

文章编号 1004-924X(2008)01-0097-06

# 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

李海涛, 房建成

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

**摘要:**提出了一种低噪声、带宽可调的自适应角速度估计算法。对该角速度估计器的稳定性做了分析,利用最小二乘法设计了实时调整前向通道比例增益的自适应算法。利用 Matlab 对实际获得的实验数据进行仿真,使稳速速率的波动量减小了 88%,然后在磁悬浮控制力矩陀螺上进行了实验。将角速度估计器加到速率环的反馈环节上,在带宽不受影响的前提下,使速率曲线的波动量减小了 71.5%。实验结果表明,该算法能在很宽的调速范围内对速度进行准确估计。

**关键词:**控制力矩陀螺;角速度估计器;量化误差;最小二乘法

**中图分类号:**V448.222;V441.5;TH824 **文献标识码:**A

## Application of adaptive angle-rate estimator to gimbal of MGCMG

LI Hai-tao, FANG Jian-cheng

(College of Instrument Science and Optoelectronics Engineering,  
Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To eliminate the noise produced by the different calculations of position signal, an adaptive algorithm for angle-rate estimation with low-noise and changeable bandwidth was proposed. The stability of estimator was analyzed, then the adaptive algorithm of adjusting proportion gain of forward channel in real time was designed using the least square method. The software of Matlab was used for simulating the experimental data to reduce the fluctuation of stable speed by 88%. Then, the experiments were carried out on Magnetic Suspended Control Moment Gyroscope(MSCMG). While the estimator was added to feedback route of velocity loop, the fluctuation of speed curve was reduced by 71.5% without the influence on bandwidth. The results show that the algorithm can give accurate angle-rate estimation with low-noise and changeable bandwidth.

**Key words:** Control Moment Gyroscope(CMG); angle-rate estimator; quantized error; least square method

## 1 引言

控制力矩陀螺(CMG)是空间站、空间实验室等大型航天器实现姿态控制的关键执行机构,它的精度直接决定了航天器的姿态控制精度。由于单框架控制力矩陀螺具有大力矩、长寿命、高精度、低功耗的优点,在航天控制应用领域引起了广泛的关注,自上世纪 60 年代以来,已经在一系列大型航天器上得到应用,如天空实验室(美国 1973)、和平号空间站(前苏联 1986)、国际空间站(1998)等等。

现有的控制力矩陀螺框架伺服系统一般采用三环控制方式,即电流环、速率环和位置环,其中速度信号一般靠测速电机获得,但是测速电机测量误差大,尤其在低速阶段其测量的速度信号基本上被噪声所淹没,同时利用测速电机也加大了控制力矩陀螺的体积和质量,降低了系统的可靠性。用光电码盘或者旋转变压器可以得到较高精度的位置信号,再由该位置信号进行后向差分也可以得到速度信号,但是由这种方式得到的位置信号是离散的量化信号,信号中带有量化噪声,而且该噪声的频带很宽。另外这种噪声与采样频率选择还密切相关,采样频率选择越大,噪声被放大的越大。当扩展反馈系统的频带时,这些噪声就引入到系统中,引起系统的振荡,降低了系统的精度。

近几年,许多学者提出了不同的抑制噪声的微分算法,也取得了一定的效果。文献[1]采用基于 FIR 和 IIR 滤波器的微分算法,但是计算量较大,不易于实时控制;文献[2]采用 TD 滤波器来实现微分算法,但对积分步长及跟踪速度系统的选择比较苛刻;文献[3]采用了 Luenberger 观测器和非线性观测器的方式,但是观测器的实现对数据模型的依赖性很强,需要知道系统比较精确的数学模型,因此实现起来困难比较大。

本文提出一种低噪声、带宽高的自适应角速度估计算法,通过光电码盘的位置信号来估计角速度信号,通过 Matlab 仿真证明该算法的理论可行性和有效性。在北京航空航天大学第五研究室自主研制的磁悬浮控制力矩陀螺 VI 上进行了实

验,实验结果表明,该算法能在很宽的调速范围内对速度进行准确地估计。

## 2 角速度估计器的设计

该角速度估计器由两部分组成,第一部分为前向通道的微分环节和可变增益  $K$ ,另一部分为反馈通道。为了减小量化引起的噪声,前向通道采用了微分加滤波环节,采用的算法为移动平均差分算法,即  $G_L(z) = \frac{1-z^{-\alpha}}{\alpha T}$ 。另外一个前向通道中可变增益  $K$  在系统中起到很关键的作用,直接影响系统的稳定性和精度。积分器  $G_S(z)$  采用双线性离散方法,即  $G_S(z) = \frac{T(z+1)}{2(z-1)}$ 。该角速度估计器的原理框图如图 1 所示。

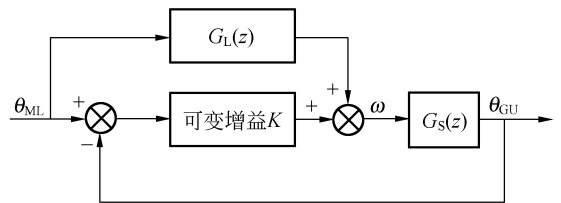


图 1 角速度估计器原理示意图

Fig. 1 Principle sketch of adaptive angle-rate estimator

## 3 系统的稳定性分析

由图 1 可知系统的传递函数为:

$$G_\theta(z) = \frac{\theta_{GU}}{\theta_{ML}} = \frac{KT}{\alpha} \frac{(1-z^{-\alpha})(z+1)^2}{4z^2 - 8z + 4 + 2KT(z^2 - 1)}, \quad (1)$$

其闭环特征方程为:

$$(4 + 2KT)z^2 - 8z + 4 - 2KT = 0, \quad (2)$$

经  $\omega$  变换后得方程:

$$(6 - KT)\omega^2 + (12 - 2KT)\omega + 14 - KT = 0. \quad (3)$$

由离散系统的劳斯判据可得:当  $KT < 6$  时,系统就可以稳定。

一般来说,采样周期都取为  $\leq 1$  ms,因此  $K$  的取值范围可以很宽,当  $0 < K < 6000$  时,系统稳定。

## 4 自适应可变增益 $K$ 的设计

### 4.1 算法原理

最小二乘参数估计方法是工程中常用的辨识方法,本文采用最小二乘参数估计的递推算法实现可变增益  $K$  的自适应估计。

如图 1 所示,  $\theta_{ML}(k)$  和  $\theta_{GU}(k)$  分别代表系统的输入和输出变量。把动态过程用式表示:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B\theta_{ML}(k) \\ \theta_{GU}(k) &= Cx(k) + D\theta_{ML}(k). \end{aligned} \quad (4)$$

则动态过程又可以表示为:

$$A(q^{-1})\theta_{GU}(k) = q^{-d}B(q^{-1})\theta_{ML}(k), \quad (5)$$

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n}, \quad (6)$$

$$B(q^{-1}) = 1 + b_1q^{-1} + \dots + b_nq^{-n}. \quad (7)$$

取  $d=1$  则式(5)可化为:

$$\theta_{GU}(k) = \Phi^T(k-1)\theta_0, \quad (8)$$

$$\Phi^T(k-1) = [-\theta_{GU}(k-1), -\theta_{GU}(k-2), \dots, \theta_{ML}(k-1), \theta_{ML}(k-2), \dots, \theta_{ML}(k-m-1)], \quad (9)$$

$$\theta_0^T = [a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m].$$

由最小二乘法概念取准则函数:

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^L \Lambda(k)(\Phi(k) - \theta_0^T(k))^2. \quad (10)$$

使  $J(\theta) = \min$  的  $\theta$  估计值  $\hat{\theta}$  为参数  $\theta$  的最小二乘估计值。式中  $\Lambda(k)$  为加权因子。

### 4.2 参数的估计

由式(1)可知系统的差分方程为:

$$\begin{aligned} (KT+1)\theta_{GU}(k) - 2\theta_{GU}(k-1) + (1-KT)\theta_{GU}(k-2) = \\ \frac{KT}{2\alpha}(\theta_{ML}(k) + 2\theta_{ML}(k-1) + \theta_{ML}(k-2) - \\ \theta_{ML}(k-\alpha-4) - 2\theta_{ML}(k-\alpha-3) - \theta_{ML}(k-\alpha-2)). \end{aligned} \quad (11)$$

该系统可描述成:

$$A(q^{-1})\theta_{GU}(k) = q^{-d}B(q^{-1})\theta_{ML}(k), \quad (12)$$

其中:

$$A(q^{-1}) = 1 + \frac{-2}{KT+1}q^{-1} + \frac{1-KT}{1+KT}q^{-2}. \quad (13)$$

$$\begin{aligned} B(q^{-1}) = & \frac{KT}{2\alpha(KT+1)} + \frac{2KT}{2\alpha(KT+1)}q^{-1} + \\ & \frac{KT}{2\alpha(KT+1)}q^{-2} - \frac{KT}{2\alpha(KT+1)}q^{\alpha+4} - \\ & \frac{2KT}{2\alpha(KT+1)}q^{\alpha+3} - \frac{KT}{2\alpha(KT+1)}q^{\alpha+2}. \end{aligned} \quad (14)$$

式(12)亦可描述成为式(8)的形式。因此由最小二乘算法:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-2)\Phi(k-1)}{1 + \Phi^T(k-1)P(k-2)\Phi(k-1)} \\ [y(k) - \Phi^T(k-1)\hat{\theta}(k-1)], \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} P(k-1) = P(k-2) - \\ \frac{P(k-2)\Phi(k-1)\Phi^T(k-1)P(k-2)}{1 + \Phi^T(k-1)P(k-2)\Phi(k-1)}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$P(0) = P_0 = P_0^T > 0. \quad (17)$$

即可求出需辨识的前向通道增益  $K$ 。其中式(15)中的  $\hat{\theta}(k)$  为  $k$  时刻的参数估计值。

在应用过程中,可根据实际系统选择  $\alpha$  的值来改变微分估计通道的平滑度和灵敏度。因此实际编程  $\alpha$  为一定值,这样式(15)中仅有  $K$  为未知变量,通过求解可以计算  $K$  的估计值。

## 5 系统的仿真研究

磁悬浮控制力矩陀螺框架部分由电机驱动,角位置传感器采用光电码盘,利用基于 DSP2812 的控制器对该系统进行控制。从码盘获得的位置信号首先存储到控制器的 RAM 中,经过串口传到上位机。DSP 控制器的位置环的采样频率为 1 kHz。

为考查上述角速度估计器的有效性,首先利用 Matlab 进行编程对实验数据进行了仿真。对于光电码盘采集的位置信息,首先利用后向差分方式求取速率值,然后采用角速度估计器求取速率值。

仿真采用的数据是在磁悬浮控制力矩陀螺 VI 上采集的,该陀螺框架伺服系统的工作范围为  $-10^\circ/\text{s} \sim 10^\circ/\text{s}$ ,转子转速为 20 000 r/min,输出力矩最大为 33 N·m。本文做了大量的实验,并相应做了分析,由于后向差分的是一种噪声,所以采用不同算法利用位置求速率,效果基本相似,为了说明角速度估计器的优势,本文采用其中的一组数据作为仿真的数据源。图 2 和图 3 分别为利用后向差分和角速度估计器求得的  $-1^\circ/\text{s}$  的速率波形,该速率下的速率波形可以体现框架伺服系统整个工作范围内的特征。图 2 与图 3 相对比,图 2 中的速率信号噪声明显比较大,从图中看出,利用后向差分方式,  $-1^\circ/\text{s}$  速率的计算得到的范围为  $-1.65 \sim -0.42^\circ/\text{s}$ ,而采用角速度估计器计

算得到的速率范围为： $-0.95 \sim -1.1^\circ/\text{s}$ ，速率的波动量为采用后向差分方式时的 12%，滤噪效果非常明显。

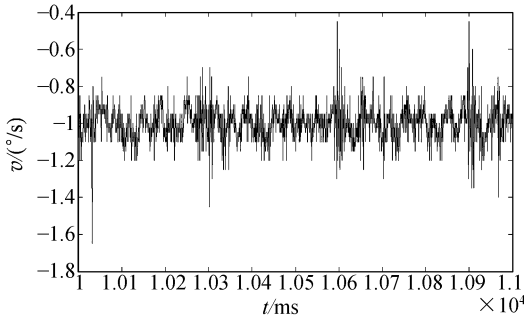


图 2 利用后向差分计算的速率信号( $-1^\circ/\text{s}$ )

Fig. 2 Speed signal calculated by backward difference( $-1^\circ/\text{s}$ )

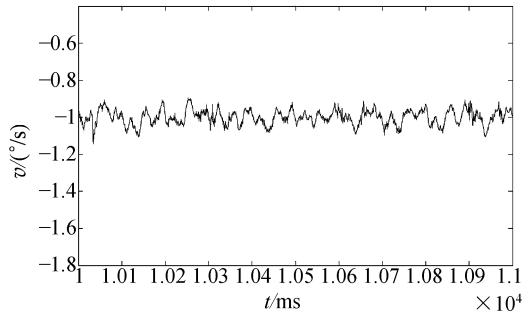


图 3 利用角速度估计器计算的速率信号( $-1^\circ/\text{s}$ )

Fig. 3 Speed signal calculated by angle-rate estimator( $-1^\circ/\text{s}$ )

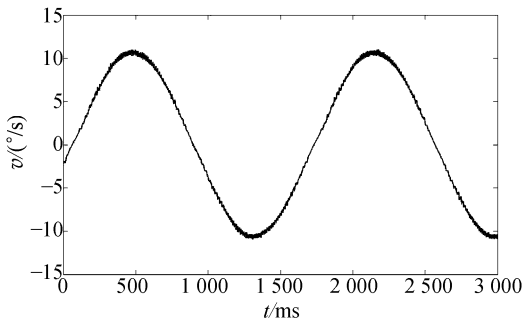


图 4 利用后向差分计算的正弦速率信号

Fig. 4 Sinusoidal speed signal calculated by backward difference

由图 4 和图 5 可以看到，当采用正弦速率命令输入时，利用角速度估计器计算的速率比利用后向差分计算的速率波形要好，引入的噪声要小，

尤其在峰值附近利用角速度估计器计算的速率受到噪声的影响要小很多。

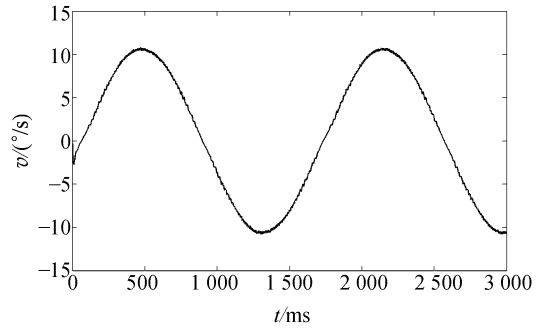


图 5 利用角速度估计器计算的正弦速率信号

Fig. 5 Sinusoidal speed signal calculated by angle-rate estimator

### 6 系统的实验研究

本实验采用的被控对象为单框架磁悬浮控制力矩陀螺 VI。框架电机采用的是直流力矩电机，角位置传感器采用海德汉公司的 RON285 型码盘，码盘的位置信号经过轴角卡 (IK410) 后变为数字量送到 DSP 控制板，然后经过控制器上的 14 位 D/A 转换成模拟量，利用示波器存储下 D/A 转换的速率波形。图 6 为验证上述算法的实验装置图。



图 6 磁悬浮控制力矩陀螺实验装置

Fig. 6 Experimental setup on MSCMG

为验证系统中采用角速度估计器具有抑制噪声而且能保证系统的带宽，实验采用了两种输入信号。其中速率环反馈环节的反馈值由光电码盘的位置信号计算得来。图 7、图 8 采用的是恒速率控制，从波形中可以验证该角速度估计器能抑制噪声，图 9、图 10 采用了正弦命令，图中上面的

正弦曲线为输出速率波形,下面的曲线为速率的命令信号,通过相位的对比,可以看出采用角速度估计器时系统的带宽并没有缩小。

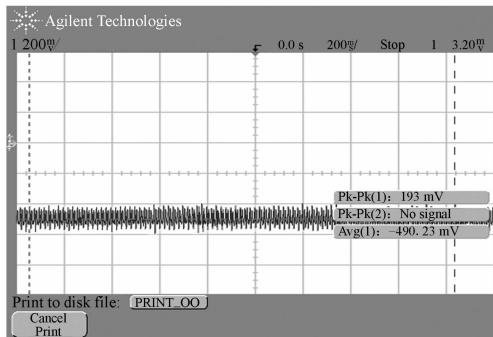


图 7 采用后向差分时的实际速率波形

Fig. 7 Actual speed wave by backward difference

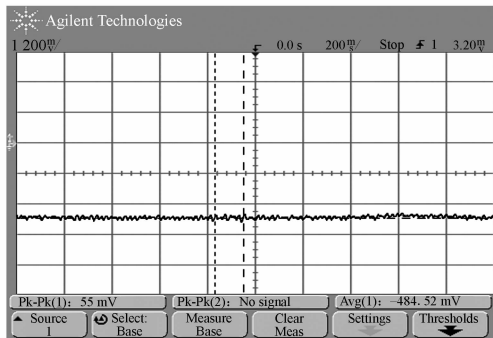


图 8 采用角速度估计器时实际的速率波形

Fig. 8 Actual speed wave by angle-rate estimator

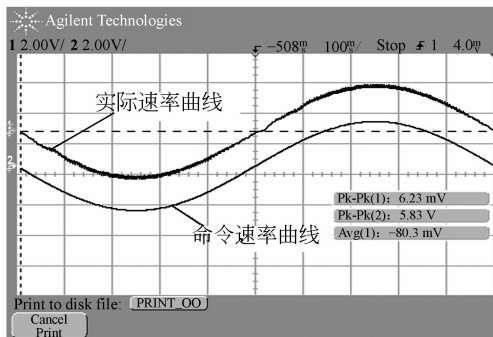


图 9 采用后向差分时的实际的正弦速率波形

Fig. 9 Actual sinusoidal speed wave by backward difference

图 7 为速度环反馈通道采用后向差分系统的速率输出波形,图 8 为采用角速度估计器时系统的速率输出波形。从图中波形可以看出,在相同的测量情况下,图 7 中速率波形的 pk-pk 值为 193 mV,图 8 中速率波形的 pk-pk 值为 55 mV,速率的波动量减小了 71.5%,噪声干扰也明显小了很多。

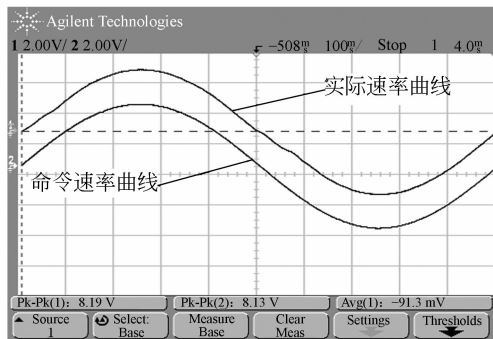


图 10 采用角速度估计器时实际的正弦速率波形

Fig. 10 Actual sinusoidal speed wave by angle-rate estimator

通过图 9 和图 10 的对比可以看出,采用角速度估计器时仍然能够很好地跟踪正弦命令,并没有降低系统的带宽,而且噪声抑制能力明显的加强了。

## 7 结 论

本文提出一种自适应角速度估计器,将位置信号转化为速率信号,避免了采用传统的差分算法引起的量化误差,同时也为系统节省了速率传感器件,减小了系统的体积与质量。

利用 Matlab 编程进行仿真,仿真结果为在确保系统伺服带宽的前提下,稳速速率的波动量减小了 88%,从结果可以明显看到本文提出的角速度估计器具有很好的滤噪效果。

在北航五研自主研发的磁悬浮控制力矩陀螺上进行了实验,实验结果表明,在确保系统伺服带宽的前提下,稳速速率的波动量减小了 72%。实验结果证明了该自适应角速度估计器的可行性与有效性。

## 参考文献:

- [1] 曲东才. 基于 FIR/IIR 型数字滤波器提取数字微分信号[J]. 计算机仿真, 2002, 19(5): 4-8.

- QU D C. Extracting the digital differential signal based on FIR/IIR filters[J]. *Computer Simulation*, 2002, 19(5): 4-8. (in Chinese)
- [2] 武利强, 林浩, 韩京清. 跟踪微分器滤波性能研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4): 651-653.  
WU L Q, LIN H, HAN J Q. Study of tracking differentiator on filtering[J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(4): 651-653. (in Chinese)
- [3] 张承进, 元元广. 一般严格反馈型非线性系统的自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(4): 621-625.  
ZHANG CH J, QI Y G. Adaptive control of general nonlinear systems in strict feedback form[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(4): 621-625. (in Chinese)
- [4] 丁雪梅, 王维雅, 黄向东. 基于差分和不变量运动目标检测与跟踪[J]. 光学精密工程, 2007, 15(4): 570-576.  
DING X M, WANG W Y, HUANG X D. New method for detecting and tracking of moving target based on difference and invariant[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 570-576. (in Chinese)
- [5] 魏彤, 房建成. 磁悬浮控制力矩陀螺的动框架效应及其角速率前馈控制方法研究[J]. 宇航学报, 2005, 26(1): 19-23.  
WEI T, FANG J CH. Moving-gimbal effects and angular rate feedforward control in magnetically suspended rotor system of CMG[J]. *Journal of Astronautics*, 2005, 26(1): 19-23. (in Chinese)
- [6] 金良海, 李德华. 改进型距离方向矢量滤波器[J]. 光学精密工程, 2007, 15(5): 798-806.  
JIN L H, LI D H. Improved directional-distance filter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 798-806. (in Chinese)
- [7] SPOONER J T, MAGGIOTE M, ORDONEZ R, et al.. *Stable Adaptive Control and Estimation for Nonlinear Systems*[M]. New York: Wiley Interscience, 2002.
- [8] NARENDRA K S, MUKHOPADHYAY S. Adaptive control using neural networks and approximate models[J]. *IEEE Trans Neural Networks*, 1997, 8(3): 475-485.
- [9] MOHAMED L H, VINCENT W, TAKAGI S. Fuzzy modeling incorporating input variables selection[J]. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, 2002, 10(6): 728-742.
- [10] 余璘, 徐锦法. 一种基于 UKF 的系统参数在线辨识方法[J]. 控制理论与应用, 2007, 26(1): 10-13.  
YU L, XU J F. UKF-based online parameter identification method[J]. *Control Theory and Applications*, 2007, 26(1): 10-13. (in Chinese)

**作者简介:**李海涛(1979—),男,博士研究生,主要研究方向为磁悬浮控制力矩陀螺框电机控制。E-mail:greatlht@163.com

房建成(1965—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为航天器姿态控制技术及自主定位导航技术以及航空航天飞行器 GNC 系统集成技术和信息集成技术。E-mail:fangjiancheng@buaa.edu.cn