

DOI: 10.11992/tis.201605024

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.tp.20170217.0954.004.html>

# PSO 优化的六自由度机械臂 全局快速终端滑模控制

王琥, 胡立坤, 谭颖

(广西大学 电气工程学院, 广西 南宁 530004)

**摘 要:**针对六自由度机械臂控制系统,提出一种基于粒子群优化(PSO)算法的全局快速终端滑模控制方法,以更大程度地减小系统的抖振,提高系统的响应速度。对于机械臂多输入多输出的特点,为了方便设计,将系统划分为 6 个二阶子系统,对各个关节进行设计,分析克服控制律的奇异性,同时运用 Lyapunov 理论证明系统的稳定性,并基于 PSO 算法完成控制参数的优化。实验结果表明:优化后的控制方法不仅可以提高系统的快速性,还可以明显减小系统的抖振,使系统具有良好的动静态性能。

**关键词:**自动控制技术;六自由度机械臂;李雅普诺夫理论;PSO 算法;全局快速终端滑模;控制律;抖振

**中图分类号:** TP24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2017)02-0266-06

**中文引用格式:**王琥,胡立坤,谭颖. PSO 优化的六自由度机械臂全局快速终端滑模控制[J]. 智能系统学报, 2017, 12(2): 266-271.

**英文引用格式:**WANG Hu, HU Likun, TAN Ying. A PSO-based global fast terminal sliding mode controller for 6-DOF manipulators[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2017, 12(2): 266-271.

## A PSO-based global fast terminal sliding mode controller for 6-DOF manipulators

WANG Hu, HU Likun, TAN Ying

(College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** In this paper, we propose a global fast terminal sliding mode (GFTSM) control method based on particle swarm optimization (PSO) for the 6-DOF (degrees of freedom) manipulator control system to reduce chattering and improve response times of the system. We divided the multi-input multi-output (MIMO) 6-DOF system into six second-order subsystems, each joint designed and analyzed to overcome the singularity of control law. Further, we demonstrated the stability of our system using Lyapunov theory and optimized the control parameters based on the PSO algorithm. Our simulation results show that the optimized control method not only improves the speed and response times of the system, but also reduces the chattering, thus producing a system with good dynamics and static performance.

**Keywords:** automatic control technology; 6-DOF manipulator; Lyapunov theory; PSO algorithm; global fast terminal sliding mode; control law; chattering

随着德国工业 4.0 普及,机器人被广泛应用在各个领域,成为国内外学者关注的热点之一。其控

制问题的解决方法已有很多,如文献[1-4]提出的自适应鲁棒控制和模糊 PID 控制等。滑模被广泛应用在机器人控制、电机控制、航天发动机等方面。其原理主要为利用输入的控制信号不断做切换,使得系统不断逼近预设好的滑模面,从而使误差逐渐

收稿日期:2016-05-24. 网络出版日期:2017-02-17.

基金项目:广西自然科学基金项目(2012GXNSFBA053144).

通信作者:胡立坤. E-mail:hlk3email@163.com.

减小。文献[5]提出了一种积分次优化的二阶滑模,利用其在三自由度的工业机器人上的轨迹跟踪,并与典型的 PD 控制器、次优化的二阶滑模三者进行比较。文献[6]利用非线性阻尼和终端滑模对机械手进行控制,使其稳定性得于提高;文献[7]利用高阶滑模对单自由度机械手进行控制;文献[8]提出了融合自适应模糊算法和滑模,对机器人进行控制,提高了被控系统的鲁棒性。然而,传统滑模的控制机理是在不同的控制逻辑之间来回切换,因此,势必存在时间滞后、空间滞后、系统惯性等因素,导致被控系统容易出现抖振现象。抖振的存在,使得系统状态在平衡状态之间来回切换,导致被控系统出现跟踪误差。工业机器人控制对于精确性有着严苛的要求,对于末端执行器的跟踪误差应达到工业要求,否则会降低被控系统的准确度。当跟踪误差过大时,甚至会激发高频未建模态,使工业机器人处于不受控状态。近年来,诸多学者针对抖振现象提出了不同的改进方法,从而有效的减小被控系统的抖振问题,主要包括趋近律方法,观测方法,智能控制方法,动态滑模方法等。在人工智能迅速崛起的基础上,大多数的学者主要采用智能控制与不同形式的滑模相结合的控制方法,如文献[9]提出的改进神经网络自适应滑模控制;文章[10-11]采用基于智能算法(GA,PSO)的滑模控制。全局快速终端滑模是在传统滑模的基础上引入非线性函数,既保证了系统在有限时间内到达滑模面,又使得系统在有限时间内达到平衡点时,误差可以快速收敛至零,达到全局快速收敛的目的。具有减小系统抖振,提高系统动静态的优点。

为了提高系统的响应速度和减小系统抖振等动静态性能,本文提出一种基于 PSO 优化的全局快速终端滑模的六自由度机械臂控制,分析与克服全局快速终端滑模的奇异性,给出了系统的响应时间,并通过仿真和实验两方面验证该控制策略的准确性和可行性。

## 1 机械臂滑模控制系统

### 1.1 六自由度机械臂数学模型

利用 Euler-Lagrange 方法,不考虑外部未知干扰力作用,在关节坐标中建立六自由度机械臂的动力学模型如下:

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\tau}(t) \quad (1)$$

式中:  $\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \ddot{\boldsymbol{\theta}} \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$  分别代表关节角度、角速度、角加速度矢量;  $\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$  代表正定对称惯性矩阵,  $\mathbf{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$  代表离心力和哥氏力矢量,

$\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) \in \mathbf{R}^{6 \times 1}$  代表重力加速度矩阵。 $\boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\theta})$  代表各个关节的输入力矩矢量。当机械臂处于非高速运动状态时,式(1)中的离心力和哥氏力对机械臂系统几乎不产生任何影响,因此,是可以完全忽略不计的<sup>[12]</sup>,即式(1)可以简化为

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\tau}(t) \quad (2)$$

由于六自由度机器人具有 MIMO 特性,为了实现对其控制的目标,将其分解成单关节的子系统,由式(2)可有

$$\ddot{\theta}_i = \mathbf{M}^{-1}(\boldsymbol{\theta})(\tau_i(t) - G_i(\boldsymbol{\theta})) \quad (3)$$

令

$$\mathbf{M}^{-1} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{16} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{61} & \cdots & a_{66} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(3)、(4)可得单关节的角加速度为

$$\ddot{\theta}_i = a_{ii}\tau_i + \sum_{j=1, j \neq i}^6 (a_{ij}\tau_j - a_{ij}G_j) - a_{ii}G_i \quad (5)$$

式中  $G_i$  为  $i$  轴的重力加速度,  $i = 1, 2, \dots, 6$ 。

令:

$$\begin{cases} x_1 = \theta_i \\ x_2 = \dot{\theta}_i \\ f(x) = \sum_{j=1, j \neq i}^6 (a_{ij}\tau_j - a_{ij}G_j) - a_{ii}G_i \\ g(x) = a_{ii} \end{cases}$$

则有

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + g(x)\tau_i \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $f(x)$ 、 $g(x)$  为  $\mathbf{R}$  域中光滑的连续函数。

如式(6)所示的二阶非线性方程即表示为六自由度机械臂的各个关节子系统。此法好处在于将六自由度机械臂模型转换成相互独立的子系统,方便后期的设计与优化。

### 1.2 滑模控制器设计

设单关节的常规全局快速终端滑模控制器的滑模面函数为

$$s_i = \dot{e}_i + \alpha_i e_i + \beta_i e_i^{p/q} \quad (7)$$

式中  $p < q$  且都为互质的正奇数,取值分别为:  $p = 3, q = 5, i = 1, 2, \dots, 6$ ,  $e_i$  为误差信号<sup>[13]</sup>,即有

$$\begin{cases} e_i = \theta_i^*(t) - \theta_i(t) \\ \dot{e}_i = \dot{\theta}_i^*(t) - \dot{\theta}_i(t) \\ \ddot{e}_i = \ddot{\theta}_i^*(t) - \ddot{\theta}_i(t) \end{cases} \quad (8)$$

由式(7)求导可得

$$\dot{s}_i = \ddot{e}_i + \alpha_i \dot{e}_i + \beta_i \cdot \frac{p}{q} \dot{e}_i e_i^{p/q - 1} \quad (9)$$

由式(6)、(8)、(9)可得

$$\dot{s}_i = \ddot{\theta}_i^* - f(x) - g(x)\tau_i + \alpha_i \dot{e}_i + \beta_i \cdot \frac{p}{q} \dot{e}_i e_i^{p-q/q} \quad (10)$$

故此选取位置控制规律为

$$\tau_i = (\ddot{\theta}_i^* - f(x) + \alpha_i \dot{e}_i + \beta_i \cdot \frac{p}{q} \dot{e}_i e_i^{p-q/q} + h(s))/g(x) \quad (11)$$

式中  $h$  为指数趋近律, 定义为

$$h(s) = \varphi_i s_i + \gamma_i s_i^{n/m}, n=3, m=5 \quad (12)$$

由位置控制律式(11)可知, 当系统的状态接近至设定值时, 即  $e \approx 0$  之时, 因为  $p - q/q < 0$ , 则  $e^{p-q/q}$  接近于无穷大, 及证明式(11)存在奇异问题。在实际的控制中, 奇异的存在容易被控系统失调。为了克服奇异问题, 选取滑模面为

$$s_i = \dot{e}_i + \alpha_i e_i + \beta_i e_i^{q/p} \quad (13)$$

同理, 可得控制律为

$$\tau_i = (\ddot{\theta}_i^* - f(x) + \alpha_i \dot{e}_i + \beta_i \cdot \frac{q}{p} \dot{e}_i e_i^{q-p/p} + h(s))/g(x) \quad (14)$$

通过解方程(7)  $s_i = 0$  得, 系统滑动模态上任意状态  $e_i(0) \neq 0$  至平衡状态的时间为

$$t_s = \frac{p}{\alpha_i(p-q)} \ln \frac{\alpha_i e_i(0)(p-q)/p + \beta_i}{\beta_i} \quad (15)$$

通过解  $h(s) = 0$  得, 系统从状态空间任意一点到达滑动模态上的时间为

$$t_r = \frac{m}{\varphi_i(m-n)} \ln \frac{\varphi_i s_i(0)m - n/m + \gamma_i}{\gamma_i} \quad (16)$$

由式(15)、(16)可知, 单关节系统的响应时间由到达时间和滑模运动时间决定; 时间参数与  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 、 $\gamma_i$ 、 $\varphi_i$  4 个参数息息相关, 因此对于控制律参数的优化有重要的意义。

为了使滑模面在被控系统发生滑动模式, 则必须满足 Lyapunov 稳定性。证明如下。选取 Lyapunov 函数为

$$V = s_i^2/2 \quad (17)$$

则有

$$\dot{V} = s_i \dot{s}_i \quad (18)$$

综合式(7)、(8)、(13)、(14)有

$$\dot{V} = -s_i \cdot h(s) =$$

$$-s_i \cdot (\varphi_i s_i + \gamma_i s_i^{n/m}) = -(\varphi_i s_i^2 + \gamma_i s_i^{n+m/m})$$

因为  $m, n$  互质奇数, 则  $m+n$  为偶数, 参数  $\varphi, \gamma_i$  为大于零的实数, 即可得  $\dot{V} < 0$ , 所以系统是稳定的。

## 2 PSO 优化机械臂滑模控制系统

PSO 算法是 Kennedy 博士和 Eberhart 博士通过对鸟群觅食的集体协作行为的研究, 于 20 世纪 90 年代首次提出的计算优化算法。该算法是基于群体迭代, 追求解空间中的最优粒子, 具有简单易实现、收敛速度快、全局搜索能力强等优点, 适用于科研以及工程应用。算法的搜索机制可描述为, 以解空间中的任意一点为出发点, 基于设定的适应度函数为个体最优解保留标准, 通过群体的更新迭代, 寻求出解空间中的最优解。假设, 问题的解空间为  $D$  维, 初始的粒子群体规模为  $n$ , 以初始种群中的一点为寻求解的出发点, 以适应度函数为评价标准, 通过粒子迭代更新, 寻求出个体极值以及全局最优值。粒子的迭代更新规则如下所示。

$$\begin{aligned} V_i^{k+1} &= \omega \cdot V_i^k + c_1 r_1 (p_i^k - X_i^k) + \\ &c_2 r_2 (S_i^k - X_i^k) \\ X_i^{k+1} &= X_i^k + V_i^{k+1} \end{aligned} \quad (19)$$

式中:  $k$  为迭代次数,  $\omega$  为惯性权重,  $c_1$ 、 $c_2$  分别为局部学习因子和全局学习因子。随机数  $r_1, r_2 \in [0, 1]$ 。  $p$  为个体极值,  $S_i$  为当前整种群最优值。

基于 PSO 优化的全局快速终端滑模控制的六自由度工业机械臂系统如图 1 所示。由图 1 可知, 以六自由度机械臂的各个关节的角度和其输入的控制量作为 PSO 的输入项, 通过迭代优化, 调整  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 、 $\varphi_i$ 、 $\gamma_i$  参数, 从而达到改善系统性能的目的。

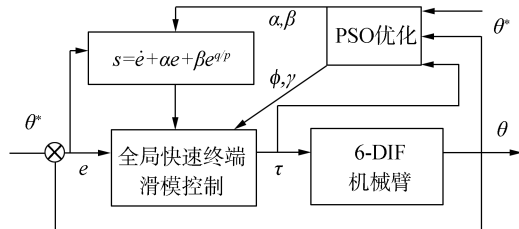


图1 基于 PSO 优化的全局快速终端滑模控制系统

Fig.1 Controlled 6-DOF manipulator via PSO-GFTSM

为保证被控系统拥有良好的动静态性能, 同时防止系统控制量的输出过大。因此, PSO 优化的最小目标函数的参数选定为: 误差的绝对值的时间积分和系统控制量输出的平方, 参照文献[13], 单关节最优目标函数定为

$$J_i(t) = \int_0^\infty (\omega_1 |e_i(t)| + \omega_2 \tau_i^2(t)) dt + \omega_3 t_{iu}$$

式中:  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  为权重系数,  $e_i(t)$  为  $i$  关节的跟踪误差,  $t_{iu}$  为  $i$  关节上升时间。同时, 为了避免超调对系统的影响, 在优化函数中加入惩罚函数, 即当系统出现超调  $\sigma_i$  时, 改写为

$$J_i(t) = \int_0^\infty (\omega_1 |e_i(t)| + \omega_2 \tau_i^2(t) + \omega_4 \sigma_i(t)) dt + \omega_3 t_{iu}$$

滑模最终的控制目标在于使系统响应快,超调小,因此,参照文献[13],对于误差、上升时间、超调、控制量的权重进行折衷选择,文中取  $\omega_1 = 0.999, \omega_2 = 0.001, \omega_3 = 2.0, \omega_4 = 200$ 。

3 仿真及实验结果

3.1 仿真研究

为了验证上述控制算法的准确性和可行性,基于上述建立的六自由度工业机械臂的动力学模型,按照图 1 所示的框架图,利用全局快速终端滑模对其各个关节进行 PSO 离线优化仿真。

问题解域的确定:由式(15)、(16)可知,系统状态至平衡状态的总时间为:  $t = t_s + t_r$ ; 系统的快速性主要由  $\alpha_i$  和  $\gamma_i$  决定,其值越大,快速性越强,同时,其值过大,输出的控制量越大,过一定值可引发机械臂剧烈振荡,而  $\beta_i$  和  $\varphi_i$  可调节控制精度与抖振振幅。鉴于机械臂本身的力矩输出受限,设定的控制量输出范围为:  $\tau_i \in [-10, 10] \text{ N} \cdot \text{m}$ 。鉴于控制量的范围,设置 4 个参数的解域为:  $\alpha_i, \beta_i, \varphi_i, \gamma_i \in [0, 10]$ , PSO 算法种群的数量为 25,迭代的最大数为 100。优化步骤采用单轴分别优化,即当前优化的轴输入信号为阶跃信号,其他轴输入信号为 0,直至优化机械臂的 6 个轴。单轴优化步骤为:

- 1) 设定优化轴初始状态  $\theta_i = \dot{\theta}_i = 0$ ,以及 PSO 相关参数,如种群数目,最大迭代次数,粒子的初始值以及解域范围等;
- 2) 运行 20 s 为一个周期,利用式(21)计算每个粒子的适应度,比较保存最优值;
- 3) 重置优化轴的初始状态  $\theta_i = \dot{\theta}_i = 0$ ;
- 4) 根据 PSO 动力方程式(19)进行粒子的更新;
- 5) 判断是否达到终止条件(最大迭代步数或精度要求),若否,则进入 2)继续搜索。

经过 6 个轴的分别优化后,见实验结果如图 2。

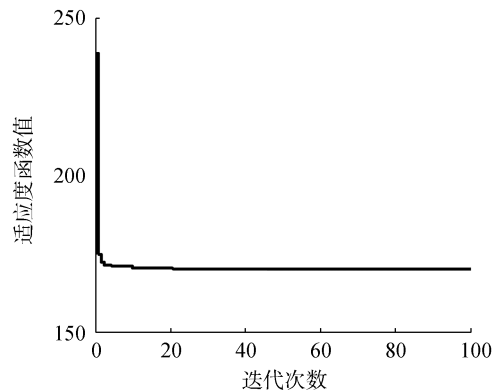


图 2 1 号轴优化函数曲线  
Fig.2 Fitness curve of Joint 1

图 2 表示的为 1 号轴(基座)的适应度函数值  $J$  收敛过程。由图知,迭代至 10 次左右收敛。

经过 PSO 离线优化的终止条件,可得 6 个轴的滑模控制器的最优参数见表 1。

表 1 PSO 优化滑模参数

Table 1 Parameters of PSO-GFTSM						
参数	1 轴	2 轴	3 轴	4 轴	5 轴	6 轴
$\alpha_i$	2.31	1.19	3.88	2.81	3.48	4.48
$\beta_i$	2.80	6.88	6.05	3.56	6.42	8.07
$\varphi_i$	1.82	2.45	4.83	4.53	2.88	2.90
$\gamma_i$	1.43	1.21	3.39	1.41	1.21	1.22

3.2 实验研究

实验用的六自由度机械臂是由 Googol 公司生产,采样周期为 0.002 s。硬件平台使用 CPAC 结构,CPAC 可将 PC 机开放、灵活的软件体系结构与 PLC 相结合,并实现了与 DSP 运动控制技术的无缝连接,上位机软件为 OtoStudio。整个系统的硬件结构组成如图 3。

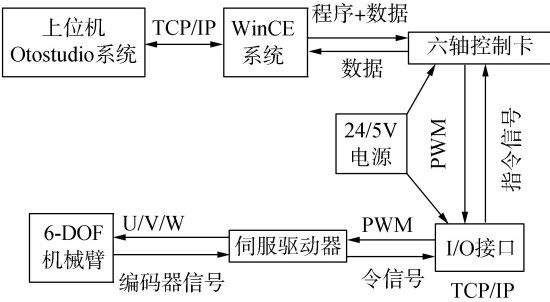


图 3 CPAC 硬件结构图  
Fig.3 Structure of CPAC

为解决控制算法在上位机的实现难题,控制算法的角度、角速度等表示为

$$\begin{cases} e(t) = \theta^*(t) - \theta(t-1) \\ \dot{e}(t) = e(t) - e(t-1) \\ \ddot{e}(t) = \dot{e}(t) - \dot{e}(t-1) \end{cases} \quad (22)$$

机械臂初始化状态:  $\dot{\theta}_i = \theta_i = 0, i = 1, 2, 3, 4, 6, \dot{\theta}_5 = 0, \theta_5 = 90^\circ$ 。机械臂六轴的期望位置分别为:  $\theta_1^* = -23^\circ, \theta_2^* = 25^\circ, \theta_3^* = 40^\circ, \theta_6^* = -55^\circ, \theta_4^* = \sin(\pi t/5) \times 20^\circ, \theta_5^* = \sin(\pi t/2) \times 5 + 90^\circ$ 。机械臂单轴输出的力矩范围为:  $\tau_i \in [-10, 10] \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

实验结果图 4 表明,优化后的全局快速终端滑模控制策略较之优化之前系统的上升时间更短,响应速度更快,两者皆避免了超调现象的出现,减小了机械的来回摩擦造成的磨损。对于稳态阶段如 95~100 s,图 4(a)~(c)和(f)的阶跃响应表明,优化前的稳态误差范围为  $[0.05^\circ, 0.2^\circ]$ ,优化后的稳态时刻,几乎与设定值重合。图 4(d)~(e)的正弦跟踪



响应表明优化前跟踪误差范围为 $[1.5^{\circ}, 4^{\circ}]$ ,优化后的跟踪误差为 $[0.3^{\circ}, 0.6^{\circ}]$ 。在末端执行器轨迹中,通过运动学计算,优化前的误差范围为: $[5.2-11.0]$  mm,优化后的误差范围为: $[0.8, 4.2]$  mm。因此,优化后的控制算法拥有响应速度快,无超调,跟踪精度高的优点。

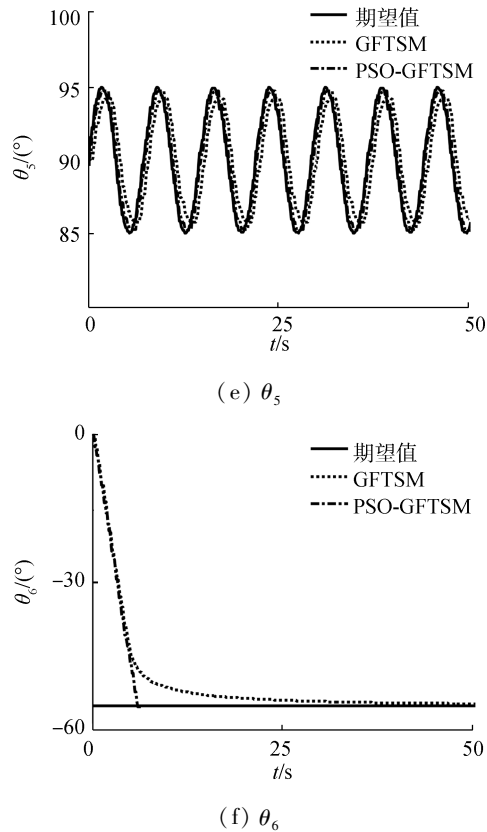
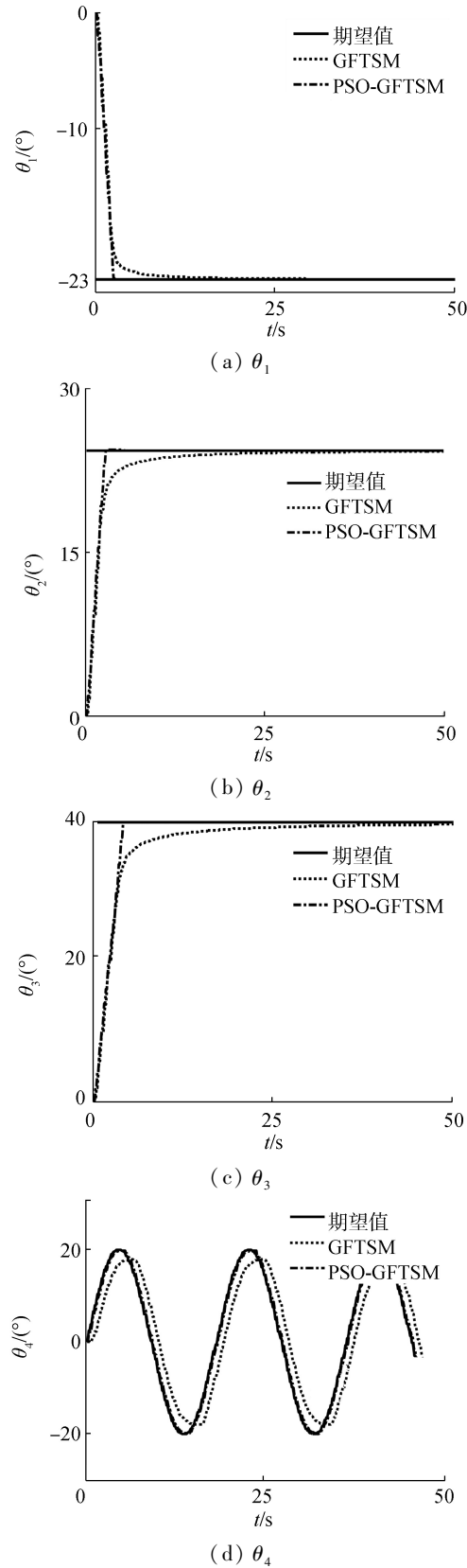


图 4 基于 PSO 优化全局快速终端滑模实验结果

Fig.4 Experimental result of PSO-GFTSM

由图 5、6 可知,在接近设定值时,图 5 仍有力矩在输出,说明未优化的趋近速度较慢;在正弦跟踪方面,优化后的调节速度快于优化前的速度。各轴的出力矩表明,各轴力矩并未在零附近来回切换,表明,此法可消除抖振。因此,优化后的滑模算法有利于工业机械臂实现快速准确定位,在物品搬运、零件装备、点焊等方面有一定的优势。

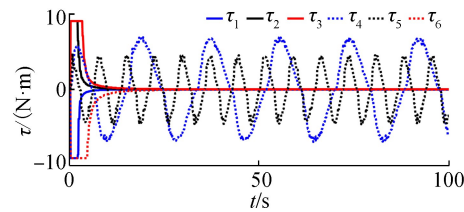


图 5 基于 GFTSM 各关节控制器输出

Fig.5 Control moment of each joint based on GFTSM

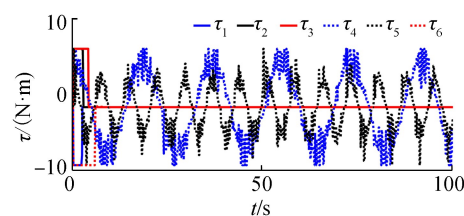


图 6 基于 PSO-GFTSM 各关节控制器输出

Fig.6 Control moment of each joint based on PSO-GFTSM

## 4 结束语

针对六自由度工业机械臂控制问题,考虑机械臂本身的 MIMO 特性,将其分解成单关节 SISO 系统,在全局快速终端变结构滑模控制的基础上,分析并克服了全局快速终端滑模控制的奇异性,同时采用 PSO 优化其控制律参数。实验结果表明:相比于优化前的滑模控制,基于 PSO 优化的全局快速终端滑模算法可以更加有效地减小被控系统的抖振问题,减小系统的上升时间,跟踪误差更小,可缩短滑模系统收敛时间,提高系统的动静态性能。

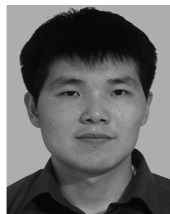
## 参考文献:

- [1] JASIM I F, PLAPPER P W. Stable robust adaptive control of robotic manipulators with switched constraints[C]//Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Takamatsu: IEEE, 2013: 755–760.
- [2] SHOJAEI K, SHAHRI A M. Adaptive robust time-varying control of uncertain non-holonomic robotic systems[J]. IET control theory & applications, 2012, 6(1): 90–102.
- [3] JAISWAL N K, KUMAR V. Comparison between conventional PID and Fuzzy PID supervisor for 3-DOF Scara type robot manipulator[C]//Proceedings of 2014 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science. Bhopal: IEEE, 2014: 1–5.
- [4] 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.
- [5] FERRARA A, INCREMONA G P. Design of an integral suboptimal second-order sliding mode controller for the robust motion control of robot manipulators[J]. IEEE transactions on control systems technology, 2015, 23(6): 2316–2325.
- [6] JIN Yi, CHANG P H, JIN Maolin, et al. Stability guaranteed time-delay control of manipulators using nonlinear damping and terminal sliding mode[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2013, 60(8): 3304–3317.
- [7] ARISOY A, BAYRAKCEKEN M K, BASTURK S, et al. High order sliding mode control of a space robot manipulator[C]//Proceedings of the 2011 5th International Conference on Recent Advances in Space Technologies. Istanbul: IEEE, 2011: 833–838.
- [8] SOLTANPOUR M R, OTADOLAJAM P, KHOOBAN M H. Robust control strategy for electrically driven robot manipulators: adaptive fuzzy sliding mode[J]. IET science, measurement & technology, 2015, 9(3): 322–334.
- [9] 付涛, 王大镇, 弓清忠, 等. 改进神经网络自适应滑模控制的机器人轨迹跟踪控制[J]. 大连理工大学学报, 2014, 54(5): 523–530.
- FU Tao, WANG Dazhen, GONG Qingzhong, et al. Robot trajectory tracking control of improved neural network adaptive sliding mode control[J]. Journal of Dalian university of technology, 2014, 54(5): 523–530.
- [10] 王艳敏, 冯勇, 陆启良. 基于遗传算法的柔性机械手高阶终端滑模控制[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39(6): 1563–1567.
- WANG Yanmin, FENG Yong, LU Qiliang. High-order terminal sliding mode control of flexible manipulators based on genetic algorithm[J]. Journal of Jilin university: engineering and technology edition, 2009, 39(6): 1563–1567.
- [11] SHARAF A M, EL-GAMMAL A A A. A variable structure sliding mode Particle Swarm Optimization-PSO optimal regulating controller for industrial PMDC motor drives[C]//Proceedings of 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. Miami, FL: IEEE, 2009: 337–343.
- [12] NIKU S B. 机器人学导论: 分析、系统及应用[M]. 孙富春, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [13] 王瑞明, 蒋静坪. 基于适应性遗传算法的滑模控制感应电机伺服驱动系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 136–141.
- WANG Ruiming, JIANG Jingping. Sliding-mode controlled induction motor servo drive system via AGA optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 136–141.

### 作者简介:



王琥,男,1990年生,硕士生,研究方向为机器人视觉、机器人控制以及轨迹规划。



胡立坤,男,1977年生,研究生导师,主要研究方向是非线性系统动力学与控制、光/风/蓄分布式电源转换与控制、工业测控网络应用。已发表核心期刊学术论文 50 余篇,其中 SCI 收录 2

篇, Ei 收录 14 篇;获得软件著作权 1 项;获得实用新型专利 1 项;申请发明专利 8 项。