

文章编号 1004-924X(2010)01-0149-07

姿控飞轮变结构变速积分控制的实现

武俊峰^{1,2}, 吴一辉¹, 安 静^{1,2}, 白 越¹, 黎海文¹, 宣 明¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:为了兼顾飞轮控制系统的响应速度和稳态精度,在分析常值切换变结构控制和变速积分控制特性的基础上,将具有开关特性,响应快,但存在抖振缺点的常值切换变结构控制与能改变积分项的累加速度,使其与偏差大小相对应,稳态精度高的变速积分控制相结合,利用变速积分控制稳态精度高的优点弥补常值切换控制的开关特性带来的缺点,提出了变结构变速积分控制。根据飞轮的本体模型和运动方程建立了控制模型,分析了控制模型的性能,进行了转速跟踪实验。实验结果显示:变结构变速积分控制使系统的动态性能和稳态性能都得到很大提高。控制指令为偏移量 1 000 r/min,幅值 100 r/min,周期 0.01 Hz 正弦信号时,跟踪误差为 2 r/min。结果表明,提出的方法抑制了超出切换带范围的超调量,提高了进入切换带内的稳态精度,防止了抖振,基本达到了加快响应速度和提高稳态精度的要求。

关键词:姿控飞轮;PI控制;变结构控制;变速积分;转速跟踪

中图分类号:V448.222 **文献标识码:**A

Implementation of variable structure and speed-changed integration control for flywheels

WU Jun-feng^{1,2}, WU Yi-hui¹, AN Jing^{1,2}, BAI Yue¹, LI Hai-wen¹, XUAN Ming¹

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: In order to balance the response speed and steady state accuracy of flywheels, a new control method combining of the constant switching variable structure control and speed-changed integration control is established on the basis of analysis of a constant switching variable structure control and a speed-changed integration control. The speed-changed integration control with high stable precision can change the accumulation of integration speed to correspond to the size of the deviation, which is able to make up the shortcomings of the constant switching variable structure control with switching characteristics. On the basis of the flywheel motor model and dynamic equation, a control model is established, then the performance of the control model is analyzed and the experiment of speed tracking is carried out. The experimental results indicate that the system dynamic and static performance have been greatly improved. When the sine instruction gives a offset in 1 000 r/min, amplitude in 100

收稿日期:2009-04-28;修订日期:2009-05-17.

基金项目:中国科学院预研项目(No. 61501.02.03.04)

r/min, and the period in 0.01 Hz, the tracking error is 2 r/min. Moreover, the proposed method suppresses the overshooting of the switching range, improves the steady state accuracy within switching range and prevents the bufferiy. It can satisfy the system requirements for higher precision and speed.

Key words: satellite attitude control flywheel; PI control; variable structure control; speed-changed integration rate; speed tracking

1 引言

姿控飞轮由具有一定惯量的轮体、驱动电机和控制线路组成^[1-2]。姿控系统通过对飞轮加减速度控制,产生作用于卫星本体的反作用力矩,实现动量交换,从而达到控制卫星姿态的目的。飞轮的控制精度直接影响卫星的姿态稳定度^[3]。若卫星的姿态稳定度要求为 $(5 \times 10^{-4})^\circ/\text{s}$,并要求飞轮产生的附加角速度 $\leq (1 \times 10^{-4})^\circ/\text{s}$;同时假设卫星的转动惯量为 $400 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,飞轮允许的附加角动量为卫星的转动惯量乘以飞轮产生的附加角速度,而飞轮的转动惯量为 $0.006 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,则根据动量守恒定律 $J_{\text{flywheel}} \omega_{\text{flywheel}} = J_{\text{satellite}} \omega_{\text{satellite}}$,可知允许飞轮的转速误差应小于 $6.66^\circ/\text{s}$ 。为了提高控制精度,人们采用了许多方法来控制姿控飞轮^[5-8]。文献^[9]通过模块化设计方法完成了姿控飞轮控制系统的设计,分析了调压调速控制方式与调压调速结合反接制动方式下的飞轮速度响应。为了对姿控飞轮进行有效控制,同时平衡控制复杂性和工程实现可行性,本文利用常值切换变结构控制跟踪响应快的优点,同时结合变速积分控制可以根据偏差大小改变积分项大小,改善稳态精度的特性,提出了变结构变速积分控制,加快了系统的响应速度,提高了系统的稳态精度。

2 变结构变速积分控制

2.1 常值切换变结构控制

针对姿控飞轮的速度控制模式设计切换函数

$$s(x) = v_{\text{ref}} - v_{\text{back}}, \quad (1)$$

其中 v_{ref} 为转速给定值, v_{back} 为速度反馈值。

采用常值切换控制

$$u = u_0 \operatorname{sgn}(s(x)). \quad (2)$$

式中, u_0 为待定常数, sgn 为符号函数。

常值切换控制方式的优点是控制过程具有开关特性,使得系统具有快速的响应特性,能实现快速跟踪,缺点是系统存在抖振现象。采用常值切换变结构控制的实验结果如图 1 所示,可以看到常值切换变结构控制具有较快的响应速度。图 2 为图 1 的放大图。

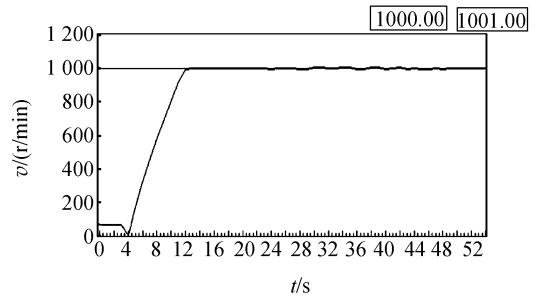


图 1 常值切换控制 1 000 r/min 响应

Fig. 1 1 000 r/min response by constant switching variable structure control

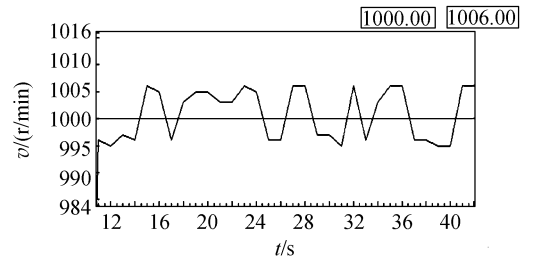


图 2 常值切换控制 1 000 r/min 响应放大图

Fig. 2 Amplified 1 000 r/min response by constant switching variable structure control

从图 2 可以看到,系统存在抖振现象而且系统能量消耗大,原因在于当系统的不会在切换线上产生滑动模态。轨迹到达切换面时,其速度是有限大,惯性使得运动点穿越切换面。因此,需要拓宽切换面,引入提高稳态精度的控制算法。

2.2 变结构变速积分控制

变结构变速积分控制的核心思想是,利用变

速积分控制稳态精度高的优点弥补常值切换控制的开关特性带来的缺点。采用设置切换面的切换带 Δ 的方法,在不同的区域采用不同的控制矢量。在切换带以外利用反接制动的快速性,弥补调压调速响应速度慢的缺点。利用变速积分的控制平滑性,改善常值变结构控制带来的抖振。设置切换面的切换带 Δ ,设计切换函数

$$s(x) = v_{ref} - v_{back}, \quad (3)$$

采用控制函数

$$u = \begin{cases} |u_{PI}| \operatorname{sgn}(s(x)) & s(x) > \Delta \\ |u_{PI}| \operatorname{sgn}(v_{ref}) & -\Delta < s(x) < \Delta \\ |u_{PI}| \operatorname{sgn}(s(x)) & s(x) < -\Delta \end{cases}, \quad (4)$$

$$u_{PI} = K_p e(k) + K_i \left\{ \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + f[e(k)]e(k) \right\}, \quad (5)$$

系数 $f[e(k)]$ 是 $e(k)$ 的函数。当 $|e(k)|$ 增大时, f 减小,反之增大。系数 f 与偏差当前值 $|e(k)|$ 的关系是线性的或非线性的,可设为:

$$f[e(k)] = \begin{cases} 1 & |e(k)| \leq B \\ \frac{A - |e(k)| + B}{A} & B \leq |e(k)| \leq A + B \\ 0 & |e(k)| > A + B \end{cases}, \quad (6)$$

f 值在 $[0, 1]$ 区间内变化,当偏差 $|e(k)| > A + B$ (所给分离区间)后, $f = 0$,不再对当前 $e(k)$ 进行继续累加;当偏差 $|e(k)| < B$ 时,加入当前值 $e(k)$,即积分项变为 $u_i(k) = K_i \sum_{j=0}^k e(j)$,积分动作达到最高速;而当偏差 $|e(k)|$ 在 B 与 $A + B$ 之间时,则累加计入的是部分当前值,其值在 $0 \sim |e(k)|$ 之间随 $|e(k)|$ 的大小而变化,因此,其积分速度在 $K_i \sum_{j=0}^{k-1} e(j)$ 和 $K_i \sum_{j=0}^k e(j)$ 之间。这种算法对 A, B 两参数的要求不精确,参数整定较容易,其中切换带的选取与系统的转动惯量有关,应根据实验确定。

3 姿控飞轮控制系统仿真分析

3.1 飞轮本体模型和控制模型

可以采用文献[9]的模块化设计方法,迅速验证算法的可行性,采用的梯形波反电动势直流无刷电动机的三相定子的电压方程表达式为:

$$U_a = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + e_a + U_n, \quad (7)$$

$$U_b = L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + e_b + U_n, \quad (8)$$

$$U_c = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + e_c + U_n, \quad (9)$$

式中, U_a, U_b, U_c 为 A, B, C 三相绕组端电压; i_a, i_b, i_c 为 A, B, C 三相绕组中流过的电流; e_a, e_b, e_c 为 A, B, C 三相绕组中反电动势; U_n 为三相绕组中性点电压; R, L 分别为各相绕组的电阻和电感。定子绕组产生的电磁转矩表达式为:

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega}, \quad (10)$$

式中, ω 为转子角速度(rad/s)。

又有

$$e_a = k_e \phi_a \omega, e_b = k_e \phi_b \omega, e_c = k_e \phi_c \omega, \quad (11)$$

其中, k_e 为反电动势系数, ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c 为单位反电动势。运动方程为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - \operatorname{sing}(\omega) T_o - T_f, \quad (12)$$

式中, J 为转子转动惯量, T_o 为静摩擦力矩,摩擦力矩 T_f 为:

$$T_f = B\omega. \quad (13)$$

式中, B 为粘滞摩擦系数。综合以上等效模型可得到飞轮电机的本体功能模块。式(4)、(5)给出的变结构变速积分控制可由图 3 的控制模型实现。

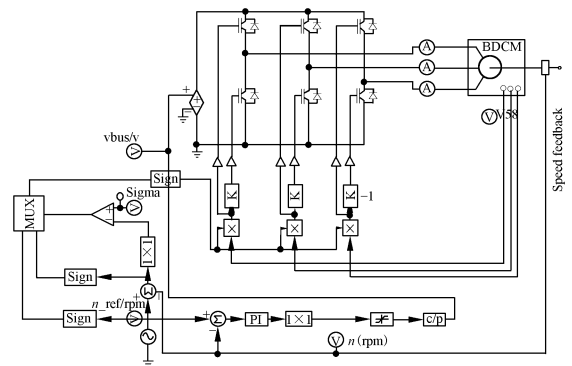


图 3 控制系统模型

Fig. 3 Model of control system

3.2 仿真结果分析

姿控飞轮参数为实验样机参数,单相绕组电阻 $R = 0.5 \Omega$,电感 $L = 0.1 \text{ mH}$,反电动势系数 $k_e = 0.049 \text{ V}/(\text{rad/s})$,转动惯量 $J = 0.006$

$\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 静摩擦力矩 $T_0 = 0.0043 \text{ N} \cdot \text{m}$, 粘滞摩擦系数 $B = 0.0000262 (\text{Nm} \cdot \text{s}/\text{rad})$ 。采用变结构变速积分控制和普通 PI 进行 1000 r/min 阶跃响应, 其结果如图 4 和图 6 所示, 图 5 为变结构变速积分参数 f 的变化过程。

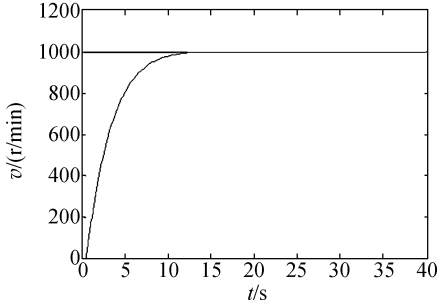


图 4 变结构变速积分控制阶跃响应

Fig. 4 Step response by variable structure and speed-changed integration control

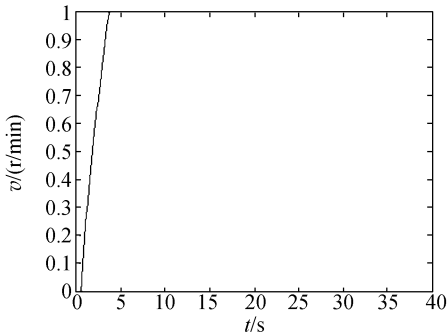


图 5 变结构变速积分参数 f 的变化过程

Fig. 5 Parameter f in variable structure and speed-changed integration control

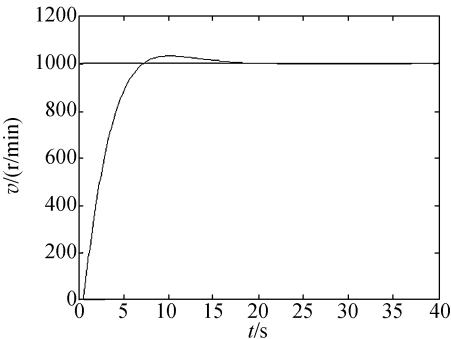


图 6 普通 PI 控制阶跃响应

Fig. 6 Step response by normal PI control

由仿真结果可以看出: 变结构变速积分控制进入稳态的时间为 13.5 s, 而普通 PI 控制进入

稳态的时间为 16.5 s。变结构变速积分控制比普通 PI 算法具有更快的响应速度和更小的超调量。

4 系统硬件实现

飞轮控制系统主要由飞轮本体、驱动控制板、上位机、电源、真空罐和真空计等组成; 飞轮本体包括飞轮电机、转子、轴系、基座。飞轮电机采用控制特性好、效率高的无刷直流电机, 由定子、转子、位置传感器组成。电机的定子和转子是电机的主要部分, 是产生力矩的机构。位置传感器将转子的位置信号转换为电信号。电机可以进行加、减速, 正、反转控制, 四象限运行。位置传感器采用霍尔集成电路, 霍尔器件置于气隙磁场内, 能可靠地反映转子的位置。飞轮转子包括一个高速旋转的轮体, 提供了一个较大的转动惯量。飞轮转子与基座之间采用脂润滑滚珠轴承连接。

控制器结构如图 7 所示, 包括 Buck 电压变换单元、模拟控制器单元、逻辑换相及驱动单元、能耗制动单元、输入滤波单元等, 这些单元之间相互影响相互协调的工作。

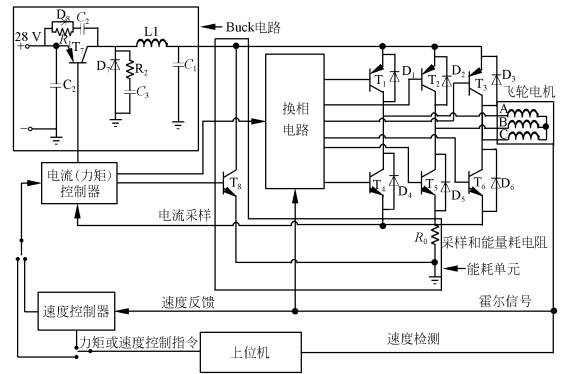


图 7 控制器结构

Fig. 7 Controller diagram

系统采用双闭环控制电路, 以电流控制回路为内环, 增加速度反馈控制回路。速度调节器的输出作为电流环的输入给定值, 飞轮速度的调节是通过电机电流的调节实现的。电流环时间常数小, 有利于抑制扰动影响, 避免过大的超调。另一个特点是, 速度调节器的输出被限幅, 通过电流环限制电机电流, 从而避免了仅有速度环系统中当速度给定值发生突变时, 可能出现的过电流和力矩冲击。

5 实验结果

普通 PI 控制和变结构变速积分的实验控制效果如图 8 和图 9 所示。

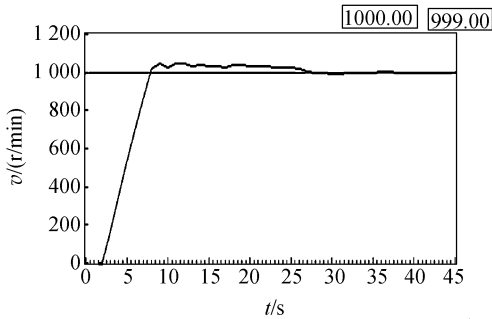


图 8 普通 PI 控制 1 000 r/min 响应

Fig. 8 1 000 r/min response by normal PI control

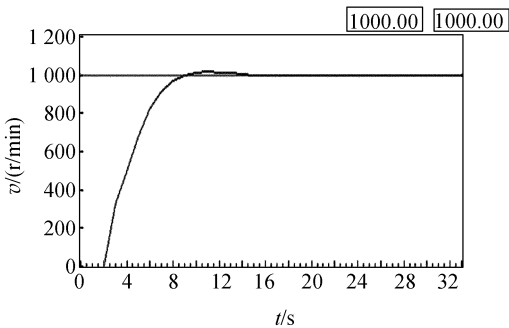


图 9 变结构变速积分控制 1 000 r/min 响应

Fig. 9 1 000 r/min response by variable structure and speed-changed integration control

由实验结果可以看出:实验结果和仿真结果一致,变结构变速积分比普通 PI 控制具有更快的响应速度,变结构变速积分控制进入稳态的时间为 15.5 s,而普通 PI 控制算法进入稳态的时间为 27.5 s。比常值切换控制具有更高的稳态精度:变结构变速积分控制稳态精度为 0.1%,而常值切换控制稳态精度为 0.5%。综合对比表明,变结构变速积分控制达到了加快响应速度和提高稳态精度的目的。

飞轮的典型工作状态是接受长周期的控制指令,处于跟踪状态,稳态误差表示出长周期工作状态下的调整精度。动态性能指标也等效地用长周期跟踪误差进行描述。采用变结构变速积分控制进行了跟踪试验,控制指令为偏移量 1 000

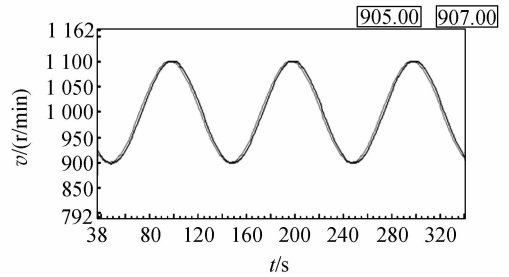


图 10 正弦跟踪曲线局部放大

Fig. 10 Local amplification of sine tracing curve

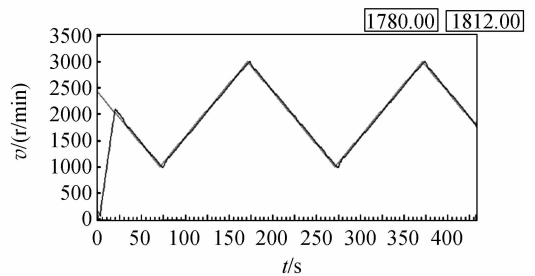


图 11 大范围三角波跟踪曲线

Fig. 11 Wide range triangle tracing curve

r/min,幅值 100 r/min,周期 0.01 Hz,结果如图 10 所示,跟踪误差为 2 r/min。控制指令为偏移量 2 000 r/min,幅值 1 000 r/min,周期 0.005 Hz 的三角波大范围跟踪结果如图 11 所示,显示了较好的控制效果。

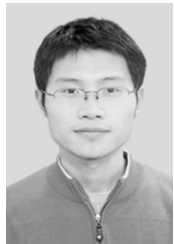
6 结 论

传统的比例积分控制,由于难以根据误差项的大小改变积分项的累加速度,因此对飞轮的大范围转速跟踪缺乏准确的跟踪能力,即使是采用变速积分或者积分分离的控制方式,也因响应速度减慢而略显不足。常值切换变结构控制的开关特性产生的能量消耗和在目标值附近的抖振现象,限制了常值切换变结构控制的工程应用范围。本文提出的变结构变速积分控制算法利用变速积分控制稳态精度高的优点弥补了常值切换控制的开关特性带来的缺点。利用变速积分的控制平滑性,改善了常值变结构控制带来的抖振。抑制了超出切换带范围的超调量,同时提高了进入切换带内的稳态精度,防止了抖振。实验结果表明:控制系统稳态精度 0.2%,达到了稳态精度要求。

参考文献:

- [1] 贾宏光,赵华兵,吴一辉,等.单轴储能及姿态控制一体化系统研究[J].光学精密工程,2004,12(3):504-509.
JIA H G, ZHAO H B, WU Y H, *et al.*. Single axis double flywheels integrated power and attitude control system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(3):504-509. (in Chinese).
- [2] 刘志华,白越,吴一辉,等.单轴飞轮储能与姿态控制系统误差分析[J].光学精密工程,2006,14(1):127-132.
LIU ZH H, BAI Y, WU Y H, *et al.*. Analysis on errors of single axis energy storage/attitude control system with double fly wheels [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(1):127-132. (in Chinese)
- [3] 李海涛,房建成.自适应角速度估计器在磁悬浮控制力矩陀螺框架伺服系统中的应用[J].光学精密工程,2008,16(1):97-102.
LI H T, FANG J CH. Application of adaptive angle-rate estimator to gimbal of MGCMG [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(1):97-102. (in Chinese)
- [4] 程颢,葛升民,刘付成,等.反作用飞轮力矩模式控制系统设计[J].宇航学报,2006(6):1248-1253.
CHENG H, GE S M, LIU F CH, *et al.*. The design of torque mode control for reaction wheel system[J]. *Journal of Astronautics*, 2006(6):1248-1253. (in Chinese)
- [5] 郭永东,卢靖华.飞轮制动切换研究[J].微特电机,1998(3):2-5.
GUO Y D, LU J H. Study on braking switch of flywheel [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 1998(3):2-5. (in Chinese)
- [6] 王昊,杨宇,田蔚凤,等.卫星姿态控制系统制动电流分析[J].微特电机,2005(9):35-37.
WANG H, YANG Y, TIAN W F, *et al.*. Braking current analysis of a satellite attitude control system [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2005(9):35-37. (in Chinese)
- [7] 杜坤梅,李铁才.惯性飞轮电机力矩伺服控制系统[J].电机与控制学报,2001,5(2):119-120.
DU K M, LI T C. Controlling system of inertial flywheel through torque servo motor [J]. *Electric Machines and Control*, 2001, 5(2): 119-120. (in Chinese)
- [8] 魏彤,房建成.高速大惯量磁悬浮转子系统章动交叉控制的保相裕度设计[J].光学精密工程,2007,15(6):858-865.
WEI T, FANG J CH. Proof-phase-margin design of nutation cross-feedback control in magnetically suspended high-speed rotor system with large rotary inertia [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6):858-865. (in Chinese)
- [9] 武俊峰,安静,徐春剑,等.姿控飞轮控制系统设计及转速过零分析[J].光学精密工程,2009,17(4):801-806.
WU J F, AN J, XU CH J, *et al.*. Design on control system of flywheels and approaching zero rating analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 801-806. (in Chinese)

作者简介:



武俊峰(1981—),男,吉林白山人,博士研究生,2004年于河海大学获得学士学位,2007年于东南大学获得硕士学位,主要从事卫星姿控飞轮控制系统设计方面的研究。E-mail: awublack@126.com



安静(1980—),男,吉林人,博士研究生,2004年、2007年于长春工业大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为空间飞轮电磁兼容技术。E-mail: anjingcoward@tom.com



白 越(1979—),男,辽宁人,博士,副研究员,主要研究方向为空间飞轮实用技术、空间摩擦及润滑学方面的研究。



宣 明(1956—),男,江苏常州人,研究员,博士生导师,主要从事集成微光机电系统方面的研究。E-mail: xuanm@ciomp. ac. cn



黎海文(1976—),男,江西人,博士,副研究员,主要从事微型生化分析仪、集成微光机电系统方面的研究。E-mail: lihaiwen@hotmail. com

导师简介:



吴一辉(1965—),女,浙江温州人,工学博士,研究员,博士生导师,1986年于天津科技大学获得学士学位,1991年、1996年分别于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得工学硕士和博士学位,主要致力于微光机电系统(MEMS)和精密机电系统方面的研究。E-mail: yihuiwu@ciomp. ac. cn

●下期预告

小波 firm 阈值滤波的光谱实时采集

李正刚^{1,2},吴一辉¹,宣 明¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

为了提高微型光谱仪光谱采集精度,提出了一种利用小波域 firm 阈值滤波去除随机噪声的方法。首先采集 2 次光谱谱线,取均值作为待处理谱线。然后计算出这两次谱线的噪声标准差取代传统小波去噪中的噪声标准差估计,运用通用阈值法确定上阈值。调整下阈值将待处理谱线小波 firm 阈值滤波,并判断滤波后偏差是否在计算的噪声方差内。选用标准溶液以 2 种浓度做相对吸光度实验,标准值是 $A=0.3204$,分别用传统十次平均方法和 firm 阈值滤波法进行去噪。实验结果表明:优于传统 10 次平均法,标准差从 0.00796 降低到了 0.00697,提高了采集速度。在以光纤光谱仪为主体的微型生化分析仪样品检测过程中的应用表明:提高了检测精度,减少了检测时间,提高效率 4~5 倍。