

文章编号: 1001-0920(2011)12-1904-05

基于新型趋近律的动中通系统滑模稳定跟踪控制

姜 君, 陈庆伟, 郭 健, 樊卫华

(南京理工大学 自动化学院, 南京 210094)

摘 要: 根据一类典型的三轴动中通系统的耦合特性及载体扰动特点, 提出一种新型滑模趋近律方法, 并在此基础上设计了滑模稳定跟踪控制器. 理论证明和仿真实验均表明了所设计的基于新型趋近律的滑模稳定跟踪控制器的合理性和有效性.

关键词: 动中通; 三轴; 耦合; 滑模控制; 趋近律

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Sliding mode stable tracking control for mobile satellite communication system based on a new reaching law

JIANG Jun, CHEN Qing-wei, GUO Jian, FAN Wei-hua

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China. Correspondent: JIANG Jun, E-mail: jiangjun1985@gmail.com)

Abstract: According to the features of coupling and disturbance of a class of typical mobile satellite communication systems, a new sliding mode reaching law is proposed. Based on the new reaching law, a sliding mode stable tracking controller is designed. At last, the rationality and the effectiveness of the designed sliding mode stable tracking controller with the new reaching law are verified by the theoretical proof and the simulation experiments.

Key words: mobile satellite communication system; tri-axis; coupling; sliding mode control; reaching law

1 引 言

安装在移动载体上的动中通系统能够通过自动调整自身姿态, 隔离载体运动以及在运动过程中所受到的扰动, 自动跟踪卫星进行不间断通信. 因其适应性强、通信距离远、频带宽、保密性好等一系列显著特点, 在战场移动指挥、目标侦查、抗险救灾、电视转播等方面有着广泛的应用前景和 market 价值^[1-2].

由于卫星位于距地面约 40 000 km 的高空, 为了实现宽频带多媒体的卫星通信, 必须采用高增益天线. 此种天线波束很窄, 跟踪精度要求很高(一般约为 0.5°, 甚至更小)^[1]. 卫星天线必须以较高的精度指向目标卫星, 才能成功建立起通信链路, 进行正常的卫星通信. 动中通系统一般工作在持续扰动、多变的复杂环境中, 该系统必须能够克服载体扰动和环境变化的影响以确保天线精确指向目标卫星. 动中通系统高精度的控制要求以及工作条件的复杂性, 决定了系统

自身结构的复杂性. 典型的动中通系统一般采用多轴结构, 从而达到将总的载体扰动分解到各个子系统中, 通过子系统分别姿态补偿达到隔离整体扰动的目的. 然而各子系统之间存在交叉耦合, 会产生相互干扰力矩, 增加了动中通系统的控制难度.

滑模控制本质上是一类特殊的非线性控制, 其非线性表现为控制的不连续性. 由于滑模控制具有快速响应、对对象参数变化及扰动不灵敏、无需在线辨识、物理实现简单等特性, 在实际工程中得到了广泛应用, 如电机与电力系统控制、机器人控制、飞行器控制、卫星姿态控制等^[3-4]. 同样, 滑模控制也很适合解决存在非线性耦合及载体扰动的动中通系统稳定跟踪问题. 本文根据动中通系统的特点, 提出一种新型趋近律滑模控制方法, 并采用该方法设计了动中通系统稳定跟踪控制器. 通过理论证明说明了所提出的新型趋近律滑模控制方法的合理性, 并经仿真实验进

收稿日期: 2010-07-20; 修回日期: 2010-11-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60975075, 61074023); 江苏省科技支撑计划项目(BE2009160); 江苏省自然科学基金项目(BK2008404); 江苏省研究生创新工程项目.

作者简介: 姜君(1985—), 男, 博士生, 从事高性能伺服系统、智能控制理论与应用的研究; 陈庆伟(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制系统、数字交流伺服系统等研究.

一步验证了该方法的有效性。

2 系统简介

本文研究的是一类用于舰载或船载卫星通信的动中通系统. 系统组成框图如图 1 所示.

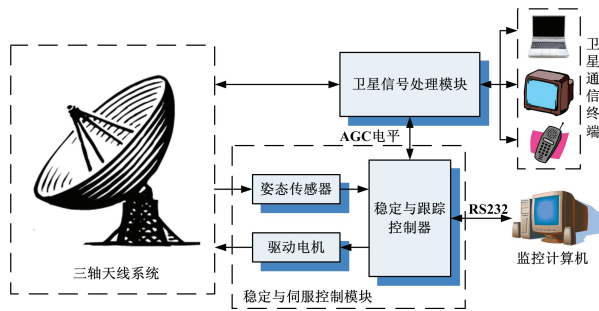


图 1 动中通系统组成框图

整个系统主要由三轴天线系统、稳定与伺服控制模块、卫星信号处理模块和卫星通信终端等几部分组成. 其中, 三轴天线系统由外向内分为方位系统、横滚系统和俯仰系统, 3 个子系统各有一个转动轴, 用于调整天线姿态. 收发卫星信号的天线部分安装在最里层的俯仰系统上. 稳定与伺服控制模块主要根据姿态传感器(陀螺、电子罗盘等)反馈的系统姿态信息作出控制决策, 通过驱动电机对卫星天线姿态进行调整, 从而确保天线始终指向目标卫星. 卫星信号处理模块主要对收发的卫星信号进行升降频处理, 并提取代表卫星信号强度的自动增益控制(AGC)电平, 传给稳定与伺服控制模块.

整个系统的设计难点在于稳定与伺服控制模块的设计. 动中通系统要求在持续扰动、多变的复杂环境中能够克服载体扰动和环境变化的影响, 确保天线精确指向目标卫星. 而动中通系统的三轴之间存在明显的非线性耦合. 当速度和加速度较大时, 各子系统之间的耦合严重, 甚至会影响到系统的稳定性. 所以在设计动中通三轴稳定系统时, 必须采取有效的控制方法, 消除外界扰动以及自身的交叉耦合影响, 才能确保系统的控制精度和动态性能, 从而保证良好的卫星通信质量.

3 滑模控制器设计

下面以动中通系统的方位子系统为例, 设计稳定跟踪滑模控制器. 方位控制系统框图如图 2 所示.

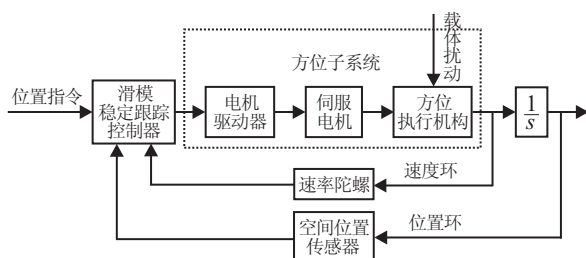


图 2 方位控制系统框图

方位子系统的状态方程可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \left(-\frac{K_m C_e}{JR} + \Delta\right)x_2 + \frac{K_u K_m}{JR}u + d, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x_1 = \theta$ 为系统方位角; $x_2 = \dot{x}_1 = \omega$ 为方位系统绕自身转动轴转动的角速度; u 为控制输入量; Δ 为系统不确定参数; d 为扰动项, 包括载体扰动以及其他子系统对方位子系统产生的交叉耦合项; K_m 为电机力矩系数; K_u 为 PWM 功率放大器放大系数; C_e 为电压反馈系数; R 为电枢电阻; J 为方位系统的转动惯量.

滑模控制通过引入滑动模式, 使得系统在滑动模式下对系统部分结构不确定性、参数变化以及外界干扰等不确定因素具有不敏感性和鲁棒性, 而且可以获得满意的动态性能, 因此很适合用于控制存在三轴交叉耦合及载体扰动的动中通系统.

虽然滑模控制具有以上诸多优点, 但由于滑模控制自身的不连续开关特性不可避免地会产生抖振. 抖振问题将影响系统的稳定性和跟踪精度, 同时增加系统的能量消耗. 若消除了抖振, 也就消除了滑模控制的抗扰动和抗扰动能力, 因此完全消除抖振是不可能的, 只能在一定程度上削弱它. 高为炳^[5-6]提出的趋近律是一种有效削弱滑模控制系统的方法. 常用的传统趋近律方法主要有以下几种^[3]:

1) 等速趋近律

$$\dot{s} = -\epsilon \text{sgn}(s), \quad s > 0, \quad (2)$$

其中常数 ϵ 表示系统的运动点趋近切换面 $s = 0$ 的速率.

2) 指数趋近律

$$\dot{s} = -\epsilon \text{sgn}(s) - ks, \quad s > 0, k > 0. \quad (3)$$

在指数趋近律中, 为保证快速趋近的同时削弱抖振, 应在增大 k 的同时减小 ϵ .

3) 幂次趋近律

$$\dot{s} = -k|s|^\alpha \text{sgn}(s), \quad k > 0, 1 > \alpha > 0. \quad (4)$$

传统的趋近律方法存在一些不足^[7-9]: 基于等速趋近律的滑模控制采用由不确定的界限计算出的固定控制增益, 如果增益 ϵ 太小, 则趋近速度很小, 导致控制的过渡过程变长; 相反, 若 ϵ 太大, 则到达滑模面引起的抖振较大. 基于指数趋近律的控制方法虽然可以通过减小 ϵ , 增大 k 加速趋近过程, 并大大削弱了抖振, 但等速项 $\epsilon \text{sgn}(s)$ 的存在使系统并不能从理论上消除抖振. 幂次趋近律能够实现平滑进入滑动模式, 但在快速趋近方面存在不足. 这几种传统的趋近律的趋近速度都不能很好地反映系统当前状态与滑模面的情况.

本文根据动中通系统稳定跟踪控制器需要快速

准确隔离载体扰动, 确保系统稳定指向的要求, 提出一种基于新型趋近律的滑模控制方法. 具体原理如下:

1) 选取切换函数

$$s = ce + \dot{e}. \quad (5)$$

其中: c 为常数, $e = r - x_1$ 为系统位置误差信号.

2) 设计新的趋近律为

$$\dot{s} = -\varepsilon|s|^\alpha \text{sgn}(s) - k|s|^\beta s. \quad (6)$$

其中: $\varepsilon > 0, k > 0, 1 > \alpha > 0, 1 > \beta > 0$.

这种改进的趋近律方法将指数趋近律快速趋近的优点和幂次趋近律能够平滑进入滑动模式的优点结合起来, 可以在确保趋近速度的同时, 尽可能地减小系统抖动. 同时根据系统当前状态与滑模面的距离, 通过 $-k|s|^\beta s$ 项自适应地改变指数趋近项的趋近速率, 进一步提高了趋近滑动模式的速率.

3) 求解控制函数 u

由式 (1) 和 (5) 得

$$\begin{aligned} s &= c\dot{e} + \ddot{e} = c\dot{e} + \ddot{r} - \dot{x}_1 = c\dot{e} + \ddot{r} - \dot{x}_2 = \\ c\dot{e} + \ddot{r} &- \left[\left(-\frac{K_m C_e}{JR} + \Delta \right) x_2 + \frac{K_u K_m}{JR} u + d \right]; \end{aligned} \quad (7)$$

由式 (6) 和 (7) 可解得

$$\begin{aligned} u &= \frac{JR}{K_u K_m} \left[c\dot{e} + \ddot{r} + \varepsilon|s|^\alpha \text{sgn}(s) + k|s|^\beta s + \right. \\ &\left. \left(\frac{K_m C_e}{JR} - \Delta \right) x_2 - d \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

4 滑模特性分析与证明

滑动模式存在条件的成立是滑动模式控制应用的前提. 系统的运动必须趋向于切换面 $s = 0$, 即必须满足可达性条件^[3]

$$s\dot{s} < 0. \quad (9)$$

定理 1 基于新型趋近律 (6) 设计的滑模控制器满足滑模可达性条件.

证明 取 Lyapunov 函数为

$$V(x) = \frac{1}{2}s^2, \quad (10)$$

则有

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= s\dot{s} = s \left[-\varepsilon|s|^\alpha \text{sgn}(s) - k|s|^\beta s \right] = \\ &-\varepsilon s|s|^\alpha \text{sgn}(s) - k|s|^\beta s^2 = \\ &-\varepsilon|s|^{\alpha+1} - k|s|^\beta s^2 \leq 0. \end{aligned} \quad (11)$$

因此, 所设计的滑模控制器满足滑模可达性条件. \square

定理 2 趋近律 (6) 可使系统在有限时间内从任意初始状态 $s(0)$ 到达滑模切换面 $s = 0$.

证明 当系统初始状态 $s(0) > 0$ 时, 新型趋近律

(6) 变为

$$\dot{s} = -\varepsilon s^\alpha - k s^{\beta+1}. \quad (12)$$

式 (12) 两边同乘以 $s^{-\alpha}$, 化为

$$s^{-\alpha} \dot{s} = -\varepsilon - k s^{\beta-\alpha+1}. \quad (13)$$

对式 (13) 积分可得

$$\begin{aligned} \frac{s^{1-\alpha}(t) - s^{1-\alpha}(0)}{1-\alpha} &= \\ -\varepsilon t - \frac{k[s^{\beta-\alpha+2}(t) - s^{\beta-\alpha+2}(0)]}{\beta-\alpha+2}. \end{aligned} \quad (14)$$

到达切换面时 $s(t) = 0$, 则从初始状态到达切换面的时间为

$$t = \frac{s^{1-\alpha}(0)}{\varepsilon(1-\alpha)} + \frac{k s^{\beta-\alpha+2}(0)}{\varepsilon(\beta-\alpha+2)}. \quad (15)$$

当系统初始状态 $s(0) < 0$ 时, 证明过程同上. 因此, 采用趋近律 (6) 可使系统在有限时间内从任意初始状态到达滑模切换面. \square

5 仿真实验

动中通系统的工作目的是快速准确地跟踪目标卫星, 并在跟踪过程中尽可能地隔离系统自身和载体运动中的影响, 从而稳定跟踪目标卫星, 进行不间断的通信. 仿真实验中以方位系统为例, 假设此时仅存在方位扰动, 方位系统初始指向为 170° , 目标卫星方位位置为 173.5° . 方位系统的控制目标即是快速准确跟踪方位系统指令信号, 并保持方位指令值附近. 本文研究的动中通系统方位子系统的相关参数如下: $J = 0.852 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $C_e = 1.1$, $K_m = 4$, $K_u = 10$, $R = 5 \Omega$. 下面通过两组仿真实验来进一步验证所设计的基于新型趋近律的滑模控制方法的有效性.

5.1 仿真实验 1

选取文献 [7] 和文献 [8] 的两种典型改进趋近律滑模控制方法与本文设计的基于新型趋近律的滑模控制方法进行比较. 在相同条件下, 分别对动中通系统方位子系统模型进行稳定跟踪仿真实验.

设系统不确定参数 $\Delta = \sin(2\pi t)$. 在 $1 \text{ s} \sim 2 \text{ s}$ 时加入速度扰动 $10 \sin(2\pi t)^\circ/\text{s}$, 则扰动加速度 $d = 20\pi \cos(2\pi t)^\circ/\text{s}^2$. 文献 [7] 采用的趋近律为 $\dot{s} = -2|s|^{0.22} \text{sgn}(s) - 20s$; 文献 [8] 采用的趋近律为 $\dot{s} = 40 \text{sgn}(s)(1 - 1.3^{|s|})$; 本文设计的新型趋近律为 $\dot{s} = -4|s|^{0.6} \text{sgn}(s) - 28|s|^{0.05}s$. 为了使仿真实验更符合实际系统条件, 设姿态传感器反馈的扰动信息和估计的系统不确定参数存在 $\pm 10\%$ 以内的随机误差, 并将控制器输出量限幅为 $\pm 12 \text{ V}$. 仿真实验结果如图 3 所示. 为了更清楚地表示系统稳定跟踪结果, 误差结果图为纵轴放大后的结果 (图 4 和图 5 与此相同).

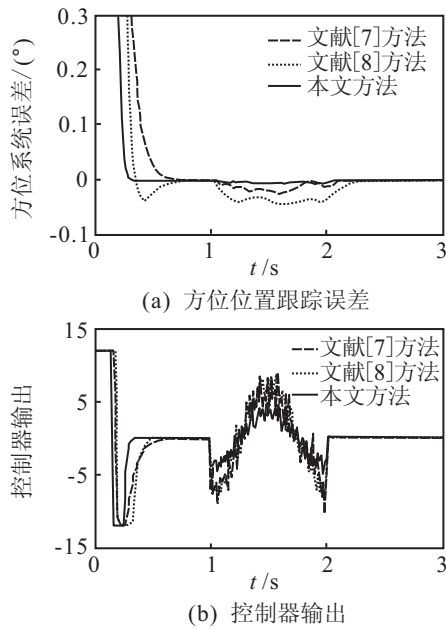


图 3 几种控制方法的比较

从图 3 可以看出, 文献 [7] 方法能够零超调跟踪目标, 稳态误差为零, 且在扰动情况下系统跟踪误差较小, 消除扰动效果较好, 但跟踪速度较慢; 文献 [8] 方法跟踪速度较快, 但有一定的超调量, 且扰动条件下系统跟踪误差较大, 进入稳态时间较长; 本文设计的新型趋近律方法综合了前面两种方法的优点, 跟踪速度快, 没有超调量, 且在扰动情况下系统跟踪误差小, 消除扰动效果较好, 鲁棒性强, 具有良好的动态和稳态特性, 从而进一步验证了所设计的新型趋近律的有效性.

5.2 仿真实验 2

在不同仿真条件下, 采用本文设计的新型趋近律滑模方法对动中通系统方位子系统模型进行稳定跟踪仿真实验. 通过不同条件下的仿真结果, 分析新型趋近律滑模方法的特点和性能.

5.2.1 参数不确定仿真实验

该实验主要分析系统的参数不确定项对系统稳定跟踪性能的影响. 选取如下 3 种参数不确定情况对方位子系统进行稳定跟踪仿真实验:

- 1) $\Delta = \sin(2\pi t)$;
- 2) $\Delta = 2 \sin(2\pi t)$;
- 3) $\Delta = -2 \sin(2\pi t)$.

此时, 扰动项 $d = 0$, 设控制算法中估计的系统参数不确定信息存在 $\pm 10\%$ 以内的随机误差, 且将控制器输出量限幅为 $\pm 12 \text{ V}$. 选取的趋近律为 $\dot{s} = -4|s|^{0.6} \text{sgn}(s) - 28|s|^{0.05} s$. 仿真实验结果如图 4 所示.

从图 4 可以看出, 参数不确定性对系统稳定跟踪

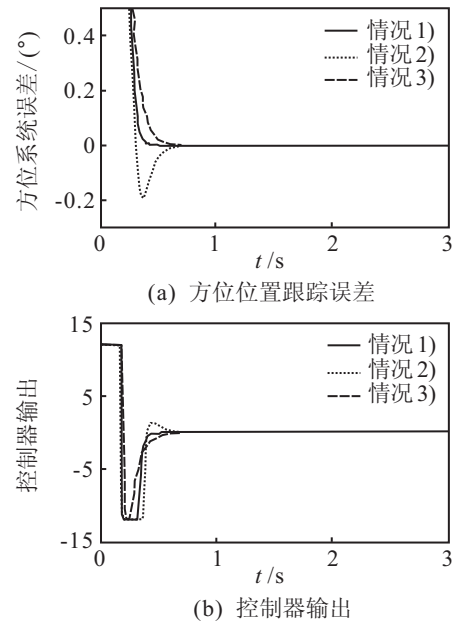


图 4 参数不确定仿真实验结果

效果具有一定影响, 主要表现在稳定跟踪初期. 参数不确定项变化可能会导致跟踪超调或者跟踪速度变慢. 本文设计的新型趋近律滑模控制方法在 3 种参数不确定情况下都能较好地消除或削弱系统参数不确定对稳定跟踪的影响.

5.2.2 扰动仿真实验

该实验主要分析外来扰动和子系统之间相互耦合对系统稳定跟踪性能的影响. 选取如下 3 种扰动条件, 对方位子系统进行稳定跟踪仿真实验:

- 1) 方位速度扰动为 $10 \sin(2\pi t) \text{ }^\circ/\text{s}$, 扰动加速度 $d = 20\pi \cos(2\pi t) \text{ }^\circ/\text{s}^2$;
- 2) 方位速度扰动为 $15 \sin(2\pi t) \text{ }^\circ/\text{s}$, 扰动加速度 $d = 30\pi \cos(2\pi t) \text{ }^\circ/\text{s}^2$;
- 3) 方位速度扰动为 $20 \sin(2\pi t) \text{ }^\circ/\text{s}$, 扰动加速度 $d = 40\pi \cos(2\pi t) \text{ }^\circ/\text{s}^2$.

此时, 设参数不确定项 $\Delta = 0$, 姿态传感器反馈的扰动信息存在 $\pm 10\%$ 以内的随机误差, 且将控制器输出量限幅为 $\pm 12 \text{ V}$. 选取的趋近律为 $\dot{s} = -4|s|^{0.6} \text{sgn}(s) - 28|s|^{0.05} s$. 仿真结果如图 5 所示.

从图 5 可以看出, 在不同的扰动情况下, 本文提出的新型趋近律滑模控制方法都能消除或削弱外来扰动对系统稳定跟踪产生的影响. 扰动较小时, 能够很好地隔离载体扰动, 保持稳定跟踪方位指令信号; 扰动很大时, 由于控制器输出限幅, 虽不能完全隔离载体扰动, 但在很大程度上削弱了大扰动对系统稳定跟踪的影响.

以上两组仿真实验结果进一步验证了本文设计的基于新型趋近律的滑模控制方法的有效性.

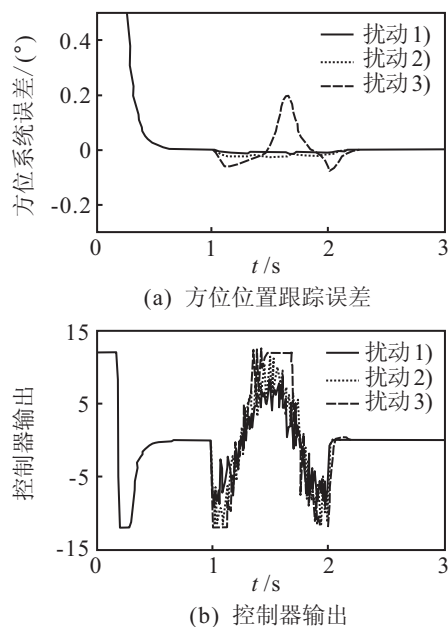


图5 扰动仿真实验结果

6 结论

本文基于一类典型三轴动中通系统的特点,利用滑模控制对不确定参数和扰动的不敏感特性,设计了一种新型趋近律滑模稳定跟踪控制器.通过理论证明和仿真实验验证了所设计新型趋近律滑模稳定跟踪控制器的合理性和有效性,对于动中通系统的理论研究和工程实践具有一定的参考价值.

参考文献(References)

- [1] 郭嘉俭. 动中通卫星通信系统若干技术问题探讨[J]. 卫星与网络, 2007, 7: 38-49.
(Guo J J. Several technical problems on moving satellite communication systems[J]. Satellite and Network, 2007, 7: 38-49.)
- [2] 徐贵民, 黄建国. 稳定环在“动中通”伺服系统中应用的仿真研究[J]. 电光与控制, 2009, 16(2): 94-96.
(Xu G M, Huang J G. Simulation studies on stable ring

for servo system of satellite communication in motion[J]. Electronics Optics and Control, 2009, 16(2): 94-96.)

- [3] 刘金琨. 滑模变结构控制 Matlab 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 35-44.
(Liu J K. Matlab simulation for sliding mode control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 35-44.)
- [4] 袁磊峰. 用于卫星通信的舰载天线稳定系统的设计及工程实现[D]. 南京: 南京理工大学自动化学院, 2003.
(Yuan L F. Design and engineering implementation for ship-borne stable antenna system for satellite communication[D]. Nanjing: School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, 2003.)
- [5] Gao W B, Hung J C. Variable structure control of nonlinear systems: A new approach[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1993, 40(1): 45-55.
- [6] Gao W B, Wang Y F, Homaifa A. Discrete-time variable structure control systems[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1995, 42(2): 117-122.
- [7] 吕春苗, 史泽林, 王洪福. 陀螺稳像平台滑模变结构控制的优化设计[J]. 信息与控制, 2007, 36(5): 639-642.
(Lv C M, Shi Z L, Wang H F. Optimization design of sliding mode variable structure control to gyro image-stabilization platform[J]. Information and Control, 2007, 36(5): 639-642.)
- [8] 彭书华, 李华德, 苏中. 非线性摩擦干扰下的电动舵机滑模变结构控制[J]. 信息与控制, 2008, 37(5): 637-640.
(Peng S H, Li H D, Su Z. Sliding mode variable structure control for electromechanical actuator with nonlinear friction[J]. Information and Control, 2008, 37(5): 637-640.)
- [9] 梅红, 王勇. 快速收敛的机器人滑模变结构控制[J]. 信息与控制, 2009, 38(5): 552-557.
(Mei H, Wang Y. Fast convergent sliding mode variable structure control of robot[J]. Information and Control, 2009, 38(5): 552-557.)

(上接第1903页)

- [8] Comaniciu D, Ramesh V, Meer P. Real-time tracking of non-rigid objects using mean shift[C]. Int Conf on Computer Vision and Pattern Recognition. Hilton Head Island, 2000, 2: 142-149.
- [9] Perez P, Hue C, Vermaak J, et al. Color based on probabilistic tracking [C]. European Conf on Computer Vision. Copenhagen, 2002: 661-675.
- [10] Sylvain B, Eric D, Michel B. High-dimensional statistical distance for region-of-interest tracking[C]. Int Conf on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas, 2007, 1: 1-8.