

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.01.014

基于趋近律的机械臂滑模控制方法研究

黄 华, 李 光, 刘领化, 林 鹏

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为了满足机械臂系统高性能的控制要求, 对高为炳提出的指数趋近律进行分析, 并研究了机械臂的运动学特性, 在此基础上对指数趋近律进行优化设计, 改进了指数趋近律, 并证明了其存在性。根据改进的趋近律, 以机械臂为控制对象, 设计了滑模控制策略, 并用 Matlab 进行仿真。仿真结果表明, 该方法不仅能满足系统的快速跟踪性, 而且能有效抑制滑模变结构控制中存在的抖振问题。

关键词: 机械臂; 滑模控制; 指数趋近律

中图分类号: TP27; TM571

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)01-0062-05

Research of a Sliding Mode Control Strategy for Manipulator Arm Based on Reaching Law

Huang Hua, Li Guang, Liu Linghua, Lin Peng

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In order to meet the high performance control requirement of manipulator arm system, the exponential reaching law was analyzed and manipulator arm's dynamics characteristics were investigated. On the basis of it the exponential reaching law was improved and its existence was proved. According to the improved reaching law, the sliding mode control strategy was designed and simulated through Matlab with a manipulator arm as the control object. The simulated results show that the method is able to meet the system fast tracking and restrain the chattering problem in the sliding mode variable structure control.

Keywords: manipulator arm; sliding mode control; exponential reaching law

0 引言

随着机器人技术的飞速发展, 机械臂作为机器人操作终端具有越来越重要的地位, 对于它的控制也提出了进一步的要求。机械臂是一种非线性、强耦合、多输出、多输入的复杂非线性系统, 易受外界环境因素的干扰, 因此对机械臂系统控制的稳定性提出了更高要求^[1]。滑模变结构控制 (variable structure control with sliding mode, VSS) 是前苏联学

者 Emelyanov 等人在 20 世纪 60 年代初提出的一种控制方法^[2]。滑模变结构作为变结构控制的一种策略, 是通过控制量的来回切换, 从而使系统状态沿着滑模面滑动, 系统在受到外界扰动和参数干扰时具有不变性, 即系统与外界干扰无关, 称为完全鲁棒性。这有利于机械臂的精确控制, 可降低随机干扰或负载变化对机械臂系统的性能影响。因此在机械臂的实时控制系统中, 应用滑模变结构控制方法具有较好的实用价值。

收稿日期: 2012-11-20

作者简介: 黄 华 (1989-), 男, 湖北武汉人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为现代控制理论及其在电力电子系统中的应用, E-mail: hhwuhan@163.com

高频抖振的存在是滑模变结构控制方法的主要缺点,抑制高频抖振是机械臂系统中应用滑模控制方法面临的难题。国内外许多学者对此进行了大量研究,如: H. Liu^[3]主要针对误差预测提出了新的滑模控制方法,该方法设计了滤波器和观测器,通过观测器来消除未建模动态的不利影响,由均值滤波器来实现输入信号的平滑控制,避免了未建模动态中的抖振问题。C. L. Hwang^[4]基于滑模控制中Lypunov稳定性的要求,设计了一种时变的切换增益,抑制了控制系统的抖振。J. E. Slitine^[5]提出用饱和函数替代符号函数,以此来削弱抖振,但是该方法存在2个缺点:一是很难确定控制器的参数,二是在消除抖动的同时会影响控制的准确度。高为炳^[6]提出了利用趋近律来减小抖动的办法,此方法通过参数调整,不仅可使控制系统保证滑动模态的动态品质,而且能抑制高频抖动。

综上所述,各种控制策略既有自身的优点,又有各自的局限性,在针对具体问题时,要综合各种因素具体对待。本文对指数趋近律进行改进,结合改进后的趋近律设计滑模控制策略,再以机械臂为控制对象进行仿真。

1 机械臂动力学模型

以刚性二关节机械臂为对象,基于拉格朗日运动学建立的 n 关节机械臂的动态方程^[7]为

$$M(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})\dot{q}+G(q)=u+f, \quad (1)$$

式中: $M(q) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为正定惯性矩阵;

$C(q,\dot{q}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为哥氏力和离心力矩阵;

$G(q) \in \mathbf{R}^n$ 为作用在关节上的重力项矢量;

$q,\dot{q},\ddot{q} \in \mathbf{R}^n$ 分别为位置矢量、速度矢量和加速度矢量;

$u \in \mathbf{R}^n$ 为关节控制力矩;

$f \in \mathbf{R}^n$ 是外部扰动信号,具体有参数变化、建模误差以及其他不确定因素。

2 趋近律的设计

滑模变结构控制系统的运动有2个阶段。第一阶段是趋近运动,它在状态空间中的运动轨迹全部位于切换面之外,或者有限次穿越切换面;第二阶段是滑动运动,系统在切换面附近并沿切换面的滑动模态。在趋近运动段必须满足滑动模态的可达性条件^[8]。根据滑模变结构原理,滑模可达性条件仅能保证状态空间任意位置运动点在有限时间内到达切换面的要求,而对于趋近运动的具体轨迹未作任何限制,趋近过程良好。因此,为了保证趋近运动的品

质,可以设计出各种各样的趋近律公式^[9]。

指数趋近律是一种常用的趋近律,表示为

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn} s - ks, \quad \varepsilon > 0, k > 0. \quad (2)$$

指数趋近律可有效缩短趋近运动的时间,也可使运动点到达切换面时的速度很小,从而保证系统正常运动阶段的动态品质。但指数趋近律的切换带为带状,系统在切换带中向原点运动时,不能趋近于原点,而是趋近于原点附近的一个抖振,因此高频抖振增加了控制器的负担。盛严等人^[10]在指数趋近律式(2)的基础上引入 s^2 因子,可得

$$\dot{s} = -\varepsilon s^2 \operatorname{sgn} s - ks, \quad \varepsilon > 0, k > 0. \quad (3)$$

本文在上述基础上进行改进,加入一个衰减因子 $e^{-\alpha t}$,可得

$$\dot{s} = -\varepsilon e^{-\alpha t} s^\beta \operatorname{sgn} s - ks, \quad \varepsilon > 0, k > 0, \alpha > 0, \beta > 0. \quad (4)$$

1) 可达性

因为

$$s\dot{s} = -ks^2 - \varepsilon e^{-\alpha t} |s|^\beta \frac{s^2}{|s|} = -ks^2 - \varepsilon e^{-\alpha t} |s|^{\beta+1} < 0, \quad (5)$$

所以式(4)满足可达性条件。

2) 存在性

对式(4)采用伯努利方程求解的方法可得

$$t = \frac{\ln[\varepsilon(\beta-1)] - \ln[s(0)^{1-\beta}(\alpha - k(1-\beta)) + \varepsilon(\beta-1)]}{k(\beta-1) + \alpha}. \quad (6)$$

这表明,系统可以在有限时间内到达切换面。

因此,根据改进指数趋近率设计的滑模变结构控制方法,可以满足滑模运动的2个必要条件:可达性和存在性^[11-12]。

在此控制策略中,第一阶段系统在变速项和指数项的共同作用下趋近滑模面,保证了趋近过程的快速性。到滑模运动阶段,此时运动轨迹接近滑模面,趋近速度几乎为0,有效抑制了刚要进入滑模面的系统初始抖振。在趋近律的控制作用下,状态变量渐进趋向于原点,穿越滑模面的幅度一直减小,抖振幅值不断减小。当系统进入稳态之后,就可以稳定于原点,抖振现象基本消失,这样就解决了滑模变结构控制固有抖振的问题。

3 控制律的设计

滑模控制器的设计由2个基本步骤组成。第一步是切换函数的设计,在系统运动到切换面后,并基本保持在切换面上,系统的外干扰和参数摄动不会影响闭环系统的滑动模态,称为滑动模态的不变性。

因此,滑模控制系统的性能直接受到所设计的切换函数的影响。从理论上说,只要能使滑模变结构控制系统的各种特性保留,并且系统的滑动模态稳定,切换函数可以设计为不同的结构。

首先设计切换函数,取 q_d 为指令, $e=q_d-q$ 为误差信号,系统切换函数设计采用常用的线性滑模面

$$s = \dot{e} + Ce, \quad C = \text{diag}(c_1, \dots, c_n), \quad c_i > 0 \quad (7)$$

对于式(7),当系统到达切换面后,对给定的任意初始状态 $e(0)$,系统将在有限时间内到达平衡点,同时保持稳定。此外,通过对常数矩阵 C 的设计,可使机械臂系统有良好的动态品质。

第二步是滑动模态控制律的设计。为了满足到达条件,使系统在切换面上形成滑动模态,需要设计滑动模态控制律 $u(x)$ 。

由式(5)知 $\dot{s} = \ddot{e} + C\dot{e}$, 将 $e=q_d-q$ 代人可得

$$\dot{s} = \ddot{e} + C\dot{e} = C\ddot{e} + \dot{q}_d - \ddot{q} \quad (8)$$

由式(1)可知

$$\ddot{q} = M^{-1}(u + f - C\dot{q} - G) \quad (9)$$

所以

$$\dot{s} = C\ddot{e} + \dot{q}_d - M^{-1}(u + f - C\dot{q} - G) \quad (10)$$

由式(4)和式(9)可求得控制律

$$u = M[C\ddot{e} + \dot{q}_d + \varepsilon e^{-\alpha t} s^\beta \text{sgn } s + ks]C\dot{q} + G - f \quad (11)$$

4 机械臂系统仿真

以二关节机械臂系统为研究对象,其动力学模型(忽略摩擦力)^[13]为

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) = u + f(t) \quad (12)$$

具体参数选取如下:

$$M(q) = \begin{pmatrix} v + q_{01} + 2q_{02} \cos q_2 & q_{01} + q_{02} \cos q_2 \\ q_{01} + q_{02} \cos q_2 & q_{01} \end{pmatrix},$$

其中 $v=13.33, q_{01}=9.98, q_{02}=8.75$;

$$C(q,\dot{q}) = \begin{pmatrix} -q_{02}\dot{q}_2 \sin q_2 & q_{02}(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin q_2 \\ q_{02}\dot{q}_1 \sin q_2 & 0 \end{pmatrix};$$

$$G(q) = \begin{pmatrix} 15g \cos q_1 + 8.75g \cos(q_1 + q_2) \\ 8.75g \cos(q_1 + q_2) \end{pmatrix},$$

其中 $g=9.8$;

$$f(t) = [3 \sin(2\pi t) \quad 3 \sin(2\pi t)]$$

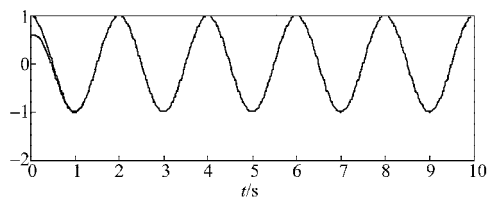
二关节的位置指令分别是:

$$q_{1d} = \cos(\pi t), \quad q_{2d} = \sin(\pi t)$$

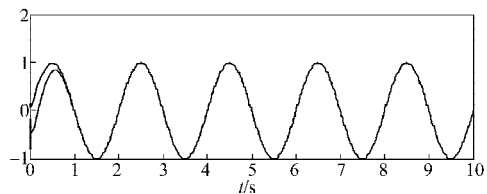
系统的初始状态为

$$[q_1 \quad q_2 \quad \dot{q}_1 \quad \dot{q}_2] = [0.6 \quad 0.3 \quad -0.5 \quad 0.5]$$

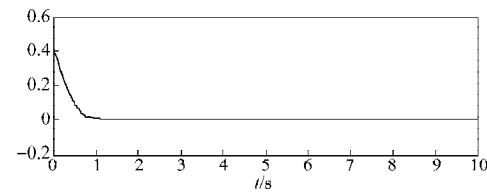
取参数 $c_1=c_2=5, \varepsilon=0.5, k=5$ 用常规趋近律进行仿真实验,结果见图1;用改进趋近律进行仿真实验,结果见图2。



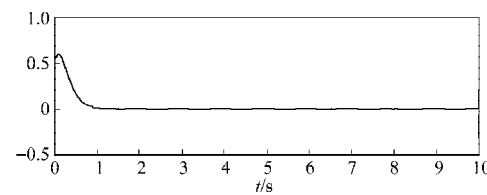
a) 关节1的位置跟踪



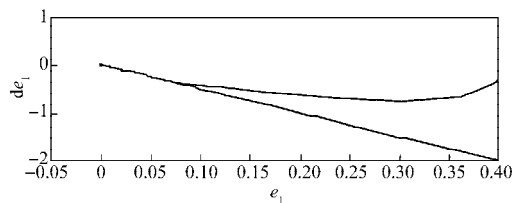
b) 关节2的位置跟踪



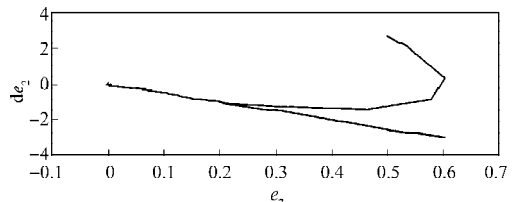
c) 关节1的位置跟踪误差



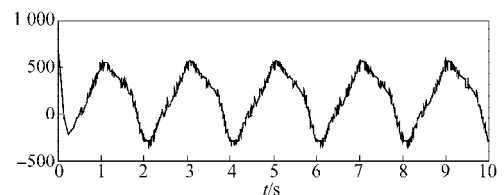
d) 关节2的位置跟踪误差



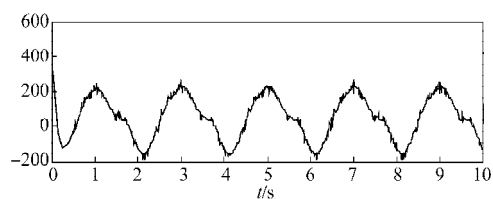
e) 关节1的相轨迹



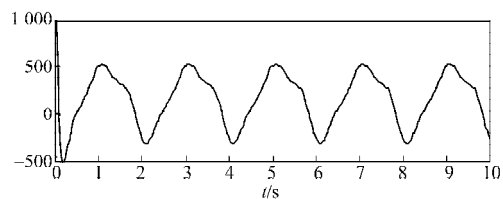
f) 关节2的相轨迹



g) 关节1的控制输入

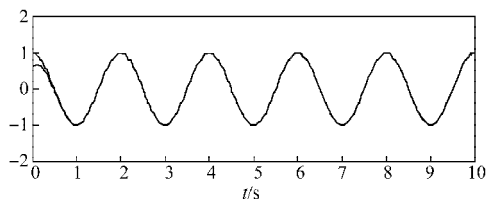


h) 关节 2 的控制输入

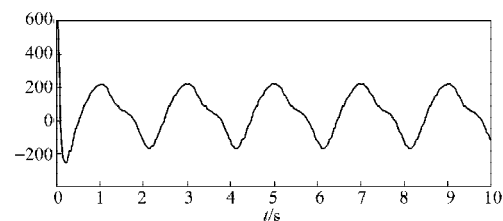


g) 关节 1 的控制输入

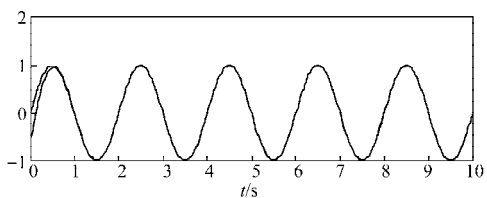
图1 基于指数趋近律的机械臂滑模控制仿真曲线
Fig. 1 Simulation curves of sliding-mode control for robotic manipulator based on exponential reaching law



a) 关节 1 的位置跟踪

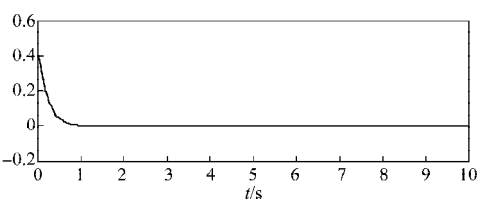


h) 关节 2 的控制输入

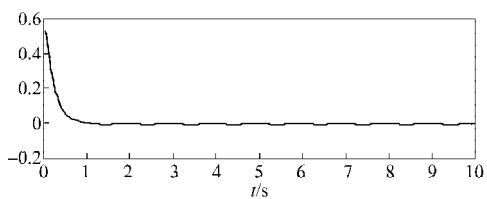


b) 关节 2 的位置跟踪

图2 基于改进趋近律的机械臂滑模控制仿真曲线
Fig. 2 Simulation curves of sliding-mode control for robotic manipulator based on improved reaching law



c) 关节 1 的位置跟踪误差



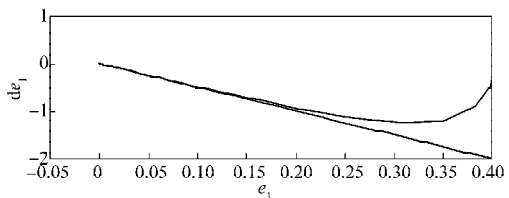
d) 关节 2 的位置跟踪误差

比较图 1 和图 2 可知, 使用常规指数趋近律的控制方法, 具有较快的位置跟踪速度, 但关节 2 有较明显的位置跟踪误差; 而使用改进之后的趋近律控制策略, 能精确地控制机械臂的位置跟踪误差, 提高系统的控制精度。比较图 1 和图 2 还可知, 在常规指数趋近律控制策略下, 机械臂系统存在明显的高频抖振; 而使用改进之后的趋近律控制策略, 能有效抑制机械臂滑模控制的抖振问题。

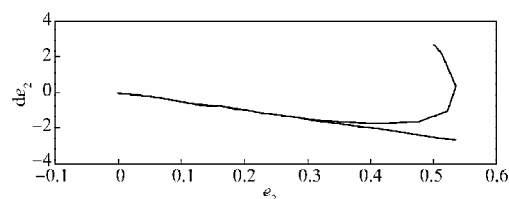
5 结语

通过对机械臂运动学特性的深入研究, 在高为炳提出的指数趋近律的基础上进行改进, 得到了改进后的趋近律, 并在数学上验证了其存在性。然后, 针对机器人技术中最常用的二关节机械手, 根据改进后的趋近律设计机械臂滑模控制策略。最后, 利用 Matlab 软件对该方法进行仿真实验, 从仿真结果可以看出, 改进后的控制策略具有缩小跟踪误差、抑制抖振的优点, 从而保证了系统对轨迹的快速跟踪, 提高了机械臂系统的工作性能。

参考文献:



e) 关节 1 的相轨迹



f) 关节 2 的相轨迹

[1] 蔡鹤皋. 机器人将是 21 世纪技术发展的热点[J]. 中国机械工程, 2000, 11(1/2): 58-60.
Cai Hegao. Robot Will Be a Hot Spot of Technological Development in the Twenty First Century[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(1/2): 58-60.
[2] 张昌凡. 滑模变结构控制研究综述[J]. 株洲工学院学报, 2004, 18(2): 1-5.
Zhang Changfan. The Research of Sliding Mode Variable

- Structure Control: A Survey[J]. Journal of Zhuzhou Institute of Technology, 2004, 18(2): 1-5.
- [3] Liu H. Smooth Sliding Control of Uncertain Systems Based on a Prediction Error[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 1997, 7(4): 353-372.
- [4] Hwang C L. Sliding Mode Control Using Time-Varying Switching Gain and Boundary Layer for Electro Hydraulic Position and Differential Pressure Control[J]. IEE Proc: Control Theory and Applications, 1996, 143(4): 325-332.
- [5] Slotine J E. Sliding Controller Design for Non-Linear Systems [J]. International Journal of Control, 1984, 40(2): 421-434.
- [6] 高为炳. 变结构控制研究的发展与现状[J]. 控制与决策, 1993, 8(4): 241-248.
Gao Weibing. The Developments and Status of Variable Structure Control[J]. Control and Decision, 1993, 8(4): 241-248.
- [7] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 88-96.
Cai Zixing. Robotics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 88-96.
- [8] 王丰尧. 滑模变结构控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 45-47.
Wang Fengyao. Sliding Mode Variable Structure Control [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1995: 45-47.
- [9] 高为炳. 变结构控制理论基础[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995: 28-29.
Gao Weibing. Variable Structure Control Theory[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1995: 28-29.
- [10] 盛 严, 王 超, 陈建斌. 结构变结构控制的指数趋近律改进方法[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(1): 108-110.
Sheng Yan, Wang Chao, Chen Jianbin. Variable Structure Control Based on Modified Exponential Approach Law for Structure Control[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(1): 108-110.
- [11] 朱 剑, 张昌凡, 崔茂振, 等. 基于改进趋近率的滑模控制方法及应用[J]. 湖南工业大学学报, 2012, 26(2): 60-63.
Zhu Jian, Zhang Changfan, Cui Maozhen, et al. The Sliding Mode Control Method Based on Improved Reaching Law and Its Application[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2012, 26(2): 60-63.
- [12] 谢慕君, 王 辉. 模糊趋近率的滑模控制在倒立摆系统中的应用研究[J]. 自动化技术与应用, 2008, 27(10): 8-11.
Xie Mujun, Wang Hui. Fuzzy Sliding-Mode Control for a Pendulum System[J]. Techniques of Automation and Applications, 2008, 27(10): 8-11.
- [13] 刘金锴. 机器人控制系统的设计与MATLAB仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 426-428.
Liu Jinkun. Robot Control System Design and Simulation of MATLAB[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 426-428.

(责任编辑: 邓光辉)