

控制与决策

Control and Decision

雕刻机系统数据驱动建模与容错跟踪控制

董世建, 孟振, 时侠圣, 王雪松

引用本文:

董世建, 孟振, 时侠圣, 王雪松. 雕刻机系统数据驱动建模与容错跟踪控制[J]. *控制与决策*, 2023, 38(9): 2569–2577.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.2171>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于变速趋近律的Buck型变换器抗扰动控制](#)

Disturbance rejection control of Buck converters based on variable rate reaching law

控制与决策. 2021, 36(4): 893–900 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1073>

[高超声速飞行器间歇故障改进自适应容错控制](#)

Improved adaptive fault-tolerant control of intermittent faults in hypersonic flight vehicle

控制与决策. 2021, 36(11): 2627–2636 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0483>

[含混合储能的互联电力系统传感器容错负荷频率控制](#)

Sensor fault-tolerant load frequency control for multi-area interconnected power system with hybrid energy storage system

控制与决策. 2021, 36(5): 1069–1077 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1432>

[多航天器系统分布式固定时间输出反馈姿态协同跟踪控制](#)

Distributed fixed-time output feedback attitude coordination tracking control for multiple rigid spacecraft

控制与决策. 2021, 36(5): 1049–1058 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0968>

[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>

雕刻机系统数据驱动建模与容错跟踪控制

董世建, 孟 振, 时侠圣, 王雪松[†]

(1. 中国矿业大学 地下空间智能控制教育部工程研究中心, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 通过分析在速度控制运行模式的雕刻机系统输入角速度与输出位置之间的机理关系, 将其系统利用一个积分因子和一个稳定传递函数相连接的模型进行模拟. 通过引入微分滤波器对采样数据进行处理, 将难以辨识的临界不稳定积分模型转换成易于辨识的稳定模型. 提出一种能够精确估计带积分因子的递推最小二乘算法, 并采用辅助变量法消除因滤波引起的有色噪声的影响. 所提出算法可以确保在开环状态下对积分系统进行精确估计. 针对多轴雕刻机运动控制系统, 提出一种基于中间观测器的容错跟踪控制算法. 针对与输入通道匹配的过程故障, 设计基于故障估计值的容错控制反馈率以进行有效补偿; 对于不匹配故障, 通过调节中间观测器增益实现充分抑制. 最后, 通过与现有算法进行对比实验, 验证了所提出算法的可行性和优越性.

关键词: 雕刻机系统; 数据驱动; 建模; 微分滤波器; 过程故障; 容错控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.2171

引用格式: 董世建, 孟振, 时侠圣, 等. 雕刻机系统数据驱动建模与容错跟踪控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(9): 2569-2577.

Data-driven modelling and fault-tolerant tracking control for engraving machine systems

DONG Shi-jian, MENG Zhen, SHI Xia-sheng, WANG Xue-song[†]

(1. Engineering Research Center of Intelligent Control for Underground Space of Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: By analyzing the mechanism relationship between the input angular velocity and the output position of the engraving machine system in speed control mode, the system is simulated as a model connected by an integrating factor and a stable transfer function. By introducing a differential filter to process the sampling data, the critical unstable integrating model is transformed into a stable model which is easy to identify. This paper proposes a recursive least squares algorithm which can accurately estimate the model with integrating factor. Besides, the instrumental variables method is applied to eliminate the influence of colored noise caused by filtering. The proposed algorithm can ensure the accurate estimation of the integrating system in open loop state. A fault-tolerant tracking control algorithm based on the intermediate observer is proposed for the multi-axis engraving machine motion control system. Aiming at the process fault matching with the input channel, a fault-tolerant control feedback rate based on fault estimation value is designed to effectively compensate. For the mismatched fault, it can be fully suppressed by adjusting intermediate observer gain. Finally, compared with the existing algorithm, the feasibility and superiority of the proposed algorithm are verified by experiment tests.

Keywords: engraving machine system; data-driven; modeling; differential filter; process fault; fault-tolerant control

0 引言

多轴运动控制系统一般由计算机、控制器和执行器主机组成^[1], 计算机将设计与排版的信息自动传送到控制器中, 并由控制器驱动步进电机或伺服电机

生成三轴的运动轨迹^[2]. 随着网络化控制系统的迅速发展和制造业日益复杂化, 对多轴运动控制系统的控制精度和安全性能都提出了更高要求^[3-5]. 现有针对多轴运动控制系统的建模方法主要分为机理建模方

收稿日期: 2021-12-25; 录用日期: 2022-04-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61903347, 52072343); 江苏省自然科学基金项目(BK20210493, BK20210492).

责任编辑: 虞文武.

[†]通讯作者. E-mail: wangxuesongcumt@163.com.

法和数据驱动方法. 通过机理分析建立的机理模型会涉及复杂的微积分运算和大量的待定参数, 从而降低了其在生产应用中的便捷性^[6]; 而基于数据驱动的辨识建模方法具有理论简单且易于实现的优势^[7], 利用辨识得到的模型能显著提高生产系统的控制性能和鲁棒稳定性. 由于雕刻机系统不同的控制模态会使得系统工作在稳定类模型、非线性类模型或积分类模型等^[8], 需要根据控制模态选择对应的建模和控制方案.

目前, 多轴运动系统的控制可分为单轴点位控制、单轴跟踪控制以及轮廓跟踪控制^[9], 其中, 轮廓跟踪控制是多轴运动控制的主要控制任务. 轮廓跟踪控制的基本思想是考虑多轴之间的相互耦合影响, 以轮廓误差为控制器输入, 计算得到轮廓误差补偿量并附加到控制系统, 从而提高轮廓同步精度^[10]. 可以通过提高各单轴的控制精度改善轮廓误差精度, 也可通过补偿法对耦合轮廓误差进行补偿. 轮廓误差需要实时在线计算, 为减小计算量, 往往会对较小的轮廓误差进行近似处理^[11]. 对于光滑的轮廓可以考虑利用坐标变换法进行估计. 对于能获得轮廓期望轨迹解析表达式的跟踪问题比较容易解决^[12-14]. 在跟踪估计过程中, 曲率越大轨迹越难估计. 现有多轴运动控制系统往往是在网络化模式下进行工作, 会受到延时和扰动的影响^[15]. 基于观测器的控制策略可以将时延带来的不确定影响建模为系统扰动的一部分, 通过观测器对其进行观测, 并在反馈输入通道中加入相应扰动补偿量, 从而消除时延对系统的影响^[16]. 因此, 设计容错性能好的控制器是实现多轴运动系统精确控制的关键.

轮廓跟踪控制一直都是国内外科科研工作者的研究热点. 文献[17]提出了用于补偿轮廓跟踪误差的交叉耦合控制(cross-coupled control, CCC)法. 对于具有重复任务性质的跟踪控制问题, 可通过迭代学习控制(iterative learning control, ILC)与CCC结合的方法, 对历史数据不断学习以提高跟踪精度^[18]. 文献[19]采用任务坐标系(task coordinate frame, TCF)上的法向误差来近似轮廓误差的策略, 提出了一种新的轮廓跟踪控制方法. 文献[20]基于所需轮廓的几何形状进行全局定义, 提出了一种性能更优越的全局坐标任务系(global task coordinate frame, GTCF)的跟踪控制方法. 文献[21]结合学习自适应鲁棒控制方法(learning adaptive robust control, LARC)解决了因系统参数不确定性和扰动引起的强耦合动态跟踪问题. 与此同时, 结合模糊逻辑、神经网络等智能技术所设计的控制策略也有效地提高了多轴运动系统的跟

踪控制精度^[22-23]. 利用数据驱动所建立的基准模型, 综合考虑未建模动态、摩擦力和外部扰动等不利因素, 设计轮廓跟踪控制器以抑制扰动的影响, 是实现多轴运动控制系统精确跟踪控制需要重点解决的问题.

本文以多轴雕刻机系统为对象, 进行数据驱动辨识建模理论和容错跟踪控制方案研究. 针对速度控制运行模式的雕刻机系统, 通过分析输入与输出之间的机理关系确定系统模型结构和阶次. 利用微分滤波器将带积分环节的模型转换成易于辨识的稳定模型, 并构造辅助模型和辅助变量以实现模型参数一致估计. 针对带过程故障的雕刻机运动控制系统中速度跟踪控制和多轴轮廓跟踪控制问题, 将过程故障分成匹配部分和不匹配部分, 利用基于中间观测器的容错控制策略进行控制. 匹配故障和控制量处于同一个通道, 可通过中间观测器进行估计和补偿. 不匹配故障和控制量不在一个通道上, 无法通过容错控制器进行补偿, 本文通过调节中间观测器增益来抑制不匹配故障对系统的影响. 最后, 通过实验验证了所提出建模与控制算法的有效性和优越性.

1 计算机数控雕刻机系统

本文研究的雕刻机系统如图1所示, 主要包括: PC机、通信接口板、以太网物理层和伺服驱动系统.

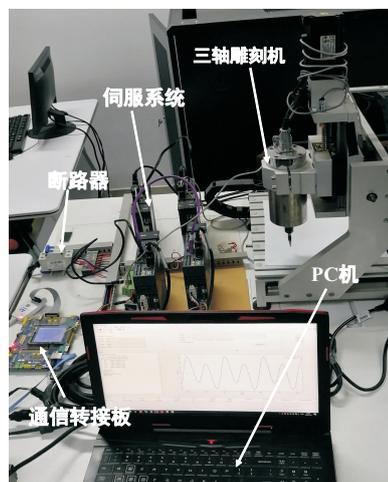


图1 雕刻机系统

常见的雕刻机控制方式包括位置模式控制、速度模式控制、扭矩模式控制和混合模式控制. 利用速度模式对雕刻机系统进行控制, 能取得更好的控制精度, 其位置输出具有临界不稳定积分特性. 同一执行机构中的3个维度的机理关系是相同的, 建模时可以只考虑单轴系统的运行状态. 但是, 设计控制算法时, 需要考虑轴之间的耦合关系, 以提高控制精度. 当驱动器工作于速度模式时, 以位置为输出量的伺服系统物理环节结构框图如图2所示.

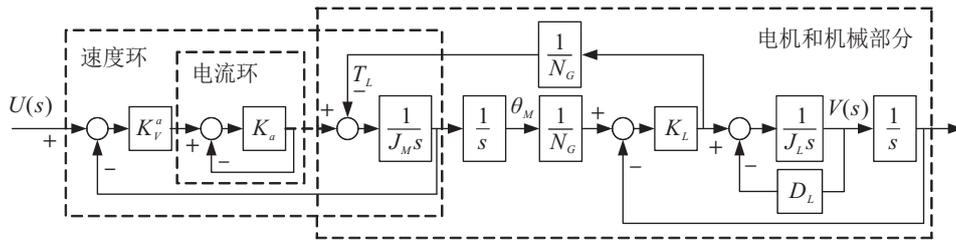


图2 伺服系统模型结构框图

根据梅森公式可以求出该系统输出端 $V(s)$ 到输入端 $U(s)$ 的传递函数为

$$G(s) = \frac{U(s)}{V(s)} = \frac{K_v^\alpha K_a K_L / [s^3(1 + K_a) J_M J_L N_G^2 + s^2 N_G^2 (J_L K_v^\alpha K_a + J_M D_L + J_M K_a D_L) + s(J_L K_L + N_G^2 K_v^\alpha K_a D_L + K_a K_L J_L + K_a K_L D_L) + K_a K_L D_L]}{1} \quad (1)$$

其中: K_v^α 为速度放大增益, K_a 为电流环增益, K_L 为弹性系数, N_G 为滚珠丝杠传动比, J_M 为永磁同步伺服电动机转动惯量, J_L 为负载转动惯量, D_L 为黏滞摩擦系数。

机理模型包含很多难以精确确定的参数. 单轴伺服驱动系统在 1/20 额定速度到 1/3 额定速度情况下, 系统整体结构可以简化为图3所示的结构。

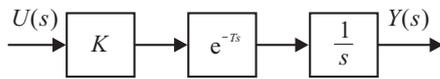


图3 简化模型结构框图

伺服系统简化模型的传递函数关系为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ts}}{s} \quad (2)$$

其中: K 为惯性环节增益, T 为时间常数。

当时间常数 T 较小时, 式(2)可以近似写为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{s(Ts + 1)} \quad (3)$$

在离散域中, 式(3)可以表示为

$$\begin{cases} x(k) = \frac{B(z^{-1})}{(1 - z^{-1})A(z^{-1})} u(k), \\ y(k) = x(k) + v(k). \end{cases} \quad (4)$$

其中: $A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a}$, $B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b}$ 。

2 基于微分滤波的建模算法

对 $(1 - z^{-1})A(z^{-1})$ 展开, 可得

$$(1 - z^{-1})A(z^{-1}) = 1 + \dots + (a_{n_a} - a_{n_a-1})z^{-n_a} - a_{n_a}z^{-(n_a+1)}. \quad (5)$$

定义参数向量 θ_0 和信息向量 φ_0 分别为

$$\theta_0 = [(a_1 - 1), \dots, (a_{n_a} - a_{n_a-1}) - a_{n_a}, b_1, \dots, b_{n_b}]^T \in \mathbb{R}^{n_0}, \quad (6)$$

$$\varphi_0(k) = [-x(k-1), \dots, -x(k-n_a-1), u(k-1), \dots, u(k-n_b)]^T, \quad (7)$$

其中 $n_0 = n_a + n_b + 1$ 。

无噪声输出 $x(k)$ 表示为 $x(k) = \varphi_0^T(k)\theta_0$ 。容易推导出关于 $\hat{\theta}_0(k)$ 的递推最小二乘算法, 会得到 $n_a + 1$ 个估计参数, 而不是原系统 n_a 个待估计参数. 对于含有噪声的系统, 标准最小二乘算法可以得到未知参数期望真值. 但是, 参数估计的方差和噪声相关并不为零, 使得参数之间不满足严格积分关系, 造成模型不匹配。

为解决这一问题, 采用一阶标准微分滤波器 $F(z^{-1}) = 1 - z^{-1}$, 对输入侧和输出侧同时进行滤波, 原模型可表示为

$$\begin{cases} F(z^{-1})x(k) = F(z^{-1})\frac{B(z^{-1})}{(1 - z^{-1})A(z^{-1})}u(k), \\ F(z^{-1})y(k) = F(z^{-1})x(k) + F(z^{-1})v(k). \end{cases} \quad (8)$$

进一步, 定义

$$Y(k) = F(z^{-1})y(k) = y(k) - y(k-1), \quad (9)$$

$$X(k) = F(z^{-1})x(k) = x(k) - x(k-1), \quad (10)$$

$$w(k) = F(z^{-1})v(k) = v(k) - v(k-1), \quad (11)$$

原模型可进一步表示为

$$\begin{cases} X(k) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(k), \\ Y(k) = X(k) + w(k). \end{cases} \quad (12)$$

可知滤波过程只对输出数据进行处理, 输入数据并未发生变化. 原系统参数估计问题已经转换成一个求解稳定输出误差模型的问题. 需要注意的是白噪声 $v(k)$ 成了临近相关的有色噪声 $w(k) = (1 - z^{-1}) \times v(k)$. 但 $w(k)$ 期望仍然为零, 其方差和 $v(k)$ 略有不同. 可以采用辅助变量最小二乘算法实现参数无偏估计. 定义参数向量 θ 和信息向量 φ 分别为

$$\theta = [a_1, \dots, a_{n_a}, b_1, \dots, b_{n_b}]^T \in \mathfrak{R}^n, \quad (13)$$

$$\varphi(k) = [-X(k-1), \dots, -X(k-n_a), u(k-1), \dots, u(k-n_b)]^T \in \mathfrak{R}^n, \quad (14)$$

其中 $n = n_a + n_b$.

无噪声输出 $X(k)$ 可以写为

$$X(k) = \varphi^T(k)\theta. \quad (15)$$

模型(12)可写为如下线性回归形式:

$$Y(k) = \varphi^T(k)\theta(k) + w(k). \quad (16)$$

本文选取辅助变量

$$\varphi^*(k) = [-\hat{X}(k-1-m), \dots, -\hat{X}(k-n_a-m), u(k-1), \dots, u(k-n_b)]^T, \quad (17)$$

其中 $m \geq 1$. 从而可得基于辅助变量的最小二乘辨识算法为

$$K(k) = \frac{P(k-1)\varphi^*(k)}{\lambda + \varphi^{*T}(k)P(k-1)\varphi^*(k)}, \quad (18)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda}(I - K(k)\varphi^{*T}(k))P(k-1), \quad (19)$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[Y(k) - \hat{\varphi}^T(k)\hat{\theta}(k-1)]. \quad (20)$$

未知内部变量 $x(k-i)$, 可利用辅助模型 $\hat{x}(k) = \hat{\varphi}_0^T(k)\hat{\theta}_0(k-1)$ 进行估计. 为提高算法估计精度和收敛速率, 构造如下自适应遗忘因子:

$$\lambda(k) = \frac{1}{(1 + \|\hat{\theta}(k) - \hat{\theta}(k-1)\|)}, \lambda(k) \geq \lambda_{\min}. \quad (21)$$

本文所提出辨识算法中所涉及的待定参数初值赋值问题与标准最小二乘法类似: 待估计参数 $\hat{\theta}(k)$ 赋予一个较小的初始参数; 协方差矩阵 $P(k)$ 赋予较大初值以利于算法收敛; 遗忘因子初值赋值为1, 其最小值 λ_{\min} 一般可以赋0.95~0.99之间数值, 自适应遗忘因子会随着算法收敛情况进行自动调节.

本文的辨识思想可进一步拓展到含有 p 个积分因子的输出误差模型, 即采用 p 阶微分滤波器 $F_p(z^{-1}) = (1 - z^{-1})^p$ 对输出数据进行滤波处理. 对于待辨识系统中可能出现的有色噪声、非零周期扰动、阶跃扰动等非高斯扰动, 微分滤波不会增加扰动的辨识难度, 通过参数扩维技术便可实现有效的辨识建模^[6].

3 基于中间观测器的容错跟踪控制

轮廓误差 $\varepsilon(k)$ 定义为实际轮廓位置 $P_r(k)$ 与期望轨迹 S 的最短距离, 即

$$\varepsilon(k) = \min_{P_d \in S} \|P_d - P_r\|_2. \quad (22)$$

其中: $\|\cdot\|_2$ 为欧几里德 (Euclid) 2 范数, $P_d(t)$ 为期望轨迹上的点.

轮廓误差如图4所示. 两轴系统直线轮廓误差可计算为 $\varepsilon = -e_x \sin \theta + e_y \cos \theta$. 圆形轮廓误差可计算为 $\varepsilon = \sqrt{(x_r - x_0)^2 + (y_r - y_0)^2} - R$. 一般的轨迹可通过直线轨迹和圆弧轨迹进行近似拟合.

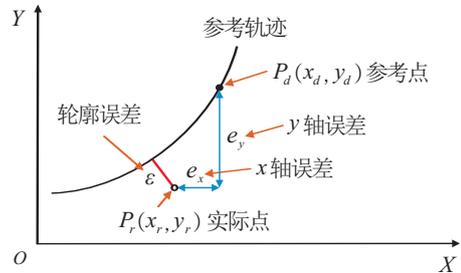


图4 轮廓误差示意图

以平面两轴控制系统为例介绍本文所提出的交叉耦合控制思想. 两轴平面轮廓可分为直线轮廓、圆弧轮廓和任意轮廓3种. 圆弧轮廓的轨迹跟踪控制理论结果可以直接用于直线轮廓的跟踪控制, 也可变换扩展到任意轮廓, 具有很好的代表性. 常见圆形轮廓轨迹如图5所示.

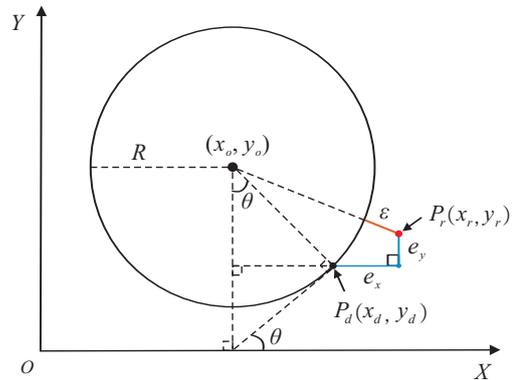


图5 跟踪圆形轮廓轨迹

给定半径为 R 、运行时间为 T 、圆心位置为 $o_r = (x_0, y_0)$ 的圆弧轮廓轨迹如下:

$$\begin{cases} v_{0x}(t) = R \cos(\omega_r \pi t) + x_0; \\ v_{0y}(t) = R \sin(\omega_r \pi t) + y_0; \\ \omega_r = 2/T, 0 \leq t \leq T; \\ v_x(0) = x_0 + R, v_y(0) = y_0. \end{cases} \quad (23)$$

圆形轮廓误差可表示为

$$\varepsilon = -\left(\sin \theta - \frac{e_x}{2R}\right) \cdot e_x + \left(\cos \theta + \frac{e_y}{2R}\right) \cdot e_y. \quad (24)$$

其中: $e_x = x_d - x_r, e_y = y_d - y_r$, 交叉耦合增益为 $C_x = \sin \theta - \frac{e_x}{2R}$ 和 $C_y = \cos \theta + \frac{e_y}{2R}$.

基于交叉耦合控制的轮廓误差补偿控制率为

$$\begin{cases} u_C(k) = \Delta u_C(k) + u_C(k-1), \\ \Delta u_C(k) = k_p(\varepsilon(k) - \varepsilon(k-1)) + k_i\varepsilon(k) + \\ \quad k_d\{\varepsilon(k) - 2\varepsilon(k-1) + \varepsilon(k-2)\}, \\ u_{C_x}(k) = C_x u_C(k), \\ U_x(k) = u_x(k) - u_{C_x}(k), \\ u_{C_y}(k) = C_y u_C(k), \\ U_y(k) = u_y(k) + u_{C_{xy}}(k). \end{cases} \quad (25)$$

其中: k_p 、 k_i 和 k_d 为增量式PID控制器的参数, $u_x(k)$ 和 $u_y(k)$ 为经过交叉耦合计算得到的X轴和Y轴补偿量, $U_x(k)$ 和 $U_y(k)$ 为X轴和Y轴控制输入量。

基于交叉耦合的扩张状态观测器只能抑制与输入匹配的扰动,无法解决输入不匹配扰动和一般的过程故障。针对存在过程故障的多轴运动控制系统,本文采用中间观测器的容错跟踪控制方法。其控制思想是考虑系统存在过程故障,并将过程故障分解为匹配不确定分量和不匹配不确定分量进行抑制。

为说明这一控制思想,考虑如下带有过程故障的离散状态空间模型:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Ef(k) + v(k), \\ y(k) = Cx(k). \end{cases} \quad (26)$$

其中: $f(k)$ 为故障信号, E 为故障增益矩阵, $v(k)$ 为随机噪声。

1) 对于 $E = B$ 的执行器故障。

引入中间变量 $\xi(k) = f(k-1) - \tau x(k)$ 和 $\tau = \omega B^T$ 。其中: τ 为可设计增益, ω 为一个可设计的标量。所提出的中间观测器为

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= \bar{A}\hat{x}(k) + B\hat{\xi}(k) + Bu(k) + L(y(k) - \hat{y}(k)), \\ \hat{\xi}(k+1) &= (I - \tau B)\hat{\xi}(k) + (\tau - \tau B\tau - \tau A)\hat{x}(k) - \tau Bu(k). \end{aligned} \quad (27)$$

其中: $\hat{x}(k)$ 、 $\hat{\xi}(k)$ 分别为 $x(k)$ 、 $\xi(k)$ 的估计值,且矩阵 $\bar{A} = A + B\tau$ 。可得误差系统为

$$e_x(k+1) = (\bar{A} - LC)e_x(k) + Be_\xi(k) + B\Delta f(k), \quad (28)$$

$$\begin{aligned} e_\xi(k+1) &= (I - \tau B)e_\xi(k) + (\tau - \tau B\tau - \tau A)e_x(k) + \\ &(I - \tau B)\Delta f(k). \end{aligned} \quad (29)$$

基于中间观测器的反馈控制率为

$$u(k) = -K(y(k) - r(k)) - \hat{f}(k-1). \quad (30)$$

其中: $r(k)$ 为参考轨迹信号, K 为反馈增益, $\hat{f}(k-1)$ 为故障信号 $k-1$ 时刻的估计值。

2) 对于一般过程故障,即 $E \neq B$ 时。

一般过程故障可以分解为匹配的执行器故障和不匹配的过程故障,即

$$Ef(k) = BB^+Ef(k) + B^\perp B^{\perp+}Ef(k). \quad (31)$$

其中: B^+ 为 B 的广义逆矩阵,即 $B^+ = (B^T B)^{-1} B^T$; B^\perp 为由 B^+ 的列张成的零空间。

待控制系统状态可以改写为

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + B\zeta(k) + \zeta(k), \\ \zeta(k) = B^+Ef(k), \\ \zeta(k) = B^\perp B^{\perp+}Ef(k). \end{cases} \quad (32)$$

引入中间变量 $\xi(k) = \zeta(k-1) - \mu x(k)$ 和 $\mu = \sigma B^T$ 。其中: μ 为可设计增益, σ 为一个可设计的标量。所提出的中间观测器为

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= \bar{A}\hat{x}(k) + B\hat{\xi}(k) + Bu(k) + L(y(k) - \hat{y}(k)), \\ \hat{\xi}(k+1) &= (I - \mu B)\hat{\xi}(k) + (\mu - \mu B\mu - \mu A)\hat{x}(k) - \mu Bu(k), \\ \hat{\xi}(k-1) &= \hat{\xi}(k) + \mu\hat{x}(k), \end{aligned} \quad (33)$$

其中 $\bar{A} = A + B\mu$ 。可以得到误差系统为

$$e_x(k+1) = (\bar{A} - LC)e_x(k) + Be_\xi(k) + B\Delta\zeta(k) + \zeta(k), \quad (34)$$

$$\begin{aligned} e_\xi(k+1) &= (I - \mu B)e_\xi(k) + (\mu - \mu B\mu - \mu A)e_x(k) + \\ &(I - \mu B)\Delta\zeta(k) - \zeta(k). \end{aligned} \quad (35)$$

基于中间观测器的反馈控制率为

$$u(k) = -K[y(k) - r(k)] - \hat{\zeta}(k-1). \quad (36)$$

基于中间观测器的容错跟踪控制框图如图6所示。

所提出控制算法中, ω 是中间观测器增益,在线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)有解的情况下, ω 越大,估计精度越高,但伴随超调; ω 越小,精度越低,超调减少。过程故障可以分成匹配部分和不匹配部分。匹配故障与控制量处于同一个通道,可通过中间观测器进行估计,利用容错控制器消除匹配部

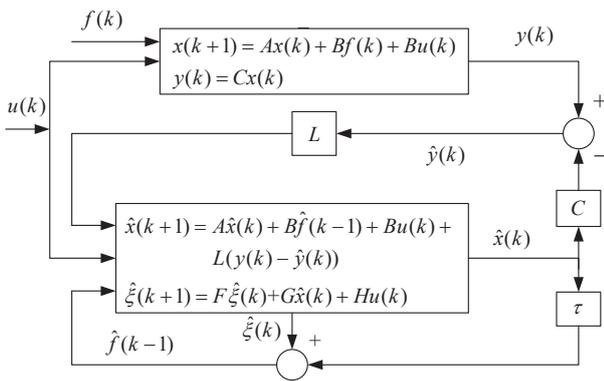


图6 基于中间观测器的容错跟踪控制法框架图

分对系统的影响. 对于不匹配部分, 其与控制量不在一个通道上, 无法通过容错控制器进行补偿, 可以通过调节中间观测器增益 ω 抑制其对系统的影响.

4 雕刻机系统建模和轮廓跟踪控制实验

4.1 雕刻机速度模式建模实验

实验时采集雕刻机双轴运动控制系统 X 轴和 Y 轴的计算控制量 U_x 和 U_y (单位: rpm), 对应的实时坐标位置 Pos_x 和 Pos_y (单位: mm), 构成两组待辨识数据, 即 U_x 、 Pos_x 和 U_y 、 Pos_y . 初始位置设定为 $x = 30$ mm, $y = 20$ mm. 为充分激励系统, 输入激励信号由频率和幅值各不相同的多正弦信号叠加而成. 并设定信号变化周期为 5 ms 即 0.005 s, 有

$$u(k) = 10 \sin\left(\frac{\pi}{4} \times 0.005k\right) + 30 \sin\left(\frac{\pi}{2} \times 0.005k\right) + 60 \sin\left(\frac{3\pi}{4} \times 0.005k\right) + 90 \sin(\pi \times 0.005k) + 120 \sin\left(\frac{5\pi}{4} \times 0.005k\right), \quad (38)$$

共采集 4000 点信号用于辨识建模. 采集到的 X 轴系统的输入输出数据如图 7 所示.

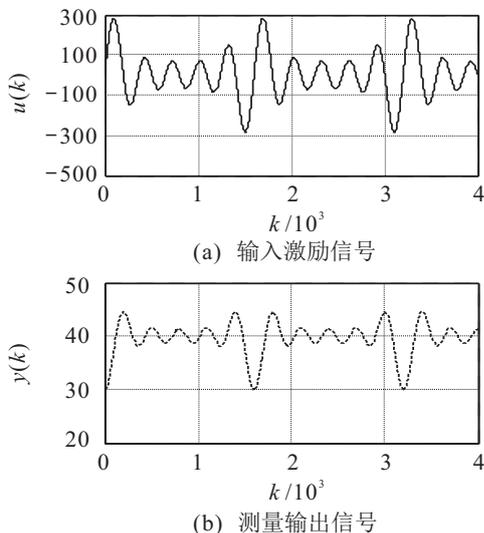


图7 X轴上的输入与输出采样信号

采用所提出的辨识算法进行估计, 取初值 $\hat{\theta}(0) = 10^{-3}I_{2 \times 1}$, $P(0) = 10^{10}I_{2 \times 2}$, $\lambda_{\min} = 0.995$, $\lambda(0) = 1$. 取 $m = 1$, 构造辅助变量 $\varphi^*(k) = [-X(k-1-1), u(k-1)]^T$. 为了对比所提出算法的优越性, 对常规最小二乘法也进行了估计. 对于 X 轴控制系统, 所提出算法的辨识结果记为 $\hat{\theta}_X(k)$, 常规最小二乘法结果记为 $\hat{\theta}_{X0}(k)$. 所得模型参数分别为

$$\hat{\theta}_X = [-0.6907, 1.2869 \times 10^{-4}]^T, \quad (39)$$

$$\hat{\theta}_{X0} = [-1.3594, 0.3593, 2.4276 \times 10^{-4}]^T. \quad (40)$$

由于本文研究对象在速度模式下的输入控制量单位是 rpm, 输出位移量是 mm, 丝杠传动比是 1r:5 mm. 使得估计所得增益较小, 存在数量级差异. 常规最小二乘法参数 $\hat{\theta}_{X0}(1) + \hat{\theta}_{X0}(2) = -1.0001 \neq -1$, 可知所辨识的系统并不是积分系统. 对于 X 轴控制系统, 所提出算法估计的模型为

$$\begin{cases} x(k) = \frac{1.2869 \times 10^{-4} z^{-1}}{(1-z^{-1})(1-0.6907z^{-1})} u(k), \\ y(k) = x(k); \end{cases} \quad (41)$$

常规最小二乘法估计模型为

$$\begin{cases} x(k) = \frac{2.4276 \times 10^{-4} z^{-1}}{1-1.3594z^{-1}+0.3593z^{-2}} u(k), \\ y(k) = x(k). \end{cases} \quad (42)$$

对于实际的系统, 机理分析只能获得模型的结构和阶次, 无法提前预知模型的真实参数. 可以考虑利用实际系统预测输出与真实输出之间的差值来衡量模型的估计精度. 利用实验所用的输入信号分别激励以上两个估计模型, 所估计模型预测输出和采样的真实输出对比结果如图 8 所示. 所提出算法的输出估计误差 $Y_{err} = 0.079$, 常规最小二乘法估计误差 $Y_{err} = 28.95$. 可以看出, 所提出算法能很好地预测系统输出, 从而充分表明了本文建模方法辨识模型的有效性和精确性. 而常规最小二乘法具有较大的估计误差, 且随着采样点的增加预测误差逐渐增大, 说明辨识的模型阶次与真实系统不匹配.

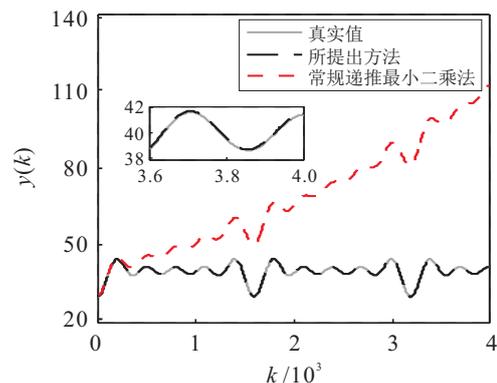


图8 不同算法的估计系统输出响应对比

同理,可得Y轴系统所提出算法的估计模型为

$$y(k) = \frac{1.5624 \times 10^{-4} z^{-1}}{(1 - z^{-1})(1 - 0.6426z^{-1})} u(k); \quad (43)$$

其常规最小二乘辨识算法估计模型为

$$y(k) = \frac{2.1311 \times 10^{-4} z^{-1}}{1 - 1.4476z^{-1} + 0.4474z^{-2}} u(k). \quad (44)$$

4.2 雕刻机系统轮廓跟踪控制

辨识得到的X轴和Y轴系统模型可以转换成状态空间模型. 其中:X轴状态空间模型为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.6907 & 1.6907 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k), \\ y(k) = [0 \quad 1.2869 \times 10^{-4}] \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix}; \end{cases} \quad (45)$$

Y轴状态空间模型为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.6426 & 1.6426 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k), \\ y(k) = [0 \quad 1.5624 \times 10^{-4}] \begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (46)$$

X轴和Y轴运动参考轨迹设置为 $x(k) = 10 \times \sin\left(\frac{1}{200} \times \frac{1}{4} \pi k\right)$, $y(k) = 10 \cos\left(\frac{1}{200} \times \frac{1}{4} \pi k\right)$, 即半径 $R = 10 \text{ mm}$ 的圆. 采用周期为 $T = \frac{1}{200} \text{ s}$, 共采样 $N = 2000$ 点.

为验证所设计的容错控制器对雕刻机双轴运动系统的轮廓跟踪控制效果以及抗干扰性能, X轴和Y轴分别加入服从高斯分布的随机扰动 $v = 0.5 \text{ randn}()$. 所加入的均值非零动态故障分别设计为 $x_d = 15 \sin\left(0.03 \times \frac{1}{4} \pi k\right) + 5 \sin\left(0.02 \times \frac{1}{4} \pi k\right) + 5$ 和 $y_d = 10 \cos\left(0.02 \times \frac{1}{4} \pi k\right) + 5 \cos\left(0.01 \times \frac{1}{4} \pi k\right) + 5$. 为对比说明所提出控制算法的优势, 文献[16]中所提出的基于扩张状态观测器的非容错控制算法也进行了控制测试. X轴的中观测器的控制器增益 $\omega_{cx} = 0.5$, 扩张状态观测器反馈控制率 $k_x = 100$; Y轴控制器增益 $\omega_{cy} = 0.4$, 反馈控制率 $k_y = 100$; X轴和Y轴交叉耦合控制率增益分别取 $k_{ccx} = 200$ 和 $k_{ccy} = 200$.

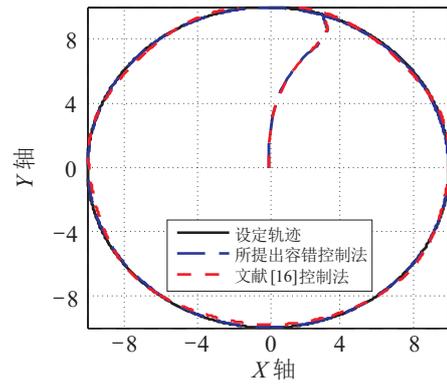


图9 不同算法设定轨迹的跟踪结果

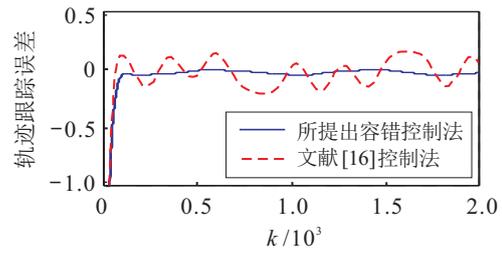


图10 设定轨迹的跟踪误差

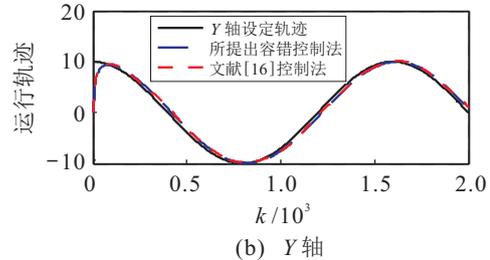
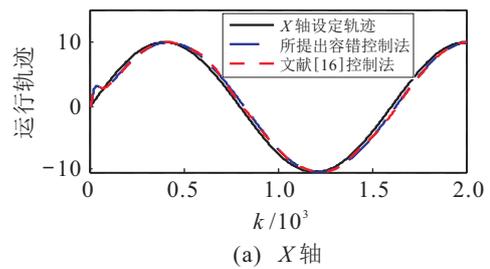


图11 X轴和Y轴跟踪轨迹

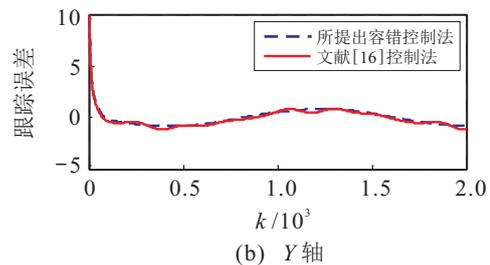
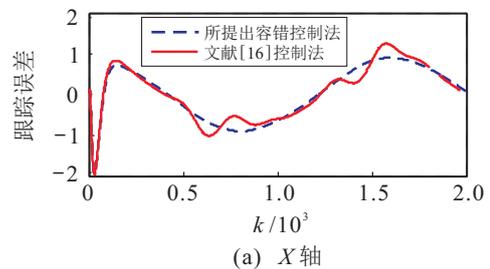


图12 X轴和Y轴跟踪轨迹误差

两种控制算法对所设定的圆形轨迹的跟踪结果如图9所示. 不同控制算法所对应的跟踪误差如图10所示. 两轴设定的跟踪轨迹结果和跟踪误差如图11

和图12所示. 容错控制算法中X轴和Y轴所设定的扰动估计结果如图13所示. 两种控制算法的跟踪误差 $y_{\text{error}} = \text{mean}\left(\sum_{k=1}^N |y(k) - \hat{y}(k)|\right)$ 如表1所示.

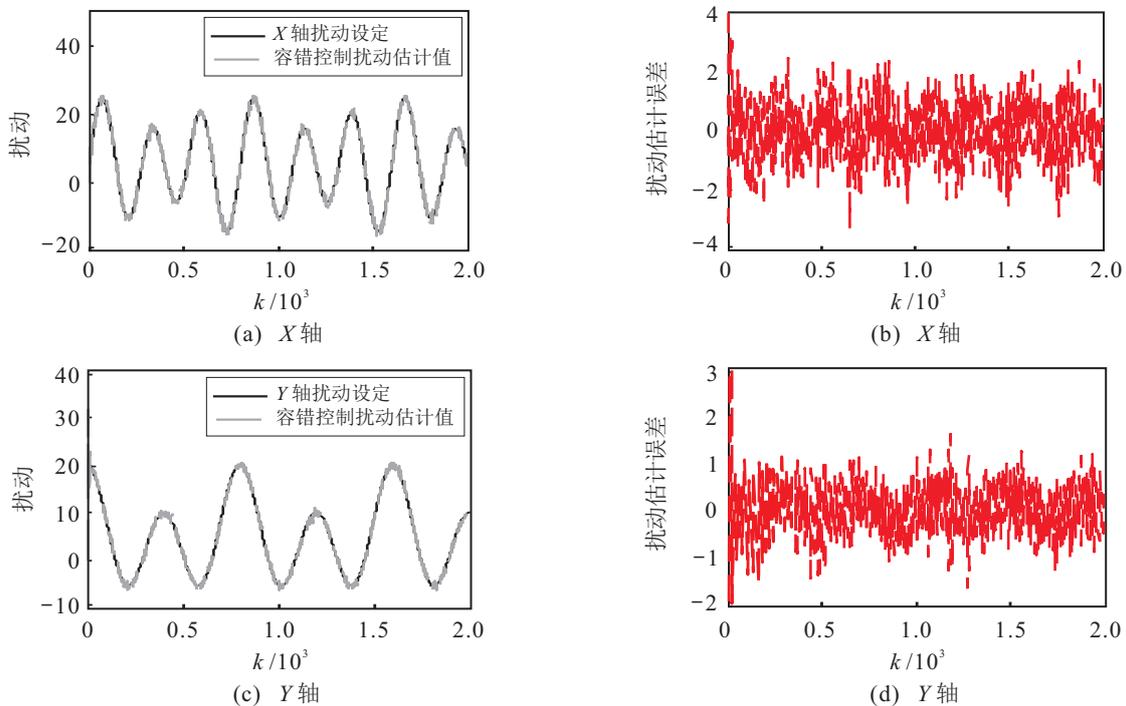


图13 容错控制算法扰动估计结果

表1 不同算法的跟踪误差值

	y_{error}	y_{yerror}	y_{error}
容错控制法	0.5636	0.6009	0.1068
无容错控制法	0.5638	0.6163	0.1626

从图9和图10中可以看出,文献[16]中的控制算法由于未采用容错控制策略,受扰动和噪声的影响而具有较大的跟踪估计误差和波动,使得在加工圆轨迹工件时工件的半径不统一,影响产品的生产质量. 结合图11、图12和图13的控制结果可知,本文所提出的基于中间观测器的容错控制算法对扰动进行了很好的估计,各个轴的跟踪效果也具有更高的控制跟踪精度和控制稳定性.

5 结论

针对速度控制运行模式的雕刻机系统,通过分析输入角速度与输出位置之间的机理关系确定了系统模型结构和阶次. 系统模型抽象为一个积分环节和一个稳定传递函数环节相串联的随机输出误差模型. 本文利用微分滤波器将模型转换成易于辨识的稳定模型,应用所构造的辅助模型和辅助变量消除了随机测量噪声的影响,实现了模型参数的一致估计. 针对带过程故障的雕刻机运动控制系统中速度

跟踪控制和多轴轮廓跟踪控制问题,利用基于中间观测器的容错跟踪控制方法进行控制. 设计中间观测器实现对匹配故障的实时估计,利用带有估计值的容错控制反馈率实现对匹配故障的实时补偿. 通过调节中间观测器增益参数,充分抑制与输入通道不匹配的故障. 最后,通过实验室多轴雕刻机系统验证了所提出辨识算法和容错轮廓跟踪控制的有效性和优越性.

参考文献(References)

- [1] 于欣波, 贺威, 薛程谦, 等. 基于扰动观测器的机器人自适应神经网络跟踪控制研究[J]. 自动化学报, 2019, 45(7): 1307-1324.
(Yu X B, He W, Xue C Q, et al. Disturbance observer-based adaptive neural network tracking control for robots[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(7): 1307-1324.)
- [2] 杨光红, 张志慧. 基于区间观测器的动态系统故障诊断技术综述[J]. 控制与决策, 2018, 33(5): 769-781.
(Yang G H, Zhang Z H. Review of interval observer based fault diagnosis techniques for dynamic systems[J]. Control and Decision, 2018, 33(5): 769-781.)
- [3] Li H Y, Wu Y, Chen M. Adaptive fault-tolerant tracking control for discrete-time multiagent systems via reinforcement learning algorithm[J]. IEEE Transactions

- on Cybernetics, 2021, 51(3): 1163-1174.
- [4] Wu Q, Dong S J, Zhang W A, et al. Online modeling of the CNC engraving system with dead-zone input nonlinearity[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(1): 774-782.
- [5] Ye D, Yang G H. Adaptive fault-tolerant tracking control against actuator faults with application to flight control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(6): 1088-1096.
- [6] Yu C P, Chen J, Li S K, et al. Identification of affinely parameterized state-space models with unknown inputs[J]. Automatica, 2020, 122: 109271.
- [7] 于丰, 毛志忠, 贾明兴, 等. 一种Hammerstein-Wiener系统的递归辨识算法[J]. 自动化学报, 2014, 40(2): 327-335.
(Yu F, Mao Z Z, Jia M X, et al. Recursive identification method for a class of Hammerstein-Wiener systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(2): 327-335.)
- [8] 于淼, 刘建昌, 王洪海, 等. 基于Laguerre滤波器的核范数子空间辨识[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(12): 2663-2670.
(Yu M, Liu J C, Wang H H, et al. Nuclear norm subspace identification based on Laguerre filters[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(12): 2663-2670.)
- [9] 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.
- [10] Zhu J W, Gu C Y, Ding S X, et al. A new observer-based cooperative fault-tolerant tracking control method with application to networked multi-axis motion control system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(8): 7422-7432.
- [11] Haddadin S, de Luca A, Albu-Schäffer A. Robot collisions: A survey on detection, isolation, and identification[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(6): 1292-1312.
- [12] 郝立颖, 韩金城, 郭戈, 等. 带有推进器故障的船舶动力定位系统的鲁棒滑模容错控制[J]. 控制与决策, 2020, 35(6): 1291-1296.
(Hao L Y, Han J C, Guo G, et al. Robust sliding mode fault-tolerant control for dynamic positioning system of ships with thruster faults[J]. Control and Decision, 2020, 35(6): 1291-1296.)
- [13] Zhu J W, Yang G H, Zhang W A, et al. Cooperative fault tolerant tracking control for multiagent systems: An intermediate estimator-based approach[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2018, 48(10): 2972-2980.
- [14] Jiang Y L, Liu J C, Wang S Q. A consensus-based multi-agent approach for estimation in robust fault detection[J]. ISA Transactions, 2014, 53(5): 1562-1568.
- [15] 王申全, 王越男, 庞基越, 等. 基于网络的离散切换时滞系统故障检测和控制器协同设计[J]. 控制与决策, 2017, 32(10): 1810-1816.
(Wang S Q, Wang Y N, Pang J Y, et al. Fault detection and control co-design for networked-based discrete-time switched systems with time-varying delays[J]. Control and Decision, 2017, 32(10): 1810-1816.)
- [16] Zhang K, Jiang B, Shi P. Adjustable parameter-based distributed fault estimation observer design for multiagent systems with directed graphs[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(2): 306-314.
- [17] Koren Y, Lo C C. Advanced controllers for feed drives[J]. CIRP Annals, 1992, 41(2): 689-698.
- [18] Ling J, Feng Z, Yao D J, et al. Non-linear contour tracking using feedback PID and feedforward position domain cross-coupled iterative learning control[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2018, 40(6): 1970-1982.
- [19] Chiu G T C, Tomizuka M. Contouring control of machine tool feed drive systems: A task coordinate frame approach[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(1): 130-139.
- [20] Yao B, Hu C X, Wang Q F. An orthogonal global task coordinate frame for contouring control of biaxial systems[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(4): 622-634.
- [21] Hu C X, Hu Z P, Yu Z, et al. Advanced GTCF-LARC contouring motion controller design for an industrial X-Y linear motor stage with experimental investigation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(4): 3308-3318.
- [22] Qazani M R C, Asadi H, Rostami M, et al. Adaptive motion cueing algorithm based on fuzzy logic using online dexterity and direction monitoring[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(2): 1945-1953.
- [23] Wang L Y, Chai T Y, Yang C Y. Neural-network-based contouring control for robotic manipulators in operational space[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(4): 1073-1080.

作者简介

董世建(1988—),男,副教授,博士,从事复杂工业系统与智能装备的辨识建模、数据驱动建模、智能优化与预测控制等研究, E-mail: dsjmw@126.com;

孟振(1991—),男,讲师,博士,从事自适应信号处理、基于强化学习的信号分析以及卫星导航系统抗干扰滤波估计、控制与优化等研究, E-mail: zhenmeng@cumt.edu.cn;

时侠圣(1992—),男,讲师,博士,从事多智能体系统分布式优化、博弈与控制、自适应动态规划和强化学习等研究, E-mail: shixiasheng@cumt.edu.cn;

王雪松(1974—),女,教授,博士生导师,从事机器学习理论、智能机器人控制、人工智能理论、复杂工业系统建模、优化及控制等研究, E-mail: wangxuesongcumt@163.com.