

# 控制与决策

Control and Decision

## 多轴同步控制系统的寿命预测和延寿方法

李炜, 颜伟俊, 毛海杰

引用本文:

李炜, 颜伟俊, 毛海杰. 多轴同步控制系统的寿命预测和延寿方法[J]. *控制与决策*, 2023, 38(9): 2587–2596.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1950>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [具有执行器故障的四旋翼无人机自适应预定性能控制](#)

Adaptive prescribed performance control of quadrotor with unknown actuator fault  
*控制与决策*. 2021, 36(9): 2103–2112 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0083>

#### [基于移动传感器/执行器网络的时滞分布参数系统镇定控制](#)

Stabilization control for a class of distributed parameter systems with time–delay based on mobile sensor and actuator networks  
*控制与决策*. 2021, 36(8): 1955–1962 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1309>

#### [考虑退化轨迹差异性与相似性的轴承RUL预测](#)

Prediction of bearing remaining useful life involving difference and similarity of degradation trajectories  
*控制与决策*. 2021, 36(11): 2832–2840 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1028>

#### [基于向量集逆区间滤波的故障观测器设计](#)

Vector set inversion interval filtering based fault observer design  
*控制与决策*. 2021, 36(12): 2973–2981 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0212>

#### [基于神经网络的电力系统暂态稳定分布式自适应控制](#)

Neural network–based distributed adaptive control for power system transient stability  
*控制与决策*. 2021, 36(6): 1407–1414 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1168>

# 多轴同步控制系统的寿命预测和延寿方法

李 炜<sup>1,2</sup>, 颜伟俊<sup>1</sup>, 毛海杰<sup>1,2†</sup>

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050;

2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 兰州 730050)

**摘要:** 随着多轴同步控制系统应用日益广泛,对其安全可靠性的要求也愈加迫切,尤其当元部件不可避免地逐渐退化时,对系统依旧具有持续工作的期许. 鉴于此,针对一类考虑单轴执行器退化的多轴同步控制系统,将感知与认知相结合,提出一种基于系统剩余寿命(RUL)预测的动态矩阵(DMC)-PID串级延寿控制方法. 首先,在不改变原有多轴同步系统结构的前提下,通过串级方式引入DMC作为延寿控制器,辅以PHM模块作为自主维护分析决策器,构建具有实时RUL预测和延寿功能的多轴同步系统新架构;然后,建立执行器隐含退化状态与多轴同步系统性能等感知信息之间的联系,得到多轴同步系统RUL分布的解析解并用于实时预测;接着,将其与同步系统的期望工作时长相结合,作为在线自主维护的认知依据,并基于给出的一种同时依赖执行器退化状态和延寿期许的自适应参数调节律,用以在线动态调整DMC约束矩阵 $Q$ 和 $R$ 的元素值,通过更契合退化过程特征和延寿需求的方式以减缓执行器退化、延长系统使用寿命,进而实现多轴系统性能与耐用性之间的更优折衷平衡;最后,通过舞台多电机同步控制系统仿真实验验证所提出方法的有效性.

**关键词:** 执行器; 多轴同步; 寿命预测; 延寿控制; 自主维护决策; 自适应调节

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1950

引用格式: 李炜,颜伟俊,毛海杰. 多轴同步控制系统的寿命预测和延寿方法[J]. 控制与决策, 2023, 38(9): 2587-2596.

## Research on life prediction and extension method of multi-axis synchronous control system

LI Wei<sup>1,2</sup>, YAN Wei-jun<sup>1</sup>, MAO Hai-jie<sup>1,2†</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** With the increasing application of multi axis synchronous control systems, the requirements of safety and reliability are becoming more and more urgent. Even when the original components are gradually degraded, many systems still have the expectation of continuous working hours. Thus, a dynamic matrix-PID cascade life extension control (DMC) method based on system residual life (RUL) prediction is proposed. Firstly, without changing the structure of the original multi axis synchronization system, a new architecture with real-time life prediction and life extension function is constructed by introducing the DMC as the life extension controller and the PHM module as the independent maintenance analysis decision-maker. Secondly, by establishing the relationship between the perceptual information such as the implicit degradation state of the actuator and the performance of the multi axis synchronization system, the analytical solution of the RUL distribution of the multi axis synchronization system is obtained and used for real-time prediction. Then, it is combined with the expected working time of the synchronization system as the cognitive basis of on-line autonomous maintenance, and based on an adaptive parameter adjustment law which depends on both actuator degradation state and life extension period, then used to dynamically adjust the element values of DMC constraint matrices  $Q$  and  $R$  on-line. The degradation of the actuator is slowed down and the service life of system is prolonged by better matching the characteristics of the degradation process and the demand for life extension, so as to achieve a better compromise balance between the performance and durability of the multi axis system. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by the simulation experiment of the stage multi motor synchronous control system.

**Keywords:** actuator; multi-axis synchronization; life prediction; life extension control; autonomous maintenance decisions; adaptive adjustment

收稿日期: 2021-11-10; 录用日期: 2022-04-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62063017).

责任编辑: 方华京.

†通讯作者. E-mail: gsmaohj@163.com.

## 0 引言

随着电力电子、电气传动等相关技术的发展,多轴同步控制以更大的负载驱动能力和高效灵活的运动方式,广泛应用于航空航天、冶金工业、数控机床、工业机器人以及舞台演艺等领域<sup>[1-3]</sup>。如舞台机械系统中,多电机驱动多吊杆同步运动,以实现特定的演艺效果;对于大惯量台体,常由多个电机共同驱动实现同步升降或旋转等。

在多轴同步控制领域,已有研究更多关注的是如何改善和提高同步控制精度,主要聚焦于同步控制结构和同步控制算法两方面<sup>[4-6]</sup>。随着多轴系统的高度自动化、精细化,在提升多轴系统同步控制精度的同时,近年来对系统运行的安全可靠性的关注度也更多,但是大多以容错的方式,或针对多轴系统传感器故障,设计一种基于解析冗余的软闭环切换机制,实现故障传感器隔离和系统容错<sup>[7]</sup>,或通过自适应调整控制器增益和重构系统控制律,以确保双电机伺服系统在故障状况下的稳定性<sup>[8]</sup>等。

上述研究均属于系统元部件出现故障后的事后补救措施。一般而言,在元部件发生故障前常经历一缓变的退化阶段,若在此阶段能够预测故障或失效并提前采取有效措施,对降低运行风险、提高系统安全性、节约维护费用等,相较于故障后的补救措施将更有意义。故障预测和健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)技术正是为了解决复杂系统的维护和保障问题,通过健康状态监测、数据处理、寿命预测等技术为系统的维护计划提供决策信息,以降低故障率和维护成本<sup>[9]</sup>。其主要包括剩余寿命(remaining useful life, RUL)预测和健康管理(health management, HM)两部分。

在剩余寿命预测研究方面,针对设备或装置的研究成果已较为丰硕<sup>[10-12]</sup>。研究方法主要分为基于失效机理、基于数据驱动以及混合方法等3类<sup>[12]</sup>。随着传感和数据采集技术的发展,基于数据驱动的方法逐渐成为主流。文献[13]详实且系统地介绍了大数据背景下随机退化设备的RUL预测技术,深入分析了包括基于机器学习、统计数据驱动等方法在内的RUL预测技术基本研究思想和发展动态。基于机器学习的方法虽然能够得到具体预测值,却难以获取解析量化评价随机退化不确定性的概率分布,且需要大量失效数据进行模型训练<sup>[14-15]</sup>。对于反馈控制系统RUL预测研究,由于在控制器和闭环结构的共同作用下,元部件退化呈现隐含特点,使得对系统的健康状态评估较为困难,成果亦相对较少。文献[16]基

于泊松过程描述执行器退化,通过分析反馈控制结构下执行器隐含退化对反馈系统的影响,结合系统失效定义求解RUL概率分布。文献[17]采用扩散过程,通过权值优选粒子滤波算法估计隐含退化状态,建立基于变失效阈值的系统失效判断准则求取控制系统的RUL概率分布。上述工作无疑对掌握设备或系统健康状态等感知信息具有重要意义,并为后续制定健康维护等认知决策提供依据<sup>[18-20]</sup>。

在健康管理方面,更多研究聚焦于如何综合考虑时间与经济成本、备件管理、资源损耗与生产效益间的平衡,借助优化理论,决策出最优平衡点,以此确定效率最高的维修方式<sup>[21]</sup>,是一种停机下的预测性维护。然而,在大多数情况下,系统具有有限时间段内不停机运行的需求,因此,通过改善控制策略等方式,对系统开展在线自主维护,作为传统停机下预测性维护的有效补充,对于延长系统工作时长、提高运行安全性、经济性均具有重要意义。

延寿控制(life extending control, LEC)作为在线自主维护的重要手段之一受到了人们的关注<sup>[22-24]</sup>。LEC的主旨是对系统退化部件进行健康状态监测和损伤程度估计,通过小幅度降低性能约束、重构控制律等方法减缓退化部件的损伤,以延长系统连续使用寿命。Ray<sup>[22]</sup>在文献[22]中系统介绍了延寿控制的发展,并指出一个设计良好的LEC系统应能够实现系统性能与耐用性间的理想平衡。基于延寿控制的思想,Langeron等<sup>[23]</sup>分析了在线性二次调节器(LQR)中调节控制参数 $Q$ 、 $R$ 对控制律的影响,并针对反馈控制系统,提出一种基于RUL预测结果在线调整LQR控制律的延寿策略。Si等<sup>[24]</sup>针对执行器退化下的反馈控制系统,详细分析执行器退化与系统状态间的联系,给出了反馈控制系统具体的寿命预测方法,并依据寿命预测结果实时计算PID控制器的参数调节系数,最终通过对控制器输出的平滑调控实现系统延寿。

然而,上述有限的系统级寿命预测和延寿方法大多是针对单闭环反馈控制,且延寿策略实施时未充分考虑参数调整尺度对系统性能的影响。鉴于此,本文针对一类存在执行器隐含退化的多轴同步控制系统,提出一种基于系统实时RUL预测的延寿控制方法。主要内容有3方面:1)通过引入PHM模块,结合退化状态和系统输出等感知信息,在不改变原有系统控制结构的前提下,以串级方式将动态矩阵控制(dynamic matrix control, DMC)作为延寿控制器,实现对多轴同步系统的在线寿命预测和自主维护决策等

认知行为框架的构建; 2) 建立符合多轴系统执行器隐含退化特性的 Wiener 退化模型, 并视多轴同步误差为系统级退化量, 深入分析执行器隐含退化与系统级退化状态间的关系, 得到执行器隐含退化下的多轴系统 RUL 解析解; 3) 依据系统 RUL 实时预测结果、执行器退化程度, 并结合系统期许工作时长, 通过构造依赖于此的参数调整函数, 实现 DMC 约束矩阵元素值自适应动态调整, 达到同步系统控制性能与耐用性间的优化平衡, 延长多轴系统的使用寿命。

### 1 基于PHM和DMC的多轴同步延寿系统的构建

#### 1.1 多轴同步系统延寿框架的构建

欲在系统性能退化时延长其工作时限, 需解决3个关键问题: 1) 如何合理地构建系统结构, 使其具备延寿功能; 2) 如何在线准确预测系统的 RUL, 为延寿策略实施提供决策依据; 3) 如何设计更优的控制策略, 使得延寿过程更及时有效。

实际工程中, 严苛的现场环境对控制算法的可靠性有较高的要求, 因此结构简易但性能稳定的 PID 算法依然倍受青睐。但是, 在线实时调控 PID 参数以平衡系统性能与耐用性, 易造成系统动态性能振荡。此外, 以 PID 为基础的成熟多轴同步系统, 为增加延寿功能而更换控制器, 也未必能够被实际工程所认可。受串级控制思想的启发, 在不改变原有多轴同步控制结构的情况下, 首先通过在外层增加一个新回路, 引入可调控系统性能与耐用性间折衷平衡的 DMC, 在串级方式下使得多轴同步系统具有延寿功能; 然后, 在上述串级控制结构的基础上还需增设一个 PHM 模块, 其功能是根据元部件的隐含退化状态和系统输出等感知信息实时预测系统 RUL, 并结合系统的期望工作时限, 为延寿控制的具体实施提供可靠依据; 最后, 为了达到更好的延寿效果, 优化控制性能与耐用性间的平衡, 需以 DMC 为基础并根据多轴系统的实时退化状态, 设计适宜的参数调整策略。

综上分析, 构建具有寿命预测和自主延寿功能的多轴同步系统结构如图1所示。其中: 基于经典 PID 算法的多轴同步系统为广义被控对象, 位于外回路的

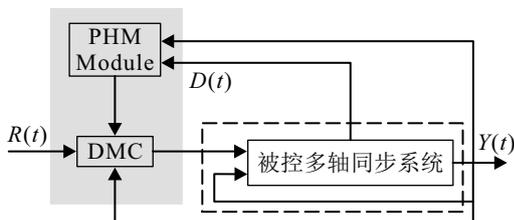


图1 具有寿命预测和延寿功能的多轴同步系统拓扑结构

DMC 为延寿控制器, 上层 PHM 模块进行系统实时寿命预测和自主维护决策。

该系统的工作原理可概述为: PHM 模块利用系统反馈和执行器退化等感知信息, 对系统进行实时状态监测和 RUL 预测; 当执行器退化致使系统性能下降, 且 PHM 认知系统 RUL 无法满足期望工作时限, 通过设定的自适应参数调节律在线减小 DMC 的控制输出, 以此减缓执行器的执行压力, 从而延缓其退化进程, 最终实现多轴同步系统延寿的目标。

#### 1.2 基于偏差耦合的多轴同步系统控制结构

考虑实际工程的成熟应用情况, 本研究选取偏差耦合+PID组合的多轴同步控制结构, 如图2所示。偏差耦合同步控制首先由偏差模块通过均值算法求取输出均值信号, 再对均值信号与各轴输出进行比较产生偏差信号, 作为同步补偿器输入。在同步补偿器的调节作用下, 实现各轴间的输出同步<sup>[5]</sup>。

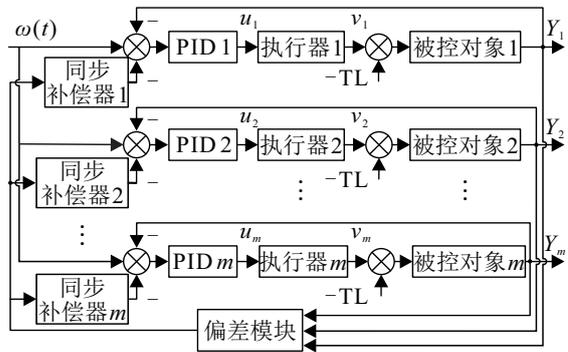


图2 多轴偏差耦合同步系统控制结构

### 2 执行器隐含退化下多轴同步系统的剩余寿命预测

在多轴同步系统中, 执行器作为连接控制器和被控对象的桥梁, 能否将控制信号转化为对等的执行量, 会直接影响控制效果。且较其他元部件, 执行器的频繁动作更易引发退化, 对系统性能的影响更为显著。因此, 研究中将执行器退化视为影响系统退化的主要因素。由前述分析可知, 实现延寿控制的前提是可在实时预测执行器退化下同步系统的退化状态和 RUL。本文将基于 PHM 模块实现此功能, 该模块尽管处于多轴同步系统的环外, 但其工作过程与系统运行行为密切相关, 除了利用多轴同步系统性能指标、执行器退化状态  $D(t)$  等感知信息, 在线进行系统 RUL 的解析求解, 还需根据 RUL 预测结果和系统工作时限需求, 认知判定决策系统是否需要延寿控制, 并相应地给出 DMC 延寿控制参数调整尺度。本节将重点分析讨论多轴同步系统 RUL 预测问题, 考虑到自主维护决策与延寿控制密切相关, 将其置于第3节

展开.

### 2.1 执行器退化建模

不同应用场景中的多轴同步系统,其执行器各不相同,但对于同类多轴系统,其隐含退化下系统退化行为却是相似的.本研究选取工程中应用广泛的交流多电机同步控制系统为研究对象,变频器作为其中控制和驱动的关键部件,多由二极管整流器、全控开关器件IGBT组成的功率模块IPM等部件构成,其中IGBT模块由于高开关频率的工作特性,在运行周期内会经历数万乃至数百万次温度冲击,将导致其热参数和电气参数退化<sup>[25]</sup>.本研究选取IGBT模块的导通电阻作为执行器退化状态,其退化过程呈现连续、渐变、非单调非线性等特征.

在统计和随机过程建模方法中,依据退化过程的不同特征和概率分布,出现了如Wiener过程、Gamma过程、逆Gaussian等模型<sup>[26]</sup>.不同于Gamma过程与逆Gaussian所描述的严格单调退化,Wiener过程是一类具有连续时间参数和连续状态空间的可用于描述非单调、非线性退化的随机过程,在退化建模和寿命预测领域应用广泛.通过分析IGBT模块导通电阻的退化特性,采用连续的非单调随机过程进行退化建模成为一种合理的选择.另外,经过曲线拟合实验对比,本文选用一类带非线性漂移的Wiener过程,对变频器的执行功能属性(这里视为执行器)进行退化建模,其数学模型<sup>[24]</sup>如下:

$$D(t) = D(0) + \int_0^t \mu(\tau; \theta) d\tau + \sigma_B B(t). \quad (1)$$

其中:  $D(0)$  为退化状态的初始值;  $\mu(\tau; \theta)$  为漂移系数,描述退化状态  $D(t)$  的非线性漂移;  $\sigma_B$  为扩散系数;  $B(t)$  为标准布朗运动.

文献[27]将执行效能损失视作一类执行器故障,随着执行器退化累积,执行效能逐渐下降,定义  $t$  时刻执行效能  $\varphi(t)$  与退化状态  $D(t)$  的关系<sup>[16]</sup> 为

$$\varphi(t) = h(\varphi_0, D(t)), \quad (2)$$

其中  $\varphi_0$  为执行器的初始执行能力.

定义  $t$  时刻执行器的输出如下:

$$v(t) = g(u(t), \varphi(t)), \quad (3)$$

其中  $g$  为由执行器执行效能决定的函数,表征执行器将控制信号  $u(t)$  转化为控制量  $v(t)$  的能力.可见执行器的实际输出由控制量  $u(t)$  和执行效能  $\varphi(t)$  共同决定.

### 2.2 多轴同步系统退化过程分析

尽管多轴系统执行器的退化状态通常有趋同规律,但是对系统寿命的影响较为复杂,因此本文重点

考虑多轴系统中单轴执行器发生退化情形.系统退化受到自身元部件、工作环境等多因素影响,主要反映为系统性能下降<sup>[28]</sup>.为科学评价系统的退化状态,构建合理的系统级退化特征量极为关键.对于多轴同步控制系统,跟踪误差和同步误差是最为常用的稳态性能指标.考虑到同步误差对于多轴同步系统更为重要,选其作为系统退化的性能指标,可描述为

$$\varepsilon = \max(|y_i - y_j|), \quad i, j = 1, 2, \dots, m \text{ 且 } i \neq j. \quad (4)$$

其中:  $m$  为被控轴数,  $y_i$  和  $y_j$  为各轴实际输出量.

通常受执行器退化的影响,当系统同步误差  $\varepsilon$  在期望指标  $\varepsilon_d$  附近限定的小范围波动时,仍属于控制任务可接受的工作状态;随着执行器退化的继续,系统退化加深,同步误差  $\varepsilon$  的波动逐渐增大,当其超出限定范围时,系统性能将不再满足控制任务的要求,则可视作系统失效.因此,通过选取合理的同步误差变化界,即系统失效阈值  $\varepsilon_{th}$ ,即可确定系统的失效区域.而系统失效阈值的合理设置,需结合工程中的实际要求给出.

由于反馈控制与同步控制等耦合结构的存在,执行器退化对于多轴系统呈现隐含退化的特点,因而无法依据执行器失效定义直接进行多轴系统的退化建模和RUL预测.从上述分析可知,两者对性能指标的影响存在对应关系,执行器退化引发多轴系统性能退化,进而导致同步误差  $\varepsilon$  增大,因此可利用系统失效对应的同步误差  $\varepsilon$  的失效阈值反推执行器退化阈值,从而通过执行器退化模型求解多轴系统的寿命分布.

文献[29]认为针对执行器退化,在系统的全生命周期中进行多阶段划分更有利于描述其与系统性能退化的关系.因此本文也将多轴同步系统从初始时刻至失效时刻之间的运行时段,分别从执行器退化状态  $D(t)$ 、执行效能  $\varphi(t)$  和多轴同步误差  $\varepsilon$  三方面,将退化过程大致划分为3个阶段,如图3所示.分别定义  $T_C$ 、 $T_S$ 、 $T_a$ 、 $T_{mission}$  为系统由正常工作状态进入退化状态的临界时间、系统失效时刻、执行器失效时刻以及期望工作时限,取  $\varepsilon_C$  为表征系统由正常工作状态转向退化阶段的临界阈值.

多轴同步系统退化过程的3个阶段具体如下.

stage 1:  $t \in [0, T_C)$ ,  $D(t) \in [D(0), D(T_C))$ ,退化初期阶段.执行器开始退化,由于反馈控制的纠偏冗余能力,同步误差  $\varepsilon < \varepsilon_C$ ,仅出现轻微波动,多轴同步系统处于正常工作状态.

stage 2:  $t \in [T_C, T_S)$ ,  $D(t) \in [D(T_C), D(T_S))$ ,退化加速阶段.多轴同步系统退化加重,  $\varepsilon \in [\varepsilon_C, \varepsilon_{th})$ ,同步误差  $\varepsilon$  波动逐渐增大,直至  $T_S$  时刻  $\varepsilon$  进入失效区域.

stage 3:  $t \in [T_s, T_a)$ ,  $D(t) \in [D(T_s), D(T_a))$ , 系统失效阶段. 此时执行器退化尚未达到自身退化阈值  $D(T_a)$ , 然而多轴系统同步误差  $\varepsilon$  已严重偏离期望指标  $\varepsilon_d$ ,  $\varepsilon \geq \varepsilon_{th}$ , 多轴同步系统失效.

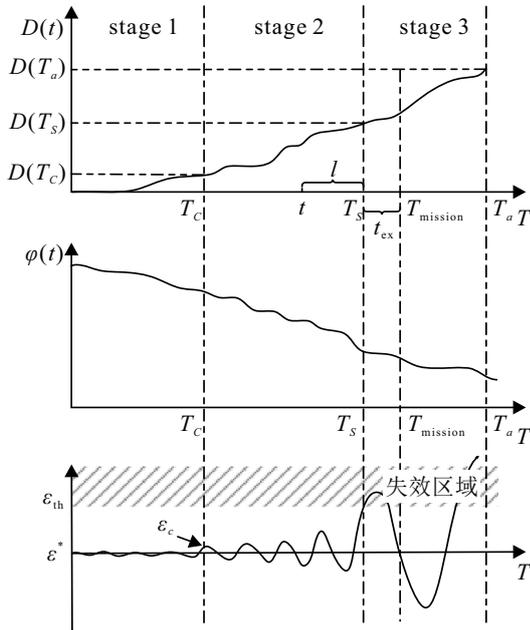


图3 多轴同步系统退化过程阶段划分

2.3 多轴同步系统剩余寿命预测

根据首达时间定义, 结合前述多轴同步系统退化过程分析, 同步误差  $\{\varepsilon(t), t \geq 0\}$  首次突破失效阈值  $\varepsilon_{th}$  的时刻, 即多轴同步系统的失效时刻为

$$T_S = \inf\{t : \varepsilon(t) \geq \varepsilon_{th} | \varepsilon(0) < \varepsilon_{th}\}. \quad (5)$$

选取系统失效时刻  $T_S$  对应的执行器退化量  $D(T_S)$  为隐含退化量的失效阈值, 则基于执行器退化状态  $D(t)$  的多轴同步系统的寿命  $T$  可定义为

$$T = \inf\{t : D(t) \geq D(T_S) | D(0) < D(T_S)\}. \quad (6)$$

不考虑参数的随机性, 系统寿命  $T$  的概率密度函数<sup>[30]</sup>为

$$f_T(t|\theta) = \frac{D(T_S) - \int_0^t \mu(\tau; \theta) d\tau + \mu(\tau; \theta)t}{\sigma_B t \sqrt{2\pi t}} \times \exp\left\{-\frac{\left[D(T_S) - \int_0^t \mu(\tau; \theta) d\tau\right]^2}{2\sigma_B^2 t}\right\}. \quad (7)$$

令  $t$  为系统运行的当前时刻,  $l$  为  $t$  时刻系统的剩余寿命, 即当前时刻至系统寿命  $T$  的间隔时间,  $l = T - t$  为一随机变量. 执行器退化模型中漂移系数  $\mu(\tau; \theta)$  取不同的函数形式可描述不同的非线性随机退化过程, 具体函数可依据退化对象的特征进行选取, 常用的主要包括幂函数模型、指数模型和对数模

型, 其中幂函数模型应用最为广泛. 这里采用幂函数模型  $\mu(\tau; \theta) = a b \tau^{b-1}$  对 IGBT 模块导通电阻退化的非线性特征进行描述, 则系统在  $t$  时刻剩余寿命的概率密度函数<sup>[30]</sup>为

$$f_L(l|\theta) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_B^2 l^3}} (D_k - a(\eta(l) - bl(l+t)^{b-1})) \times \exp\left\{-\frac{(D_k - a\eta(l))^2}{2\sigma_B^2 l}\right\}. \quad (8)$$

其中:  $\eta(l) = (l+t)^b - t^b$ ,  $D_k = D(T_S) - D(t)$ .

3 基于DMC的自适应延寿控制策略设计

3.1 基于DMC的延寿控制

延寿策略使用较多的是 LQR、MPC 等控制算法, 原因是二者均可通过在线调整约束矩阵参数, 实现系统控制性能与耐用性的折衷, 从而延长系统的寿命. 尽管 LQR 是最为成熟求解线性二次型的最优控制方法, 可获得控制律的全局最优解, 但其对被控对象模型的依赖度高, 且鲁棒性较差. 而 MPC 方法中的动态矩阵控制 (DMC), 是一种基于对象阶跃响应的模型预测控制算法, 该算法尽管通过将控制周期分解为多个有限时间跨度, 获取的控制增量是局部最优解, 但模型预测、反馈校正、滚动优化的精髓, 使其对被控对象模型的依赖度低, 且鲁棒性高, 更适应于难以精确建模、不确定因素多的多轴同步系统. 其基本思想是构造目标函数并根据约束条件进行求解, 目标函数通常为如下二次型形式:

$$\min J(t) = [Y_M(t+1) - Y_r(t+1)]^T Q [Y_M(t+1) - Y_r(t+1)] + \Delta U^T(t) R \Delta U(t). \quad (9)$$

其中:  $Y_M(t+1) = [y_M(t+1) \dots y_M(T+P)]^T$  为模型预测输出矢量,  $Y_r(t+1) = [y_r(t+1) \dots y_r(t+P)]^T$  为期望输入矢量,  $Q$  为误差加权矩阵,  $R$  为控制加权矩阵,  $P$  为预测步长,  $M$  为控制步长.

根据延寿控制思想, 在确保系统稳定运行的前提下, 由式(9)可知, 减小  $Q$  矩阵和增大  $R$  矩阵中特定元素值, 即可实现对被控系统性能约束的放松和控制增量的减少; 结合图1与图2可知, 则是由外环 DMC 减小多轴同步系统的控制输入  $\omega(t)$ , 随之减小内环 PID 控制器输出, 进而减弱执行器的执行压力以延缓其退化过程, 延长多轴同步系统使用寿命. 为便于参数调整, 令  $Q$ 、 $R$  矩阵对角线元素分别相等, 且各元素调整尺度均取  $\Delta q$ 、 $\Delta r$ .

### 3.2 延寿介入时系统分析

在延寿策略的设计中依然存在2个关键问题: 1) 延寿策略介入系统运行时间节点的判决; 2) 对控制参数调节策略的制定, 这也恰恰是PHM承担自主维护决策认知层面的任务. 若系统能够完成控制任务, 即系统于期望工作时限后失效, 则有  $T_S > T_{\text{mission}}$ . 欲使系统达到期望工作时限, 基于RUL预测结果  $l$  求得  $t$  时刻所需最短延寿时间  $t_{\text{ex}}$  为

$$t_{\text{ex}} = T_{\text{mission}} - (t + l). \quad (10)$$

结合图3进行分析, 当处于 stage 1 时, 系统健康水平良好, 无需进行延寿控制; 而当进入 stage 3 时, 系统已处于失效状态, 除基于冗余的容错控制外, 在无冗余下调整控制策略已无济于事. 因此延寿策略只能在 stage 2, 即系统性能已发生退化但未退化至失效阈值时介入系统工作.

当多轴同步系统进入退化阶段 stage 2 时, 根据  $t_{\text{ex}}$  是否大于 0 即可判决延寿策略是否需要介入以及 DMC 参数  $Q$ 、 $R$  元素的调整尺度. 具体判决机制为: 若  $t_{\text{ex}} < 0$ , 则系统 RUL 足以满足期望工作时限  $T_{\text{mission}}$  要求, 无需调整 DMC 的参数; 若  $t_{\text{ex}} \geq 0$ , 则系统 RUL 已无法满足  $T_{\text{mission}}$  要求, 延寿控制介入, PHM 模块向 DMC 控制器发送权值矩阵调整尺度.

### 3.3 DMC 延寿控制中参数自适应调整策略设计

目前已有研究成果中, 控制参数的调整多采用固定值以修正  $Q$ 、 $R$  矩阵元素, 未考虑延寿策略下系统的退化状态更新, 易造成对性能约束的过度放松, 难以使得系统性能与耐用性达到优化平衡. 若能够在  $Q$ 、 $R$  矩阵元素值的调节中, 使其与执行器实时退化状态以及期望延寿时长  $t_{\text{ex}}$  密切关联, 即当执行器退化不明显且  $t_{\text{ex}}$  较小时, 通过微调满足延寿需求, 避免对系统性能产生过多影响; 当执行器退化显著且  $t_{\text{ex}}$  较大时, 通过较大尺度调节, 以尽可能延缓执行器退化, 延长系统寿命; 而当执行器退化严重但未达到失效阈值  $D(T_S)$ , 且  $t_{\text{ex}} > 0$  仍有延寿需求时, 考虑  $Q$ 、 $R$  矩阵元素值由于前期累计调整已邻近稳定边界的敏感区, 应逐步减小调整尺度, 以获得后期平稳延寿的效果. 如此, 则有望使得系统性能与耐用性达到更优的折衷平衡.

综上所述, 考虑执行器退化过程先缓慢后加速的特点, 兼顾延寿过程对  $Q$ 、 $R$  矩阵元素值调整尺度的期许, 可构造与执行器退化实时状态  $D(t)$  关联的调节律, 用于  $Q$ 、 $R$  矩阵元素值的修正, 如下所示:

$$\rho(t) = \exp(-(D(t) - D_\rho)^2 / 2\sigma_\rho^2). \quad (11)$$

其中:  $\sigma_\rho$  决定调节律的主要作用区间, 其选值应使得  $\rho(t)$  曲线的上升阶段覆盖  $D(T_C) \sim \vartheta D(T_S)$ ,  $\vartheta D(T_S) \sim D(T_S)$  为前述敏感区,  $\vartheta \in (0.5, 1)$ , 意为敏感区对应执行器退化较严重的情形; 进而令  $D_\rho = \vartheta D(T_S)$ , 决定  $\rho(t)$  曲线开始下降的时刻. 由调节律  $\rho(t)$  的表达式可见, 其作用在于可根据执行器的实时退化量  $D(t)$  产生类似正态分布的输出曲线,  $\rho(t)$  作用时段和区段如图4所示. 将该特性赋予参数调节量, 可使得  $Q$ 、 $R$  矩阵元素值自适应于  $D(t)$  进行调整, 更契合于不同退化时段的特征.

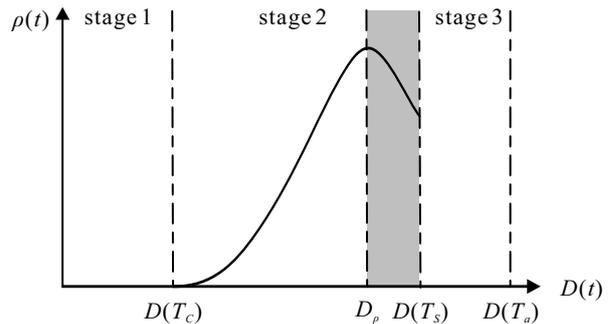


图4  $\rho(t)$  作用时段和区段

进一步考虑期望延寿时长  $t_{\text{ex}}$  的需求, 建立  $Q$ 、 $R$  矩阵元素值调节量与执行器退化以及系统寿命间的函数关系如下:

$$\begin{cases} \Delta q(t) = \alpha(\rho(t) + \eta t_{\text{ex}}(t))q_0, & t_{\text{ex}} > 0; \\ \Delta r(t) = \beta(\rho(t) + \eta t_{\text{ex}}(t))r_0, & \\ \Delta q(t) = 0, & t_{\text{ex}} \leq 0. \\ \Delta r(t) = 0, & \end{cases} \quad (12)$$

其中:  $q_0$ 、 $r_0$  分别为  $Q$ 、 $R$  矩阵中元素值的初始值;  $\alpha$ 、 $\beta$  作为参数调整的比例系数, 均大于 0;  $\eta > 0$  为  $t_{\text{ex}}$  的比例系数.

观察式(12)和  $\rho(t)$  可发现,  $\Delta q$ 、 $\Delta r$  的取值不仅依赖于执行器实际退化量  $D(t)$ , 同时依赖于系统实时寿命预测结果相关的期望延寿时长  $t_{\text{ex}}$ . 相较于不依赖这两者的固定参数延寿方法, 所提出方法对控制参数的调节更契合系统的实际状态和需求.

由式(12), 可进一步给出  $q$ 、 $r$  的调整算法为

$$\begin{aligned} q(t+1) &= q(t) - \Delta q(t), \\ r(t+1) &= r(t) + \Delta r(t). \end{aligned} \quad (13)$$

在 DMC 控制中, 通常要求  $Q$  矩阵始终保持半正定, 且  $Q$ 、 $R$  矩阵中元素值存在调节界  $q_{\text{min}}$ 、 $r_{\text{max}}$ , 因此需要引入如下约束条件:

$$\begin{aligned} q(t) &\geq \Delta q(t), \\ q(t) &\geq q_{\text{min}}, \quad r(t) \leq r_{\text{max}}. \end{aligned} \quad (14)$$

结合系统退化的多阶段划分,延寿策略亦分为如下3个阶段.

stage 1: 执行器轻微退化,多轴同步系统健康水平良好, $Q$ 、 $R$ 矩阵元素值维持初始值不变.

stage 2:  $D(t) \in [D(T_C), D(T_S))$ , 执行器退化加重,PHM模块在线实时预测系统RUL,并根据判决条件 $t_{ex}$ 实施延寿策略, $Q$ 、 $R$ 矩阵元素值根据式(11)~(14)进行调整更新,系统实施在线自主维护.

stage 3:  $D(t) \geq D(T_S)$ ,多轴同步失效,为保证人员和设备安全,应尽快停机检修.

根据上述控制参数调整过程,对应的算法流程如图5所示.

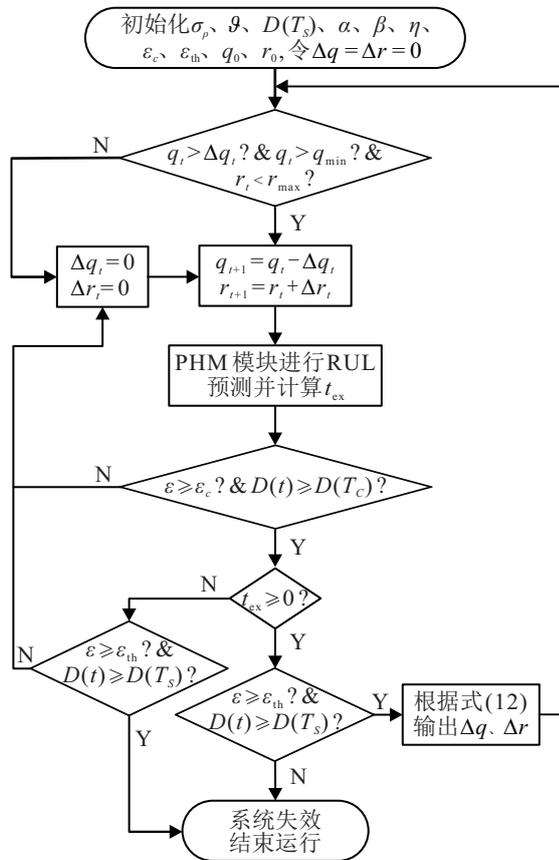


图5 参数自适应调整延寿控制算法流程

## 4 仿真实验和结果分析

### 4.1 实验设计

本文以升降舞台多电机同步控制系统为背景,对所提出的寿命预测和延寿控制方法进行有效性验证.假设在某特定舞台演出中,要求两子台面同步运行,即2台电机分别驱动2个升降舞台,采用实际工程中矢量变频器驱动三相异步电机的方案.三相异步电机的数学模型是非线性强耦合的多变量复杂系统,不利于仿真研究,而通过矢量变换技术,可将变频器与异步电机的结合近似等效为直流电机,其传递函数

可写为

$$G(s) = \frac{1/C_e}{T_m T_l s^2 + T_m s + 1} \quad (15)$$

其中: $T_m = 2JR/C_e C_m$ 为机电时间常数; $T_l = L/R$ 为电磁时间常数; $C_e$ 为反电势系数; $J$ 、 $R$ 、 $L$ 、 $C_m$ 分别为电机转子的电动惯量、定子绕组的电阻、绕组等效电感和电磁转矩常数.IGBT模块导通电阻的退化将引发变频器执行效能 $\varphi(t)$ 下降,进而影响传函中相关参数的变化.

选取直流电机的额定参数为10 kW,220 V,55 A,1000 r/min, $R = 1.0 \Omega$ , $C_e = 0.1925 \text{ V} \cdot \text{min/r}$ .通过计算得到机电时间常数 $T_m = 0.075 \text{ s}$ ,电磁时间常数 $T_l = 0.017 \text{ s}$ .考虑实际中即使是型号相同的2台电机也会存在一定的差异,可体现于机电惯性和电磁惯性的时间常数中,因此在仿真中对2台电机的参数设置略有不同,具体如表1所示.

表1 机电时间常数和电磁时间常数

	$T_m/\text{s}$	$T_l/\text{s}$
电机1	0.075	0.017
电机2	0.1	0.015

假设电机1所在轴的执行器出现退化,根据式(1)对变频器IGBT模块的导通电阻进行退化建模,令其初始退化量 $D(0) = 0$ ,取退化参数为 $a = 0.0000985$ , $b = 1.463$ , $\sigma_B = 0.01$ .

在系统性能无退化时,通过Ziegler-Nichol响应曲线法整定得到内环PI控制器参数如下: $K_P = 0.142$ , $K_I = 1.38$ ;采用的位置耦合同步补偿器为 $(0.142 \text{ s} + 0.38)/\text{s}$ .DMC的控制参数:预测步长 $P = 10$ ,控制步长 $M = 5$ , $Q$ 、 $R$ 矩阵元素初始值分别为 $q_0 = 0.06$ , $r_0 = 0.04$ ,其约束值为 $q_{\min} = 0.015$ , $r_{\max} = 1$ .假设系统期望工作时限 $T_{\text{mission}} = 500 \text{ h}$ ,取执行器退化失效阈值 $D(T_S) = 0.632$ ,系统位置同步误差 $\varepsilon$ 临界阈值 $\varepsilon_c = 0.4$ ,失效阈值 $\varepsilon_{\text{th}} = 5 \text{ r}$ ;调节律 $\rho(t)$ 中取 $\vartheta = 0.8$ ,则 $D_\rho = 0.5$ , $\delta = 0.11$ ,调节函数(12)中各参数分别取 $\alpha = 0.000044$ 、 $\beta = 0.0014$ 、 $\eta = 0.001$ ,位置跟踪误差阈值 $e_{\text{ss}}^{\max} = 500 \text{ r}$ .

### 4.2 实验实施和结果分析

#### 4.2.1 执行器隐含退化下多轴同步系统RUL预测

假设系统在仿真运行初始时刻变频器的执行效能开始发生退化,由式(1)所建退化模型,可得到其退化轨迹如图6所示.

图7为未施加延寿策略时舞台电机同步系统的位置同步误差.根据首达时间下失效定义,位置同步误差 $\varepsilon$ 在405 h时刻超出失效阈值 $\varepsilon_{\text{th}} = 5 \text{ r}$ ,即系统使

用寿命未达到期望工作时限  $T_{\text{mission}} = 500 \text{ h}$ . 进一步由式(8)得到系统剩余寿命的概率密度分布如图8所示. 同时在表2中展示了系统失效前, 每隔80h得到的系统剩余寿命估计值、估计误差和同步误差  $\varepsilon$  的值.

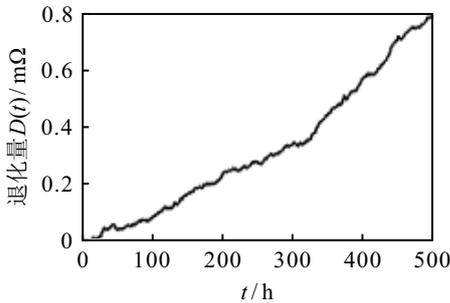


图6 变频器退化过程

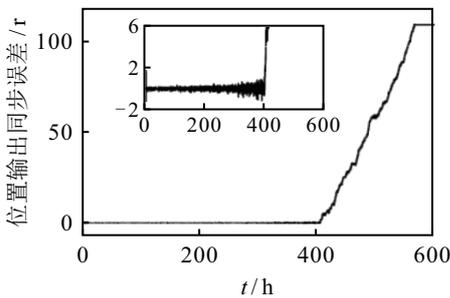


图7 发生退化时双电机位置同步误差

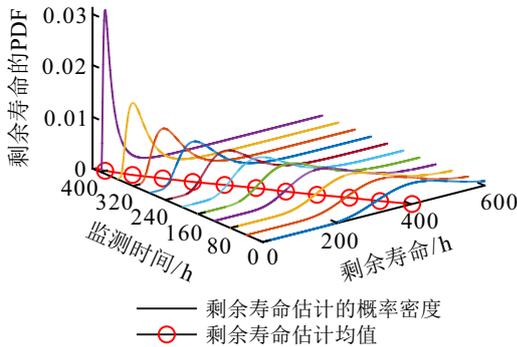


图8 系统剩余寿命预测分布

表2 系统RUL估计值和同步误差  $\varepsilon$  值

	监测时刻 $t/h$				
	80	160	240	320	400
RUL 估计值/h	323.64	243.67	163.92	84.19	4.49
估计误差/h	1.36	1.33	1.08	0.81	0.51
同步误差 $\varepsilon/r$	-0.019	0.062	-0.117	0.703	2.540

由图8和表2可见, RUL估计误差在0.51~1.36之间, 多次实验平均误差均小于1.3h, 在可接受范围内, 且随着执行器退化程度加深, 系统的同步误差在逐渐增大, 并在期望工作时限  $T_{\text{mission}} = 500 \text{ h}$  前(405h)系统完全失效.

#### 4.2.2 基于寿命预测的多轴同步系统延寿控制

通过PHM模块对舞台电机同步控制系统位置同步误差信号的在线分析, 根据寿命预测结果和期望

工作时限, 系统在230h时判决条件满足  $t_{\text{ex}} \geq 0$ , 延寿策略开始介入系统控制; 然后, PHM模块采用式(11)~(14)延寿调节律, 输出  $Q$ 、 $R$  矩阵元素调节值  $\Delta q$ 、 $\Delta r$ , 实现基于DMC的延寿控制. 有无延寿下控制作用的对比如图9所示.

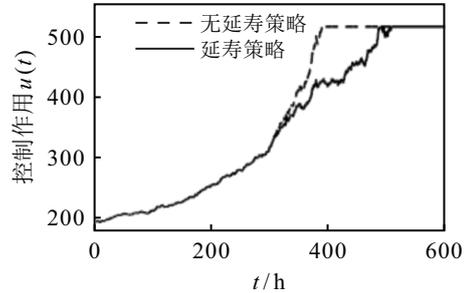


图9 有/无延寿下控制作用对比

相较于未施加延寿控制的情况, 施加延寿策略后控制作用明显减弱, 因而相应的变频器执行压力得到有效缓解. 图10和图11分别为有/无延寿控制下位置同步误差  $\varepsilon$  与位置跟踪误差  $e_{\text{ss}}$  的对比曲线. 由图10可见, 在延寿控制作用下位置同步误差  $\varepsilon$  超出失效阈值  $\varepsilon_{\text{th}} = 5r$  的时间由405h延长至521h, 即系统使用寿命被有效延长至521h. 且由图11可见, 在延寿后的失效时刻521h时, 舞台电机同步系统的位置跟踪误差  $e_{\text{ss}}(T_S) = 370r < e_{\text{ss}}^{\text{max}}$ , 即系统在维持性能可接受前提下, 同时满足控制任务的时限性要求. 至此, 所提出的同步控制系统寿命预测和延寿方法的有效性得到了验证.

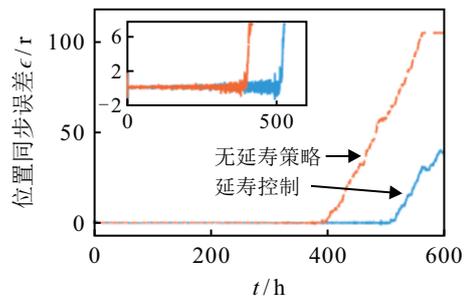


图10 有/无延寿下位置同步误差对比

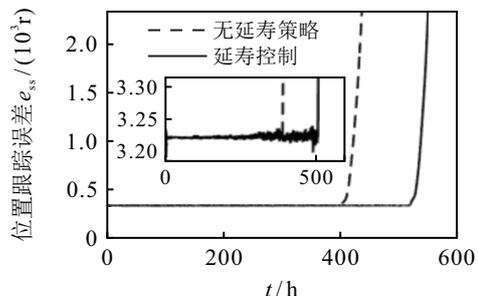


图11 有/无延寿控制下位置跟踪误差对比

#### 4.2.3 参数不同调节方式下延寿策略对比

为进一步体现所提出自适应延寿策略的优越性, 将其与已有  $Q$ 、 $R$  矩阵元素值调整量为固定参数的延

寿策略进行比较,后者调整值取为 $\Delta q = 2.19 \times 10^{-6}$ 、 $\Delta r = 4.68 \times 10^{-5}$ . 图12和图13分别为两种延寿策略下 $Q$ 、 $R$ 元素值的变化曲线与舞台电机同步系统位置同步误差 $\epsilon$ 变化曲线.

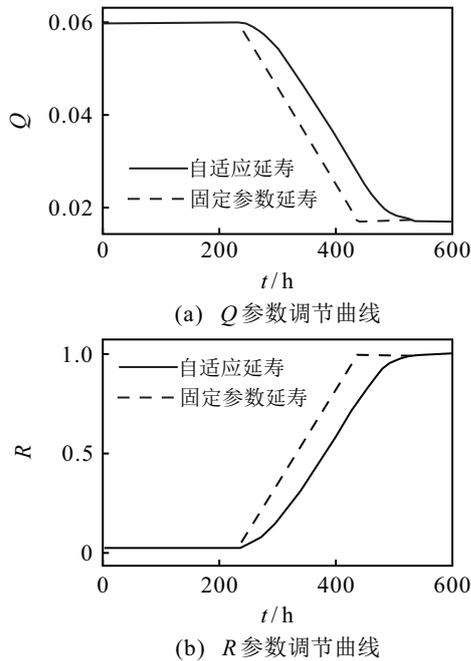


图 12 两种延寿策略下 $Q/R$ 变化曲线

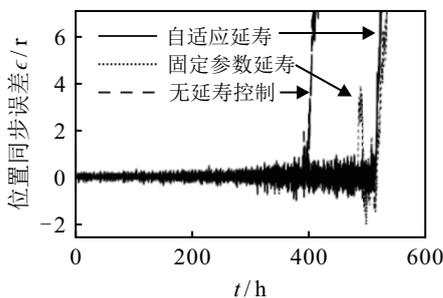


图 13 两种延寿策略下位置同步误差变化

由图12和图13可见,在整个延寿过程中,较固定参数调整量的延寿策略,所提出方法的 $Q$ 、 $R$ 元素值变化不仅更为平滑,且系统性能指标的波动也更为平稳,尤其是后期表现得更为显著.其根本原因在于,文中对 $Q$ 、 $R$ 元素值的调整,通过巧妙地设计调节律和引入期望延寿时长,使得调节量同时依赖于执行器的退化状态和延寿期许,因而在不同阶段可根据系统的实际退化程度和需求,动态自适应地调节控制参数,使得 $Q$ 、 $R$ 元素值变化既可更好契合退化过程前缓后快的特征,又兼顾了后期敏感区弱调的需求,规避了参数锐变滋生的抖动,也满足了延寿时长.这充分表明,文中关联执行器退化状态和需延寿时长的自适应参数调节律,在有效保障控制任务完成的同时,更好地维持了双电机系统的同步性能,即在系统性能与耐用性间取得了更好的折衷平衡.

## 5 结 论

本文针对一类存在执行器隐含退化的多轴同步控制系统,提出了一种基于系统寿命预测的DMC-PID延寿架构和方法.通过舞台多电机同步系统仿真实验,得到以下结论.

1)结合PHM与DMC提出的多轴同步控制系统延寿架构,借助于PHM对系统性能退化的感知、寿命预测和认知决策,通过串级方式引入DMC,并辅以自适应参数调整实现延寿功能,由于未改变原有同步控制系统的基础结构,因而易被工程界接受,更具工程可实现性.

2)通过深入分析执行器隐含退化状态与系统同步性能指标间的关系,给出多轴同步控制系统RUL定义和解析解,可在线实时预测多轴同步控制系统RUL,为延寿策略的实施提供可靠依据.

3)同时依赖于执行器退化状态和工作时长期许对延寿参数调节量 $\Delta q$ 、 $\Delta r$ 进行的巧妙设计,使得延寿过程中 $Q$ 、 $R$ 元素值的变化,能够自适应于多轴同步控制系统的实际退化程度,较已有固定参数调节律,对于系统控制性能与耐用性间的折衷平衡更具优势.

在实际工程中,对于多轴同步控制系统,执行器的退化不仅仅会发生在某一回路,且不可避免地存在个体差异、测量误差和时变等多源不确定性,这些均是多轴同步控制系统RUL预测和延寿需考虑的,也是后续需进一步深入研究和解决的问题.

## 参考文献(References)

- [1] Tian H, Zhang Y S, Lu X Y. Synchronous coordinated control of angle adjusting mechanism with multi-axis motion in wind tunnel[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(5): 1063-1068.
- [2] Zhong G L, Deng H, Xin G Y, et al. Dynamic hybrid control of a hexapod walking robot: Experimental verification[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8): 5001-5011.
- [3] Zhong G L, Shao Z Z, Deng H, et al. Precise position synchronous control for multi-axis servo systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(5): 3707-3717.
- [4] Perez-Pinal, Nunez C, Alvarez R, et al. Comparison of multi-motor synchronization techniques[C]. The 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. Busan, 2004: 1670-1675.
- [5] Ye Y H, Peng F, Huang Y K. Overview of multi-motor synchronous motion control technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(14): 2922-2935.
- [6] Mao H J, Li W, Wang K H, et al. Sensor fault tolerant

- switch strategy for multi-motor synchronous system based on ADRC[J]. *Journal of Shandong University: Engineering Science*, 2017, 47(5): 64-70.
- [7] Mao H J, Li W, Jiang D N. Fault diagnosis and switching tolerance for multi-motor synchronous control based on complex dynamical network[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(4): 843-851.
- [8] Chen W, Wu Y F, Du R H, et al. Fault diagnosis and fault tolerant control for the servo system driven by two motors synchronously[J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(1): 27-34.
- [9] Nian F S. Viewpoints about the prognostic and health management[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(8): 1-14.
- [10] Wang X, Hu C H, Ren Z Q, et al. Performance degradation modeling and remaining useful life prediction for aero-engine based on nonlinear Wiener process[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(2): 223291.
- [11] Ren Z Q, Si X S, Hu C H, et al. Remaining useful life prediction method for engine combining multi-sensors data[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(12): 223312.
- [12] Lei Y G, Li N P, Guo L, et al. Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 104: 799-834.
- [13] Li T M, Si X S, Liu X, et al. Data-model interactive remaining useful life prediction technologies for stochastic degrading devices with big data[J]. *Acta Automatica Sinica*, DOI: 10.16383/j.aas.c201068.
- [14] Pei H, Hu C H, Si X S, et al. Review of machine learning based remaining useful life prediction methods for equipment[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(8): 1-13.
- [15] Khan S, Yairi T. A review on the application of deep learning in system health management[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 107: 241-265.
- [16] Assessment R U L, Nguyen D N, Dieulle L, et al. Feedback control system with stochastically deteriorating actuator: Remaining useful life assessment[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, 47(3): 3244-3249.
- [17] Shi Q, Hu C H, Si X S, et al. Remaining useful lifetime prediction method of controlled systems considering performance degradation of actuator[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(5): 941-952.
- [18] Peng Y, Liu D T. Data-driven prognostics and health management: A review of recent advances[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(3): 481-495.
- [19] Hu C H, Shi Q, Si X S, et al. Data-driven life prediction and health management: State of the art[J]. *Information and Control*, 2017, 46(1): 72-82.
- [20] Sun B, Zeng S K, Kang R, et al. Benefits and challenges of system prognostics[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2012, 61(2): 323-335.
- [21] Zhou D H, Wei M H, Si X S. A survey on anomaly detection, life prediction and maintenance decision for industrial processes[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(6): 711-722.
- [22] Ray A. Life extending control of large-scale dynamical systems[C]. *Proceedings of the American Control Conference*. Arlington, 2001, 5: 3692-3701.
- [23] Langeron Y, Grall A, Barros A. Actuator health prognosis for designing LQR control in feedback systems[J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2013, 33: 979-984.
- [24] Si X S, Ren Z Q, Hu X X, et al. A novel degradation modeling and prognostic framework for closed-loop systems with degrading actuator[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(11): 9635-9647.
- [25] Bai L J, Huang M, Rao Z, et al. Lifetime prediction of IGBT based on GARCH model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(18): 5787-5796.
- [26] Si X S, Wang W B, Hu C H, et al. Remaining useful life estimation—A review on the statistical data driven approaches[J]. *European Journal of Operational Research*, 2011, 213(1): 1-14.
- [27] Yang H, Jiang B. Fault detection and accommodation via neural network and variable structure control[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2007, 5(3): 253-260.
- [28] Zhou D H, Liu Y, He X. Review on fault diagnosis techniques for closed-loop systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(11): 1933-1943.
- [29] Li W, Wang C W. Research on remaining useful life prediction and life extension of control system with implicit degradation of actuators[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2020, 48(12): 20-26.
- [30] Si X S, Hu C H, Zhou D H. Nonlinear degradation process modeling and remaining useful life estimation subject to measurement error[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(5): 530-541.

### 作者简介

李炜(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统建模、动态系统故障诊断与容错控制等研究, E-mail: liwei@lut.com;

颜伟俊(1997—), 男, 硕士生, 从事动态系统故障诊断与容错控制的研究, E-mail: yanweijun0908@163.com;

毛海杰(1978—), 女, 副教授, 博士, 从事动态系统故障诊断与容错控制等研究, E-mail: gsmahj@163.com.