DOI：10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.4001

基于 ANSTSMC 的欠驱动机械臂轨迹跟踪控制

曾　鑫[1]，孙友鹏[1]，孙　晓[1]，罗剑宾[2]

（1. 湖南工业大学 机械工程学院，湖南 株洲 412007；2. 株洲南方阀门股份有限公司，湖南 株洲 412007）

摘　要：针对欠驱动机械臂难控制问题，提出了一种综合稳定控制策略，该策略能够在存在不确定振动干扰的工况下保障系统稳定运行。首先，采用 D-H 参数法与拉格朗日法，建立了考虑系统不确定非线性特性的欠驱动机械臂动力学模型。其次，针对机械臂在复杂环境中承受的不确定性干扰，设计了基于自适应非奇异快速终端滑模控（ANSTSMC）的轨迹跟踪控制器，该控制器依托自适应控制律，可实时检测并预估外界干扰及系统自身的抖振信号。同时，基于李雅普诺夫稳定性理论对系统稳定性进行分析，结果表明，所设计的控制器能够确保系统在有限时间内实现快速收敛。仿真实验结果验证了所提方法的有效性，且结果显示，该控制策略可在系统失稳状态下实现机械臂的精准轨迹跟踪，有效提升系统整体性能，推动机械臂快速恢复稳定运行状态。

关键词：欠驱动机械臂；稳定性控制策略；自适应；轨迹跟踪

中图分类号：TP273　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673-9833(2026)04-0001-07

引文格式：曾　鑫，孙友鹏，孙　晓，等 . 基于 ANSTSMC 的欠驱动机械臂轨迹跟踪控制 [J]. 湖南工业大学学报，2026，40(4)：1-7.

Tracking Control of Underactuated Manipulators Based on ANSTSMC

ZENG Xin[1]，SUN Youpeng[1]，SUN Xiao[1]，LUO Jianbin[2]

（1. School of Mechanical Engineering，Hunan University of Technology，Zhuzhou Hunan 412007，China；
2. Zhuzhou Southern Valve Co., Ltd.，Zhuzhou Hunan 412007，China）

Abstract：A comprehensive stable control strategy has been proposed to address the control challenges of under-actuated robotic arms, which can ensure stable system operation in the presence of uncertain vibration disturbances. Firstly, based on the Denavit-Hartenberg (D-H) method and Lagrangian mechanics, a dynamic model is established to capture the uncertain nonlinear dynamics of the under-actuated manipulator. Secondly, a trajectory tracking controller is designed based on ANSTSMC (adaptive non-singular fast terminal sliding mode control) to address the uncertain disturbances experienced by robotic arms in complex environments. Under the proposed adaptive control law, external disturbances and inherent chattering effects can be estimated and compensated in real time. Meanwhile, based on the Lyapunov stability theory, a system stability analysis is conducted, with the analysis results showing that the designed controller can ensure rapid convergence of the system within a finite time. The simulation experiment results have verified the effectiveness of the proposed method. The results show that the control strategy can achieve precise trajectory tracking of the robotic arm in the unstable state of the system, effectively improve the overall performance of the system, and promote the rapid recovery of the robotic arm to a stable operating state.

Keywords：underactuated robotic arm；stability control strategy；adaptivity；trajectory tracking

收稿日期：2025-03-04

基金项目：湖南省重点领域研发计划基金资助项目（2022GK2068）；湖南省自然科学基金省市联合基金资助项目（2021JJ50053）

作者简介：曾　鑫，男，湖南工业大学教师，主要研究方向为智能机器人及其自动化控制，E-mail：14260@hut.edu.cn

通信作者：孙　晓，男，湖南工业大学教授，主要研究方向为机电控制及机器人智能控制技术，E-mail：13873325228@163.com

0 引言

轮式移动机械臂凭借较大的作业范围、较高的移动速度以及较强的任务载荷能力，已在各类应用场景中获得广泛关注。然而，与其他移动机器人类似，轮式移动机械臂在运动稳定性方面仍存在明显不足，这需要通过技术创新加以优化与克服，以充分发挥其潜力。尤其是在不平坦地形上，平台需要能够根据地形变化在不同角度和方向上进行灵活移动。此时，平台的自由度可能因地形而受限，而机械臂则需具备更高精度的自由度以完成特定任务。由于平台采用差速驱动控制方式，难以有效应对复杂地形，导致系统整体呈现欠驱动特性，进而需通过反馈控制与优化控制策略以协调平台与机械臂的运动[1]。

此外，Guo S. 等[2]研究指出，移动机械臂的失稳通常表现为平台在某一支撑边缘发生翘起。针对这一失稳模式，失稳的移动机械臂可被简化为一个垂直于支撑边的平面上的双摆杆可变摆长倒立摆小车模型[3]。移动机械臂的任务执行本质上涉及平台与机械臂之间的动态协调，这种系统特性与倒立摆系统等欠驱动系统相似。欠驱动系统指的是控制输入数量少于系统自由度的系统[4]，与全驱动系统相比，欠驱动系统通过减少驱动装置数量，以降低成本并减轻系统质量，已在倒立摆、水面舰船、四旋翼无人机和双足机器人等应用中得到广泛使用[5]。欠驱动系统的控制问题在当前非线性控制领域中备受瞩目，成为一个研究热点。然而，欠驱动系统所具有的强耦合性与非线性特征，极大地增加了系统稳定控制的难度，使其面临着巨大挑战。

而具有欠驱动臂的机器人关节受到非完整约束[6]，双摆（Pendubot 系统）、倒立摆机构作为欠驱动系统中最经典的系统形式，目前对于两者的控制方法有很多，主要分为经典控制和智能控制。经典控制如传统的 PID 控制，崔宝影等[7]采用经典 PID 控制对 Pendubot 系统进行轨迹跟踪，且跟踪效果良好，但是并未对系统施加任何干扰，因而系统环境比较理想；赵海滨等[8]利用线性化的处理设计即线性二次调节器（LQR）进行 Pendubot 系统的摆起和平衡控制器研究，而现实中 Pendubot 系统所呈现的是非线性的。关于智能控制，近年来的研究也是层出不穷，M. Boukattaya 等[9]设计了非奇异终端滑膜控制器，对于不确定的二阶系统进行稳定性控制研究，实验效果显著。而他们进行的实验对象为二连杆机构，未对欠驱动机构进行实验。王亚午等[10]结合迭代学习方法和倒转设计 LQR 控制器，对第一关节为主动臂的垂直三连杆欠驱动机械臂进行倒摆控制，采用了竖直向下和垂直向上近似模型两种状态进行控制，使其平稳地在两种状态切换；林壮等[11]采用等效控制理论和李雅普诺夫函数法，设计了分层滑膜变结构控制器，以解决欠驱动机械臂控制精度低的问题。以上所提控制策略均能够对基础模型的欠驱动机械臂实现有效控制。然而，这些控制策略存在一定的局限性：要么采用了对被控系统的线性近似方法，要么忽视了被控系统的稳定控制。因此，本文提出一种基于自适应非奇异快速终端滑模控制的稳定控制，在复杂路面下仅依赖移动机械臂普遍具有的非完整约束，实现对该类系统的稳定。

1 移动机械臂动力学建模

本文以图 1 所示的平台及多级摆杆机械臂的耦合机构作为研究对象。首先，平台及多级摆杆耦合机构类似于倒立摆机构，倒立摆是一种典型的复杂控制系统，小车由电机驱动，在地面移动以保持杆直立，其中第一主动臂连接到小车上[12]。其次，第二主动臂和欠驱动臂的双摆机械臂类似于欠驱动两杆机械臂 Pendubot 系统，具有两旋转关节，第一个关节带有驱动电机，称为驱动关节；第二个关节没有电机，是非驱动的，称为欠驱动关节[5]。

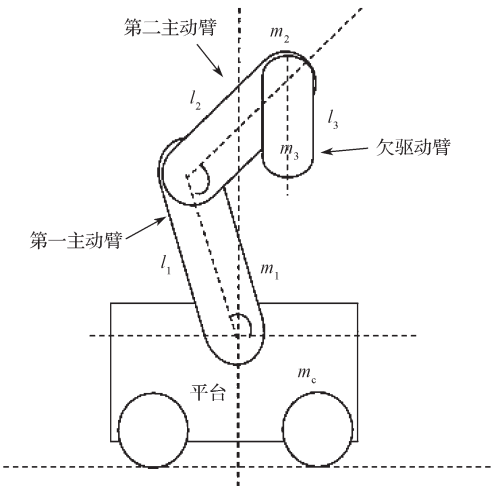


图 1 平台及多级摆杆耦合机构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the platform and multi-stage pendulum coupling mechanism

机械臂的动力学模型如图 2 所示，机械臂末端执行器可简化为一个欠驱动臂，在复杂路面下平台会给机械臂一些复杂干扰，通过控制主动臂力矩，并且对平台干扰给予补偿，从而跟踪系统的物理输出量角度和角速度，使得欠驱动机械臂在受到复杂干扰的情况下快速到达目标位置。

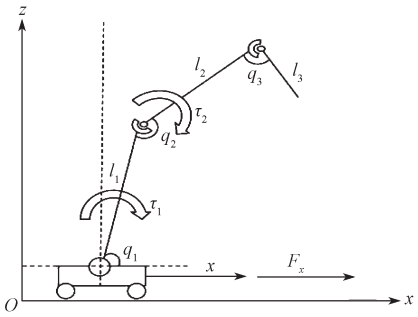


图 2　机械臂动力学模型示意图

Fig. 2　Dynamics model of mechanical arm

为简化对移动机械臂及平台结构参数的处理，可将平台因素视作扰动项并将其纳入动力学模型进行分析 [13]，多级摆杆动力学模型的相关参数见表 1。

表 1　机械臂结构主要参数表

Table 1　Main parameters table of the robotic arm structure

机械臂	长度	质量	关节角度	转动惯量	驱动力矩
第一主动臂	l_1	m_1	q_1	I_1	τ_1
第二主动臂	l_2	m_2	q_2	I_2	τ_2
欠驱动臂	l_3	m_3	q_3	I_3	

在广义坐标系中机械臂系统的拉格朗日函数 L 定义为

$$L=K-P, \tag{1}$$

式中：K、P 分别为机械臂系统的总动能和总势能。

动力学方程即拉格朗日方程，表达式为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\dot{q}_i}\right)-\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}=\tau_i, \tag{2}$$

式中：q_i 为关节角；τ_i 为驱动力矩；$\dot{q}_i$ 为关节角速度；i=1, 2, 3。

由系统各连杆的质心坐标可得欠驱动机械臂系统通用的动力学方程为

$$\boldsymbol{M}(q)\ddot{q}+\boldsymbol{C}(q,\dot{q})\dot{q}+\boldsymbol{G}(q)=\tau。 \tag{3}$$

为了更准确地描述系统的运动，特将摩擦力矩加入动力学模型中，摩擦力矩的计算考虑库仑摩擦和黏性摩擦，结合上述表达式，平台与双摆机械臂的耦合动力学模型为

$$\boldsymbol{M}(q)\ddot{q}+\boldsymbol{C}(q,\dot{q})\dot{q}+\boldsymbol{G}(q)+\boldsymbol{F}(\dot{q})=\tau+d(t), \tag{4}$$

式（3）（4）中：$\boldsymbol{M}(q)$ 为惯性矩阵；$\boldsymbol{C}(q,\dot{q})$ 为科里奥利力矩；$\boldsymbol{G}(q)$ 为重力力矩；$\boldsymbol{F}(\dot{q})$ 为摩擦力矩；$d(t)$ 为平台的不确定干扰，且有 $d(t)<D$，即干扰有上界 D。

该模型是为了让末端位置误差接近于 0，而欠驱动臂的误差描述为 $e_3(t)=q_3(t)-q_{3\mathrm{ref}}(t)$，可得目标函数如下：

$$J=\int_0^T e_3(t)^2\,\mathrm{d}t。 \tag{5}$$

通过计算与整理得出欠驱动系统动力学方程也满足下列约束关系：

$$\boldsymbol{M}(q)\ddot{q}+\boldsymbol{C}(q,\dot{q})\dot{q}+\boldsymbol{G}(q)=0。 \tag{6}$$

由式（4）可知，通过调控系统输出力矩即可直接控制系统驱动关节状态，但控制关系是非线性的，且由于系统参数的可变性，并不能对其进行线性近似化。由式（6）知，系统驱动关节与欠驱动关节状态的约束关系属于非线性关系，且随系统参数变化而变化。

2　滑模控制器设计与稳定性分析

在控制系统中，滑模控制（sliding mode control，SMC）通过定义滑模面描述系统的期望行为，并根据系统状态沿滑模面滑动，从而实现对系统的控制。滑模面是一个状态空间中的超平面，系统的状态应始终沿该面滑动，并最终收敛到该面上的一个平衡点。自适应非奇异终端滑模控制器能在终端滑模面的基础上进行非奇异化修正，并结合在线自适应参数估计，实现对有限时间高精度控制的有力支持。它在应对建模不准、外部扰动以及系统参数变化时，仍可保持系统的稳定性与高效性，同时有效抑制抖振并确保快速收敛，从而在需要快速精准响应的应用中展现出明显优势。滑模控制设计通常包括两个步骤：a）滑模面设计；b）控制律设计。

2.1　滑模面设计

对于不完整系统特性，为了更快地收敛，引入非奇异项和快速项，在控制器的滑模设计中使用了 3 个滑模面分别控制 3 个机械臂的角度，分别为第一主动臂滑模面 s_1、第二主动臂滑模面 s_2 和欠驱动臂滑模面 s_3。

$$s_1=\dot{q}_1+\lambda_1\left|q_1-q_{1\mathrm{ref}}\right|^{n/p}\cdot\mathrm{sgn}\left(q_1-q_{1\mathrm{ref}}\right), \tag{7}$$

$$s_2=\dot{q}_2+\lambda_1\left|q_2-q_{2\mathrm{ref}}\right|^{n/p}\cdot\mathrm{sgn}\left(q_2-q_{2\mathrm{ref}}\right), \tag{8}$$

$$s_3=\dot{q}_3+\lambda_1\left|q_3-q_{3\mathrm{ref}}\right|^{n/p}\cdot\mathrm{sgn}\left(q_3-q_{3\mathrm{ref}}\right)。 \tag{9}$$

式（7）~（9）中：q 为机械臂的实际角度；q_{ref} 为平台的参考轨迹；$\dot{q}$ 为平台的速度，表示平台位置的变化速率；λ_1 为机械臂角度误差的滑膜增益，控制系统响应速度；$\mathrm{sgn}(q-q_{\mathrm{ref}})$ 为符号函数，用于确定平台与理想轨迹的相对误差；$\left|q-q_{\mathrm{ref}}\right|^{n/p}$ 为误差项加权，其中 p 为滑模面设计中决定了误差项“强度”或“幅度”的参数，n 为控制滑模面上误差项的“收敛性”调节参数，控制非线性调整的速度，加入了 n/p 加速项，通过指数调节，加快系统的响应速度。

2.2　控制律设计

滑模面定义了系统的“滑模”状态，而控制律则基于滑模面来计算控制输入。控制输入的目的是使

得系统的状态沿滑模面滑动，并最终收敛到平衡点。首先定义控制输入的控制律如下：

$$u_1=-c_1\cdot s_1-\partial_1\cdot|s_1|^{h/(h+1)}\cdot\mathrm{sgn}(s_1)-\gamma_1\cdot s_1^2, \tag{10}$$

$$u_2=-c_2\cdot s_2-\partial_2\cdot|s_2|^{h/(h+1)}\cdot\mathrm{sgn}(s_2)-\gamma_2\cdot s_2^2, \tag{11}$$

$$u_3=-c_3\cdot s_3-\partial_3\cdot|s_3|^{h/(h+1)}\cdot\mathrm{sgn}(s_3)-\gamma_3\cdot s_3^2。 \tag{12}$$

式（10）~（12）中：c_1、c_2、c_3为控制增益，控制平台和摆杆的反馈效果；∂_1、∂_2、∂_3为调整项，基于滑模面加速项的大小动态调整控制力矩；γ_1、γ_2、γ_3为非线性项，引入非线性项可以进一步提高控制性能和系统鲁棒性；h为一个用于控制非线性项强度的参数，$h/(h+1)$使得系统在面对误差时的非线性响应较为平滑，尤其是误差较大时，避免了过度控制。

控制律的设计通过反馈滑模面状态，确保系统在任何时间都能够沿着滑模面稳定运动，并且通过加速项进一步提高控制系统的响应速度。此外，该设计还增加了动态增益：

$$\Delta c_1=\gamma_1\cdot|s_1|-\beta_1\cdot c_1, \tag{13}$$

$$\Delta c_2=\gamma_2\cdot|s_2|-\beta_2\cdot c_2, \tag{14}$$

$$\Delta c_3=\gamma_3\cdot|s_3|-\beta_3\cdot c_3。 \tag{15}$$

式（13）~（15）中：β_1、β_2、β_3为正则化项系数，分别用于防止增益c_1、c_2、c_3无限增大。

此外采用$-\beta c$作为抑制项，用于动态平衡增益的增大趋势，以保持系统的稳定性。通过增益自适应律形式对增益进行动态调节，调整滑模面的大小和控制性能，以确保系统的稳定和较快响应速度。

2.3 李雅普诺夫稳定性分析

首先根据式（7）~（9）构建一个基于滑模面误差的李雅普诺夫函数：

$$V(s_1,\ s_2,\ s_3)=\frac{1}{2}s_1^2+\frac{1}{2}s_2^2+\frac{1}{2}s_3^2, \tag{16}$$

为分析系统的稳定性，需计算式（16）导数：

$$\dot V(s_1,\ s_2,\ s_3)=\frac{\partial V}{\partial s_1}\dot s_1+\frac{\partial V}{\partial s_2}\dot s_2+\frac{\partial V}{\partial s_3}\dot s_3。 \tag{17}$$

由于$\frac{\partial V}{\partial s_1}=s_1$、$\frac{\partial V}{\partial s_2}=s_2$、$\frac{\partial V}{\partial s_3}=s_3$，从而得：

$$\dot V(s_1,\ s_2,\ s_3)=s_1\dot s_1+s_2\dot s_2+s_3\dot s_3, \tag{18}$$

式（17）~（18）中：$\dot s_1$、$\dot s_2$、$\dot s_3$为滑膜面误差的导数。

根据式（10）~（12），可知平台和摆杆的控制力矩分别为u_1、u_2、u_3，从而计算得到s_1、s_2、s_3的导数如下：

$$\dot s_1=\ddot q_1+\lambda_1\frac{n}{p}|q_1-q_{1\mathrm{ref}}|^{(n/p)-1}\mathrm{sgn}(q_1-q_{1\mathrm{ref}})\dot q_1, \tag{19}$$

$$\dot s_2=\ddot q_2+\lambda_2\frac{n}{p}|q_2-q_{2\mathrm{ref}}|^{(n/p)-1}\mathrm{sgn}(q_2-q_{2\mathrm{ref}})\dot q_2, \tag{20}$$

$$\dot s_3=\ddot q_3+\lambda_3\frac{n}{p}|q_3-q_{3\mathrm{ref}}|^{(n/p)-1}\mathrm{sgn}(q_3-q_{3\mathrm{ref}})\dot q_3。 \tag{21}$$

式中：$\ddot q$为摆杆的加速度。

结合以上的表达式，将$\dot s_1$、$\dot s_2$、$\dot s_3$代入李雅普诺夫函数的导数公式可得：

$$\begin{aligned}\dot V(s_1,\ s_2,\ s_3)=&s_1\left(\ddot q_1+\lambda_1\frac{n}{p}|q_1-q_{1\mathrm{ref}}|^{(n/p)-1}\mathrm{sgn}(q_1-q_{1\mathrm{ref}})\dot q_1\right)+\\&s_2\left(\ddot q_2+\lambda_2\frac{n}{p}|q_2-q_{2\mathrm{ref}}|^{(n/p)-1}\mathrm{sgn}(q_2-q_{2\mathrm{ref}})\dot q_2\right)+\\&s_3\left(\ddot q_3+\lambda_3\frac{n}{p}|q_3-q_{3\mathrm{ref}}|^{(n/p)-1}\mathrm{sgn}(q_3-q_{3\mathrm{ref}})\dot q_3\right)。\end{aligned} \tag{22}$$

最后通过控制律和系统动力学方程设计，使系统误差逐渐减小。具体来说，控制器的设计确保了每个误差项的变化率为负，且随着时间推移，控制器会逼近0。

由于控制律的目的是将误差变小，可以推测出$\dot V(s_1,\ s_2,\ s_3)$为负定，即

$$\dot V(s_1,\ s_2,\ s_3)\leqslant-\varepsilon(s_1^2+s_2^2+s_3^2)。 \tag{23}$$

式中：$\varepsilon>0$为常数，表示系统能量的衰减速度。

从而可知该控制器确保了系统稳定性，并且系统误差将逐渐收敛到0。此外，采用四阶龙格－库塔法对系统的动力学方程进行数值计算，更新系统的状态变量，还设置控制输入限制。为了避免控制输入过大，导致系统不稳定或者执行器损坏，对控制扭矩进行限制。流程图如图3所示。

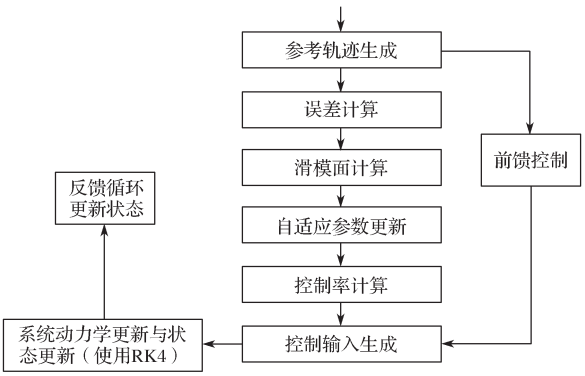


图3 耦合系统自适应快速终端滑模控制器流程图

Fig. 3 Flowchart of the adaptive fast terminal sliding mode controller for the coupled system

3 仿真验证与结果分析

3.1 控制器滑模面参数设置

为验证自适应非奇异快速终端滑模控制器的有效性和实用性，在Matlab/Simulink环境下建立的平台及多级摆杆耦合机构的动力学模型中，采用加入增

益参数调节的非奇异终端滑模控制和自适应快速终端滑模控制进行仿真实验。通过仿真对比分析了两种控制方法的表现。此外，还对机械臂系统的位置和速度进行了跟踪。

倒摆系统的初始条件设置如下：平台的初始角度为 0°，第一主动臂、第二主动臂和欠驱动臂的初始角度均为 45°，它们的目标状态为将摆杆从 45° 位置摆起至 90° 并保持稳定。选择 45° 作为初始摆杆角度是因为它代表了一种较为常见的非平衡初始状态，能够充分验证控制策略在从初始不稳定状态到稳定状态转变过程中的表现。此外，目标状态为 90°，即将摆杆摆起至完全垂直的位置，并维持其稳定性，以测试控制器在极限角度下的鲁棒性和稳定性。在实验过程中，考虑到系统可能受外部扰动，干扰项被设定为随时间变化的随机扰动。此设置旨在模拟现实中系统可能面临的不可预测和多变的环境因素，评估控制器在应对动态和不确定干扰时的有效性。为保证控制策略的应用具有代表性和广泛的适用性，设置表 2 所示系统的物理参数。

表 2　机械臂结构的主要参数表

Table 2　Main parameter table of the robotic arm structure

参数类型	参数详情（符号、数值、单位）		
基础参数	q_{ref}=45°	b=0.1 N·s/m	m_c=5 kg
质量参数	m_1=1 kg	m_2=1 kg	m_3=0.5 kg
长度参数	l_1=1 m	l_2=1 m	l_3=0.5 m
转动惯量	I_1=0.01 kg·m^2	I_2=0.02 kg·m^2	I_3=0.01 kg·m^2

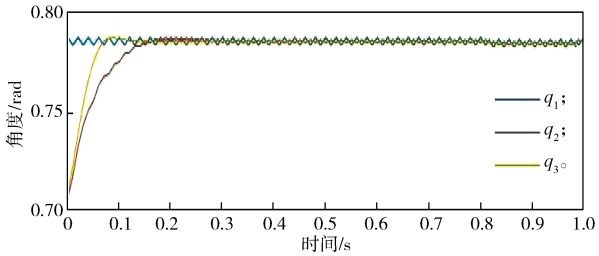
表中 m_c 为平台质量，b 为阻尼系数，平台干扰设置为随时间变化的随机干扰。

3.2　仿真结果分析

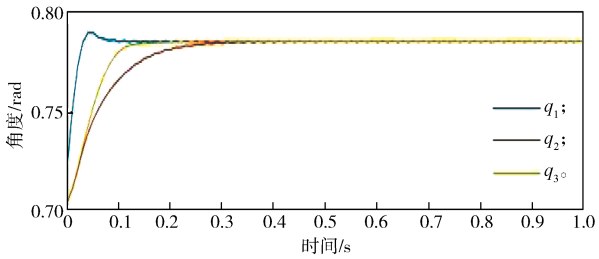
首先，为了验证提出的自适应非奇异快速终端滑模控制器在倒立摆结构中有更快速的响应速度和更好的抗干扰性能，主要对机械臂角度的跟踪、关节速度以及控制误差的动态变化进行比较。

图 4 为不同非奇异终端滑模控制下机械臂的关节角度跟踪图。从图 4a 中可知，在初始阶段，可能有一些过度响应，这些关节角度在仿真开始时有一定的初始偏差（接近 0.75 rad），但随着时间推移，角度迅速收敛到期望的目标值（接近 π/4，即 0.785 rad），控制系统非常有效。控制增益和自适应调节机制帮助关节快速响应并达到目标角度，且系统没有出现过冲或超调。

由图 4b 中可以看出，初始时第一主动臂所受振荡较大，对干扰较为敏感，且在 0.4 s 之后恢复稳定，收敛较慢。对比分析图 4a 和 b，可知相比于添加增益参数的非奇异终端滑模控制在 0.25 s 左右恢复稳定且出现过冲的情况下，在自适应非奇异快速滑模控制下各个关节角度没有出现过冲情况，且在 0.15 s 左右恢复稳定，因此自适应非奇异快速滑模控制器表现出更加稳定的控制性能和更快的收敛速度。



a）自适应

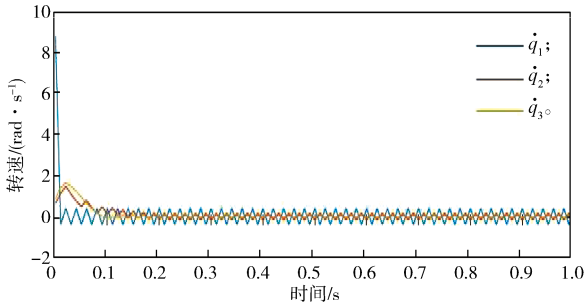


b）加入增益参数

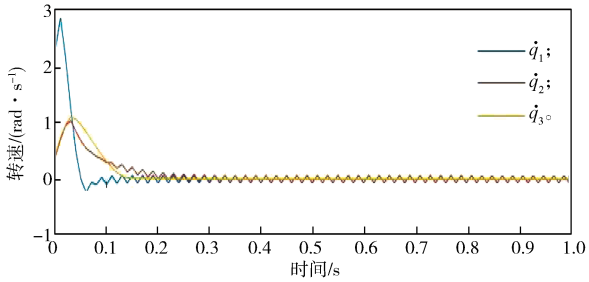
图 4　不同非奇异终端滑模控制下机械臂的关节角度跟踪曲线

Fig. 4　Joint angle tracking diagram for robotic arms under different non-singular terminal sliding mode control

图 5 为不同非奇异终端滑模控制下机械臂的关节速度跟踪图。



a）自适应



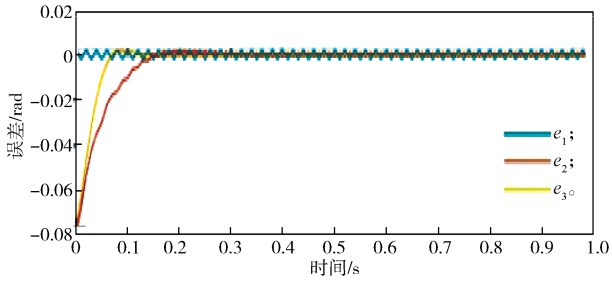
b）加入增益参数

图 5　不同非奇异终端滑模控制下机械臂的关节速度跟踪图

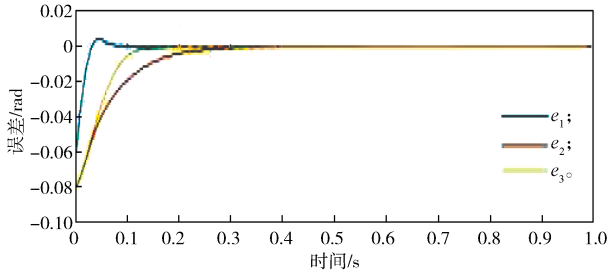
Fig. 5　Joint velocity tracking diagram for robotic arms under different non-singular terminal sliding mode control

由图 5a 可知，初始转速为 0，且系统的转速在初期为 0。随着关节角度的变化，速度曲线在初期逐渐上升，并在后期迅速减小至 0，关节速度平稳地减小并趋近于 0，表明关节在到达目标角度后保持静止，说明控制器对角速度的调节效果很好，没有产生过度振荡，在达到 0 时表现平稳，显示出控制系统的高效性和稳定性。从图 5b 中可知，在初期振荡过后，速度逐渐减小并趋于稳定，且整个过程中的收敛速度较慢。对比分析图 5a 和 b 可知，在加入增益参数的非奇异终端滑模控制下，系统在 0.1 s 时有更大的速度波动，对于外界干扰较为敏感；自适应非奇异快速终端滑模控制器波动在 0.1 s 的时候较为平缓，并且没有过冲情况，收敛速度较快，系统更加快速稳定，从而表明自适应非奇异快速终端滑模控制更加适用于复杂路面这类需要快速反应和控制的场景。

图 6 为不同非奇异快速终端滑模控制下的机械臂的控制误差动态跟踪图。



a）自适应



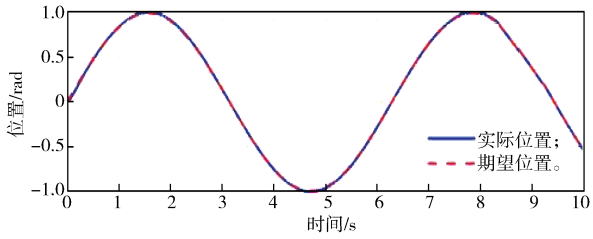
b）加入增益参数

图 6 不同非奇异快速终端滑模控制下的机械臂的控制误差动态跟踪

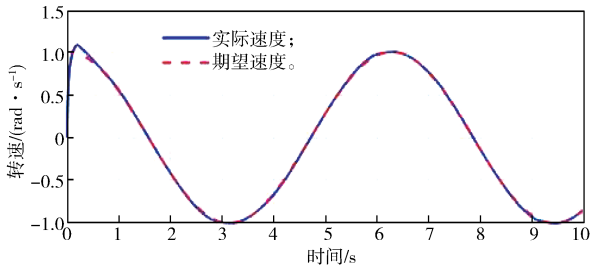
Fig. 6 Dynamic tracking of control errors for robotic arms under different non-singular fast terminal sliding mode control

由图 6a 可知自适应条件下初期误差较大，随着时间的推移，误差快速减小，最终趋近 0，表明控制系统已成功消除关节角度误差。控制误差曲线也平稳收敛，表明系统的稳定性和收敛性均较好。由图 6b 可知，加入增益参数后控制误差收敛较慢，系统需更长时间才能将误差降到接近 0。虽然最终误差也很小，但收敛时间较长。可看到误差在开始时经历了较大的振荡。对比分析图 6a 和 b 可知，在加入增益参数的非奇异终端滑模控制下，系统刚开始时有更大的误差波动，可能会影响对时间敏感的应用，而自适应非奇异快速终端滑模控制展现了快速的误差收敛和较小的振荡，系统控制效果较好，适合对稳定性和响应速度都有较高要求的应用。

图 7 为机械臂系统的轨迹和速度跟踪图。由图 7 可以看出，机械臂系统的实际位置以及实际速度与理想值误差极小，结果进一步表明自适应非奇异快速终端滑模控制器有着优秀的位置和速度跟踪能力。



a）机械臂系统轨迹



b）速度跟踪

图 7 机械臂系统的轨迹和速度跟踪图

Fig. 7 Trajectory and velocity tracking diagram of the robotic arm system

综上所述，所提出的自适应快速终端滑模控制策略参数优化合理，能够在动态响应和稳态性能上显著提升系统控制效果，为解决倒立摆控制问题提供了高效的技术路径。

4 结语

本文提供了一种自适应非奇异快速终端控制策略。首先，通过对轮式移动机械臂的运动特性进行分析，建立了其等效简化模型，为后续的动态分析提供了依据。随后，基于该简化模型，构建了机械臂在复杂路面下的动力学模型，以全面描述机械臂在受到不同干扰情境下的运动行为。基于动力学模型，提出了一种针对系统在复杂环境的跟踪控制方法，目的是能对机械臂在运动过程中进行稳定控制。

为验证所提方法的有效性，设计了不同控制策略下耦合机构系统的仿真实验，并进行了对比分析。仿真实验结果表明，所设计的控制器在动态响应、稳态误差消除、控制力矩稳定性以及自适应参数收敛性等方面均表现出优异的性能。特别是在两连杆机械臂系统的应用中，采用自适应非奇异快速终端滑模控制

（ANSTSMC）机制可显著提升系统性能，成功实现机械臂系统的失稳恢复与跟踪控制。

本文提出的控制方法不仅可有效解决轮式移动机械臂在运动过程中的失稳问题，还为其他类型的移动机器人在设计失稳恢复行为控制器时提供了理论依据和实践指导。

参考文献：

[1] CHENG C，ZHANG H，PENG H，et al. Stability Control for End Effect of Mobile Manipulator in Uneven Terrain Based on Active Disturbance Rejection Control[J]. Assembly Automation，2021，41(3)：369−383.

[2] GUO S，SONG T，XI F F，et al. Tip-Over Stability Analysis for a Wheeled Mobile Manipulator[J]. Journal of Dynamic Systems，Measurement，and Control，2017，139(5)：054501.

[3] PETROVIĆ G R，MATTILA J. Analytic Solutions for Wheeled Mobile Manipulator Supporting Forces[J]. IEEE Access，2022，10：43235−43255.

[4] 李振浩，管声启，何建新 . 遗传算法在仿生机械手指多目标尺寸优化中的应用 [J]. 机械科学与技术，2020，39(10)：1534−1538.
LI Zhenhao，GUAN Shengqi，HE Jianxin. Applying Genetic Algorithmto Multi-Objective Optimization of Size of Bionic Robot Finger[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering，2020，39(10)：1534−1538.

[5] 黄自鑫，侯梦毓，危少奇，等 . 平面 Acrobot 和 Pendubot 的统一控制策略 [J]. 深圳大学学报 (理工版)，2023，40(3)：275−283.
HUANG Zixin，HOU Mengyu，WEI Shaoqi，et al. The Unified Control Strategy for Planar Acrobot and Pendubot[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)，2023，40(3)：275−283.

[6] HE B，WANG S，LIU Y J. Underactuated Robotics：A Review[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems，2019，16(4)：172988141986216.

[7] 崔宝影，程权成 . 欠驱动机器人系统稳定性与跟踪控制研究 [J]. 三门峡职业技术学院学报，2024，23(2)：129−133.
CUI Baoying，CHENG Quancheng. Research on System Stability and Tracking Control of Underactuated Robot[J]. Journal of Sanmenxia Polytechnic，2024，23(2)：129−133.

[8] 赵海滨，刘　冲，陆志国，等 . 基于 Matlab/Simulink 的欠驱动机械臂仿真实验 [J]. 实验技术与管理，2018，35(6)：135−138, 143.
ZHAO Haibin，LIU Chong，LU Zhiguo，et al. Simulation Experiment of Under-Actuated Manipulator Based on Matlab/Simulink[J]. Experimental Technology and Management，2018，35(6)：135−138, 143.

[9] BOUKATTAYA M，MEZGHANI N，DAMAK T. Adaptive Nonsingular Fast Terminal Sliding-Mode Control for the Tracking Problem of Uncertain Dynamical Systems[J]. ISA Transactions，2018，77：1−19.

[10] 王亚午，陈思雨，吴俊东，等 . 结合迭代学习方法和倒转方法的垂直多欠驱动关节机械臂摇起控制策略 [J/OL]. 机械科学与技术，2024：1−8. (2024−06−20). https://link.cnki.net/doi/10.13433/j.cnki.1003-8728.20240085.
WANG Yawu，CHEN Siyu，WU Jundong，et al. Swing-Up Control Strategy for Vertical Manipulator with Multiple Passive Joints Combining Iterative Learning Method and Rewinding Method[J/OL]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering，2024：1−8. (2024−06−20). https://link.cnki.net/doi/10.13433/j.cnki.1003-8728.20240085.

[11] 林　壮，朱齐丹，邢卓异 . 基于遗传优化的水平欠驱动机械臂分层滑模控制 [J]. 控制与决策，2008，23(1)：99−102.
LIN Zhuang，ZHU Qidan，XING Zhuoyi. Hierarchical Sliding Mode Control for Horizontal Underactuated Manipulators with Optimization Based on GA[J]. Control and Decision，2008，23(1)：99−102.

[12] 路宇瀚，白欣慧，李渝哲 . 基于多倒立摆系统动态博弈的多智能体强化学习研究 [J/OL]. 控制工程，2024：1−7. (2024−02−26). https://link.cnki.net/doi/10.14107/j.cnki.kzgc.20230290.
LU Yuhan，BAI Xinhui，LI Yuzhe. Research on Multi-Agent Reinforcement Learning Based on Dynamic Game of Multi-Inverted Pendulum System[J/OL]. Control Engineering of China，2024：1−7. (2024−02−26). https://link.cnki.net/doi/10.14107/j.cnki.kzgc.20230290.

[13] KAUSAR Z，STOL K，PATEL N. The Effect of Terrain Inclination on Performance and the Stability Region of Two-Wheeled Mobile Robots[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems，2012，9(5)：218.

（责任编辑：姜利民）