

控制与决策

Control and Decision

输入饱和的机器人固定时间预设性能容错控制

高升, 张伟, 郭延宁

引用本文:

高升, 张伟, 郭延宁. 输入饱和的机器人固定时间预设性能容错控制[J]. *控制与决策*, 2025, 40(9): 2639–2646.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.1078>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[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>

[基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制](#)

[Coordinated impedance control for dual-arm robots based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller](#)

控制与决策. 2021, 36(6): 1311–1323 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1701>

[基于未知系统动态估计的机器人预设性能控制](#)

Unknown system dynamics estimator for prescribed performance control of robotic systems

控制与决策. 2021, 36(5): 1040–1048 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1219>

[输入饱和的充液航天器抗干扰有限时间滑模控制](#)

Anti-disturbance finite-time sliding mode control for liquid-filled spacecraft with input saturation

控制与决策. 2021, 36(5): 1078–1086 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0820>

[基于反演算法的严格反馈非线性系统固定时间跟踪控制](#)

Fixed-time tracking control for strict-feedback nonlinear systems based on backstepping algorithm

控制与决策. 2021, 36(1): 173–179 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0658>

输入饱和的机器人固定时间预设性能容错控制

高升^{1,2†}, 张伟¹, 郭延宁³

- 中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016;
- 中国-葡萄牙星海“一带一路”联合实验室, 上海 200120;
- 哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 研究考虑执行器故障与控制输入饱和的不确定机器人系统高性能轨迹跟踪控制问题, 提出一种基于非奇异终端滑模控制框架的固定时间预设性能容错控制器。首先, 设计一种新颖的固定时间预设性能函数, 同时保证机器人轨迹跟踪位置误差稳态精度与瞬态性能的状态约束要求; 然后, 基于设计的改进预设性能函数与非奇异终端滑模控制策略, 提出一种考虑执行器部分失效故障与输入饱和和非线性的固定时间预设性能容错控制方法, 保证闭环系统具有更快的瞬态响应性能、更高的稳态精度以及更强的鲁棒性; 接着, 利用 Lyapunov 稳定性理论证明机器人轨迹跟踪位置误差的固定时间稳定性, 同时满足设定的预设性能; 最后, 通过双关节机器人仿真算例与实验验证所提出方法的正确性和有效性。

关键词: 预设性能控制; 容错控制; 固定时间稳定性; 输入饱和; 非奇异终端滑模; 不确定机器人系统

中图分类号: TP273 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.1078

引用格式: 高升, 张伟, 郭延宁. 输入饱和的机器人固定时间预设性能容错控制 [J]. 控制与决策, 2025, 40(9): 2639-2646.

Prescribed performance-based fixed-time fault-tolerant control for robotic systems with input saturation

GAO Sheng^{1,2†}, ZHANG Wei¹, GUO Yan-ning³

- State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
- China-Portugal Belt and Road Joint Laboratory on Space & Sea Technology Advanced Research, Shanghai 200120, China;
- School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: This study addresses the high-performance trajectory tracking control problem for uncertain robot systems, taking into account actuator faults and control input saturation. A fixed-time, prescribed-performance, fault-tolerant controller is proposed within the framework of nonsingular terminal sliding mode control. First, a novel fixed-time prescribed performance function is designed to enforce state constraints on both steady-state precision and transient performance of the robot's trajectory tracking position error. Then, a fixed-time prescribed performance fault-tolerant control method, which accounts for actuator partial failure and input saturation nonlinearity, is proposed to ensure faster transient response, higher steady-state accuracy, and improved robustness of the closed-loop system. Additionally, the Lyapunov stability theory is applied to prove that the trajectory tracking position error achieves fixed-time stability and satisfies the prescribed performance. Finally, the effectiveness and correctness of the proposed method are verified through numerical simulations and experiments conducted on a double-jointed robot system.

Keywords: prescribed performance control; fault-tolerant control; fixed-time stability; input saturation; nonsingular terminal sliding mode; uncertain robotic systems

0 引言

机器人因其可以代替人类高效地执行繁琐甚至

危险的任务而得到了深入且广泛的发展, 在现代制造业、军工以及航空航天等领域发挥着举足轻重的

收稿日期: 2024-09-06; 录用日期: 2025-02-18.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFE0204600); 国家自然科学基金项目 (62473110); 辽宁省自然科学基金面上项目 (2024-MSBA-80); 机器人学国家重点实验室自主课题项目 (2025-Z01-05); 中国科学院沈阳自动化研究所基础研究计划项目 (2022JC3K03).

责任编辑: 林志赞.

†通信作者. E-mail: gaosheng@sia.cn.

作用. 随着科技的发展与社会的进步, 对机器人系统的操控效率、控制精度以及可靠性方面提出了更高的要求^[1]. 考虑到机器人需要长时间、高强度的连续作业, 其部件, 尤其是执行器极易发生部分失效等故障^[2-3], 这将会导致系统控制性能下降甚至不稳定, 以致作业任务终止或带来灾难性的后果. 容错控制 (fault-tolerant control, FTC) 可以很好地补偿执行器的部分失效故障, 以此保证机器人控制系统的稳定性、准确性与安全性^[4]. 因此, 针对存在执行器部分失效故障、外部干扰与模型不确定性等因素的强耦合非线性机器人控制系统, 开展准确、可靠、快速的容错控制方法研究, 是未来机器人精准控制技术中亟待解决的问题.

近年来, 众多学者针对机器人系统容错控制开展了丰富的研究工作. 文献 [5] 提出了一种基于自适应非奇异快速终端滑模控制的机器人轨迹跟踪容错控制方法. 文献 [6] 基于径向基神经网络设计非线性故障估计器, 并利用估计结果进一步提出了一种自适应反步滑模容错控制方法. 文献 [7] 提出了一种自适应连续非奇异快速终端滑模控制方法, 并结合双连杆刚性机械臂实例验证了方法的有效性. 虽然这些成果很好地解决了机器人系统的容错控制问题, 但所设计的控制器仅能保证系统渐近收敛.

与之相比, 有限时间控制 (finite time control) 可以实现系统状态在有限时间内收敛至平衡点, 其具备更快的收敛速度与更优异的稳定精度, 从而大大改善了系统的控制性能^[8]. 文献 [9] 针对具有执行器故障的不确定机器人系统, 提出了一种新的有限时间容错控制方法. 文献 [10] 利用分数阶微积分理论对存在未知外部干扰和执行器故障的机械臂进行有限时间容错控制器的设计. 文献 [11] 针对存在外部干扰和建模误差的机器人系统, 提出了一种基于观测器的有限时间容错控制方法. 文献 [12] 将观测器设计与加权快速终端滑模容错控制方法相结合, 实现了有限时间主动容错控制. 文献 [13] 对有限时间控制及其应用研究进行了系统地总结. 但有限时间控制的收敛时间显示地包含系统的初始状态值, 而固定时间稳定 (fixed time stability) 是一种强约束的有限时间稳定, 其收敛时间与系统的初始状态无关. 因此, 机器人系统的固定时间容错控制受到了学者们的青睐. 文献 [14] 针对机器人系统提出了一种具有全局固定时间稳定性的鲁棒容错控制方法. 文献 [15] 针对不确定机器人系统执行器的部分失效故障提出了一种基于固定时间滑模控制的自适应容错方法. 文献 [16] 设计了一种基于自适应模糊反步控

制的固定时间容错控制器. 文献 [17] 针对空间漂浮基机器人执行器部分失效故障, 提出了一种基于固定时间滑模控制的容错控制方法. 上述方法虽然很好地处理了轨迹跟踪容错控制的稳态问题, 但未充分考虑控制系统的瞬态性能.

预设性能控制 (prescribed performance control, PPC) 可以很好地解决上述问题, 该方法由 Bechlioulis 等^[18] 在 2008 首次提出并深入研究, 其通过预先设置系统稳态及动态性能的方式达到提升系统控制性能的目的. 文献 [19] 针对一类严格反馈非线性系统, 提出一种自适应固定时间预设性能控制策略. 最近, 文献 [20] 基于设计的固定时间预设性能函数提出了一种近似固定时间预设性能控制方法. 与此同时, 在文献 [20] 的基础上, 作者进一步考虑容错控制问题, 针对具有执行器部分失效故障、参数不确定性和有界扰动的机器人系统, 提出了一种近似固定时间预设性能容错控制方法^[21], 但其未考虑机器人执行器输入饱和问题.

受限于实际的物理约束, 执行器不可避免地会受到输入饱和 (input saturation) 的影响. 文献 [22] 针对机械臂系统控制问题, 提出一种固定时间模糊自适应控制方法, 设计固定时间抗饱和器消除饱和对系统性能的影响. 文献 [23] 针对具有参数不确定性和输入饱和的机器人系统, 提出了一种鲁棒自适应固定时间滑模控制方法. 但这些研究成果并未考虑容错控制与预设性能控制等问题.

本文受上述研究结果启发, 针对考虑输入饱和和非线性的不确定机器人系统提出一种基于新设计的预设性能函数的固定时间容错控制方法. 该方法在非奇异终端滑模的框架下设计固定时间容错控制器, 并同时考虑输入饱和和非线性、外部干扰、模型不确定性以及执行器部分失效故障等问题, 实现输入饱和和不确定机器人系统固定时间预设性能容错控制.

1 问题描述

1.1 机器人动力学系统

考虑如下 n 自由度机器人动力学系统:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \Gamma\tau + d. \quad (1)$$

其中: $q, \dot{q}, \ddot{q} \in \mathbf{R}^n$ 分别为机器人关节的位置信息、速度信息和加速度信息; $M(q), C(q, \dot{q}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 分别为机器人系统的惯性矩阵与离心力-哥氏力矩阵; $g(q), \tau \in \mathbf{R}^n$ 分别为机器人系统的重力向量与控制输入向量; $d \in \mathbf{R}^n$ 为有界的未知输入干扰向量且满足 $\|d\| \leq d_M$; $\Gamma \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为机器人关节执行器失效率矩阵, 其为对角正定矩阵, 用于表征执行器的

健康状态.

性质 1^[24] 对称正定矩阵 $M(q)$ 满足

$$\|M(q)\| \leq M_H. \quad (2)$$

性质 2^[24] 矩阵 $M(q)$ 和 $C(q, \dot{q})$ 满足

$$\varsigma^T (\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})) \varsigma = 0, \forall \varsigma \in \mathbf{R}^n. \quad (3)$$

假设 1^[20] 机器人系统的不确定性可描述为

$$\begin{aligned} M(q) &= M_0(q) + \Delta M(q), \\ C(q, \dot{q}) &= C_0(q, \dot{q}) + \Delta C(q, \dot{q}), \\ g(q) &= g_0(q) + \Delta g(q). \end{aligned} \quad (4)$$

其中: $M_0(q)$, $C_0(q, \dot{q})$, $g_0(q)$ 分别为相应矩阵的标称值, $\Delta M(q)$, $\Delta C(q, \dot{q})$, $\Delta g(q)$ 为其不确定项, 且满足

$$\begin{aligned} \|\Delta M(q)\| &\leq M_1, \quad \|\Delta C(q, \dot{q})\| \leq C_1, \\ \|\Delta g(q)\| &\leq G_1, \end{aligned} \quad (5)$$

M_1, C_1, G_1 均为已知的正常数.

假设 2^[21] 关节执行器失效率矩阵定义为 $\Gamma = \text{diag}(\gamma_1(t), \dots, \gamma_n(t))$, 其中 $\gamma_i(t)$ 为执行器失效程度. 假设存在一个已知数 γ_0 满足

$$\gamma_0 \leq \gamma_i(t) \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

1.2 输入饱和

执行器的输入 $\mathbf{u}(t)$ 存在输入饱和和非线性, 记为

$$\tau(\mathbf{u}(t)) = \begin{cases} \text{sig}(\mathbf{u}(t))\tau_M, & \|\mathbf{u}(t)\| \geq \tau_M; \\ \mathbf{u}(t), & \|\mathbf{u}(t)\| < \tau_M. \end{cases} \quad (7)$$

其中: τ_M 为控制输入的最大幅值, $\text{sig}(\cdot)$ 的定义见后文. 为了更好地处理饱和和非线性问题, 式 (7) 可以描述为^[23]

$$\tau_i(u_i) = f_i(u_i) + \Delta\tau_i(u_i). \quad (8)$$

其中: u_i 为输入 $\mathbf{u}(t)$ 的第 i 项, $\Delta\tau_i(u_i)$ 为有界的估计误差. 由文献 [23] 可知, 函数 $f(u)$ 可重新整理为

$$f(u) = u - \Lambda u, \quad (9)$$

其中矩阵 Λ 可表示为

$$\Lambda = \text{diag}[(\pi\mu_i u_i / (2\tau_{iM}))^2 / (1 + (\pi\mu_i u_i / (2\tau_{iM}))^2)], \quad 0 < \mu_i < 1.$$

1.3 引理描述

引理 1(固定时间稳定定理)^[25-26] 考虑如下一般系统:

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}), \quad f(0) = 0, \quad \mathbf{x}_0 \triangleq \mathbf{x}(0). \quad (10)$$

其中: $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ 为系统状态, $f(\mathbf{x})$ 为定义域包含原点的非线性函数. 如果存在一个正定且连续的函数 $V(\mathbf{x})$ 满足

$$\dot{V}(\mathbf{x}) + \alpha V^p(\mathbf{x}) + \beta V^r(\mathbf{x}) \leq 0. \quad (11)$$

其中: $\alpha, \beta > 0, 0 < p < 1, r > 1$. 则系统 (11) 为固

定时间稳定, 且收敛时间的上界与系统的初始状态无关, 可表示为

$$T \leq T_{\max} = \frac{1}{\alpha(1-p)} + \frac{1}{\beta(r-1)}. \quad (12)$$

引理 2^[27] 对于任意标量 $\varsigma_1, \dots, \varsigma_n \geq 0$, 存在

$$\sum_{i=1}^n \varsigma_i^r \geq n^{1-r} \left(\sum_{i=1}^n \varsigma_i \right)^r, \quad r > 1. \quad (13)$$

引理 3^[28] 对于任意 $l > 0$ 以及任意 $\vartheta \in \mathbf{R}$, 有如下不等式成立:

$$0 \leq |\vartheta| - |\vartheta| \tanh\left(\frac{|\vartheta|}{l}\right) \leq 0.2785l. \quad (14)$$

2 容错控制器设计

2.1 固定时间预设性能函数

为了保证系统更高的稳态精度与更快的收敛速度, 提出一种新的具有固定时间收敛性能的预设性能函数

$$\rho_i(t) = \begin{cases} (\rho_{0i} - \rho_i) \exp(\varpi_i(t)) + \rho_{\infty i}, & 0 \leq t < T_i; \\ \rho_{\infty i}, & t \geq T_i. \end{cases} \quad (15)$$

$$\rho_t = t/l_i T_i, \quad \varpi_i(t) = -\frac{l_i T_i t}{T_i - t}. \quad (16)$$

其中: $\rho_{0i}, \rho_{\infty i}, T_i$ 和 l_i 为待设计正常数, 并同时满足 $\rho_{\infty i} < |e_i(0)| < \rho_{0i}, l_i > 1$.

式 (15) 提出的函数 $\rho_i(t)$ 满足文献 [20] 给出的预设性能函数的定义以及相关性质, 即 $\rho_i(t)$ 光滑递减且有界, 论述过程详见文献 [20].

受文献 [29] 的启发, 转换函数选取为

$$\psi(x) = \ln\left(\frac{\bar{b}_i(x - b_i)}{-b_i(\bar{b}_i - x)}\right). \quad (17)$$

进一步, 转换函数 $\psi(x)$ 的导数可推导为

$$v(x) = \frac{1}{\bar{b}_i - x} + \frac{1}{b_i}. \quad (18)$$

注 1 通过调节 l_i 和 T_i 的大小可以提高瞬态收敛速度, 一般通过调小 T_i 的取值与调大 l_i 的取值获得更优异的收敛性能, 但过小的 T_i 以及过大的 l_i 容易引起执行器饱和, 甚至导致系统失稳现象的发生. T_i 的取值一般在 1 ~ 5 之间, 而 l_i 的取值一般在 1 ~ 2 之间.

2.2 容错控制器设计

本文的控制目标是通过设计固定时间预设性能容错控制器, 使得系统在执行器出现部分失效故障时, 仍能保证系统的固定时间稳定性, 即机器人系统的轨迹跟踪误差满足

$$\begin{aligned} \underline{b}_i \rho_i(t) &< e_i(t) < \bar{b}_i \rho_i(t), \\ \mathbf{e}(t) &= \mathbf{q}(t) - \mathbf{q}_d(t). \end{aligned} \quad (19)$$

其中: $e_i(t)$ 为轨迹跟踪误差,表示 $\mathbf{e}(t)$ 的第 i 项; $\mathbf{q}_d(t)$ 为期望轨迹; $\bar{b}_i \rho_i(t)$ 和 $\underline{b}_i \rho_i(t)$ 分别为预设性能的上、下边界;常数 \underline{b}_i 和 \bar{b}_i 满足

$$\begin{aligned} \underline{b}_i &= \begin{cases} -1, & e_i(0) < 0; \\ -v_i, & e_i(0) \geq 0. \end{cases} \\ \bar{b}_i &= \begin{cases} v_i, & e_i(0) < 0; \\ 1, & e_i(0) \geq 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (20)$$

$0 < v_i < 1$ 为设定的超调参数, $e_i(0)$ 为第 i 个关节的初始位置误差.

在构造滑模面前,给出如下变量的定义:

$$\begin{aligned} \mathbf{Sig}^r(\boldsymbol{\varepsilon}_1) &= [\text{sig}^r(\varepsilon_{11}), \dots, \text{sig}^r(\varepsilon_{1n})]^T, \\ \mathbf{W}^p(\boldsymbol{\varepsilon}_1) &= [w^p(\varepsilon_{11}), \dots, w^p(\varepsilon_{1n})]^T, \\ \mathbf{M}^r(\boldsymbol{\varepsilon}_1) &= \text{diag}(r|\varepsilon_{11}|^{r-1}, \dots, r|\varepsilon_{1n}|^{r-1}), \\ \mathbf{F}^p(\boldsymbol{\varepsilon}_1) &= \text{diag}(f^p(\varepsilon_{11}), \dots, f^p(\varepsilon_{1n})). \end{aligned} \quad (21)$$

其中:参数 r 和 p 满足 $r > 1$, $0 < p < 1$; ε_{1i} 表示转换之后位置误差向量 $\boldsymbol{\varepsilon}_1$ 的第 i 项.向量 $\boldsymbol{\varepsilon}_1$ 及其导数分别为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\varepsilon}_1 &= \left[\psi\left(\frac{e_1}{\rho_1}\right), \dots, \psi\left(\frac{e_n}{\rho_n}\right) \right]^T, \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 &= \mathbf{B}\boldsymbol{\varepsilon}_2, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_2 = \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{A}\mathbf{e}. \end{aligned} \quad (22)$$

其中:矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 均为对角矩阵,即

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \text{diag}(a_1, \dots, a_n), \quad a_i = -\dot{\rho}_i/\rho_i, \\ \mathbf{B} &= \text{diag}(b_1, \dots, b_n), \quad b_i = (1/\rho_i)v(e_i/\rho_i). \end{aligned} \quad (23)$$

函数 $\text{sig}^r(x)$, $w^p(x)$ 和 $f^p(x)$ 定义为

$$\begin{aligned} \text{sig}^r(x) &= |x|^r \text{sgn}(x), \\ w^p(x) &= \begin{cases} \delta \text{tanh}^p(x/\delta), & |x| < \delta; \\ \text{sig}^p(x), & |x| \geq \delta. \end{cases} \\ f^p(x) &= \begin{cases} \delta^{p-1}, & |x| < \delta; \\ p|x|^{p-1}, & |x| \geq \delta. \end{cases} \end{aligned} \quad (24)$$

其中: $0 < \delta \leq 1$,函数 $\text{sgn}(x)$ 为符号函数.

构造如下形式的非奇异终端滑模面:

$$\mathbf{s} = \boldsymbol{\varepsilon}_2 + \mathbf{K}_1 \mathbf{Sig}^r(\boldsymbol{\varepsilon}_1) + \mathbf{K}_2 \mathbf{W}^p(\boldsymbol{\varepsilon}_1), \quad (25)$$

其中 \mathbf{K}_1 和 \mathbf{K}_2 均为待设计的对角正定矩阵.

最后,基于构造的滑模面 \mathbf{s} 提出如下形式的固定时间预设性能容错控制器:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{u}_a + \mathbf{u}_b, \\ \mathbf{u}_a &= \boldsymbol{\tau}_0 + \boldsymbol{\tau}_1 + \boldsymbol{\tau}_2. \end{aligned} \quad (26)$$

其中

$$\boldsymbol{\tau}_0 = -\mathbf{M}_0(\mathbf{q})\mathbf{u}_0 - \mathbf{C}_0(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\mathbf{u}_1 + \mathbf{g}_0(\mathbf{q}), \quad (27)$$

$$\boldsymbol{\tau}_1 = -\mathbf{K}_0 \mathbf{Sig}^\sigma(\mathbf{s}) - \frac{\mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|} \left(\bar{\eta} \tanh\left(\frac{\bar{\eta}}{l}\right) + 0.2785l \right), \quad (28)$$

$$\boldsymbol{\tau}_2 = -u_2 \frac{\mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|}, \quad (29)$$

$$\mathbf{u}_b = -\frac{\|\mathbf{u}_a\| \mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|(1 - \Lambda_{\max}(\mathbf{A}))}. \quad (30)$$

其中: \mathbf{K}_0 为待设计的对角正定矩阵, $\sigma > 1$, $\bar{\eta}$ 为系统的集总干扰项的上界,有

$$\bar{\eta} = M_1 \|\mathbf{u}_0\| + C_1 \|\dot{\mathbf{q}}\| \|\mathbf{u}_1\| + G_1 + d_M + \|\boldsymbol{\Gamma}\| \bar{\Delta}. \quad (31)$$

向量 \mathbf{u}_0 , \mathbf{u}_1 和标量 u_2 分别定义为

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_0 &= \mathbf{A}\dot{\mathbf{e}} + \dot{\mathbf{A}}\mathbf{e} - \ddot{\mathbf{q}}_d + \\ &(\mathbf{K}_1 \mathbf{M}^r(\boldsymbol{\varepsilon}_1) + \mathbf{K}_2 \mathbf{F}^p(\boldsymbol{\varepsilon}_1)) \mathbf{B}\boldsymbol{\varepsilon}_2, \end{aligned} \quad (32)$$

$$\mathbf{u}_1 = \mathbf{A}\mathbf{e} - \mathbf{q}_d + \mathbf{K}_1 \mathbf{Sig}^r(\boldsymbol{\varepsilon}_1) + \mathbf{K}_2 \mathbf{W}^p(\boldsymbol{\varepsilon}_1), \quad (33)$$

$$u_2 = \frac{(1 - \gamma_0) \|\boldsymbol{\tau}_0 + \boldsymbol{\tau}_1\| + k}{\gamma_0}, \quad k > 0. \quad (34)$$

3 稳定性分析

根据式(25)中滑模面的定义,可以求得其导数为

$$\dot{\mathbf{s}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2 + (\mathbf{K}_1 \mathbf{M}^r(\boldsymbol{\varepsilon}_1) + \mathbf{K}_2 \mathbf{F}^p(\boldsymbol{\varepsilon}_1)) \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1. \quad (35)$$

式(35)两边同时乘以 $\mathbf{M}(\mathbf{q})$,并由性质1可知下式成立:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2 + \mathbf{M}(\mathbf{q})\mathbf{u}_0. \quad (36)$$

在式(36)两边同时加上 $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\mathbf{s}$,有

$$\begin{aligned} \mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{s}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\mathbf{s} &= \\ \mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2 + \mathbf{M}(\mathbf{q})\mathbf{u}_0 + \\ \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})(\boldsymbol{\varepsilon}_2 + \mathbf{K}_1 \mathbf{Sig}^r(\boldsymbol{\varepsilon}_1) + \mathbf{K}_2 \mathbf{W}^p(\boldsymbol{\varepsilon}_1)). \end{aligned} \quad (37)$$

将 $\boldsymbol{\varepsilon}_2$ 和 $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2$ 代入式(37),可得

$$\begin{aligned} \mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{s}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\mathbf{s} &= \\ \mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2 + \mathbf{M}(\mathbf{q})\mathbf{u}_0 + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2 + \mathbf{u}_1). \end{aligned} \quad (38)$$

将式(1)代入(38),并由假设1和假设2可知关于滑模面 \mathbf{s} 的机器人动力学模型为

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{s}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\mathbf{s} = \boldsymbol{\Gamma} \mathbf{f}(\mathbf{u}) - \boldsymbol{\tau}_0 + \boldsymbol{\eta}, \quad (39)$$

其中 $\boldsymbol{\eta}$ 为系统的集总干扰项,即

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\eta} &= \Delta \mathbf{M}(\mathbf{q})\mathbf{u}_0 + \Delta \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\mathbf{u}_1 - \\ &\mathbf{g}_0(\mathbf{q}) + \boldsymbol{\Gamma} \Delta \boldsymbol{\tau} + \mathbf{d}. \end{aligned} \quad (40)$$

定理1 针对存在执行器部分失效故障以及输入饱和问题的不确定机器人系统(1),在满足假设条件1~假设3的情况下,所提出的基于预设性能函数(15)的容错控制器(26)可实现闭环系统(39)的固定时间稳定性与预设性能满足性,即同时满足如下条件.

1) 机器人各关节位置误差 e_i 会在固定时间 T_{fi} 内收敛至原点附近的小邻域 B_{ei} 内,进而渐近收敛至原点.小邻域 B_{ei} 与固定时间收敛上界 T_{fi} 分别为

$$B_{ei} = \{e_i | \rho_{0i}\psi^{-1}(-\delta) \leq e_i \leq \rho_{0i}\psi^{-1}(\delta)\}, \quad (41)$$

$$T_{fi} \leq T_s + T_{ei}. \quad (42)$$

其中: 时间上界 T_s 和 T_{ei} 分别为

$$T_s \leq \frac{2}{\phi_1(\sigma - 1)} + \frac{2}{\phi_2}, \quad (43)$$

$$T_{ei} \leq \frac{2}{\phi_3(1 - p)} + \frac{2}{\phi_4(r - 1)}, \quad (44)$$

正常数 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 和 ϕ_4 定义为

$$\begin{aligned} \phi_1 &= n^{(1-\sigma)/2}(2/M_H)^{(1+\sigma)/2}\Lambda_{\min}(\mathbf{K}_0), \\ \phi_2 &= k(2/M_H)^{1/2}, \\ \phi_3 &= 2^{(p+3)/2}\rho_{0i}^{-1}k_{1i}, \\ \phi_4 &= 2^{(r+3)/2}\rho_{0i}^{-1}k_{2i}. \end{aligned} \quad (45)$$

2) 机器人各关节位置误差 e_i 全时段满足预设性能(15).

证明 从滑模控制的到达阶段与滑模阶段分两步证明定理1中1)的正确性.

到达阶段: 联立式(9)、(26)和(39)可得如下闭环系统:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{s}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\mathbf{s} = \mathbf{\Gamma}(\mathbf{u} - \mathbf{\Lambda}\mathbf{u}) - \boldsymbol{\tau}_0 + \boldsymbol{\eta}. \quad (46)$$

由式(46)定义Lyapunov函数 $V = 1/2\mathbf{s}^T\mathbf{M}(\mathbf{q})\mathbf{s}$, 根据性质2有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{s}^T\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{s}} + \mathbf{s}^T\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\mathbf{s} = \\ &= \mathbf{s}^T\mathbf{\Gamma}\mathbf{u}_a + \mathbf{s}^T\mathbf{\Gamma}\mathbf{u}_b - \mathbf{s}^T\mathbf{\Gamma}\mathbf{\Lambda}\mathbf{u} - \mathbf{s}^T\boldsymbol{\tau}_0 + \mathbf{s}^T\boldsymbol{\eta}. \end{aligned} \quad (47)$$

由矩阵 $\mathbf{\Lambda}$ 的定义可知如下不等式成立:

$$\begin{aligned} &\mathbf{s}^T\mathbf{\Gamma}\mathbf{u}_b - \mathbf{s}^T\mathbf{\Gamma}\mathbf{\Lambda}\mathbf{u} = \\ &\mathbf{s}^T\mathbf{\Gamma}(\mathbf{I} - \mathbf{\Lambda})\mathbf{u}_b - \mathbf{s}^T\mathbf{\Gamma}\mathbf{\Lambda}\mathbf{u}_a = \\ &= -\mathbf{\Gamma}(\mathbf{I} - \mathbf{\Lambda})\frac{\|\mathbf{u}_a\|\|\mathbf{s}\|}{1 - \Lambda_{\max}(\mathbf{\Lambda})} - \mathbf{s}^T\mathbf{\Gamma}\mathbf{\Lambda}\mathbf{u}_a \leq \\ &= -\mathbf{\Gamma}\|\mathbf{u}_a\|\|\mathbf{s}\| - \mathbf{s}^T\mathbf{\Gamma}\mathbf{\Lambda}\mathbf{u}_a \leq 0. \end{aligned} \quad (48)$$

因此, 式(47)变为

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \mathbf{s}^T\mathbf{\Gamma}\mathbf{u}_a - \mathbf{s}^T\boldsymbol{\tau}_0 + \mathbf{s}^T\boldsymbol{\eta} = \\ &= \mathbf{s}^T(\mathbf{\Gamma}\boldsymbol{\tau}_2 + \boldsymbol{\tau}_1 + \boldsymbol{\eta} - (\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma})(\boldsymbol{\tau}_0 + \boldsymbol{\tau}_1)) \leq \\ &= \mathbf{s}^T\mathbf{\Gamma}\boldsymbol{\tau}_2 + \mathbf{s}^T\boldsymbol{\tau}_1 + \|\mathbf{s}\|\|\boldsymbol{\eta}\| + \\ &= \|\mathbf{s}\|\|\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}\|\|\boldsymbol{\tau}_0 + \boldsymbol{\tau}_1\|. \end{aligned} \quad (49)$$

由假设2易知 $\|\mathbf{I} - \mathbf{\Gamma}\| \leq 1 - \gamma_0$, 将式(28)和(29)代入(49), 进一步结合引理3可知

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\gamma_0 u_2 \|\mathbf{s}\| - \mathbf{s}^T\mathbf{K}_0\text{Sig}^\sigma(\mathbf{s}) + \\ &= (1 - \gamma_0)\|\mathbf{s}\|\|\boldsymbol{\tau}_0 + \boldsymbol{\tau}_1\| \leq \\ &= -k\|\mathbf{s}\| - \mathbf{s}^T\mathbf{K}_0\text{Sig}^\sigma(\mathbf{s}). \end{aligned} \quad (50)$$

根据 $\text{Sig}^\sigma(\mathbf{s})$ 的定义和引理2, 式(50)可进一步推导为

$$\dot{V} \leq -k\|\mathbf{s}\| - n^{(1-\sigma)/2}\Lambda_{\min}(\mathbf{K}_0)\|\mathbf{s}\|^{\sigma+1}. \quad (51)$$

由 V 的定义可知 $\|\mathbf{s}\| \geq (2/M_H)^{1/2}V^{1/2}$ 成立, 将其代入式(51)可得

$$\dot{V} + \phi_1 V^{(\sigma+1)/2} + \phi_2 V^{1/2} \leq 0. \quad (52)$$

由式(52)与引理1可知, 滑模面 \mathbf{s} 可在固定时间 T_s 内收敛到原点, 即 $\mathbf{s} = 0$ 成立. 因此, 定理1中的1)证毕.

滑模阶段: 当滑模向量 $\mathbf{s} = 0$ 时, 式(25)变为

$$\varepsilon_{2i} = -k_{1i}|\varepsilon_{1i}|^r \text{sgn}(\varepsilon_{1i}) - k_{2i}w^p(\varepsilon_{1i}). \quad (53)$$

滑模阶段的证明过程与文献[21]相同, 此处不再赘述. 定理1中的2)证毕.

由定理1中2)的证明可知, 转换误差 ε_{1i} 始终有界, 即 $\varepsilon_{1i} \in L_\infty, \forall t \geq 0$ 成立. 进一步, 由式(22)可知 $e_i = \rho_i\psi^{-1}(\varepsilon_{1i})$, 由 $\psi^{-1}(x)$ 的光滑性与 $\rho_i > 0$ 可得 $e_i \in (b_i\rho_i, \bar{b}_i\rho_i)$ 成立, 因此 e_i 满足预设性能(15). \square

4 验证与分析

4.1 数值仿真

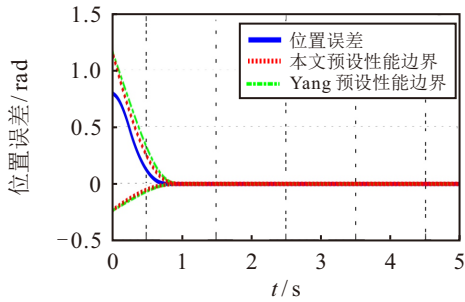
为了验证本文提出的容错控制策略的有效性, 以文献[21]采用的双关节机器人算例进行仿真验证与对比分析, 具体参数定义与取值详见文献[21]. 考虑到机器人系统的不确定性, 质量参数 m_1 和 m_2 的标称参数分别取为 $m_{10} = 0.4 \text{ kg}$ 和 $m_{20} = 1.2 \text{ kg}$. 双关节机器人中两个关节最大力矩 τ_M 均设置为 $120 \text{ N}\cdot\text{m}$. 同时其初始状态与期望轨迹设定与文献[21]相同. 机器人关节执行器失效率矩阵设定为 $\mathbf{\Gamma} = \text{diag}(0.32, 0.45 + 0.05\sin(t))$, 外部干扰设置为

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 2.15 \sin(4t) + 0.45\sin(200\pi t) \\ 2.15 \sin(4t) + 0.45\sin(200\pi t) \end{bmatrix} \text{ N}\cdot\text{m}.$$

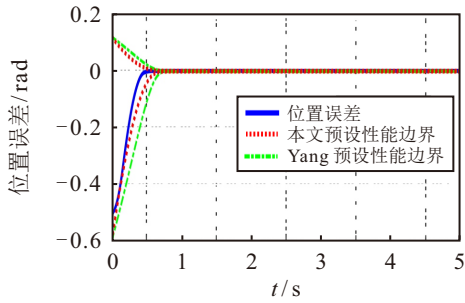
由假设1可知不确定参数上界分别为 $M_1 = 2, C_1 = 2, G_1 = 5$. 干扰参数上界为 $d_M = 5$. 由假设2和执行器失效率矩阵 $\mathbf{\Gamma}$ 的定义, 参数 $\gamma_0 = 0.3$. 预设性能参数分别设置为 $\rho_{01} = 1.0, \rho_{02} = 0.6, \rho_{\infty 1} = 0.002, \rho_{\infty 2} = 0.002, l_1 = l_2 = 1.5, \nu_1 = \nu_2 = 0.3, T_1 = 1.2, T_2 = 0.9$. 控制参数分别选取为 $r = 1.2, p = 0.5, k = 2.0, \sigma = 1.5, \delta = 0.01, \mathbf{K}_0 = \text{diag}(5, 5), \mathbf{K}_1 = \text{diag}(0.01, 0.02), \mathbf{K}_2 = \text{diag}(0.1, 0.2)$.

图1和图2给出了本文所提出固定时间预设性能容错控制方法的数值仿真结果. 图1的位置误差在容错控制器的作用下很快收敛且始终保持在预先设定的性能边界范围内, 并且本文设计的预设性能函数收敛性能优于Yang等[21]提出的预设性能函数. 图2的控制力矩没有超出设定的范围. 因此, 可以得出该控制器可以很好地处理系统执行器的部分失效故障与输入饱和问题, 并且控制精度与响应速度均

满足设计要求.



(a) 关节1的轨迹跟踪位置误差



(b) 关节2的轨迹跟踪位置误差

图1 机器人各关节轨迹跟踪误差

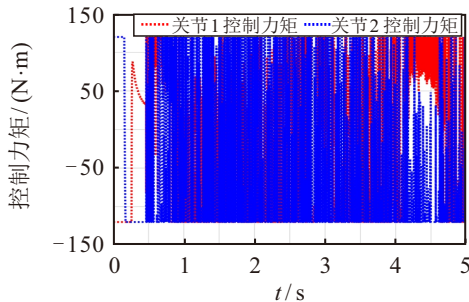
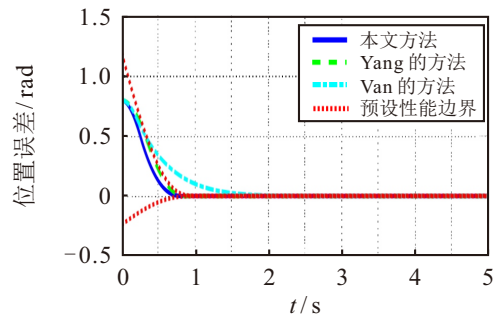


图2 机器人各关节控制力矩

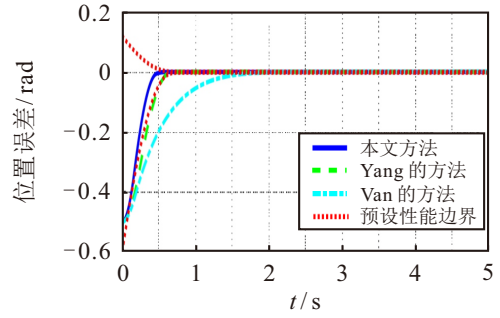
为了表明所设计容错控制器的优越性, 将其与FFTC方法^[9]和PPFTC方法^[21]进行比较. FFTC控制器的参数设置为 $k_1 = 1.5, k_2 = 1, p = 9, r = 7, \delta = 18, \lambda = 1.3$. PPFTC预设性能参数与控制参数的设置与本文相同. 从图3的仿真结果可以看出, 本文设计的控制器位置误差收敛速度明显优于FFTC和PPFTC方法, 同时表现出较好的稳态性能. 这是由于所提出的新颖的性能函数要优于文献所设计的性能函数, 进而得到更优异的控制效果. 此外, 所设计的控制器的位置误差始终保持在性能边界内, 但FFTC的位置误差超出了性能边界.

4.2 实验验证

以实验室的六轴协作机械臂实验平台(图4)验证所提控制器的有效性. 将六轴机械臂的关节1、关节2和关节5、关节6锁定, 机械臂变为由关节3和关节4组成的双关节机器人系统. 质量参数 m_1 和 m_2 的标称参数为 $m_{10} = 1.5 \text{ kg}$ 和 $m_{20} = 1.0 \text{ kg}$. 杆长



(a) 关节1的轨迹跟踪位置误差



(b) 关节2的轨迹跟踪位置误差

图3 轨迹跟踪误差对比结果

$L_1 = 0.8 \text{ m}$ 和 $L_2 = 0.25 \text{ m}$. 转动惯量 $J_1 = 0.438 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 和 $J_2 = 0.0126 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$. 两个关节初始位置为 $\mathbf{q}(0) = (0.8, 1.6^T \text{ rad})$, 初始速度均设置为0, 期望轨迹 \mathbf{q}_d 沿用数值仿真部分给出的轨迹, 执行器失效率矩阵 $\mathbf{\Gamma} = \text{diag}(0.4, 0.35 + 0.05\sin(t))$. 参数 $\gamma_0 = 0.3$, 参数上界 M_1, C_1, G_1 和 d_M 分别选取为 $M_1 = 1.1, C_1 = 1.1, G_1 = 0.5, d_M = 6$. 最后, 考虑到实际实验条件的限制, 预设性能参数设置为 $\rho_{01} = 0.8, \rho_{02} = 0.5, \rho_{\infty 1} = 0.04, \rho_{\infty 2} = 0.04, l_1 = 1.5, l_2 = 1.6, \nu_1 = \nu_2 = 0.3, T_1 = 1.2, T_2 = 1.0$. 控制参数分别选取为 $r = 1.2, p = 0.5, k = 1.0, \sigma = 1.5, \delta = 0.01, \mathbf{K}_0 = \text{diag}(5, 5), \mathbf{K}_1 = \text{diag}(0.2, 0.06), \mathbf{K}_2 = \text{diag}(0.5, 0.5)$.

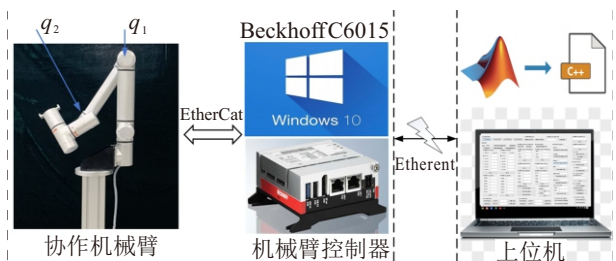


图4 协作机械臂实验平台

本文所提控制器实验结果如图5所示. 可以看出, 在本文所提出控制器作用下, 两个关节的轨迹跟踪误差在稳态和瞬态方面均表现出较优异的性能, 具备较快的收敛速度、较高的稳态精度以及较小的超调, 并且全时段收敛于预设性能边界, 验证了所提出控制算法的有效性.

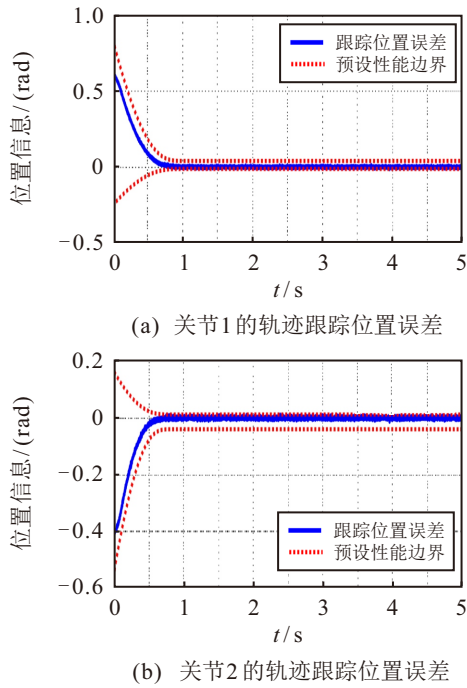


图5 轨迹跟踪误差结果

5 结论

本文提出了一种基于改进的预设性能函数的不确定机器人系统固定时间容错控制策略,保证了系统在出现执行器部分失效故障时的鲁棒控制.在现有预设性能函数的基础上提出了一种性能更优的固定时间收敛预设性能函数,并基于此函数与非奇异终端滑模面设计了固定时间容错控制器.利用Lyapunov稳定性理论证明了闭环系统跟踪位置误差的固定时间稳定性以及预设性能满足性.最后,结合双关节机器人系统仿真算例验证了方法的有效性和性能优越性.未来将围绕实物验证开展深入研究,致力于将所提出的控制方法应用于实际的机器人系统.

参考文献 (References)

- [1] 曹锦旗, 韩雪松. 工业机器人轨迹规划的研究方法综述[J]. 信息与控制, 2024, 53(4): 471-486.
(Cao J Q, Han X S. Review of research methods for industrial robot trajectory planning[J]. Information and Control, 2024, 53(4): 471-486.)
- [2] Capisani L M, Ferrara A, Ferreira de Loza A, et al. Manipulator fault diagnosis via higher order sliding-mode observers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3979-3986.
- [3] 雷荣华, 付晓东, 陈力. 基于加幂积分法的空间机器人二阶滑模全局固定时间控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(10): 3270-3278.
(Lei R H, Fu X D, Chen L. Second-order sliding mode global fixed-time control of the space robot based on the power-addition integral method[J]. Control and Decision, 2024, 39(10): 3270-3278.)
- [4] Xiao B, Cao L, Xu S Y, et al. Robust tracking control of robot manipulators with actuator faults and joint velocity measurement uncertainty[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(3): 1354-1365.
- [5] Van M, Mavrouniotis M, Ge S S. An adaptive backstepping nonsingular fast terminal sliding mode control for robust fault tolerant control of robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(7): 1448-1458.
- [6] Wu Y W, Yao L N. Fault diagnosis and fault tolerant control for manipulator with actuator multiplicative fault[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2021, 19(2): 980-987.
- [7] Zhang W J, Yang X H, Xu Z H, et al. An adaptive fault-tolerant control method for robot manipulators[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2021, 19(12): 3983-3995.
- [8] Jiang B Y, Li C J, Ma G F. Finite-time output feedback attitude control for spacecraft using "Adding a power integrator" technique[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 66: 342-354.
- [9] van M, Ge S S, Ren H L. Finite time fault tolerant control for robot manipulators using time delay estimation and continuous nonsingular fast terminal sliding mode control[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(7): 1681-1693.
- [10] Anjum Z, Guo Y. Finite time fractional-order adaptive backstepping fault tolerant control of robotic manipulator[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2021, 19(1): 301-310.
- [11] Xiong C G, Yang L, Zhou B, et al. Finite-time fault-tolerant control of robotic systems with uncertain dynamics[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2022, 20(8): 2681-2690.
- [12] 赵扬, 刘霞. 机器人系统的加权快速终端滑模主动容错控制[J]. 信息与控制, 2023, 52(3): 360-368.
(Zhao Y, Liu X. Weighted fast terminal sliding mode active fault-tolerant control for robotic system[J]. Information and Control, 2023, 52(3): 360-368.)
- [13] Liu Y, Li H Y, Lu R Q, et al. An overview of finite/fixed-time control and its application in engineering systems[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(12): 2106-2120.
- [14] Van M, Ceglarek D. Robust fault tolerant control of robot manipulators with global fixed-time convergence[J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358(1): 699-722.
- [15] Zhang L Y, Liu H, Tang D F, et al. Adaptive fixed-time fault-tolerant tracking control and its application for robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(3): 2956-2966.
- [16] Van M, Sun Y Z, McIlvanna S, et al. Adaptive fuzzy fault tolerant control for robot manipulators with fixed-time convergence[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2023, 31(9): 3210-3219.
- [17] 汤万兴, 艾海平, 陈力. 漂浮基空间机器人固定时间收

- 敛主动容错控制[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2022, 50(5): 650-657.
(Tang W X, Ai H P, Chen L. Active fault tolerant control for free-floating space robots with fixed time convergence[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2022, 50(5): 650-657.)
- [18] Bechlioulis C P, Rovithakis G A. Robust adaptive control of feedback linearizable MIMO nonlinear systems with prescribed performance[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(9): 2090-2099.
- [19] 李应森, 陈明, 姜海洋, 等. 基于有限时间指令滤波的非线性系统固定时间预设性能控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(5): 1498-1506.
(Li Y S, Chen M, Jiang H Y, et al. Finite-time command filtered-based fixed-time prescribed performance control[J]. Control and Decision, 2024, 39(5): 1498-1506.)
- [20] Yang P, Su Y X. Proximate fixed-time prescribed performance tracking control of uncertain robot manipulators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(5): 3275-3285.
- [21] Yang P, Su Y X, Zhang L Y. Proximate fixed-time fault-tolerant tracking control for robot manipulators with prescribed performance[J]. Automatica, 2023, 157: 111262.]
- [22] 周玥欣, 于金鹏, 刘加朋, 等. 考虑输入饱和的不确定机械臂系统固定时间阻抗控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(12): 3919-3926.
(Zhou Y X, Yu J P, Liu J P, et al. Fixed-time impedance control of uncertain manipulator system considering input saturation[J]. Control and Decision, 2024, 39(12): 3919-3926.)
- [23] Hu Y S, Yan H C, Zhang H, et al. Robust adaptive fixed-time sliding-mode control for uncertain robotic systems with input saturation[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2023, 53(4): 2636-2646.
- [24] Sciacivico L, Siciliano B. Modelling and control of robot manipulators[M]. Cham: Springer London, 2000.
- [25] Polyakov A. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(8): 2106-2110.
- [26] 姜博严, 李佳玲, 李传江, 等. 二阶系统有限时间控制方法综述[J]. 控制理论与应用, 2024, 41(5): 769-797.
(Jiang B Y, Li J L, Li C J, et al. Review on finite-time control method for a second-order system[J]. Control Theory & Applications, 2024, 41(5): 769-797.)
- [27] Liu Y, Liu X P, Jing Y W, et al. A novel finite-time adaptive fuzzy tracking control scheme for nonstrict feedback systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2019, 27(4): 646-658.
- [28] Liu Y, Liu X P, Jing Y W, et al. Direct adaptive preassigned finite-time control with time-delay and quantized input using neural network[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2020, 31(4): 1222-1231.
- [29] Karayiannidis Y, Doulgeri Z. Model-free robot joint position regulation and tracking with prescribed performance guarantees[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2012, 60(2): 214-226.

作者简介

高升 (1991-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为空间机器人控制、非线性系统故障诊断与容错控制, E-mail: gaosheng@sia.cn;

张伟 (1979-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为卫星、深空探测及在轨服务, E-mail: zhangwei@sia.cn;

郭延宁 (1985-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为航天器控制、视觉导航, E-mail: guoyn@hit.edu.cn.