sigma_B B_M(t) + \varepsilon \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $\varepsilon \sim N(0, \gamma^2)$  为随机测量误差,且假设任意时刻  $t$  的  $\varepsilon$  是独立同分布的,同时与  $B_M(t)$  相互独立.

考虑执行器开始运行到当前时刻  $0=t_0 < t_1 < \dots < t_k$  上退化监测的数据为  $\tilde{D}_{1:k}=(\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \dots, \tilde{d}_k)$ ,其中  $\tilde{d}_k=\tilde{D}(t_k), k=1, 2, \dots$  表示当前时刻  $t_k$  得到的测量数据,则基于  $\tilde{D}_{1:k}$  估计执行器的隐含实际退化状态  $d_k$  可以通过以下状态空间模型来表示<sup>[21]</sup>:

$$\begin{cases} d_k = d_{k-1} + h(t_k, \theta) - h(t_{k-1}, \theta) + v_k \\ \tilde{d}_k = d_k + \varepsilon_k \end{cases}$$

式中:  $h(t_k, \theta) = \int_0^{t_k} \alpha\beta\tau^{\beta-1} d\tau$ ;  $\varepsilon_k$  为  $\varepsilon$  在  $t_k$  时刻的具体形式,  $v_k = \sigma[B_M(t_k) - B_M(t_{k-1})]$  且与  $\varepsilon_k$  是独立同分布的随机噪声序列,进一步有  $v_k \sim N(0, \sigma^2(t_k - t_{k-1}))$ ,  $\varepsilon_k \sim N(0, \gamma^2)$ .

虽然该退化模型对时间呈非线性特性,但对状态是线性的,因此利用 Kalman 滤波技术进行退化状态估计是不二的选择.在当前时刻  $t_k$  下基于 Kalman 滤波的退化状态估计过程可归结为式(2)和式(3),其中

状态估计

$$\begin{aligned} \hat{d}_{k|k-1} &= \hat{d}_{k-1|k-1} + h(t_k, \theta) - h(t_{k-1}, \theta) \\ \hat{d}_{k|k} &= \hat{d}_{k|k-1} + K(k)(\tilde{d}_k - \hat{d}_{k|k-1}) \\ K(k) &= P_{k|k-1} (P_{k|k-1} + \gamma^2)^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

方差更新

$$\begin{aligned} P_{k|k-1} &= P_{k-1|k-1} + \sigma_B^2(t_k - t_{k-1}) \\ P_{k|k} &= (1 - K(k))P_{k|k-1} \end{aligned} \quad (3)$$

在对存在测量误差的执行器退化过程进行状态估计的基础上,可得剩余寿命分布的以下推论.

**推论<sup>[4]</sup>** 对于随机退化过程  $\{D(t), t \geq 0\}$ , 考虑幂函数形式  $\mu(\tau; \theta)=\alpha\beta t^{\beta-1}$ , 设  $t_k$  为剩余寿命时间,在给定  $\tilde{D}_{1:k}$  时的剩余寿命 PDF 为

$$\begin{aligned} f_{t_k|D_{1:k}}(t_k|\tilde{D}_{1:k}) &\approx \frac{1}{\sqrt{2\pi t_k^2 (P_{k|k} + \sigma_B^2 t_k)}} \\ &\exp\left\{-\frac{(l_{af} - \hat{d}_{k|k} - \alpha v(t_k; \theta))^2}{2(P_{k|k} + \sigma_B^2 t_k)}\right\} \times \\ &[l_{af} - \alpha v(t_k; \theta) + \alpha\beta t_k (t_k + t_k)^{\beta-1} \\ &\quad - \frac{P_{k|k} (l_{af} - \alpha v(t_k; \theta)) + \hat{d}_{k|k} \sigma_B^2 t_k}{P_{k|k} + \sigma_B^2 t_k}] \end{aligned} \quad (4)$$

若假设执行器初始执行能力为  $K_{a0}$ ,  $k$  时刻的退化量为  $\hat{d}_{k|k}$ , 则该时刻执行器的执行能力可表示为

$$K_a(k) = K_{a0} - \hat{d}_{k|k}$$

## 2 系统剩余寿命预测与延寿控制策略

### 2.1 控制系统剩余寿命预测

执行器寿命与控制系统寿命既有区别又有联系. 执行器寿命是指执行器从起初的健康状态运行到退化失效不能工作时的整个生命周期; 而仅考虑执行器退化下的控制系统寿命是指当执行器退化到某一阈值, 系统无法完成期望的控制任务时的寿命<sup>[22]</sup>. 因此, 在进行控制系统寿命预测之前, 首先应该确定不满足性能指标的控制系统退化阈值, 而后依此进行寿命预测和延寿控制研究.

值得注意的是, 在确定控制系统退化阈值的过程中, 本文除了考虑稳态误差的变化外, 还同时兼顾了动态性能, 较文献<sup>[11,22]</sup>仅考虑以稳态误差作为判断系统是否失效的唯一性能指标而言, 对系统性能的评判更为全面. 这里限定当控制系统性能超过性能指标约束集 $[e_{ss}^{max}, t_s^{max}, \sigma^{max}\%]$ 时对应的退化量 $l_{sf}$ 为系统的退化阈值, 由于 $l_{sf} < l_{cf}$ , 故可将控制系统寿命定义为

$$T_f = \inf \{ t: D(t) > l_{sf} / D(0) < l_{sf} \} \quad (5)$$

式中:  $\inf$  为下确界算子;  $l_{sf}$  为控制系统失效阈值, 则系统剩余寿命表示为

$$RUL(t) = \inf \{ T_f > t, D(t) > l_{sf} \} - t \quad (6)$$

根据 1.2 节得到的剩余寿命概率密度函数式(4)与已确定的系统退化阈值, 控制系统的剩余寿命 PDF 可表示为

$$f_{t_k/y_{1:k}}(t_k / \tilde{D}_{1:k}) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi t_k^2 (P_{k|k} + \sigma_B^2 t_k)}} \exp \left\{ -\frac{(l_{sf} - \hat{d}_{k|k} - \alpha v(t_k; \theta))^2}{2(P_{k|k} + \sigma_B^2 t_k)} \right\} \times [l_{sf} - \alpha v(t_k; \theta) + \alpha \beta t_k (t_k + t_k)^{\beta-1} - \frac{P_{k|k} (l_{sf} - \alpha v(t_k; \theta)) + \hat{d}_{k|k} \sigma_B^2 t_k}{P_{k|k} + \sigma_B^2 t_k}] \quad (7)$$

式中  $v(t_k; \theta) = (t_k + t_k)^\beta - t_k^\beta$ .

综合(5)~(7)式可得闭环控制系统剩余寿命的预测信息, 这为以延寿控制为主的在线视情维护奠定了基础.

### 2.2 基于执行器实时退化状态的自适应延寿策略

控制系统的健康管理除了预测控制系统寿命信

息并提供被动的维护建议和决策之外, 还应当包含通过改变控制器结构、参数或控制约束等使控制系统延寿的主动维护方式. 系统的在线延寿策略本质上就是一种特殊的视情维护, 其关键是在执行器退化过程中, 且在控制系统性能超过其相应的失效阈值之前, 通过调整控制作用来延长系统寿命<sup>[23]</sup>. 以较少的维修投入提高系统的安全可靠性和可维护性, 实现其自主维护下的安全运行.

然而, 如何基于执行器退化中系统的预测寿命调整控制作用呢? 从前述线性二次型调节器(LQR)性能函数可以看出, 矩阵 $Q$ 强调系统状态与性能指标之间的关联, 而矩阵 $R$ 关注控制输入与性能指标的关联. 矩阵 $Q$ 特定元素值减小而矩阵 $R$ 特定元素值增大可使控制输入减小, 在一定程度上牺牲系统性能来缓解执行器的执行压力, 进而达到延缓执行器退化并延长系统寿命的目的. 文献<sup>[17]</sup>正是基于此对 $Q$ 和 $R$ 的特定元素值进行相应调节, 达到了缓解执行器压力的目的. 但对 $Q$ 和 $R$ 矩阵元素值调节采用与执行器退化量无关的固定值, 这种方式未考虑控制输入 $u(t)$ 与执行器能力损失度量 $c_i(t)$ 之间的关联, 也即未考虑执行器实际退化量对 $u(t)$ 的有效实现能力. 因此这种延寿策略的适应性势必难尽人意. 笔者以为, 实际调节过程应该将 $Q$ 和 $R$ 元素值的调节与执行器退化量相结合: 当某一时刻退化值较大时, 反馈控制系统会增大控制作用 $u(t)$ 以保证系统性能, 为缓解执行器的执行压力, 需将 $Q$ 和 $R$ 元素值的调节量增大; 反之, 当执行器退化值较小时, 为尽可能保证控制系统的性能水平, 将 $Q$ 和 $R$ 元素值调节量减小. 据此提出基于执行器实时退化状态的自适应延寿策略AELCS-ODSA.

在此延寿策略下, 首先需建立 $Q$ 和 $R$ 矩阵的特定元素值调节与退化之间如下函数关系

$$\begin{aligned} Q_{ii}(k) &= Q_{ii}(k-1) - \eta_1 * \varphi(k) * Q_{ii}(0) \\ R_{ii}(k) &= R_{ii}(k-1) + \eta_2 * \varphi(k) * R_{ii}(0) \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $\eta_1 > 0$ ,  $\eta_2 > 0$ 为调节系数,  $Q_{ii}(0)$ 和 $R_{ii}(0)$ 分别表示 $Q$ 和 $R$ 矩阵待调节元素的初始值,  $\varphi(k) = \exp(-(1 - c_i(k)))$ 是与执行器退化相关的调节量. 建立的上述函数关系将退化值与控制器参数调节联系起来, 从而可使延寿策略对退化有更好的适应度.

其次, 为保证 $Q(k)$ 在调节过程始终满足半正定的条件, 引入如下约束条件:

$$Q_{ii}(k-1) > \eta_1 * \varphi(k) * Q_{ii}(0) \quad (9)$$

$$Q_{ii}(0) * \sum_{k=1}^M (\eta_1 * \varphi(k)) \leq Q_{ii}(0) \quad (10)$$

其中, 式(9)表示在调节时刻  $k$ ,  $Q$  矩阵元素  $Q_{ii}(k)$  当前时刻的调节量总是小于上一调节时刻  $Q_{ii}(k-1)$  值, 这样即可保证每一调节时刻的  $Q(k)$  矩阵为半正定; 式(10)表达在执行器退化的全生命周期内, 矩阵  $Q$  元素  $Q_{ii}$  调节量的总和不超过其初始值

$Q_{ii}(0)$ , 也即其终值  $Q_{ii}(M) \geq 0$ ,  $M$  为执行器退化直至执行能力为 0 时的退化采样点个数。

此外, 当因执行器退化使系统已无法按期望目标完成任务时, 为保证控制系统能够延长安全工作时段, 可以通过降低系统性能指标来达到延长控制系统寿命的目的, 延寿控制下反馈控制系统结构如图 2 所示. 针对前述执行器退化导致系统退化的三个不同阶段, 控制系统的延寿策略亦分为三个阶段:

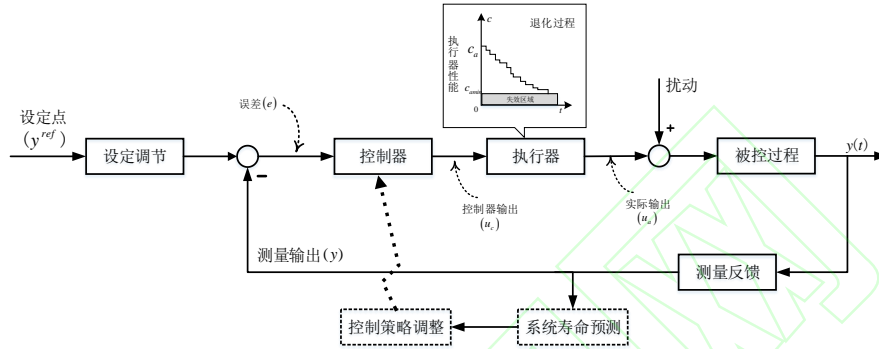


图 2 反馈控制系统延寿策略框图

阶段 I: 此阶段  $D(t) \leq L_n$ , 执行器健康水平良好, 可保证系统性能为期望值  $e_{ss}^*, t_s^*, \sigma^%$ ,  $Q$  和  $R$  分别为  $Q_0$  和  $R_0$ ;

阶段 II:  $D(t) \in (L_n, L_{sf}]$ , 反馈控制系统性能指标  $e_{ss} \in [e_{ss}^*, e_{ss}^{max}]$ ,  $t_s \in [t_s^*, t_s^{max}]$ ,  $\sigma\% \in [\sigma^%, \sigma^{max}\%]$ , 执行器退化明显. 需通过 AELCS-ODSA 策略延缓执行器退化,  $Q$  和  $R$  调整依式(8)进行;

阶段 III:  $D(t) \in (L_{sf}, L_{cf}]$ , 执行器退化超过系统退化阈值  $l_{sf}$ , 控制系统性能指标  $e_{ss} > e_{ss}^{max}$ ,  $t_s > t_s^{max}$ ,  $\sigma\% > \sigma^{max}\%$ , 为确保系统能够安全运行, 需降低系统控制目标; 具体的算法流程如图 3 所示.

### 3 仿真实验与结果分析

#### 3.1 实验设计

本文通过研究双容水箱控制系统的水泵退化过程来验证文中方法的有效性, 其示意图如图 4 所示. 设水箱 1 的横截面积为  $S_1$ , 水箱 2 的横截面积为  $S_2$ , 入口流量为  $q_1$ , 与水泵的控制输入  $u_c$  之间的关系为  $q_1 = K_a u_c$ , 其中  $K_a$  表示水泵的执行能力, 出口流量为  $q_3$ .  $h_1$  和  $h_2$  分别表示水箱 1 和水箱 2 的液位高度, 阀门 2 和阀门 3 的液阻分别为  $\tilde{R}_2$  和  $\tilde{R}_3$ . 根据物料动态平衡关系建模并进行近似处理, 在不考虑执行器退化情形下, 双容水箱系统的模型为:

$$\frac{H_2(s)}{U(s)} = \frac{K_T}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1}$$

其中  $T_1 = S_1 \tilde{R}_2$ ,  $T_2 = S_2 \tilde{R}_3$ ,  $K_T = K_a \tilde{R}_3$ . 将上述传递函数转化为状态空间表达式, 同时考虑执行器水泵退化过程, 系统状态描述为  $x(t) = [h_1(t) \ h_2(t)]$ , 系统输出  $y(t) = h_2(t)$ , 则系统模型可表示为:

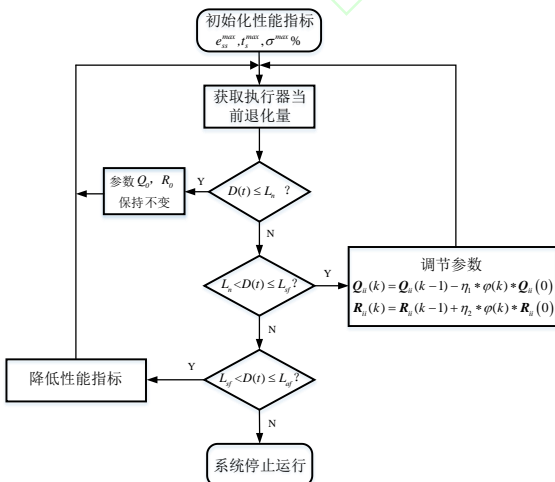


图 3 反馈控制系统 AELCS-ODSA 流程图

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \begin{bmatrix} 0 & -5.549 \\ I & -2.58 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1.376 \\ 0 \end{bmatrix} (I - Ca(t))u(t) \\ y(t) &= [0 \quad I]x(t) \end{aligned}$$

考虑水泵在长期运行过程中会发生不同程度的疲劳和磨损, 这种执行器的缓慢退化过程用连续时间的非线性 Wiener 过程来表征较为合理, 因此图 4 中执行器退化的测量数据与其隐含退化状态可表示为式(1)的形式, 则考虑测量误差情形下控制系统的寿命概率密度分布如式(7)所示。

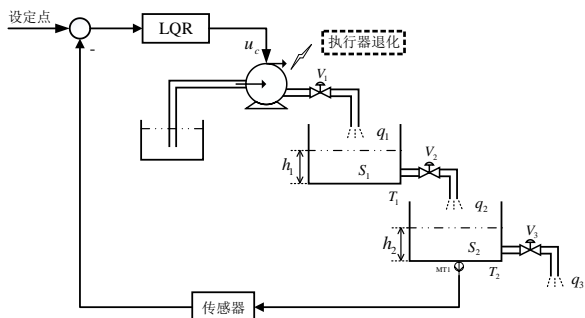


图 4 双容水箱示意图

由于通过调整控制参数进行延寿是以牺牲系统性能为代价的, 故而需比较有延寿或无延寿策略下的反馈控制系统性能指标。文中选取由于执行器退化致使系统不满足期望性能指标开始, 直至系统寿命终止的  $N$  个退化点进行分析, 为了对系统退化过程性能给出更为合理的评价, 特定义如下评价指标:

$$E_{ss} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_{ss}^i, T_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_s^i, \sigma\% = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma^i\% \quad (11)$$

此外, 将文献[14]提及的利用带噪声原始测量数据直接进行剩余寿命预测的方法(Method 1, M1)与本文基于卡尔曼滤波估计预测的方法(Method 2, M2)进行比较; 引入剩余寿命的均方误差(Mean-Square Error, MSE)来评价两种方法在不同预测时刻下剩余寿命预测的精度, 具体为

$$MSE = \sum_{i=100}^{N_{RUL}} \frac{(T_e^i - T_r^i)^2}{N_{RUL}}, (N_{RUL} = 100, 200, \dots, 700)$$

式中:  $T_r^i$  为第  $i$  个预测时刻的真实剩余寿命,  $T_e^i$  为 M1 或 M2 在预测时刻的剩余寿命预测值, MSE 用于表示真实寿命与不同方法下剩余寿命预测结果的精度差异。

水箱基本仿真参数为:  $S_1=10, S_2=25, K_{v1}=8, K_{v2}=6, g=9.828, h_1=0, h_2=0, \rho=1, \tilde{R}_2=0.0232, \tilde{R}_3=0.031$ ; 退化过程的仿真参数为:  $K_a=8, \alpha=0.2, \beta=0.6, \sigma_B=0.1, \gamma=0.05, \eta_1=0.0001, \eta_2=0.002,$

$N=1500$ , 性能指标约束集合  $e_{ss}^{max}=0.1, t_s^{max}=2.4, \sigma^{max}\%=11.71\%$ , 二次性能指标约束的初始值:  $R_0=1,$

$$Q_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 18.94 \end{bmatrix}.$$

### 3.2 结果分析

#### 3.2.1 退化状态估计

图 5 分别给出了执行器退化过程的测量值、真实值及基于测量值的 Kalman 滤波估计值, 图 6 给出了测量值、估计值与真实值间的误差水平。

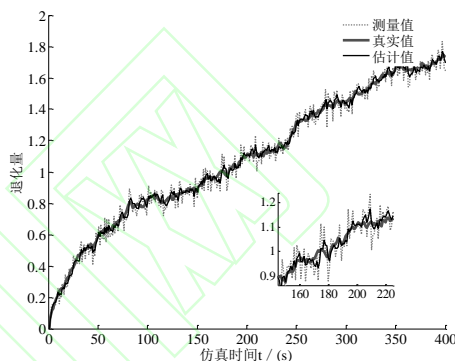


图 5 退化测量值与估计值比较

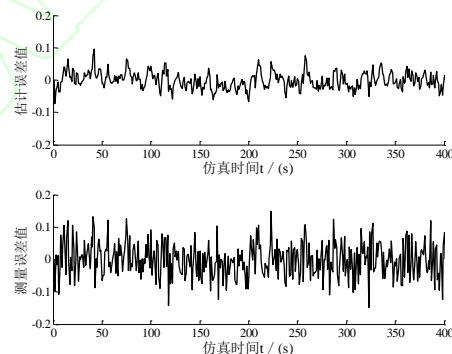


图 6 估计误差与测量误差比较

不难看出, 由于测量值中含有较大的误差, 通过卡尔曼滤波得到的估计值相比直接监测数据更准确地反映了真实的退化状态, 且估计值与真实值的误差范围更小, 进一步说明了基于测量值得到的估计值更好地反映了退化的真实状态。这为后续控制系统健康管理和延寿奠定了基础。

#### 3.2.2 系统剩余寿命

当控制系统性能不满足约束集的任意一个时, 对应的退化失效阈值  $t_{sf}$  被认定为系统退化阈值。图 7 为水箱 2 的液位随执行器退化的变化值, 可以看出, 执行器执行能力因退化而下降的过程中, 在仿真时间  $t=1143$  s 时超调量首先越出控制系统性能指标约束集, 即系统输出已无法按期望性能指标跟踪输入, 表明控制系统寿命终止。同时, 根据式(7)和



$l_{sf}$ ，分别基于 M1 和 M2 的双容水箱控制系统寿命预测分布如图 8 所示，两种方法在不同预测时刻剩余寿命预测精度 MSE 的差异如图 9 所示。

由图 8 可以看出，基于 M2 的寿命预测概率密度曲线较 M1 的更加集中，说明 M2 的预测不确定性小于 M1；进一步，由图 9 看出，M2 的剩余寿命 MSE 明显小于 M1。这充分说明，在退化测量数据包含测量误差的情况下，通过卡尔曼滤波技术估计的退化状态，较直接利用原始测量数据预测的系统寿命，更接近真实值。因此，对于实际工程中无法避免的测量噪声，基于状态估计进行闭环系统剩余寿命预测是一个更为可行的方法。

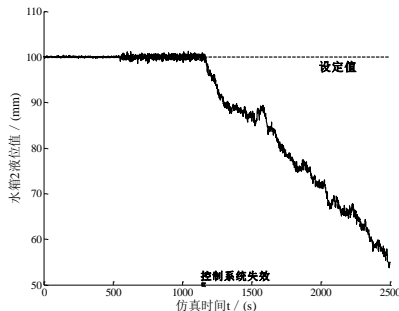


图 7 水箱 2 液位值变化趋势

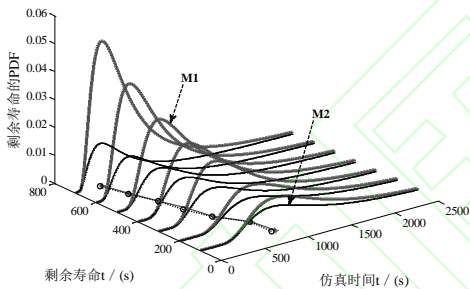


图 8 控制系统寿命预测分布

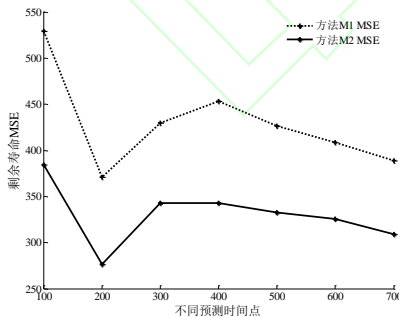


图 9 剩余寿命 MSE 比较

### 3.2.3 延寿结果及分析

首先，在基于 M2 进行隐含退化状态估计的寿命预测基础上，结合文中基于执行器实时退化状态的延寿控制策略 AELCS-ODSA 式(8)，图 10 给出了延寿下闭环控制系统寿命预测分布。

由于延寿策略是通过调整权重矩阵  $Q$  和  $R$ ，使

控制作用减小来缓解执行器执行压力的，因此，执行器的退化过程会被减缓，系统不满足性能指标约束集的时间会被延后，即系统达到退化阈值  $l_{sf}$  的时间发生变化，控制系统安全运行时间得以延长。

本文以调整  $Q$  矩阵的元素值  $Q_{22}$  和一维标量

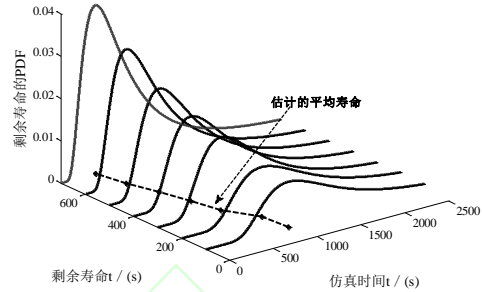


图 10 延寿策略下系统寿命预测分布

$R$  值实现延寿控制，为进一步观察有延寿策略与无延寿策略下  $Q_{22}$  和  $R$  的变化趋势以及控制作用的强弱差异。图 11 和图 12 分别给出有 AELCS-ODSA 与无延寿作用时  $Q_{22}$ 、 $R$  及控制作用的变化曲线。从图 11 和 12 可以看出，随着执行器退化量逐渐增加，为延缓其退化过程，采用本文 AELCS-ODSA 方法，控制器参数  $Q$  的元素值  $Q_{22}$  和  $R$  会基于执行器实时退化状态自动调整，相对于未采用延寿策略时二者保持不变的情况，控制作用更强，能起到缓解执行器执行压力的作用，因此可以延长系统运行时间。

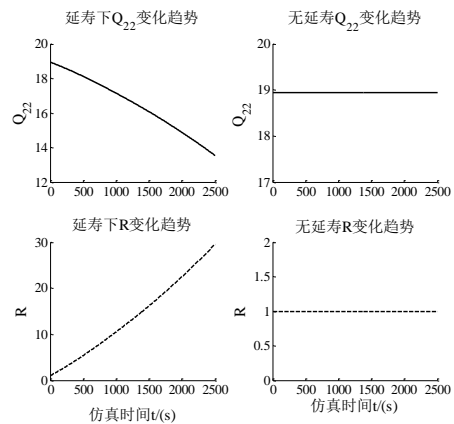


图 11  $Q_{22}$  和  $R$  变化趋势

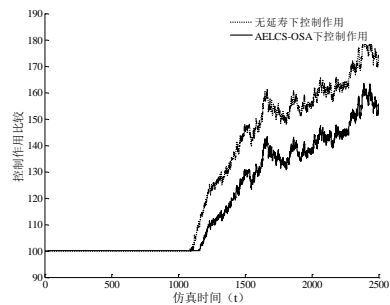


图 12 有/无延寿策略的控制作用对比图

其次, 为定量分析文中延寿策略的优越性, 将文献 [17] 中控制参数调整为固定值的方式与本文

AELCS-ODSA 控制参数调整与退化程度相关的方式相比较. 表 1 给出了不同延寿策略以及无延寿策

表 1 有/无延寿策略的系统预测寿命值

预测时刻 $t/s$	100	200	300	400	500	600	700
无延寿策略 RUL	840	731	669	490	368	289	156
文献[17]延寿策略 RUL	913	803	742	560	435	356	217
AELCS-ODSA RUL	941	831	770	587	462	382	241
文献[17]延寿时间	73	72	73	70	67	67	61
AELCS-ODSA 延寿时间	101	100	101	97	94	93	85

略时控制系统寿命的预测值. 从 1 表中可以看出, 其一, 在不同延寿策略下, 控制系统寿命预测值均大于未延寿的预测值, 说明通过延寿策略的引入, 执行器退化得到缓解, 进而闭环控制系统寿命也得到一定的延长; 其二, 较文献 [17] 延寿策略, AELCS-ODSA 在每一预测时刻的延寿时间均高出 24~28 s, 两者的平均延寿时间分别为 95.86 s 和 69.00 s, AELCS-ODSA 比文献 [17] 延寿策略平均高出 26.86 s, 延寿时间提高了 38.93%. 说明将控制器参数  $Q$  和  $R$  调节与退化量相关联时, 能更有针对性地缓解执行器压力, 从而更多地延长系统寿命.

基于文中定义的评价指标式 (11), 有/无延寿策略时系统性能的对比结果如表 2 所示. 可以看出, 在延寿策略下  $\sigma\%$  会略大于无延寿策略, 说明为保证执行器健康水平, 必须以适当牺牲部分系统性能为代价; 另外, 对比 AELCS-ODSA 和文献 [17] 所提方法发现, 前者的系统稳态和动态性能均优于后者, 说明控制器参数调整与退化量关联的延寿策略能使执行器更有效地实现控制作用, 使控制系统性能得以改善.

表 2 不同延寿策略下系统性能对比表

策略	$E_{ss}/mm$	$T_s/s$	$\sigma/\%$
无延寿策略	10.4819	6.3717	11.74%
文献[17]延寿策略	9.1157	5.7328	12.13%
AELCS-ODSA	9.0587	5.7159	12.13%

## 4 结语

本文针对执行器退化监测数据存在测量误差的闭环控制系统, 基于非线性 Wiener 过程、卡尔曼滤波技术以及 LQR 最优控制等, 研究了其寿命预测与延寿控制问题, 并在双容水箱控制系统进行实验验证, 主要内容和结果包括:

1) 以带测量误差的非线性 Wiener 模型描述不

确定测量值与执行器隐含退化状态的关系, 进而基于卡尔曼滤波技术估计了实际退化状态; 实验结果表明通过卡尔曼滤波得到的估计值较直接监测数据, 能更准确地反映真实的退化状态.

2) 根据执行器的退化程度及闭环控制系统性能约束, 定义了控制系统退化的三个阶段, 结合控制系统动态与稳态性能指标, 以约束集的方式确定了系统退化失效阈值, 由此和退化状态估计值, 得到了控制系统剩余寿命预测分布的解析解; 实验结果表明, 在退化监测数据包含测量误差的情况下, 较直接利用原始测量数据预测系统寿命的方法, 通过卡尔曼滤波技术估计退化状态, 其预测结果更接近真实值.

3) 将 LQR 控制器参数  $Q$ 、 $R$  的调整与执行器退化量相互关联, 提出的基于执行器实时退化状态的自适应延寿策略 AELCS-ODSA, 通过在线调整控制器参数和修正性能约束, 折衷平衡了系统性能与执行器退化进程; 实验结果表明, AELCS-ODSA 较文献 [17] 延寿策略, 能更有针对性地缓解执行器压力, 从而更多地延长了系统寿命.

实际工程中, 冲击造成执行器退化也是不可避免的问题, 时变、个体差异及测量误差等多源不确定性对控制系统寿命预测精度都会产生影响, LQR 控制器的鲁棒性不足在一定程度上制约了延寿效果, 这将是未来研究工作需进一步探讨的问题.

## 参 考 文 献

- [1] NGUYEN D N, DIEULLE L, GRALL A. Feedback control system with stochastically deteriorating actuator: remaining useful life assessment[C]// World Congress of the International Federation of Automatic Control. Cape Town: IFAC, 2014: 3244-3249.
- [2] BEGANOVIC N, SÖFFKER D. Remaining lifetime modeling using State-of-Health estimation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 92(8): 107-123.

- [3] 郑建飞, 胡昌华, 司小胜, 张正新, 张鑫. 考虑不确定测量和个体差异的非线性随机退化系统剩余寿命估计[J]. 自动化学报, 2017, 43(2): 259-270.
- [4] 司小胜, 胡昌华, 周东华. 带测量误差的非线性退化过程建模与剩余寿命估计[J]. 自动化学报, 2013, 39(5): 530-541.
- [5] 闫书法, 马彪, 郑长松. 基于多元劣化失效的综合传动剩余寿命预测[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(8):28-33.
- [6] ZHAI Q, YE Z S. RUL prediction of deteriorating products using an adaptive Wiener process model[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6): 2911-2921.
- [7] SON K L, FOULADIRAD M, BARROS A. Remaining useful lifetime estimation and noisy gamma deterioration process [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 149: 76-87.
- [8] LANGERON Y, FOULADIRAD M, GRALL A. Controlled systems, failure prediction and maintenance[J]. IFAC-Papers On Line, 2016, 49(12): 805-808.
- [9] AGGAB T, KRATZ F, VRIGNAT P, et al. Remaining Useful Life prediction method using an observer and statistical inference estimation methods[C]// Annual conference of the prognostics and health management society. Florida: HAL, 2017: 1-8.
- [10] SHI Q, HU C, SI X, et al. Predicting remaining useful life of degraded control systems considering three-source factors [C]// 2017 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Harbin). Harbin: IEEE, 2017: 1-8.
- [11] KE X, XU Z, WANG W, et al. Remaining useful life prediction for non-stationary degradation processes with shocks[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O. Journal of Risk and Reliability, 2017, 231(5): 469-480.
- [12] 司小胜, 胡昌华. 数据驱动的设备剩余寿命预测理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [13] SHEN Y, SHEN L, XU W. A Wiener - based degradation model with logistic distributed measurement errors and remaining useful life estimation[J]. Quality & Reliability Engineering International, 2018, 34(6): 1289-1303.
- [14] WAN XL, GU B, CHENG ZJ. Residual life estimation based on bivariate Wiener degradation process with measurement errors[J]. Journal of Central South University of Technology, 2013, 20(7):1844-1851.
- [15] LORENZO C F, MERRILL W C. Life extending control-a concept paper[C]// 1991 American Control Conference. Boston: IEEE, 1991: 1081-1095.
- [16] LI D, CHEN T, MARQUEZ H J, et al. Variance constrained model predictive control and application in life extending control[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2005, 29(2): 297-314.
- [17] LANGERON Y. Actuator health prognosis for designing LQR control in feedback systems[J]. Chemical Engineering Transactions, 2013, 33:979-984.
- [18] 马天兵, 杜菲. 基于 LQR-IMCS 算法的智能结构振动主动控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(3):72-75+80.
- [19] LANGERON Y, GRALL A, BARROS A. A modeling framework for deteriorating control system and predictive maintenance of actuators[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 140:22-36.
- [20] 金光. 基于退化的可靠性技术:模型、方法及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014:63-65.
- [21] 司小胜, 胡昌华, 张琪, 等. 不确定退化测量数据下的剩余寿命估计[J]. 电子学报, 2015, 43(1):30-35.
- [22] 施权, 胡昌华, 司小胜, 扈晓翔, 张正新. 考虑执行器性能退化的控制系统剩余寿命预测方法[J]. 自动化学报, 2019, 45(5):941-952.
- [23] LAAYOUJ N, JAMOULI H. Prognosis of degradation based on a new dynamic method for remaining useful life prediction[J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2017, 23(2): 239-255.