

文章编号 1004-924X(2015)09-2553-09

微动量轮高精度滑模变结构控制

王梦焱*, 张高飞, 尤政, 田宁

(清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 基于滑模变结构算法研究了小卫星微动量轮的精确控制。在系统整体控制框架的基础上, 对微动量轮动力学模型进行了分析; 结合理想模型引入纹波电压、摩擦系数不确定性、扰动力矩等干扰因素, 完善了微动量轮动力学模型。设计了等效滑模变结构控制算法, 并对控制率参数进行了仿真优化。通过 MATLAB 仿真, 对比分析了滑模变结构控制和常规 PI 控制在转速控制和力矩控制两种模式下的特性。最后, 实验设计了微动量轮样机。仿真结果表明: 基于滑模变结构控制的微动量轮转速控制精度达到 ± 0.5 r/min, 从 0 加速到 2 000 r/min 的时间为 18 s, 均明显优于 PI 控制。实验结果表明: 利用滑模变结构控制的微动量轮转速控制精度达到 ± 0.9 r/min, 从 0 加速到 2 000 r/min 的时间为 26 s。上述结果显示: 利用滑模变结构控制算法可以有效克服微动量轮控制中的干扰因素, 提高转速控制精度和输出力矩稳定度, 缩短转速变化响应时间。

关键词: 小卫星; 姿态控制; 微动量轮; 滑模控制; 仿真计算; 样机实验

中图分类号: V448.22; TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152309.2553

High precision sliding mode control for micro-momentum wheel

WANG Meng-bi*, ZHANG Gao-fei, YOU Zheng, TIAN Ning

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments
Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: wangmb1020@gmail.com

Abstract: The precision control of a micro-momentum wheel in micro-satellite was researched based on a sliding mode control algorithm. On the basis of the whole control system framework, the dynamic model of the micro-momentum wheel was analyzed. Combination of the ideal model and consideration of the interference factors such as ripple voltage, the uncertainty of friction coefficient, and disturbance torque, the dynamic model of micro-momentum wheel was improved. Then, sliding mode control algorithm was designed, and simulation control rate parameters were optimized. Through MATLAB simulation, sliding mode control and conventional PI control were compared for the torque control and speed control. Finally, a micro-momentum wheel prototype was designed. The simulation results show that the speed control precision of the micro-momentum wheel based on sliding mode control is ± 0.5 r/min and it can accelerate from 0 to 2 000 r/min in 18 s, both are much better than that based on PI control. Experimental results demonstrate that the speed control precision of the micro-momentum wheel based on sliding mode control is ± 0.9 r/min and it can accelerate from 0 to 2 000 r/min in 26 s. These results indicate that sliding mode control algorithm effectively overcomes

收稿日期: 2015-03-17; 修订日期: 2015-04-10.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2013AA122601)

the control interference factors of the micro-momentum wheel and improves the speed control precision, shortens the acceleration time.

Key words: micro-satellite; attitude control; micro-momentum wheel; sliding mode control; simulation and calculation; prototype experiment

1 引言

微小卫星是指质量小于 1 000 kg 的卫星^[1]。由于微小卫星具有体积小、重量轻、研制和发射成本低、研制周期短等优势^[2],在过去十余年内发展迅速,全球已成功发射微小卫星 497 颗,占卫星发射总数的 41.21%^[3]。2013 年,全球微小卫星发射呈爆发式增长态势,共成功发射 146 颗^[4]。目前,微小卫星已经在遥感、导航、通讯、技术试验、空间对抗等多个领域发挥重要作用。随着微小卫星应用研究的深入,对微小卫星平台的姿态控制精度要求不断提高。微动量轮具有可靠性高、控制精度高和功耗低等优点,已被广泛应用于微小卫星姿态控制之中^[5-6]。微动量轮通过改变飞轮转子的转速来改变角动量大小,从而产生控制力矩实现微小卫星姿态的精确控制^[7-9]。因此,微动量轮转速控制的精度直接影响微小卫星姿态控制精度,是衡量微动量轮性能的重要指标。

微动量轮从结构上看是一台惯性矩很大的无刷直流电机,由于非线性、参数不确定以及扰动等因素,经典线性控制方法难以达到理想的高精度控制效果^[10]。为了提高控制性能,目前人们普遍采用神经网络控制、模糊控制、自适应控制等智能控制方法来改善了非线性、不确定性、扰动因素等对转速控制精度的影响^[11-16]。这些控制方法虽然能有效提高微动量轮的控制性能,但算法相对复杂,难以在容量有限的微小卫星上得到应用。

滑模变结构控制是前苏联学者 Emelyanov 和 Utkin 在 20 世纪 50 年代提出的一种特殊非线性控制方法^[17]。滑模变结构控制是变结构控制系统的一种控制策略,具有使系统“结构”随时间变化的开关特性,这也是滑模变结构控制与常规控制的根本区别。该控制特性迫使系统沿滑动模态做小幅度、高频率的上下运动,即“滑模”运动,而滑动模态的设计与系统参数及扰动无关,从而使得滑模运动系统具有快速响应、对参数变化及扰动不灵敏、无需系统在线识别、物理实现简单等

优点^[18-20]。将滑模变结构控制应用于微动量轮转速控制中,可以有效克服非线性、系统参数不确定性和频繁扰动等因素,提高转速控制精度和稳定度,且由于算法结构简单而便于工程实现。

本文在分析微动量轮模型的基础上,引入纹波电压、扰动力矩、摩擦力矩不确定性等控制干扰因素,对理论模型进行了完善,在此基础上完成了控制系统设计。针对控制系统模型,开展了滑模变结构控制算法的设计和仿真。仿真结果显示,利用滑模变结构控制算法的转速控制精度、转速响应特性、抗干扰能力、力矩控制稳定度等特性都明显优于常规 PI 控制。将滑模变结构控制算法数字化后写入微处理器进行微动量轮样机实验,实验结果显示样机 2 000 r/min 时转速控制精度为 ± 0.9 r/min,加速时间为 26 s。仿真和实验结果表明,利用滑模变结构控制算法可以有效克服微动量轮控制中的干扰因素,提高转速控制和力矩控制精度、缩短转速变化响应时间。

2 微动量轮模型及控制系统设计

2.1 微动量轮控制系统设计

微动量轮由无刷直流电机、电机驱动器和转速控制器组成,如图 1 所示。电机控制器采用 UC1625 直流无刷电机控制器对电机反馈 HALL 信号和转向信号进行编码获得驱动电路控制输入;利用脉宽调制器(PWM)控制调整电机输入电压占空比,从而改变电机输入电压幅值,实现转速控制目标。驱动电路采用全桥驱动方式,以场效应管为切换开关(上端为 P 沟道 IRF4905,下端为 N 沟道 IRF3205)。数据处理器采用 C515C 微控制器,设定转速指令和电机编码器获取的电机转速反馈信号作为 C515C 输入信号,通过固化在 C515C 中的滑模变结构控制算法运算得到电压输出信号。将此输出的电压信号输入 UC1625 作为 PWM 控制输入,从而实现微动量轮的转速控制。

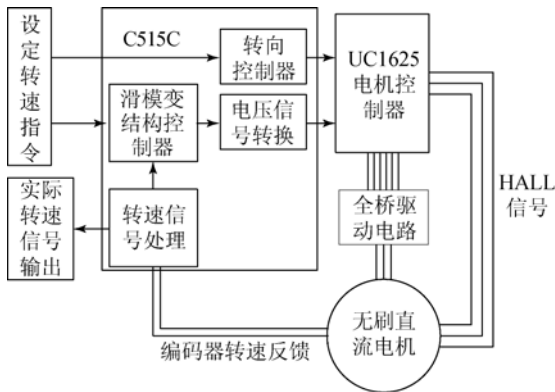


图 1 微动量轮控制系统结构

Fig. 1 Control system structure of micro-momentum wheel

2.2 微动量轮动力学理想模型

分析微动量轮电机模型可以得到电动势平衡方程、反电动势方程和力矩平衡方程^[21]:

$$\begin{cases} Li + Ri + e = u \\ e = K_e \cdot \omega \\ m_e = m_d + m_f = J\dot{\omega} + K_f \omega = K_m i \end{cases}, \quad (1)$$

其中: u 为电机驱动电压; L 为电机电枢电感; R 为电机电枢电阻; i 为流过电机电枢的电流; e 为电机反电动势; ω 为电机转速; K_e 为电机电势系数, 是由电机实际物理结构决定的常数; m_e 为输出总力矩; m_d 为输出机械力矩; m_f 为摩擦力矩; K_f 为摩擦阻尼系数; J 为旋转部分转动惯量; K_m 为电机转矩系数。

由此可以得到输出转速与输入电动势之间的理想关系:

$$\frac{LJ}{K_m} \ddot{\omega} + \frac{LK_f + RJ}{K_m} \dot{\omega} + \frac{K_e K_m + RK_f}{K_m} \omega = u. \quad (2)$$

微动量轮电机理想模型如图 2 所示。

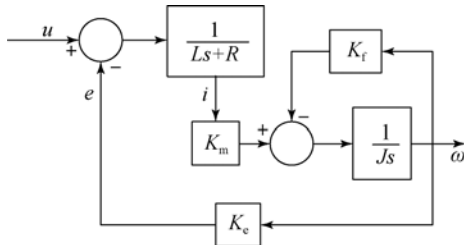


图 2 微动量轮理想模型

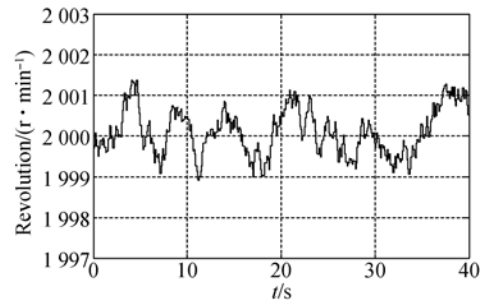
Fig. 2 Ideal model of micro-momentum wheel

2.3 微动量轮动力学模型修正

在实际工作过程中微动量轮电机模型并不理想。一方面由于无刷直流电机一般采用全桥驱动

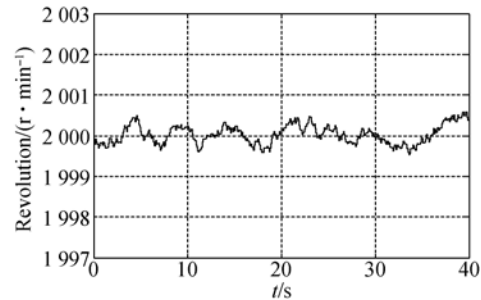
方式, 通过调整占空比控制电机驱动电压, 因此驱动电压会受到电路供电电压的纹波影响, 产生波动值 Δu ; 另一方面, 摩擦力矩 K_f 为非线性, 会随着工作环境产生变化。除此之外, 还存在扰动力矩 $m_r(t)$ 。摩擦力矩 K_f 由标称值和不确定值两部分组成: $K_f = K_{f0} + \Delta K_f$, 其中标称摩擦力矩是电机设计过程中可以测定的机械常数, 不确定部分 ΔK_f 是在实际工作过程中的不确定值。

分别单独考虑干扰力矩、测速误差、驱动电压纹波和摩擦阻尼误差 4 个扰动因素对转速控制的影响, 进行数值仿真分析。设定测速误差为最大值 2 r/min 随机误差, 其余扰动量输入为理论值 5% 的随机误差, 结果如图 3 所示。



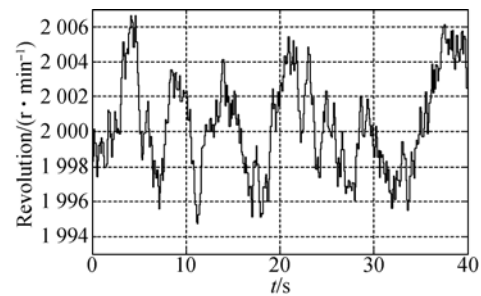
(a) 干扰力矩扰动

(a) Disturbance of torque



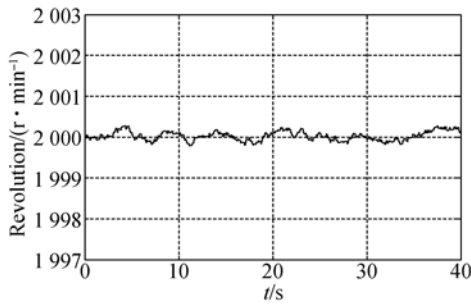
(b) 测速误差扰动

(b) Disturbance of speed measurement



(c) 纹波电压扰动

(c) Disturbance of ripple voltage



(d) 摩擦阻尼误差

(d) Disturbance of friction damping

图 3 不同扰动因素对转速控制精度的影响

Fig. 3 Effects of different disturbance factors on speed control accuracy

从仿真结果分析可以得到,纹波电压和扰动力矩对微动量轮转速控制精度的影响较大。因此,在模型处理中,为了简化控制器设计,可以忽略摩擦阻尼对控制精度的影响。

扰动力矩可以融合到驱动电压扰动项中。由此可以得到输出转速与输入电动势之间的实际关系为:

$$\frac{LJ}{K_m} \ddot{\omega} + \frac{LK_{f0} + RJ}{K_m} \dot{\omega} + \frac{K_e K_m + RK_{f0}}{K_m} \omega + \frac{L\Delta K_f}{K_m} \dot{\omega} + \frac{R\Delta K_f}{K_m} \omega = u - \Delta u. \quad (3)$$

3 滑模变结构控制算法设计及仿真

3.1 滑膜变结构控制算法设计

取状态量 $x_1 = \omega, x_2 = \dot{\omega}$, 根据公式(3)可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = Ax_2 + Bx_1 + Du + g. \end{cases} \quad (4)$$

其中: $A = -\frac{LK_{f0} + RJ}{LJ}; B = -\frac{K_e K_m + RK_{f0}}{LJ}; D =$

$\frac{K_m}{LJ}$ 。 $g = -\frac{L\Delta K_f}{LJ}x_2 - \frac{R\Delta K_f}{LJ}x_1 + \frac{K_m}{LJ}\Delta u$ 可视为系

统输入扰动量,扰动上界 $\|g\| \leq G$ 。

采用等效滑模控制思想设计控制器,分别设计等效控制器和切换控制器得到系统总控制率,如图 4 所示。

(1) 滑模面设计

设计滑模面为 $s = c\epsilon + \dot{\epsilon}$ 。其中 $c \geq 0, \epsilon = x_1 - \hat{x}_1, \dot{\epsilon} = x_2 - \hat{x}_2$, 分别为输出角速度和角加速度与期望值的误差。

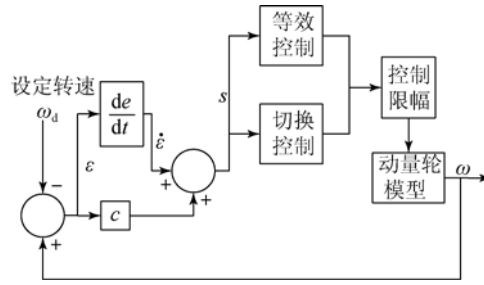


图 4 微动量轮等效滑模变结构控制框图

Fig. 4 Block diagram of equivalent sliding mode control for micro-momentum wheel

(2) 设计等效控制器(此时相当于不考虑外界扰动)

对滑模面函数求导可以得到:

$$\dot{s} = c\dot{\epsilon} + \ddot{\epsilon} = c\dot{\epsilon} + \dot{x}_2 - \dot{\hat{x}}_2 = c\dot{\epsilon} - \dot{\hat{x}}_2 + Ax_2 + Bx_1 + Du. \quad (5)$$

令 $\dot{s} = 0$ 可得:

$$u_{eq} = -\frac{1}{D} (c\dot{\epsilon} - \dot{\hat{x}}_2 + Ax_2 + Bx_1). \quad (6)$$

(3) 切换控制器

设计切换控制为 $u_{vss} = k \cdot \text{sgn}(s)$ (切换控制用来克服外界扰动)。

实际控制率为:

$$u = u_{eq} + u_{vss} = -\frac{1}{D} (c\dot{\epsilon} - \dot{\hat{x}}_2 + Ax_2 + Bx_1) + k \cdot \text{sgn}(s). \quad (7)$$

定义李雅普诺夫函数为 $V = \frac{1}{2} s^2$, 可得到:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} = \\ & s(c\dot{\epsilon} - \dot{\hat{x}}_2 + Ax_2 + Bx_1 + Du + g) = \\ & s(Dk \cdot \text{sgn}(s) + g). \end{aligned} \quad (8)$$

为了保证 $\dot{V} \leq 0$, 即 $s(Dk \cdot \text{sgn}(s) + g) \leq 0$ (当 $s=0$ 时 $\dot{V}=0$), 可以得到 $k \leq -\frac{G}{D}$ 。

(4) 饱和控制输入

在微动量轮控制过程中,驱动电压是有一定限制的,无法实现任意大输入, $u \leq u_{max}$ 。因此实际控制输入需要采用饱和输入控制。

引入 $\text{sat}(u)$ 函数,则实际控制输入饱和函数为:

$$u_i = \text{sat}(u) = \begin{cases} u_{max}, & u \geq u_{max} \\ u, & |u| < u_{max} \\ -u_{max}, & u \leq -u_{max} \end{cases}. \quad (9)$$

3.2 仿真模型参数确定

微动量轮实验系统样机参数如表 1 所示。

表 1 微动量轮实验系统模型参数

Tab. 1 Model parameters of micro-momentum wheel experimental system

模型参数	数值
相间电阻 R/Ω	3.4
相间电感 $L/\mu\text{H}$	148
摩擦阻尼 $K_{f0}/(\text{mNm} \cdot \text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	2.14×10^{-5}
力矩常数 $K_m/(\text{mNm} \cdot \text{A}^{-1})$	6.34
电势常数 $K_e/(\text{mV} \cdot \text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	0.664
转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.34×10^{-4}
驱动电压 u_{max}/V	12

由此可以得到微动量轮模型的参数值为: $A = -2.297 \times 10^4 (1/\text{s})$; $B = -215.9 (1/\text{s}^2)$; $D = 3.197 \times 10^5 (1/\text{Vs}^3)$ 。由于 $\Delta K_f \approx K_{f0} \ll K_m$, 根据 $g = -\frac{L\Delta K_f}{LJ}x_2 - \frac{R\Delta K_f}{LJ}x_1 + \frac{K_m}{LJ}\Delta u$, 可以估算得到 $\|g\| \leq G = 2 \times 10^5$ 。 $k \leq -\frac{G}{D} = -0.626$ 。

3.3 控制算法参数优化

系统整体控制框图如图 5 所示。

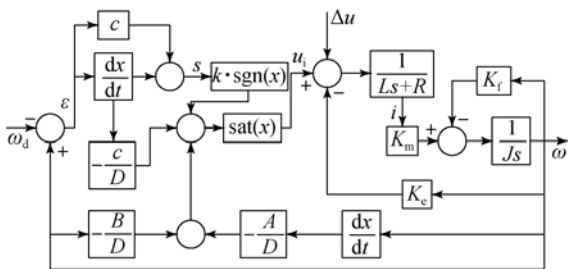


图 5 微动量轮滑模变结构控制方块图

Fig. 5 Flow chart of sliding mode control for micro-momentum wheel

算法设计中需要对控制率参数 c 和 k 进行仿真优化, 设定扰动输入电压 Δu 为最大值 0.6 V 的随机扰动输入(最大扰动电压占最大驱动电压的 5%), 角速度期望值为 2000 r/min 。分别对 c 和 k 取不同数值进行仿真分析, 得到转速控制精度和加速时间结果如表 2、表 3 所示。

表 2 不同控制率参数取值的转速控制精度

Tab. 2 Speed control precision in different values of control rate parameter

c	k						
	-0.7	-1	-1.3	-1.6	-1.9	-2.2	-2.5
1	0.62	0.83	0.92	1.04	1.12	1.20	1.31
2	0.53	0.62	0.68	0.80	0.89	1.02	0.98
3	0.35	0.50	0.53	0.59	0.68	0.79	0.78
4	0.31	0.38	0.42	0.50	0.57	0.65	0.63
5	0.27	0.38	0.42	0.45	0.52	0.58	0.55
6	0.24	0.33	0.38	0.43	0.48	0.55	0.54
7	0.21	0.28	0.32	0.35	0.41	0.46	0.42
8	0.20	0.29	0.31	0.32	0.35	0.41	0.41
9	0.19	0.26	0.28	0.29	0.32	0.40	0.39
10	0.17	0.20	0.24	0.25	0.30	0.36	0.36

表 3 不同控制率参数取值的加速时间

Tab. 3 Acceleration time in different values of control rate parameter

c	k						
	-0.7	-1	-1.3	-1.6	-1.9	-2.2	-2.5
1	27	22	21	20	20	21	20
2	24	21	19	16	16	16	16
3	23	18	16	15	15	15	15
4	23	17	15	15	15	15	15
5	23	17	15	15	15	15	15
6	23	17	15	15	14	14	14
7	23	17	15	15	14	14	14
8	23	17	15	14	14	14	14
9	23	17	15	14	14	14	14
10	22	17	15	14	14	14	14

分析仿真结果可以得到转速控制精度和加速时间随参数取值改变的变化趋势:

(1) 参数 c 取值越大, 转速控制精度相对越高, 加速时间相对越短(最短加速时间为 14 s)。从式(7)控制率表达式分析, 参数 c 等效于微分控制器参数, c 越大转速稳定误差越小, 但会造成过大的转速波动频率, 不利于微动量轮长期工作。

(2) 参数 k 取值越大, 转速精度越低, 加速时间越短, 因此可以根据控制需求合理选择参数 k 的取值。

(3) 加速最短时间为 14 s , 这是微动量轮模型最高电压驱动时的最短加速时间。

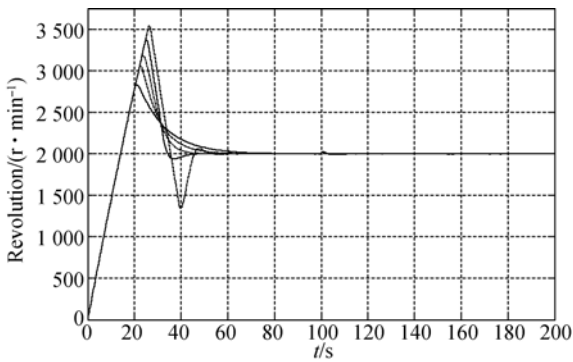
根据微动量轮样机工作特性, 仿真验证和样

机实际控制选取的参数值为： $c=3, k=-1$ 。

3.4 转速控制模式仿真结果

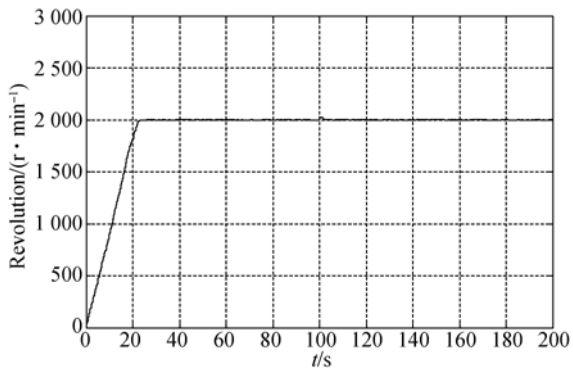
设定控制角速度期望值为 $2\ 000\ \text{r}/\text{min}$ ，控制扰动输入为 2.3 中给出的 4 种扰动，利用 MATLAB Simulink 模拟仿真，仿真时间为 200 s。为了验证滑模变结构控制算法抗干扰特性，在 100 s 时施加单位脉冲外界扰动（以驱动电压干扰方式施加，扰动电压值为 3 V，占最大驱动电压的 25%）。仿真过程中，选取 PI 控制方法作为参考进行对比分析，PI 控制算法参数优化参考文献[10]、[16]，仿真中选取了多组 PI 参数进行对比分析。

仿真结果如图 6、图 7 所示，图 6 为时间从 0~200 s 整个仿真过程中飞轮转速变化曲线，图 7 为 60~200 s 飞轮转速趋于平稳后的转速曲线。其中(a)为 5 组不同参数的 PI 控制转速变化曲线，(b)为滑模变结构算法控制下飞轮转速变化曲线。



(a)PI 控制算法

(a)PI control algorithm



(b)滑模变结构控制算法

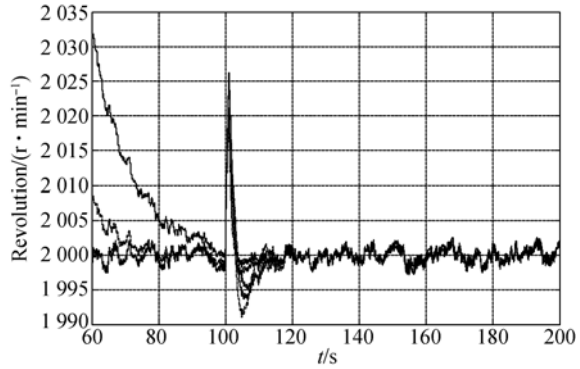
(b)Sliding mode control algorithm

图 6 微动量轮转速控制曲线

Fig. 6 Speed control curve of micro-momentum wheel

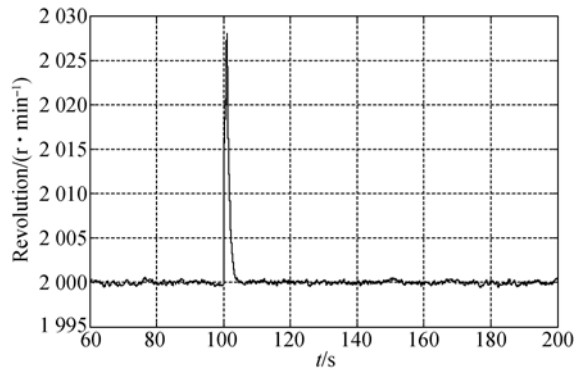
分析图 6 可知，不同 PI 控制参数导致控制结果的超调量和加速时间不同。超调量越小，相对

加速时间会增加。对比分析 PI 控制方法和滑模变结构控制方法仿真结果可得：滑模变结构控制几乎无超调量，加速时间短于 PI 控制方法。从滑模变结构控制理论可以得到当系统状态到达滑模面（控制目标）时，系统趋于稳定，不会产生超调。



(a)PI 控制算法

(a)PI control algorithm



(b)滑模变结构控制算法

(b)Sliding mode control algorithm

图 7 控制转速稳定后波动情况

Fig. 7 Fluctuation of steady speed

分析图 7 可知，微动量轮转速达到稳定后，不同参数的 PI 控制方法的转速控制波动范围均大于 $\pm 2\ \text{r}/\text{min}$ ，而滑模变结构控制方法转速控制精度可达到 $\pm 0.5\ \text{r}/\text{min}$ ，高于 PI 控制。仿真过程中 100 s 时刻输入单位脉冲的驱动电源干扰，从仿真结果分析可知两种控制方法转速变化最大值基本一致，滑模变结构控制转速稳定响应时间为 4 s，小于 PI 控制方法。由此说明滑模变结构控制具有更好的抗干扰性，能在更短的时间内消除外界干扰影响，控制稳定转速。

速转控制模式下，分析仿真结果可知：采用滑模变结构控制算法后，微动量轮转速加速时间和控制稳定度都明显优于传统 PI 控制方法；滑膜变

结构控制具有更好的控干扰性, 在外界干扰影响下能快速控制稳定转速。

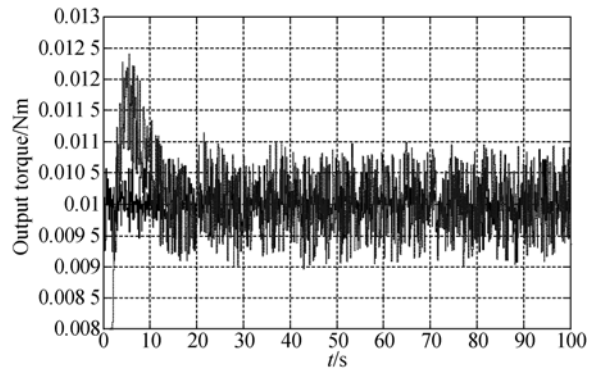
3.5 力矩控制模式仿真仿真

微动量轮工作中除了关注转速控制精度和稳定度外, 还需关注力矩输出过程中输出力矩的精度和稳定度等性能指标。针对力矩控制模式下微动量轮模型进行仿真分析, 设定输出力矩期望为:

$$m_d = \begin{cases} 0.01 \text{ Nm}, & t < 100 \text{ s} \\ -0.01 \text{ Nm}, & t \geq 100 \text{ s} \end{cases} \quad (10)$$

仿真参数与上文相同, 控制参数为 $c=0.5$, $k=-1$, 得到结果如图 8 所示。图 8(a) 为 5 组不同参数的 PI 控制输出力矩变化曲线, 图 8(b) 和图 8(c) 为滑模变结构控制方法和一组 PI 控制对比仿真结果, 其中虚线所示为 PI 控制结果, 实线表示滑模变结构控制算法得到输出力矩变化曲线。

从图 8(b) 可以得到力矩控制模式下, 滑模变结构控制输出力矩能够快速达到期望输出力矩, 相应时间明显小于 PI 控制方法。从图 8(c) 可知, 滑模变结构控制输出力矩精度高于 PI 控制, 输出力矩精度达到 0.001 Nm 。



(c) 输出力矩稳定度

(c) Stability of output torque

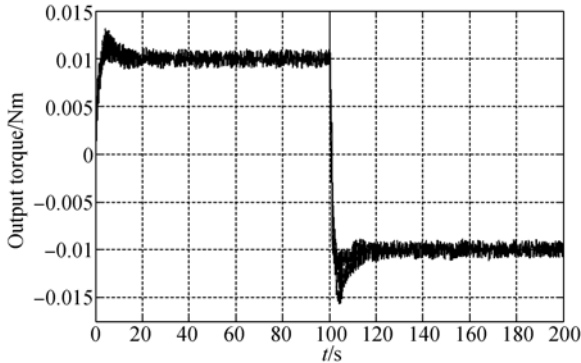
图 8 力矩控制模式仿真结果

Fig. 8 Simulation results of torque control mode

由仿真结果分析可知: 在力矩模式下, 滑模变结构控制方法的输出力矩变化响应时间小于 PI 控制, 调速控制频率高 (可以更快地提供控制力矩); 转速超调量小于 PI 控制; 输出力矩控制稳定度高于 PI 控制。

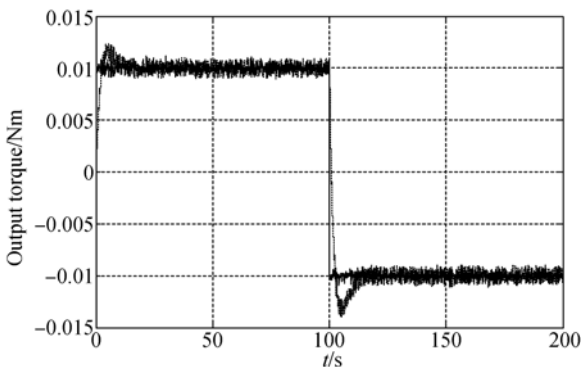
4 微动量轮样机实验

将滑模变结构算法写入 C515C 中, 对微动量轮样机进行转速控制测试实验。初始设置转速为 2000 r/min , 100 s 后输入转速设置指令, 设置转速为 1000 r/min , 测速时间间隔为 1 s 。实验结果如图 9、图 10 所示, 图 9 为 200 s 内微动量轮转速变化, 图 10 为 $30 \sim 100 \text{ s}$ 时间区间 (设定转速为 2000 r/min) 的微动量轮转速波动情况。



(a) PI 控制输出力矩

(a) Output torque of PI control



(b) 输出力矩对比

(b) Comparison of output torque

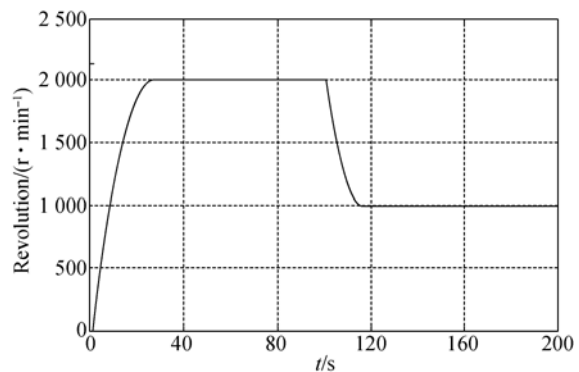


图 9 微动量轮样机转速测试结果

Fig. 9 Speed test results of micro-momentum wheel prototype

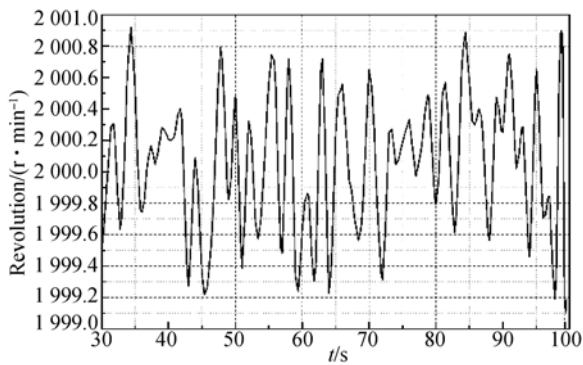


图 10 微动量轮样机转速稳定后波动情况

Fig. 10 Steady speed fluctuation of micro-momentum wheel prototype

分析实验结果可知:

(1)微动量轮样机实验中转速变化趋势与仿真结果相似,可以收敛到设定转速,验证了控制系统设计和控制算法的有效性。

(2)分析实验结果可得转速从 0 加速到 2 000 r/min 的时间为 26 s,从 2 000 r/min 降至 1 000 r/min 的时间为 15 s,加速和减速时间大于仿真结果。分析认为是由加减速阶段摩擦系数比模型设定值大导致的。

参考文献:

- [1] 尤政,龚克,陆建华. 微小卫星的技术发展与思路 [J]. 科技导报, 2001(3):43-47.
YOU ZH, GONG K, LU J H. Development of micro-satellite technology and its thinking [J]. *Science & Technology Review*, 2001(3):43-47. (in Chinese)
- [2] 陆建华,王京,龚克. 微小卫星技术发展及其应用 [J]. 世界电信, 2001, 14(11):8-11.
LU J H, WANG J, GONG K. Development and application of micro-satellite [J]. *World Telecommunications*, 2001, 14(11):8-11. (in Chinese)
- [3] 范志涵,张召才. 国外小卫星最新发展研究 [J]. 国际太空, 2013, (8):20-29.
FAN ZH H, ZHANG ZH C. The research for latest development of foreign microsatellite [J]. *Space International*, 2013, (8):20-29. (in Chinese)
- [4] 朱鲁青,张召才. 2013 年国外微小卫星回顾 [J]. 国际太空, 2014, (2):38-43.
ZHU L Q, ZHANG ZH C. The development of foreign microsatellite in 2013 [J]. *Space International*, 2014, (2):38-43. (in Chinese)
- [5] ISMAIL Z, VARATHARAJOO R. A study of reaction wheel configurations for a 3-axis satellite attitude control [J]. *Advances in Space Research*, 2010, 45(6):750-759.
- [6] 王辉,武俊峰,李胤,等. 小卫星用反作用飞轮系统设计 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(2):331-337.
WANG H, WU J F, LI Y, et al.. Micro/Nano technology and fine mechanics design of reaction flywheel systems for small satellites [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2):331-337.
- [7] SHANKAR N S, NAIR P S, GHOSAL A. Dynamic interaction of rotating momentum wheels with spacecraft elements [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 315:970-984.
- [8] AGRAWAL S K, PATHAK K, FRANCH J, et al.. A differentially flat open-chain space robot with arbitrarily oriented joint axes and two momentum wheels at the base [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(9):2185-2191.
- [9] 刘强,房建成,韩邦成. 磁悬浮飞轮锁紧保护技术研究与发展现状 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(9):2465-2475.

(3)在转速平稳阶段,微动量轮样机实验中转速波动比仿真结果大,样机转速控制精度为 ± 0.9 r/min。分析认为是由转速测量采用的是编码器测速,存在一定的测量误差,而这一误差在仿真模型中是被忽略掉的。

5 结 论

本文在理想微动量轮模型的基础上引入摩擦阻尼、纹波电压、扰动力矩等干扰因素,完善了微动量轮模型。基于模型特点和控制目标,设计了等效滑模变结构控制算法并进行了算法仿真。仿真结果显示滑模变结构控制的微动量轮在转速变化响应时间、转速控制精度、抗干扰能力以及调速控制频率、输出力矩稳定度等特性上都大大优于常规 PI 控制。在算法仿真的基础上,完成了基于 C515C 微控制器和 UC1625 电机控制器的微动量轮硬件电路设计,并利用样机开展了性能测试实验。实验结果表明,滑模变结构控制的微动量轮转速控制精度达到 ± 0.9 r/min,从 0 加速到 2 000 r/min 的时间为 26 s。

- LIU Q, FANG J CH, HAN B CH. Research and development status of locking protection technologies for magnetic bearing flywheels [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9):2465-2475. (in Chinese)
- [10] 陈茂胜, 金光, 安源, 等. 采用自适应 PI 控制的单框架控制力矩陀螺角动量飞轮系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5):1075-1081.
- CHEN M SH, JIN G, AN Y, *et al.*. Design of angular momentum wheel in SGCMG using adaptive compensation PI control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5):1075-1081. (in Chinese)
- [11] 纪志成, 沈艳霞, 薛花. 无刷直流电机自适应模糊控制的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(5):104-109.
- JI ZH CH, SHEN Y X, XUE H. Study on the adaptive fuzzy control for brushless DC motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(5):104-109. (in Chinese)
- [12] 夏长亮, 祁温雅, 杨荣, 等. 基于 RBF 神经网络的超声电机参数辨识与模型参考自适应控制[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(7):117-121.
- XIA CH L, QI W Y, YANG R, *et al.*. Identification and model reference adaptive control for ultrasonic motor based on RBF neural network [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(7):117-121. (in Chinese)
- [13] GOKBULUT M, DANDIL B, BAL C. A hybrid neuro-fuzzy controller for brushless DC motor [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, 3949:125-132.
- [14] GENCER C, SAYGIN A, COSKUN I. DSP based fuzzy-neural speed tracking control of brushless DC motor [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, 39(49):107-116.
- [15] RUBAAI A., RICKETTS D., KANKAM M. D. Development and implementation of an adaptive fuzzy-neural-network controller for brushless drives [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, 38(2):441-447.
- [16] 李光军, 刘刚, 张聪. 基于单神经元 PID 算法的微小飞轮高精度控制[J]. *宇航学报*, 2013, 34(1):54-60.
- LI G J, LIU G, ZHANG C. High accuracy control for micro flywheel based on single neuron PID algorithm [J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(1):54-60. (in Chinese)
- [17] 李鹏. 传统和高阶滑模控制研究及其应用[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011.
- LI P. *Research and Application of Traditional and Higher-Order Sliding Mode Control* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [18] YEH H, NELSON E, SPARKS A. nonlinear tracking control for satellite formation [J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2002, 25(2):376-386.
- [19] EKER I. Second-order sliding mode control with PI sliding surface and experimental application to an electromechanical plant [J]. *Arabian Journal For Science And Engineering*, 2012, 37(7):1969-1986.
- [20] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:清华大学出版社.
- LIU J K. *Sliding Mode Control Design and Matlab Simulation* [M]. Beijing: Tsinghua University press. (in Chinese)
- [21] 陈非凡, 张高飞, 陈益峰. 小卫星动量轮非线性特性建模与仿真方法[J]. *宇航学报*, 2003, 24(6):651-655
- CHEN F F, ZHAN G F, CHEN Y F. Non-linear modeling and simulation technique for momentum wheel of small satellites [J]. *Journal of Astronautics*, 2003, 24(6):651-655. (in Chinese)

作者简介:



王梦焱(1987—),男,江苏常州人,博士研究生,2010年于清华大学获得学士学位,主要研究方向卫星编队总体技术,卫星姿态确定控制技术。E-mail: wangmb1020@gmail.com

导师简介:



尤政(1962—),男,江苏扬州人,博士,教授,博士生导师,中国工程院院士,1990于华中科技大学获得博士学位,主要研究方向为微纳技术及其空间应用,主要研究领域为微米/纳米技术、微光机电系统集成、微纳卫星技术。E-mail: yzdpi@mail. tsinghua. edu. cn