doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.13.005

基于自适应模型补偿控制的名优茶采摘系统设计与试验

俞传阳[1,2]　陈黎卿[1,3]　张留洋[1,3]　刘立超[1,3]　刘　策[1,3]　安　雪[1,3]

(1.安徽农业大学工学院,合肥 230036;2.安徽建筑大学机械与电气工程学院,合肥 230601;
3.安徽省智能农机装备工程研究中心,合肥 230036)

摘要:智能化采摘是提升茶叶产业效率的关键发展方向。针对当前名优茶采摘机械臂存在的定位精度不足和稳定性欠佳问题,本研究提出了一种自适应模型补偿的控制策略。首先,采用拉格朗日方法构建了机械臂动力学模型;其次,设计了径向基函数(Radial basis function, RBF)神经网络和非线性扰动观测器(Nonlinear disturbance observer, NDO),分别用于逼近机械臂动力学模型误差和估计补偿系统外部干扰与未建模误差;进而,基于 Lyapunov 稳定性理论证明了所提出的控制系统具有稳定性。仿真试验结果表明:引入非线性干扰观测器后,三轴机械臂的位置与速度跟踪性能显著提升,位置跟踪误差降低至 0.18、0.01、0.43 rad,波动幅度明显降低。田间采摘验证试验表明,相比传统 PID 控制,该策略使机械臂运动加速度波动降低 86.8%,振动幅度减小 94.8%,单棵茶芽平均采摘耗时约为 1.00 s,最大成功采摘率达到 51.82%,单棵茶芽最优采摘时间达 0.79 s。本文研究有效解决了茶芽采摘过程中的高精度定位与运动平稳协同控制难题,为名优茶智能化采摘提供了可靠的技术方案。

关键词:茶叶采摘机器人;机械臂控制;自适应补偿;非线性扰动观测器;运动稳定性

中图分类号:S225.93　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)13-0079-10　　**OSID**:

Design and Testing of High-quality Tea Picking System Based on Adaptive Model Compensation Control

Yu Chuanyang[1,2]　Chen Liqing[1,3]　Zhang Liuyang[1,3]　Liu Lichao[1,3]　Liu Ce[1,3]　An Xue[1,3]

(1. *College of Engineering*, *Anhui Agricultural University*, *Hefei* 230036, *China*
2. *School of Mechanical and Electrical Engineering*, *Anhui Jianzhu University*, *Hefei* 230601, *China*
3. *Anhui Province Engineering Research Center of Intelligent Agricultural Machinery*, *Hefei* 230036, *China*)

Abstract: Intelligent picking is a key development for improving the efficiency of the tea industry. Aiming to address the current issues of poor positioning accuracy and stability of mechanical arms used for picking high-quality tea, an adaptive model compensation control strategy was proposed. Firstly, a mechanical arm dynamics model was constructed by using the Lagrange method. Secondly, a radial basis function (RBF) neural network and a nonlinear disturbance observer (NDO) were designed to adaptively compensate for the dynamic model errors and external disturbances, respectively. Furthermore, the stability of the proposed control system was proven based on Lyapunov stability theory. Simulation test results showed that, following the introduction of the nonlinear disturbance observer, the position and velocity tracking performance of the three-axis robotic arm improved significantly, with position tracking errors reduced to 0.18 rad, 0.01 rad, and 0.43 rad, and fluctuation amplitudes noticeably decreased. Field picking validation tests showed that, compared with traditional PID control, this strategy reduced the robotic arm's acceleration fluctuations by 86.8%, reduced vibration amplitude by 94.8%, achieved an average picking time of approximately one second per cycle and a successful picking rate of 51.82%, as well as an optimal picking speed of 0.79 s per tea bud. The research successfully overcame the challenges of high-precision positioning and smooth motion coordination control during tea bud picking, offering a reliable technical solution for the intelligent picking of premium tea.

Key words: tea picking robot; robotic arm control; adaptive compensation; nonlinear disturbance observer; motion stability

收稿日期:2025-09-14　修回日期:2025-10-31

基金项目:茶树生物学与资源利用国家重点实验室开放课题(SKLTOF20230123)

作者简介:俞传阳(1988—),男,博士生,安徽建筑大学讲师,主要从事智能农机装备研究,E-mail:chuanyang@ahjzu.edu.cn

通信作者:安雪(1991—),女,副教授,博士,主要从事智能农机装备与农业采摘机器人研究,E-mail:anxue@ahau.edu.cn

0 引言

中国作为全球最大的茶叶生产国,种植面积已达 3.27×10^6 hm^2[1],而茶园从业人员 50 岁以上占比达 61.35%,且名优茶采摘机械化率仅为 4.32%[2]。可见,名优茶采摘面临劳动力短缺、效率低下及季节性产能受限等突出矛盾,发展智能化采摘装备已成为产业转型升级的迫切需求[3-4]。现有茶叶采摘机械臂主要采用直角坐标式[5-6]、Delta 并联式[7-8]及串联式[9]3 类构型,但在实际作业中,机械臂动力学模型不确定性、系统惯性扰动及环境干扰等因素,显著降低了茶芽定位精度与采摘成功率。因此,实现高精度、强抗扰的机械臂控制,是突破名优茶智能化采摘瓶颈的核心关键之一。

目前,采摘机械臂的控制策略主要分为传统控制方法与现代智能控制方法两类。传统控制方法如 PID 控制[10-12]结构简单、易于实现,但在面对非线性、强耦合的机械臂系统时,往往因参数固定而缺乏自适应能力,导致对外界干扰和模型变化的鲁棒性较差。滑模控制[13-15]虽具有较强的鲁棒性,但存在明显的抖振问题,影响控制精度和执行器寿命[16]。反步控制[17]和基于模型预测的控制方法(MPC[18]、NMPC[19])虽在特定场景下表现良好,但其性能高度依赖精确的数学模型,对参数摄动和未建模动态十分敏感,在实际复杂的茶园环境中适用性有限。

为进一步提高机械臂在不确定环境下的控制性能,近年来,结合神经网络与扰动观测器的复合控制方法逐渐受到关注。RBF 神经网络因其强大的非线性逼近能力和自适应学习特性,被广泛应用于机械臂动力学模型的在线补偿。例如,陈明方等[20]利用 RBF 网络对 3-PTT 并联机构末端运动误差进行补偿,有效提升了末端定位精度,但其未考虑外部时变干扰的影响。另一方面,非线性扰动观测器(NDO)能够快速估计并补偿系统所受的外部扰动和未建模动态,如尚东阳等[21]将 NDO 应用于机械臂抑振中,显著改善了柔性机械臂角速度波动性,然而该方法对模型内部不确定性的处理仍显不足。值得注意的是,现有研究多将 RBF 与 NDO 孤立使用,未能充分发挥二者在模型误差逼近和扰动补偿方面的协同潜力,且缺乏在农业采摘场景下的集成验证。

为进一步提高机械臂模型精度和振动抑制能力,本文提出一种自适应模型补偿的机械臂控制策略:通过 RBF 神经网络自适应方式在线逼近机械臂动力学中未建模部分,同时结合 NDO 快速估计和补偿外部干扰和系统扰动,提高模型抗干扰能力;基于 Lyapunov 稳定性理论构建全局控制器,从而显著提高系统的跟踪精度和鲁棒性;在此基础上结合 7 段 S 形曲线轨迹规划进一步降低加速度突变导致的抖动。最终通过田间试验验证该策略在名优茶采摘中的实际效果,以期为解决名优茶采摘机械臂高精度控制问题提供有效方案。

1 采摘机械臂设计与工作原理

1.1 采摘机械臂设计

名优茶采摘机器人总体结构如图 1 所示,主要由履带底盘、龙门架、电池仓、采-收-存一体化采摘器、*XYZ* 三轴直角机械臂等组成。主要结构参数如表 1 所示。

表 1 名优茶采摘系统主要结构参数

Tab. 1 Main structural parameters of famous tea picking system

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 200×1 200×1 500
电池容量/(A·h)	100
电池电压/V	48
最大行走速度/(m·s^{-1})	4
采摘范围(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 000×1 000×350
平均采摘速度/(棵·s^{-1})	1.00

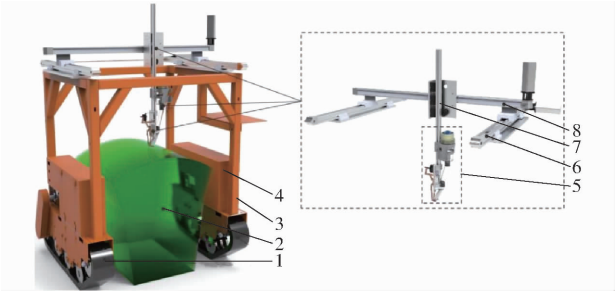


图 1 采摘机器人结构图

Fig. 1 Structure of picking robot

1. 履带底盘 2. 茶垄 3. 龙门架 4. 电池仓 5. 采-收-存一体化采摘器 6、7、8. *X*、*Y*、*Z* 轴直角机械臂

定位与采摘过程中,控制系统需要实时调整机械臂位置和速度参数,减小茶芽定位误差,确保采摘器准确定位到茶芽有效采摘位置,完成剪切动作。因此,机械臂快速且准确的定位控制是保障茶芽精准采摘和稳定输送的关键。

图 2 为机械臂采摘运动过程。首先机械臂根据目标空间位置进行初定位,运动到茶芽正上方 50 mm 处,如图 2a 所示,并开启负压进行预吸;然后,机械臂沿 *Z* 轴下降,剪切茶芽,如图 2b 所示;最后,机械臂迅速上提,可确保茶芽和茶梗进一步脱离,并完成负压吸取和输送过程,如图 2c 所示。定位与采摘过程中,控制系统需要实时调整机械臂位置和速度参数,减小茶芽定位误差,确保采摘器准确

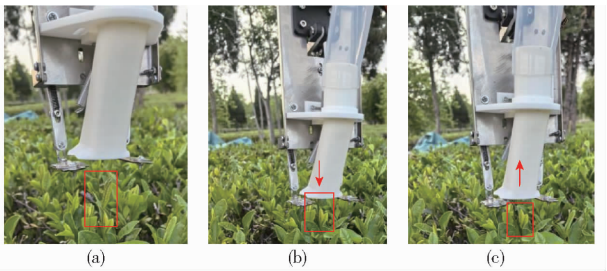


图 2　采摘运动过程

Fig. 2　Process of picking

定位到茶芽有效采摘位置。

1.2　动力学模型

拉格朗日动力学建模方法从采摘机械臂能量角度出发，能简化复合动作带来的动力学问题[22]，因此本文对机构系统选择拉格朗日动力学建模方法，即

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{F}(\dot{\boldsymbol{q}})+\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})=\boldsymbol{\tau} \tag{1}$$

式中　$\boldsymbol{q}$——机械臂关节向量

$\boldsymbol{\tau}$——实际控制输入

$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})$——质量矩阵

$\boldsymbol{F}(\dot{\boldsymbol{q}})$——摩擦力项

$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})$——重力项

机械臂控制精度是影响名优茶采摘效果的关键因素之一[23]。传统的控制方法虽然能够实现机械臂的快速运动控制，但需要对机械臂精确建模，且机械臂在快速采摘动作过程中不可避免地存在摩擦力以及外部干扰[24]。

在实际的模型中，存在很多不确定因素以及相关参数准确度等问题，可将式(1)模型参数表示为

$$\boldsymbol{M}_0(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{F}_0(\dot{\boldsymbol{q}})+\boldsymbol{G}_0(\boldsymbol{q})+\boldsymbol{d}=\boldsymbol{\tau} \tag{2}$$

其中　$\boldsymbol{M}_0=\mathrm{diag}(\boldsymbol{M}_{11},\boldsymbol{M}_{22},\boldsymbol{M}_{33})=$

$$\mathrm{diag}\left(\frac{m_x l_{ph}^2}{4\pi^2}+j_x,\frac{m_y l_{ph}^2}{4\pi^2}+j_y,\frac{m_z l_{ph}^2}{4\pi^2}+j_z\right)$$

$$\boldsymbol{F}_0=\mathrm{diag}(F_x,F_y,F_z)$$

$$\boldsymbol{G}_0=\left[0,0,\frac{m_z g\, l_{ph}}{2\pi}\right]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{d}=\boldsymbol{d}_m+\boldsymbol{d}_l$$

式中　l_{ph}——线性滑台导程，取 5.2 mm/r

m_x、m_y、m_z——三轴等效质量，分别取 2.75、1.82、1.02 kg

j_x、j_y、j_z——三轴等效转动惯量，分别取 0.05、0.03、0.02 kg·m^2

F_x、F_y、F_z——三轴已知计算受力，N

$\boldsymbol{M}_0$、$\boldsymbol{F}_0$、$\boldsymbol{G}_0$——不包括建模误差的准确项

$\boldsymbol{d}$——系统总未知项

$\boldsymbol{d}_m$——总系统建模误差

$\boldsymbol{d}_l$——非线性扰动项

模型参数基于机械臂三维模型在 Solidworks 中通过质量属性分析获得。

将动力学方程表示为状态方程形式，即

$$\dot{\boldsymbol{q}}_1=\boldsymbol{q}_2 \tag{3}$$

$$\dot{\boldsymbol{q}}_2=\boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{q}_1)[\boldsymbol{\tau}-\boldsymbol{d}-\boldsymbol{F}(\boldsymbol{q}_2)-\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}_1)] \tag{4}$$

式中$[\boldsymbol{q}_1,\boldsymbol{q}_2]^{\mathrm{T}}=[\boldsymbol{\theta},\dot{\boldsymbol{\theta}}]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{\theta}$、$\dot{\boldsymbol{\theta}}$ 分别表示各轴驱动电机转角位移与角速度的向量表达。

2　模型补偿的自适应控制器设计

2.1　高增益观测器设计

由于速度 $\dot{\boldsymbol{q}}$、加速度 $\ddot{\boldsymbol{q}}$ 等系统状态量在实际中无法直接获取，可以通过高增益观测器[25]来估计。通过观测器，系统状态估计 $\hat{\boldsymbol{q}}$ 和$\dot{\hat{\boldsymbol{q}}}$记为 $\boldsymbol{\pi}_1$和 $\boldsymbol{\pi}_2$，ε 为小正数(决定观测器收敛速度)，$\lambda_1>0$ 为设计参数，则有

$$\dot{\boldsymbol{\pi}}_1=\boldsymbol{\pi}_2/\varepsilon \tag{5}$$

$$\dot{\boldsymbol{\pi}}_2=(-\lambda_1\boldsymbol{\pi}_2-\boldsymbol{\pi}_1+\boldsymbol{q})/\varepsilon \tag{6}$$

轨迹跟踪误差 $\boldsymbol{e}_1$和轨迹跟踪估计误差 $\boldsymbol{e}_2$分别定义为

$$\boldsymbol{e}_1=\boldsymbol{\pi}_1-\boldsymbol{q}_d \tag{7}$$

$$\boldsymbol{e}_2=\boldsymbol{\pi}_2-\boldsymbol{\alpha} \tag{8}$$

式中　$\boldsymbol{q}_d$——目标位置

其中，虚拟控制量 $\boldsymbol{\alpha}$ 及其更新率$\dot{\boldsymbol{\alpha}}$设计为

$$\boldsymbol{\alpha}=\dot{\boldsymbol{q}}_d-\boldsymbol{K}_1\boldsymbol{e}_1 \tag{9}$$

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}}=-\boldsymbol{K}_1(\dot{\boldsymbol{q}}-\dot{\boldsymbol{q}}_d)+\ddot{\boldsymbol{q}}_d \tag{10}$$

式中　$\boldsymbol{K}_1$——正定增益矩阵

2.2　动力学模型补偿控制器设计

采用 RBF 神经网络逼近未知动力学方程

$$f(\boldsymbol{X})=\boldsymbol{W}^{*\mathrm{T}}\varphi(\boldsymbol{X})+\boldsymbol{B}\tanh\left(\frac{\boldsymbol{e}_2}{b}\right)$$

式中　$\boldsymbol{W}^*$——神经网络的权重估计

φ——高斯激活函数

$\boldsymbol{B}$——鲁棒补偿项时变增益矩阵

b——正数，控制双曲正切函数的形状

$\boldsymbol{X}$——输入层

$\tanh\left(\frac{\boldsymbol{e}_2}{b}\right)$——双曲正切函数，用于鲁棒补偿逼近误差和观测误差

输入层

$$\boldsymbol{X}=[\boldsymbol{\pi}_1\quad\boldsymbol{\pi}_2\quad\boldsymbol{\alpha}_1\quad\dot{\boldsymbol{\alpha}}_1]^{\mathrm{T}}$$

隐藏层包含 16 个高斯径向基函数节点组成，采用高斯激活函数$\varphi_i(\boldsymbol{X})=\exp(-\|\boldsymbol{X}_i-\boldsymbol{c}_i\|^2/(2b_i^2))$，其中 $i=1,2,\cdots,16$；$\boldsymbol{c}_i$ 为第 i 个高斯径向基函数的中心向量，b_i 为高斯激活函数中的第 i 个正数，控制双曲正切函数的形状，输出层 $f(\boldsymbol{X})$通过权重的线性加权组合来逼近未知动力学项。神经控制器输入 τ_{feedbcak}由比例误差反馈项($-\boldsymbol{e}_1$)、速度误差

反馈项($-\boldsymbol{K}_2\boldsymbol{e}_2$)、神经网络补偿项($-\boldsymbol{W}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{S}(\boldsymbol{X})$)和鲁棒补偿项$\left(-\boldsymbol{B}\tanh\left(\frac{\boldsymbol{e}_2}{b}\right)\right)$构成,其表达式为

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{feedbcak}} = -\boldsymbol{e}_1 - \boldsymbol{K}_2\boldsymbol{e}_2 - \boldsymbol{W}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{S}(\boldsymbol{X}) - \boldsymbol{B}\tanh\left(\frac{\boldsymbol{e}_2}{b}\right) \tag{11}$$

式中 $\boldsymbol{K}_2$——正定增益矩阵

$\boldsymbol{S}(\boldsymbol{X})$——神经网络的基函数向量

自适应更新律

$$\dot{\boldsymbol{W}}^* = \boldsymbol{\Gamma}_w(\boldsymbol{S}(\boldsymbol{X})\boldsymbol{e}_2^{\mathrm{T}} - \sigma_W\boldsymbol{W}^*) - \gamma_W\boldsymbol{W}^* \tag{12}$$

$$\dot{\boldsymbol{B}} = \boldsymbol{\Gamma}_B\left(\tanh\left(\frac{\boldsymbol{e}_2}{b}\right)\boldsymbol{e}_2^{\mathrm{T}} - \sigma_B\boldsymbol{B}\right) - \gamma_B\boldsymbol{B} \tag{13}$$

式中 $\dot{\boldsymbol{W}}^*$——神经网络的权重估计的更新率

$\dot{\boldsymbol{B}}$——鲁棒补偿时变增益矩阵的更新率

$\boldsymbol{\Gamma}_w$、$\boldsymbol{\Gamma}_B$——正定学习率矩阵

σ_W、σ_B——抑制参数漂移的常数,用于增强系统的鲁棒性

γ_W、γ_B——指数衰减项

σ_W、σ_B用于抑制参数漂移,避免在持续扰动下参数估计值无界增长。通过引入该项,可加速参数收敛过程,提升系统鲁棒性。仿真表明,当$\gamma_W = \gamma_B = 0.1$时,系统在收敛速度与稳态精度之间取得较好平衡。

2.3 非线性扰动观测器

为提升系统抗外界干扰能力并有效补偿动力学模型中的可观测误差,同时进一步改善动力学模型补偿控制收敛速度较慢问题,设计非线性干扰观测器对系统误差干扰项进行估计与补偿,从而确保控制系统的稳定性。

构建辅助变量$\boldsymbol{p}(\boldsymbol{p}\in\mathbf{R}^3)$,正定对角增益矩阵$\boldsymbol{L}\in\mathbf{R}^3$,则有

$$\dot{\boldsymbol{p}} = -\boldsymbol{L}\boldsymbol{p} - \boldsymbol{L}(\boldsymbol{L}\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}) + \boldsymbol{F}(\dot{\boldsymbol{q}}) - \boldsymbol{\tau}) \tag{14}$$

$\hat{\boldsymbol{d}}_l$为更新扰动估计量,其扰动估计更新率方程为

$$\dot{\hat{\boldsymbol{d}}}_l = \dot{\boldsymbol{p}} + \boldsymbol{L}\ddot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{L}[\ddot{\boldsymbol{q}} - (\boldsymbol{L}\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{q}) + \boldsymbol{F}(\dot{\boldsymbol{q}}) - \boldsymbol{\tau})] - \boldsymbol{L}\boldsymbol{p} \tag{15}$$

设计$\hat{\boldsymbol{d}}_l$逼近真实扰动$\boldsymbol{d}_l$,通过辅助变量$\boldsymbol{p}$和动态方程使得扰动误差估计$\tilde{\boldsymbol{d}}_l = \boldsymbol{d}_l - \hat{\boldsymbol{d}}_l$指数收敛。

$$\boldsymbol{d}_l = \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{M}_0(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} - \boldsymbol{F}_0(\dot{\boldsymbol{q}}) - \boldsymbol{G}_0(\boldsymbol{q}) - \boldsymbol{d}_m \tag{16}$$

综合公式(11)~(16)可得最终的自适应模型补偿控制输入为

$$\boldsymbol{\tau} = -\boldsymbol{e}_1 - \boldsymbol{K}_2\boldsymbol{e}_2 - \boldsymbol{W}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{S}(\boldsymbol{X}) - \boldsymbol{B}\tanh\left(\frac{\boldsymbol{e}_2}{b}\right) - \hat{\boldsymbol{d}}_l \tag{17}$$

2.4 稳定性分析

为验证本文控制器对于实现取对于机构系统控制在有限时间收敛且系统具有稳定性,选取Lyapunov稳定性分析,构造Lyapunov函数$\boldsymbol{V}$为

$$\boldsymbol{V} = \boldsymbol{V}_1 + \boldsymbol{V}_2 + \boldsymbol{V}_3 + \boldsymbol{V}_4 \tag{18}$$

$\boldsymbol{V}_1$为跟踪误差项

$$\boldsymbol{V}_1 = \frac{1}{2}\boldsymbol{e}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}_1 \tag{19}$$

$\boldsymbol{V}_2$为观测误差项

$$\boldsymbol{V}_2 = \frac{1}{2}\tilde{\boldsymbol{x}}_1^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{x}}_1 + \frac{1}{2}\tilde{\boldsymbol{x}}_2^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{x}}_2 \tag{20}$$

其中 $\tilde{\boldsymbol{x}}_1 = \boldsymbol{x}_1 - \hat{\boldsymbol{x}}_1$ $\tilde{\boldsymbol{x}}_2 = \boldsymbol{x}_2 - \hat{\boldsymbol{x}}_2$

式中 $\boldsymbol{x}_1$、$\boldsymbol{x}_2$——系统状态变量$\boldsymbol{\theta}$、$\dot{\boldsymbol{\theta}}$

$\hat{\boldsymbol{x}}_1$、$\hat{\boldsymbol{x}}_2$——系统状态变量的非线性观测器观测值

$\tilde{\boldsymbol{x}}_1$、$\tilde{\boldsymbol{x}}_2$——非线性观测器误差

$\boldsymbol{V}_3$为动力学逼近误差项

$$\boldsymbol{V}_3 = \frac{1}{2}\boldsymbol{e}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{e}_2 \tag{21}$$

$\boldsymbol{V}_4$为参数估计误差项

$$\boldsymbol{V}_4 = \frac{1}{2}\mathrm{tr}(\widetilde{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_w^{-1}\widetilde{\boldsymbol{W}}) + \frac{1}{2}\widetilde{\boldsymbol{B}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_B^{-1}\widetilde{\boldsymbol{B}} \tag{22}$$

其中 $\widetilde{\boldsymbol{W}} = \hat{\boldsymbol{W}} - \boldsymbol{W}^*$ $\widetilde{\boldsymbol{B}} = \hat{\boldsymbol{B}} - \boldsymbol{B}^*$

式中 $\widetilde{\boldsymbol{W}}$——权重估计误差

$\widetilde{\boldsymbol{B}}$——迟滞补偿项估计误差

求导得$\dot{\boldsymbol{V}} = \dot{\boldsymbol{V}}_1 + \dot{\boldsymbol{V}}_2 + \dot{\boldsymbol{V}}_3 + \dot{\boldsymbol{V}}_4$。

$\dot{\boldsymbol{V}}_1$分析

$$\dot{\boldsymbol{V}}_1 = \boldsymbol{e}_1^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{e}_2 + \boldsymbol{\alpha} - \dot{\boldsymbol{x}}_d) = \boldsymbol{e}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}_2 - \boldsymbol{e}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_1\boldsymbol{e}_1 \tag{23}$$

$\dot{\boldsymbol{V}}_2$分析

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_1 = \tilde{\boldsymbol{x}}_2 - \frac{\lambda_1}{\varepsilon}\tilde{\boldsymbol{x}}_1 \tag{24}$$

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_2 = -\boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{x}_1)[\boldsymbol{C}(\boldsymbol{x}_1,\hat{\boldsymbol{x}}_2)\tilde{\boldsymbol{x}}_2 + \Delta\boldsymbol{F} + \Delta\boldsymbol{C}] - \frac{\lambda_2}{\varepsilon^2}\tilde{\boldsymbol{x}}_1 \tag{25}$$

其中 $\Delta\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F}(\boldsymbol{x}_2) - \boldsymbol{F}(\hat{\boldsymbol{x}}_2)$

$\Delta\boldsymbol{C} = \boldsymbol{C}(\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{x}_2)\boldsymbol{x}_2 - \boldsymbol{C}(\boldsymbol{x}_1,\hat{\boldsymbol{x}}_2)\hat{\boldsymbol{x}}_2$

式中 λ_1、λ_2——非线性扰动观测器增益值

由于ε取值极小,观测误差动态可视为快速收敛(高增益观测器性质)

$$\dot{\boldsymbol{V}}_2 \leqslant -\frac{\lambda_1}{\varepsilon}\tilde{\boldsymbol{x}}_1^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{x}}_1 - \frac{\lambda_2}{\varepsilon^2}\tilde{\boldsymbol{x}}_2^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{x}}_2 + O(\|\tilde{\boldsymbol{x}}\|) \tag{26}$$

式中 O——非线性扰动观测器估计误差与实际状态导数之间的残差

$\dot{\boldsymbol{V}}_3$分析

$$\dot{V}_3 = \boldsymbol{e}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{e}}_2 + \frac{1}{2}\boldsymbol{e}_2^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{M}}\boldsymbol{e}_2 \tag{27}$$

由于$\dot{\boldsymbol{e}}_2 = \dot{\hat{\boldsymbol{x}}}_2 - \dot{\boldsymbol{\alpha}}$，代入观测器动力学和控制律

$$\dot{V}_3 = \boldsymbol{e}_2^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{C}\hat{\boldsymbol{x}}_2 - \boldsymbol{F} - \boldsymbol{G} - \boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{\alpha}}] + \frac{1}{2}\boldsymbol{e}_2^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{M}}\boldsymbol{e}_2 \tag{28}$$

假设机械臂动力学参数$\dot{\boldsymbol{M}} - 2\boldsymbol{C}$为斜对称矩阵，则$\dot{V}_3$可表示为

$$\dot{V}_3 = \boldsymbol{e}_2^{\mathrm{T}}\left[-\boldsymbol{K}_2\boldsymbol{e}_2 - \hat{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}(\boldsymbol{X}) - \hat{\boldsymbol{B}}\tanh\left(\frac{\boldsymbol{e}_2}{b}\right) + \boldsymbol{\varepsilon}\right] \tag{29}$$

$\dot{V}_4$分析

$$\dot{V}_4 = \mathrm{tr}(\tilde{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_w^{-1}\dot{\tilde{\boldsymbol{W}}}) + \tilde{\boldsymbol{B}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Gamma}_B^{-1}\dot{\tilde{\boldsymbol{B}}} \tag{30}$$

代入自适应律

$$\dot{V}_4 = -\boldsymbol{\sigma}_W\|\tilde{\boldsymbol{W}}\|_F^2 - \boldsymbol{\sigma}_B\|\tilde{\boldsymbol{B}}\|^2 + \mathrm{tr}(\tilde{\boldsymbol{W}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}(\boldsymbol{X})\boldsymbol{e}_2^{\mathrm{T}}) + \tilde{\boldsymbol{B}}^{\mathrm{T}}\tanh\left(\frac{\boldsymbol{e}_2}{b}\right)\boldsymbol{e}_2 \tag{31}$$

合并各项，并忽略式中高阶项，可得

$$\dot{V} \leqslant -\boldsymbol{e}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_1\boldsymbol{e}_1 + \boldsymbol{e}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}_2 - \boldsymbol{e}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_2\boldsymbol{e}_2 - \frac{\lambda_1}{\varepsilon}\hat{\boldsymbol{x}}_1^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{x}}_1 - \frac{\lambda_2}{\varepsilon^2}\hat{\boldsymbol{x}}_2^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{x}}_2 \tag{32}$$

利用 Young 不等式 处理交叉项

$$\boldsymbol{e}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}_2 \leqslant \frac{1}{2}\boldsymbol{e}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}_1 + \frac{1}{2}\boldsymbol{e}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e}_2 \tag{33}$$

最终可得

$$\dot{V} \leqslant -\left[\left(\lambda_{\min}(\boldsymbol{K}_1) - \frac{1}{2}\right)\|\boldsymbol{e}_1\|^2 - \left(\lambda_{\min}(\boldsymbol{K}_2) - \frac{1}{2}\right)\|\boldsymbol{e}_2\|^2 - \frac{\lambda_1}{\varepsilon}\|\tilde{\boldsymbol{x}}_1\|^2 - \frac{\lambda_2}{\varepsilon^2}\|\tilde{\boldsymbol{x}}_2\|^2 + \Delta\right] \tag{34}$$

式中　$\boldsymbol{\Delta}$——有界项

$\lambda_{\min}$——非线性扰动观测器增益值最小值

综上，合理选择$\boldsymbol{K}_1$、$\boldsymbol{K}_2$可使得$\lambda_{\min}(\boldsymbol{K}_1) > 0.5$且$\lambda_{\min}(\boldsymbol{K}_2) > 0.5$，观测器增益$\lambda_1$、$\lambda_2$取值足够大可使得$\dot{V} \leqslant -\kappa V + \boldsymbol{C}$，式中$\kappa > 0$，$\boldsymbol{C}$为有界常数。由 Barbalat 引理可得$\boldsymbol{V}$有界则$\boldsymbol{e}_1$、$\boldsymbol{e}_2$、$\hat{\boldsymbol{x}}_1$、$\hat{\boldsymbol{x}}_2$一致有界，$\dot{\boldsymbol{V}}$负定则误差收敛到紧集。因此，对于任意初始条件（在有限域内），系统状态收敛到平衡点附近的小邻域，即系统具有稳定性。

2.5　轨迹规划

针对脉冲型步进电机驱动器存在机械臂运动产生较大的启动及急停振动问题，本文基于 7 段 S 形曲线（S-curve）加减速算法[26-27]，实现加速度平滑变化来减少机械惯性带来的冲击，提高运动控制性能。其速度曲线呈现 S 形，加速度变化曲线为对称梯形，即加速度变化率保持恒定。在 Matlab 2023b 中实现了 7 段 S 形曲线算法仿真，设置最大速变为 50 mm/s、最大加速度为 100 mm/s^2、加加速度为 500 mm/s^3，总位移为 1 mm。通过分段计算各阶段（加加速、匀加速、减加速、匀速、加减速、匀减速、减减速）的时间、速度和位移，并采用平滑滤波优化曲线连续性。结果显示，总运动时间 0.09 s，各阶段位移分布合理，速度曲线平滑过渡，加速度无突变，符合 S 形曲线的特性，仿真结果如图 3 所示。

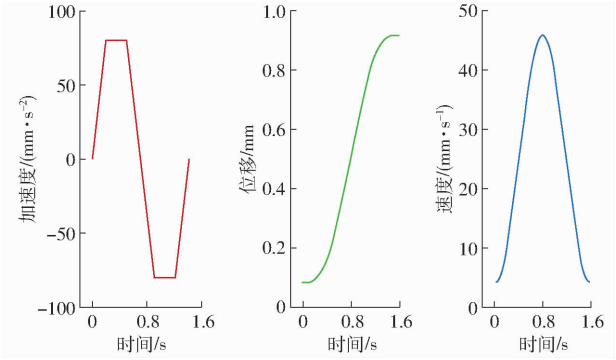


图 3　7 段 S 形仿真结果

Fig. 3　7-segment S-type simulation results

2.6　控制策略实现

初始化完成设定机械臂初始位姿(X_0, Y_0, Z_0)和期望轨迹$\boldsymbol{q}_d(t)$，高增益观测器参数$(\varepsilon, \boldsymbol{K}_1, \boldsymbol{K}_2)$、RBF 神经网络权重$\hat{\boldsymbol{W}}(0)$和迟滞补偿估计$\hat{\boldsymbol{\beta}}(0)$；高增益观测器状态估计实时估计不可测状态（速度、加速度）；轨迹跟踪误差计算虚拟控制量$\boldsymbol{\alpha}$和跟踪误差$\boldsymbol{e}$、$\boldsymbol{s}$；RBF 神经网络自适应补偿逼近未知动力学$f(\boldsymbol{x})$和生成控制律$\boldsymbol{\tau}$；参数在线更新神经网络权重$\hat{\boldsymbol{W}}$和迟滞补偿$\hat{\boldsymbol{\beta}}$；采用 7 段 S 形曲线规划期望轨迹，确保加速度连续；闭环控制执行将控制量$\boldsymbol{\tau}$等参数输出至电机驱动器，完成机械臂位姿调整。图 4 展示了算法结构组成。

3　仿真分析

3.1　仿真设置

为验证自适应模型补偿控制算法的有效性，本研究基于 Matlab 2023b 平台对机械臂控制模型进行了仿真分析。三轴驱动电机初始转角$\boldsymbol{q}_0 = (0, 0, 0)^{\mathrm{T}}$，自适应参数$\boldsymbol{\Gamma}_W = 60\boldsymbol{I}_{16}$和$\boldsymbol{\Gamma}_B = 60\boldsymbol{I}_3$分别为 16 维度权重$\boldsymbol{W}$和 3 维权重$\boldsymbol{B}$的学习率，摩擦项设置为改进的 Stribeck 摩擦模型，该摩擦模型更接近实际。其他仿真参数设置如表 2 所示。仿真调试推荐顺序：先调 PD 增益（$\boldsymbol{K}_1$，$\boldsymbol{K}_2$）确保基本稳定性，再调扰动观测器（$\boldsymbol{L}$），优化抗干扰性能，然后调学习率

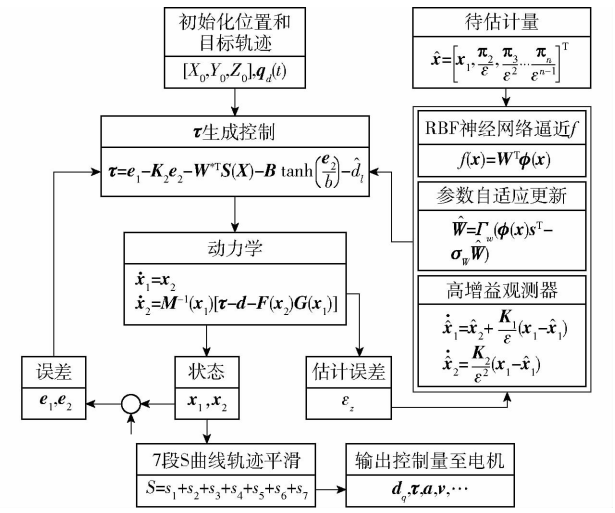


图 4 控制策略结构

Fig. 4 Control strategy structure

($\boldsymbol{\Gamma}_W$, $\boldsymbol{\Gamma}_B$),优化模型自适应能力,最后调辅助参数(σ_W,σ_B,b,γ_W,γ_B),微调模型性能。

表 2 仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
$\boldsymbol{q}_d(t)$	$(0.2\cos(0.25\pi t),0.2\sin(0.25\pi t),0.3\cos(0.25\pi t)+0.25)^{\mathrm{T}}$	b	0.1
		$\boldsymbol{L}$	diag(50,50,50)
		σ_W	0.01
$\boldsymbol{K}_1$	diag(5,5,5)	σ_B	0.01
$\boldsymbol{K}_2$	diag(20,20,20)	γ_W	0.1
$\boldsymbol{\Gamma}_w$	60eye(16)	γ_B	0.1
$\boldsymbol{\Gamma}_B$	60eye(3)	λ_1	5

3.2 无模型补偿控制仿真分析

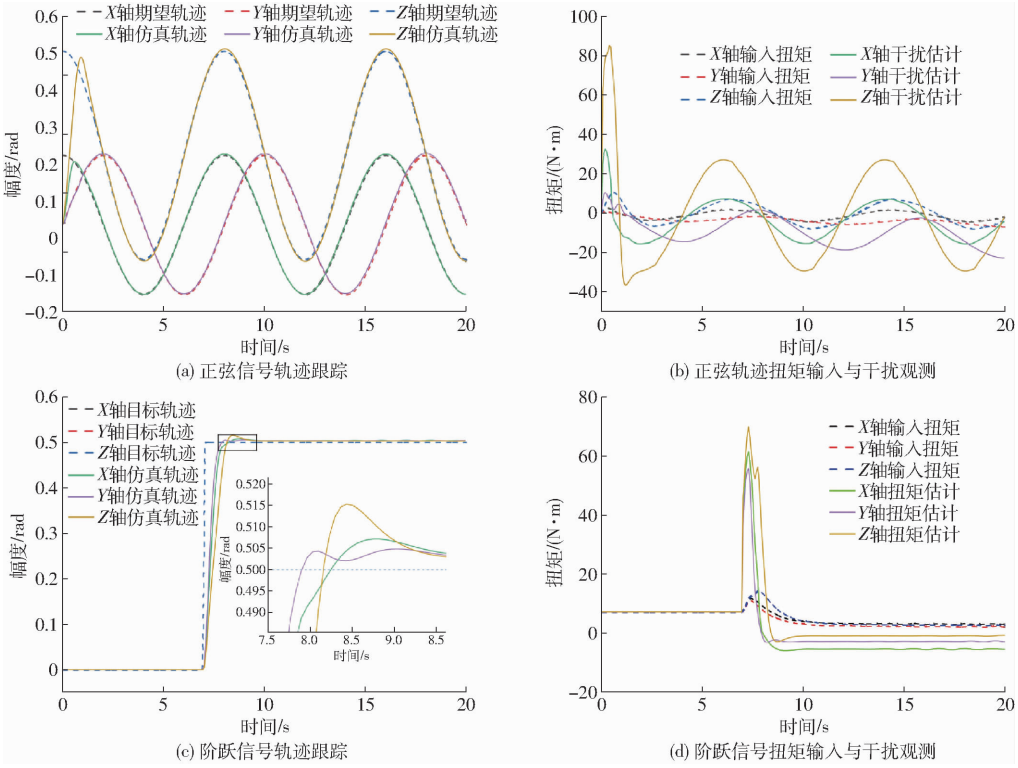
将公式(17)中的鲁棒补偿项和扰动估计项取消,只保留误差项和 RBF 神经网络项,即 $\boldsymbol{\tau}=-\boldsymbol{e}_1-\boldsymbol{K}_2\boldsymbol{e}_2-\boldsymbol{W}^{*\mathrm{T}}S(\boldsymbol{X})$。无模型补偿控制器仿真结果如图 5 所示,包含轨迹速度跟踪和控制输入仿真结果。

由图 5a 轨迹跟踪仿真可知,三轴轨迹跟踪最大误差分别为 0.18、0.01、0.43 rad,在无模型补偿的控制下,可实现系统位置和速度期望轨迹有效跟踪,保证跟踪误差有效时间内收敛,但产生较大跟踪误差和波动。由图 5b 可知,控制输入的力矩振幅波动较大,系统跟踪稳定性不高,导致机械臂运动产生振动。

取消鲁棒补偿项和扰动估计项后,RBF 神经网络虽能逼近机械臂动力学模型真值,但模型控制精度降低,抗干扰能力下降。同时,缺少非线性扰动估计的补偿,模型的抗干扰能力进一步降低,表现为模型总体上能跟踪目标轨迹,但所需输入抖动加剧,且跟踪轨迹纹波较大。

3.3 自适应模型补偿控制仿真分析

在 RBF 神经网络控制器基础上,引入非线性干扰观测器。即 $\boldsymbol{\tau}=-\boldsymbol{e}_1-\boldsymbol{K}_2\boldsymbol{e}_2-\boldsymbol{W}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{S}(\boldsymbol{X})-\boldsymbol{R}\tanh\left(\frac{\boldsymbol{e}_2}{b}\right)-\hat{\boldsymbol{d}}_l$。其中,鲁棒控制项 $\boldsymbol{R}\tanh\left(\frac{\boldsymbol{e}_2}{b}\right)$ 用于抑制观测器和神经网络的估计误差、近似误差等高频未补偿部分。系统轨迹位置跟踪和控制输入的仿真结果如图 6 所示。



(a) 正弦信号轨迹跟踪

(b) 正弦轨迹扭矩输入与干扰观测

(c) 阶跃信号轨迹跟踪

(d) 阶跃信号扭矩输入与干扰观测

图 5 自适应模型补偿控制策略仿真结果

Fig. 5 Simulation results of adaptive model compensation control strategy

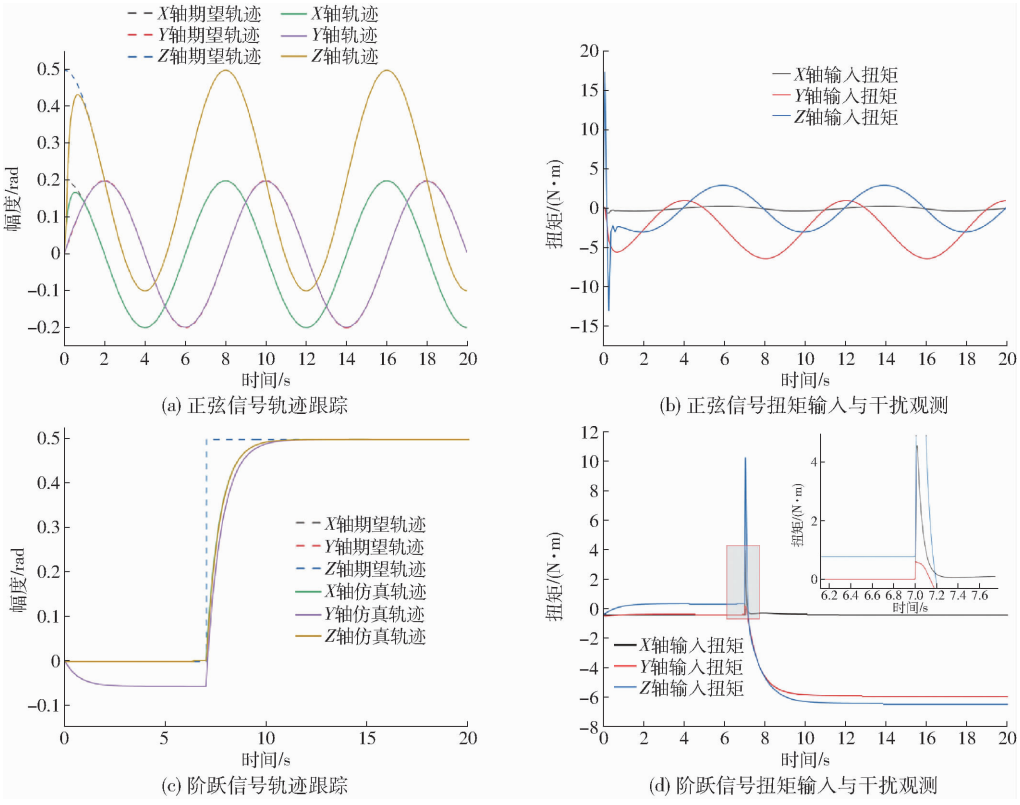


图 6　模型预测控制策略(MPC)仿真结果

Fig. 6　Simulation results of model predictive control (MPC) strategy

由图 6a 轨迹跟踪仿真数据可计算,三轴轨迹跟踪最大误差分别为 0.18、0.01、0.43 rad;在引入自适应模型补偿控制下,系统达到稳态后收敛振荡稳定现象得到抑制,位置跟踪准确性和系统收敛速度也有提高。图 6b 展示了自适应模型补偿控制的执行器扭矩和非线性干扰估计,其中非线性估计包括建模动态、外部干扰,以及神经网络未能完美拟合的误差。以 Z 轴为例,在 0.5 s 时,干扰估计值是 X 轴输入近 20 倍,可见,引入非线性干扰观测器可有效跟踪系统外界干扰,避免执行器端错误输出,导致采摘系统运动平顺性下降。图 6c 和图 6d 展示了自适应模型补偿控制在阶跃信号下同样具有精确的轨迹跟踪和抗干扰输出能力。

为进一步验证本文提出的算法性能,在跟踪相同的期望轨迹时,对于轨迹变形缓慢的正弦信号跟踪时,MPC 控制器对于各轴位置跟踪误差略优于本文提出的自适应模型补偿控制策略,但控制输入力矩在起始时的波动更为剧烈,如图 6a、6b 所示;对于变形较为剧烈的阶跃信号跟踪时,MPC 控制器对于各轴位置跟踪误差大于本文提出的自适应模型补偿控制策略,且控制输入出现剧烈抖动。这说明在处理名优茶采摘机械臂的强非线性、复合干扰等问题时,本文提出的结合 RBF 神经网络与非线性干扰观测器的补偿策略,其鲁棒性和控制平滑性优于 MPC 方法。

4　采摘田间试验

4.1　采摘试验

为验证算法的可行性,在安徽省合肥市安徽农业大学教学示范基地茶园开展试验。茶园土壤干燥,天气晴朗,温度 25℃,测试品种为舒茶早,为人工修剪后重新长出的茶芽,采摘机器人工作场景如图 7 所示。采摘控制系统硬件包括主控模块 Jetson Orin NX、图像采集模块英特尔 Realsense D455 型深度相机、采摘控制模块、机械臂控制模块以及电源。其中采摘控制模块采用 Arduino Mega2560 为主控单片机,通过占空比脉冲控制舵机完成采摘末端的剪切动作,通过继电器通断控制高速直流电机产生负压,机械臂控制模块采用东莞博派智能科技有限公司的 4 轴运动控制器(型号:ET_NEC_NLM)为运动控制单元,控制三轴步进电机驱动器(型号:HBS57)进行机械臂回零及位置跟踪运动。试验中 7 段 S 形曲线控制参数设置为:最大速度 85.6 mm/s,最大加速度 208.2 mm/s^2,加加速度 386.9 mm/s^3。

4.2　机械臂运动控制试验

为评估控制策略的抗扰动性能,在机械臂末端施加可变负载扰动,具体通过在 Z 轴末端安装可调质量块(质量范围 0 ~ 1.0 kg)模拟实际采摘中的负载变化。负载扰动容限的判定标准为:当位置跟踪误差持续超过 ±1.0 mm 时,认为系统失稳。容限值

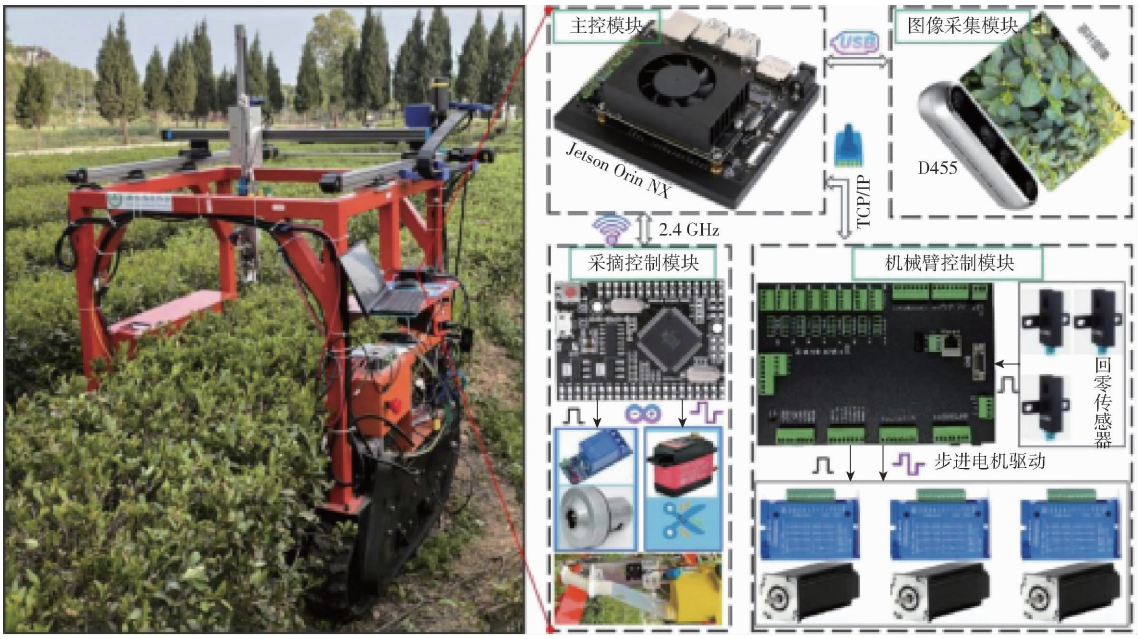


图 7 茶园试验

Fig. 7 Tea garden experiment

计算为最大可承受扰动质量与额定负载(3 kg)的百分比。

试验结果表明(表 3),所提出的自适应模型补偿控制算法在跟踪 S 形曲线轨迹时,最大位置误差控制在 ±0.15 mm 以内,较无模型补偿 PD 控制[17](±0.46 mm)和模糊 PID 算法[28](±0.38 mm)分别提升 67% 和 60%。通过 7 段 S 形曲线加减速规划,机械臂加速度波动由传统模糊 PID 的 ±0.5 g 降至 ±0.2 g,振动幅度减少 94.8%。RBF 神经网络对动力学不确定性(如摩擦突变、负载变化)的逼近误差 $\|f(x)\| \leqslant 0.05$ N·m(式(36)),表明其可有效补偿未建模干扰。自适应模型补偿控制通过其强鲁棒性和有限时间收敛特性,可有效优化机械臂的加减速过程,抑制因系统惯性(如连杆质量、关节摩擦突变)引起的振动。试验时,采用 7 段 S 曲线加减速算法,生成平滑的 $\boldsymbol{q}_d(t)$,利用布置于 Z 轴末端的振动位移传感器记录三轴方向的加速度和振动幅度量。图 8 展示了基于传统模糊 PID 算法和自适应模型补偿控制针对 S 形曲线加减速运动规划时采集的加速度和振动位移对比。

表 3 控制效果对比

Tab. 3 Comparison of control effects

指标	无模型补偿 PD 控制	模糊 PID 控制	自适应模型补偿控制
最大位置误差/mm	±0.46	±0.38	±0.15
加速度波动范围/g	±0.7	±0.5	±0.2
负载扰动容限/%	17	15	28

采用传统模糊 PID 算法时,X 轴出现最大加速度为 0.91 g,且变化幅度最大达到 1.17 g,Z 轴振动幅度最大达到 3.4 mm。采用自适应模型补偿控制算法时三轴未出现尖峰加速度值,且变化幅度为 ±0.12 g,最大加速度是传统 PID 算法的 13.2%,而 Z 轴振动幅度最大达到 0.18 mm,是传统 PID 算法的 5.2%。可见自适应模型补偿控制算法相比传统 PID 算法提升了机械臂运动的平顺性。

4.3 采摘试验结果与分析

如表 4 所示,田间试验结果表明:机械臂在茶芽精确定位后,成功采摘率为 48% ~57%,单棵茶芽采摘平均耗时为 1.00 s,最优采摘速度可达 1.31 棵/s。其中,成功采摘茶叶为对所有采摘茶叶经过人工筛选后的完整茶芽,采摘分 10 组进行。试验中茶芽采摘出现采摘失败、负压输送失败及误采老叶的现象,如图 9 所示,即空间干扰型失效、形态干扰型失效和输送动力学失效,其占比分别为 68.8%、24.3% 和 6.9%。其中,空间干扰型失效是由于茶芽与邻近老梗空间距离过近,导致老梗卡入剪切刀片间隙,阻碍茶梗有效切割,可通过进一步优化采摘手结构,如采用弹簧伸缩型刀架避免茶梗刚性剪切,以及增加末端自由度配合视觉检测避免直接剪切茶梗;形态干扰型失效与 Y 形茶芽叶展宽度过大或老叶紧贴目标茶芽有关,剪切后非目标组织被负压吸入,可通过在目标检测中增加茶芽形态分类,并配合多自由度末端采摘手调整剪切方位角进行 Y 形茶芽采摘,此外,还通过增加负压吸力对 Y 形茶芽进行束形,使其叶展因吸力作用减小,有利于进一步吸入到负压管道;而输送动力学失效与机械

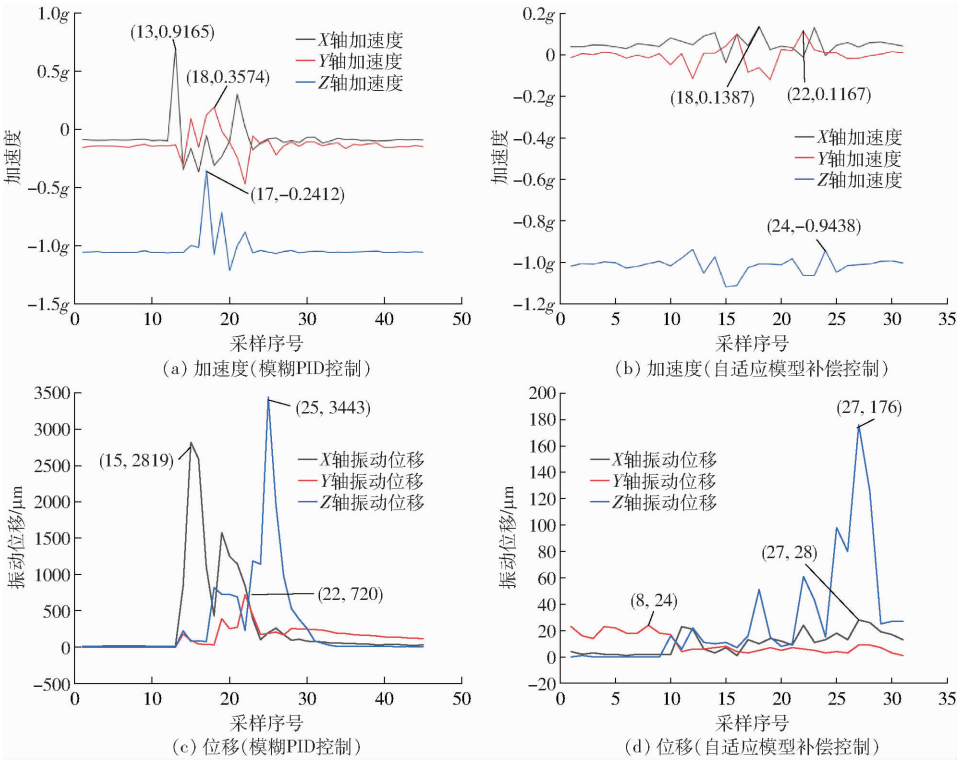


图 8　运动规划对比

Fig. 8　Comparison of exercise plans

表 4　采摘试验统计

Tab. 4　Harvesting trial statistics

性能参数	组 1	组 2	组 3	组 4	组 5	组 6	组 7	组 8	组 9	组 10
识别茶芽数	42	36	28	31	51	25	37	46	56	35
成功采摘数	24	20	14	15	27	14	18	24	27	17
成功采摘率/%	57.14	55.56	50.00	48.39	52.94	56.00	48.65	52.17	48.21	48.57
采摘总耗时/s	35.7	34.2	28.7	24.4	53.0	24.7	48.3	47.2	55.7	36.4
采摘速度/(棵·s^{-1})	0.85	0.95	1.02	0.79	1.04	0.99	1.31	1.03	0.99	1.04



图 9　采摘失败案例

Fig. 9　Example of failed harvesting

臂采摘高度、吸力大小及提升速度过快有关，导致茶芽在输送软管中动能不足，未能及时进入储存室，可通过仿真和物理试验进一步探索茶芽质量、吸入高度、负压通道结构参数及负压参数的关系模型，确定最终的工程实际参数。

该系统的成功采摘率平均值为 51.82%，虽低于人工采摘水平，相比陈建能等[6]设计的螺纹管吸附式采收器最低采摘成功率为 38.5%，本研究的成功采摘性能有了一定提升。且该控制系统的核心提升源于自适应控制带来的振动抑制效应，可避免茶芽因机械冲击破裂导致的损失。1.31 棵/s 的最优采摘速度较人工采摘有了显著提升，证明其在效率层面具备规模化应用潜力。

5　结论

(1)为提升直角坐标采摘机械臂的模型精度和抗干扰能力，基于 RBF 神经网络和非线性扰动观测器构建了自适应模型补偿控制器，并与无模型补偿控制器、模型预测控制器 MPC 进行了仿真对比。仿真结果表明：基于自适应模型补偿控制器，三轴对于正弦轨迹跟踪的最大位置误差分别为 0.18、0.01、0.43 rad；引入的非线性扰动观测器不仅补偿外部干扰，更关键的是补偿了由机械臂自身惯性、摩擦突变等引起的内部扰动，使得控制器实际输出为总干扰估计的 1/20，而无模型补偿控制器和 MPC 控制器则出现较大的输出波动，验证了系统在模型不确定性与外界干扰下的强鲁棒性。

(2)基于7段S形曲线的轨迹规划实现了加加速度连续化,将机械臂运动冲击降低94.8%。结合动力学补偿控制,解决了急停抖动导致的茶芽损伤问题。通过在茶园实地试验对机器人的采摘效果进行了评估。结果显示机器人的采摘成功率为51.82%。单棵茶芽平均采摘速率为1.00棵/s,最高采摘速度为1.31棵/s,为名优茶机械化采收提供了低损伤、高效率的可靠解决方案。

参 考 文 献

[1] 殷伟, 张莹, 杨一单, 等. 全球茶叶贸易网络及我国茶叶出口市场格局演变特征分析[J]. 地理与地理信息科学, 2022, 38(2): 63 - 70.
Yin Wei, Zhang Ying, Yang Yidan, et al. Analysis on the characteristics of global tea trade network and pattern evolution of China's tea export market[J]. Geography and Geo-Information Science, 2022, 38(2): 63 - 70. (in Chinese)

[2] 陈佳, 蒋清海, 韩余, 等. 2024 年茶园生产机械化研究现状与发展趋势[J]. 中国茶叶, 2025, 47(8): 1 - 9.
Chen Jia, Jiang Qinghai, Han Yu, et al. Research status and development trends of tea garden production mechanization in 2024[J]. China Tea, 2025, 47(8): 1 - 9. (in Chinese)

[3] He L, Sun Y, Chen L, et al. Advance on agricultural robot hand-eye coordination for agronomic task: a review[J]. Engineering, 2025, 51: 263 - 279.

[4] 刘继展, 江应星. 农业采摘机器人产业化进程分析与多臂高速化技术走向[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 1 - 17.
Liu Jizhan, Jiang Yingxing. Industrialization trends and multi-arm technology direction of harvesting robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 1 - 17. (in Chinese)

[5] 杨化林, 钟岩, 姜沅政, 等. 基于时间与急动度最优的并联式采茶机器人轨迹规划混合策略[J]. 机械工程学报, 2022, 58(9): 62 - 70.
Yang Hualin, Zhong Yan, Jiang Yuanzheng, et al. Hybrid strategy of parallel tea picking robot trajectory planning based on optimal time and Jerk[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(9): 62 - 70. (in Chinese)

[6] 陈建能, 李杭, 任萍, 等. 螺纹管吸附式名优茶采收器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 131 - 139.
Chen Jianneng, Li Hang, Ren Ping, et al. Design and experiment of threaded tube adsorption type famous tea harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 131 - 139. (in Chinese)

[7] 周宇杰, 吴强, 贺磊盈, 等. 名优茶采摘机器人的系统设计与试验[J]. 机械工程学报, 2022, 58(19): 12 - 23.
Zhou Yujie, Wu Qiang, He Leiying, et al. Design and experiment of intelligent picking robot for famous tea[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(19): 12 - 23. (in Chinese)

[8] 罗坤, 吴正敏, 曹成茂, 等. 茶鲜叶嫩梢捏切组合式采摘器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 1 - 9.
Luo Kun, Wu Zhengmin, Cao Chengmao, et al. Design and experiment of the combined pinch and cut picker for tea fresh leaf tips[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(13): 1 - 9. (in Chinese)

[9] Yang H, Chen L, Ma Z, et al. Computer vision-based high-quality tea automatic plucking robot using delta parallel manipulator[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 181: 105946.

[10] 王辉, 刘艺豪, 周利明, 等. 施肥播种机肥料流量分段式 PID 控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 32 - 40.
Wang Hui, Liu Yihao, Zhou Liming, et al. Design and test of fertilizer flow piecewise PID control system of fertilizer planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 32 - 40. (in Chinese)

[11] 张继成, 严士超, 纪文义, 等. 基于增量式 PID 算法的多种固体肥精确施控系统研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 99 - 106.
Zhang Jicheng, Yan Shichao, Ji Wenyi, et al. Precision fertilization control system research for solid fertilizers based on incremental PID control algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 99 - 106. (in Chinese)

[12] 苗中华, 李闯, 韩科立, 等. 基于模糊 PID 的采棉机作业速度最优控制算法与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 9 - 14, 27.
Miao Zhonghua, Li Chuang, Han Keli, et al. Optimal control algorithm and experiment of working speed of cotton-picking machine based on fuzzy PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 9 - 14, 27. (in Chinese)

[13] Atta O, Tamara N. Robust observer-based adaptive fuzzy sliding mode controller[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 76: 58 - 71.

[14] Ghogare M G, Patil S K L, Patil C K Y. Experimental validation of optimized fast terminal sliding mode control for level system[J]. ISA Transactions, 2022, 126: 486 - 497.

[15] 王军晓, 闫小东, 徐建明. 基于扰动和摩擦补偿的柔性机械臂系统非奇异快速终端滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(7): 1199 - 1207.
Wang Junxiao, Yan Xiaodong, Xu Jianming. Nonsingular fast terminal-sliding-mode control of flexible manipulator systems based on disturbance and friction compensation[J]. Control Theory and Applications, 2023, 40(7): 1199 - 1207. (in Chinese)

[16] 张鹏, 张金鹏. 变结构控制的抖振问题研究[J]. 航空兵器, 2013(2): 9 - 13.
Zhang Peng, Zhang Jinpeng. Study on chattering of variable structure control[J]. Aero Weaponry, 2013(2): 9 - 13. (in Chinese)

(下转第 102 页)

Qiang Hongbin, Xue Dapeng, Feng Xinyu, et al. Stewart parallel manipulator kinematic calibration based on the normalized identification Jacobian choosing measurement configurations[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(7): 1546 – 1557. (in Chinese)

[22] 高跃,房立金,姜雪洁,等.一种基于 D – H 参数的 7 自由度机械臂机构精度综合方法研究[J].仪器仪表学报,2022, 43(4):137 – 145.
Gao Yue, Fang Lijin, Jiang Xuejie, et al. Research on the precision synthesis method of a 7 DOF manipulator based on D – H parameters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 137 – 145. (in Chinese)

[23] 孙顺利,汤维,罗远强,等.山地果茶园单轨运输机摆臂式装卸结构设计与优化[J].华南农业大学学报, 2025, 46(2): 246 – 255.
Sun Shunli, Tang Wei, Luo Yuanqiang, et al. Design and optimization of swing arm loading and unloading structure of monorail conveyor for hilly orchard and tea garden[J]. Journal of South China Agricultural University, 2025, 46(2): 246 – 255. (in Chinese)

[24] 胡子瑞,王丙旭,杨景,等.基于轨迹灵巧度的机械臂尺寸优化[J].制造业自动化,2023, 45(11):96 – 101.
Hu Zirui, Wang Bingxu, Yang Jing, et al. Dimension optimization of manipulator based on trajectory dexterity[J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(11): 96 – 101. (in Chinese)

[25] 谭月胜,詹登辉,张彭豪.刚柔耦合串联机械臂末端位置误差分析与补偿[J].农业机械学报,2021, 52(2):416 – 426.
Tan Yuesheng, Zhan Denghui, Zhang Penghao. Analysis and compensation of end position error of rigid-flexible coupling serial manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 416 – 426. (in Chinese)

[26] 高跃,房立金,许继谦,等.一种 7 – DOF 机械臂的结构设计及其几何位置误差分析[J].东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(7):1003 – 1009.
Gao Yue, Fang Lijin, Xu Jiqian, et al. Structural design of a 7 – DOF manipulator and its geometric position error analysis [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2022, 43(7): 1003 – 1009. (in Chinese)

(上接第 88 页)

[17] Hu G, Chen C, Chen J, et al. Simplified 4-DOF manipulator for rapid robotic apple harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 199: 107177.

[18] Chen W H, Ballance D J, O'Reilly J. Model predictive control of nonlinear systems: computational burden and stability[J]. IEE Proceedings-Control Theory and Applications, 2000, 147(4): 387 – 394.

[19] Rybus T, Seweryn K, Sasiadek J Z. Control system for free-floating space manipulator based on nonlinear model predictive control (NMPC)[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2017, 85: 491 – 509.

[20] 陈明方, 黄良恩, 魏松坡, 等. 基于 Jacobian + RBF 的 3-PTT 并联机构末端精确控制方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 430 – 440.
Chen Mingfang, Huang Liang'en, Wei Songpo, et al. End precise control method of 3-PTT parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 430 – 440. (in Chinese)

[21] 尚东阳, 李小彭, 尹猛, 等. 基于干扰观测器的含有柔性关节的柔性机械臂抑振策略[J]. 振动与冲击, 2022, 41(24): 125 – 133.
Shang Dongyang, Li Xiaopeng, Yin Meng, et al. Vibration suppression strategy for the flexible manipulator with a flexible joint based on an disturbance observer[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(24): 125 – 133. (in Chinese)

[22] Wang Y, Zhang Z, Li C, et al. Adaptive incremental sliding mode control for a robot manipulator[J]. Mechatronics, 2022, 82: 102717.

[23] Nguyen T S, Harton D, Campeau-Lecours A, et al. Motion control algorithms based on the dynamic modelling of kinematically redundant hybrid parallel robots[J]. Mechatronics, 2021, 76: 102555.

[24] Scholl P, Iskandar M, Wolf S, et al. Learning-based adaption of robotic friction models[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2024, 89: 102780.

[25] Saleki A, Fateh M M. Model-free control of electrically driven robot manipulators using an extended state observer[J]. Computers and Electrical Engineering, 2020, 87: 106768.

[26] Chen Z, Gao X, Wang A, et al. An online open-loop S-curve velocity profile control method for stepping motors on FPGA[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(12): 16452 – 16462.

[27] Fang Y, Hu J, Liu W H, et al. Smooth and time-optimal S-curve trajectory planning for automated robots and machines[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 137: 127 – 153.

[28] 李扬, 侯加林, 苑进, 等. 基于改进 PSO 的模糊 PID 高枝修剪机械臂末端抑振算法与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 49 – 58.
Li Yang, Hou Jialin, Yuan Jin, et al. Experiment and vibration suppression algorithm for high-branch pruning manipulator based on fuzzy PID with improved PSO[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 49 – 58. (in Chinese)