

文章编号 1004-924X(2012)11-2424-09

积分反馈自抗扰控制力矩陀螺框架伺服系统设计

陈茂胜^{1,2*}, 金光¹, 张涛¹, 戴路¹, 朴永杰¹, 周美丽¹, 曲宏松¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 设计了永磁同步电机直驱的控制力矩陀螺(CMG)框架伺服系统, 并提出积分反馈自抗扰控制(ADRC)伺服跟踪算法用于实时跟踪 CMG 操纵律输出的框架角速度指令。首先, 采用电机轴电流 $i_d=0$ 的矢量控制策略建立了 CMG 框架伺服系统的数学模型; 然后, 分析摩擦力矩和齿槽力矩对 CMG 框架伺服系统性能的影响, 并在 Matlab 中搭建速度环采用 ADRC 的框架伺服仿真系统; 最后, 对框架伺服系统的速度环分别采用模糊 PI、ADRC、积分反馈 ADRC 算法进行实验。实验结果表明: 采用积分反馈 ADRC 算法跟踪 $0.1\sim 2.0$ rad/s 时, 稳态精度为 $0.005\sim 0.012$ rad/s; 跟踪 $0.0\sim 0.1$ rad/s 时, 稳态精度为 $0.001\sim 0.005$ rad/s, 临界爬行速度为 0.003 rad/s; 跟踪 $2\sin(t)$ rad/s 速度曲线时, 幅值误差为 0.55% , 相位滞后 0.09978 rad。结果满足 CMG 框架伺服系统精度高、鲁棒性强的要求。

关键词: 控制力矩陀螺; 永磁同步电机; 矢量控制策略; 自抗扰控制; 积分反馈

中图分类号: V448.2; TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122011.2424

Design of gimbal servo system of CMG using active disturbance rejection control with integral feedback

CHEN Mao-sheng^{1,2*}, JIN Guang¹, ZHANG Tao¹, DAI Lu¹,

PIAO Yong-jie¹, ZHOU Mei-li¹, QU Hong-song¹

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

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

* *Corresponding author, E-mail: chenms0911@yahoo.com.cn*

Abstract: The gimbal servo system for a Control Moment Gyroscope(CMG) directly driven by a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) was designed, and an Active Disturbance Rejection Control(ADRC) algorithm with integral feedback was proposed. Firstly, the mathematic model for the CMG gimbal servo system was built by using an oriented control strategy in shaft current $i_d=0$. Then, the effects of both frictional and alveolar torques on the performance of gimbal servo system were analyzed. A simulation system for gimbal servo system which used the ADRC as a speed loop was built up in Matlab. Finally, the hardware experiments of fuzzy PI, ADRC and the ADRC with integral feedback were carried out. Test and experiments show that the steady state accuracy is $0.005\sim 0.012$ rad/s when a step velocity of $0.1\sim 2.0$ rad/s is tracked by u-

收稿日期: 2012-03-05; 修订日期: 2012-04-07.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA12Z113)

sing the ADRC, and that is 0.001—0.005 rad/s and the crawling speed is 0.003 rad/s when the step velocity of 0.0—0.1 rad/s is tracked by using the ADRC with integral feedback. Furthermore, the relative amplitude error is 0.55% and the phase error is 0.099 78 rad, when the gimbal system tracks the $2\sin(t)$ rad/s by using the ADRC with integral feedback. The proposed gimbal servo system of CMG satisfies the demands of high precision and robustness.

Key words: Control Moment Gyro (CMG); Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM); filed oriented control; Active Disturbance Rejection Control (ADRC); integral feedback

1 引言

控制力矩陀螺(Control Moment Gyroscope, CMG)是应用在航天器上的一类具有“力矩放大”特性的惯性执行机构,通过动量交换产生内部力矩,实现对航天器的姿态控制。框架伺服系统作为 CMG 的重要组成部分,其速度或位置的控制性能直接决定 CMG 的输出力矩精度。为获得高精度的输出力矩,实现高精度的姿态控制,必须研究高性能的框架伺服系统。

2007 年和 2009 年发射的 WorldView-1/2 卫星均采用 Honeywell 公司 M50 系列控制力矩陀螺作为卫星的执行结构,其框架系统采用“O 型”结构,最大框架角加速度为 3 rad/s²,角速度精度为 2%,输出力矩为 0.075~75 Nm,使卫星机动能力分别达到 4.5 (°)/s 和 3.5 (°)/s,推扫 300 km 耗时由原来的 60 s 降至 9 s。而 Pleiades 卫星所采用的 Astrium 公司研制的高精度 15-45S 控制力矩陀螺,其框架系统采用“U 型”结构,最大框架角加速度为 3 rad/s²,角位置精度优于 10 mrad,使卫星机动 60°仅耗时 25 s^[1]。目前,国内的一些高校和研究所也正积极开展 CMG 框架伺服系统的研制。在设计 CMG 框架伺服系统时,根据所应用航天器转动惯量的不同,选择正弦永磁同步电机经传动机构或直驱方式驱动框架轴转动。北京航空航天大学 and 北京控制工程研究所针对大型航天器研制的控制力矩陀螺^[2,3],均采用永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)经传动机构后驱动框架轴,减小了所选电机的体积和质量,避免了驱动电机长时间工作在超低速区域,但也因此带来了框架输出角速率波动较大、精度降低等问题。

本文针对中小型航天器设计了 PMSM 电机

直驱的“U 型”CMG 框架伺服系统。通过建立框架伺服系统的数学模型,采用 $i_d=0$ 的矢量控制策略,分析框架系统中存在的干扰力矩及其特性,提出采用积分反馈自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)的伺服跟踪算法,以获得高性能的速度稳态精度。框架伺服系统速度环分别采用模糊 PI、ADRC、积分反馈 ADRC 这 3 种控制算法进行实验,并从稳态精度、临界爬行速度、抗干扰能力等方面进行数据对比、分析。实验表明,积分反馈 ADRC 控制力矩陀螺框架伺服系统具有稳态精度高、临界爬行速度低、鲁棒性强等特点,满足系统的使用要求。

2 CMG 框架系统建模与伺服控制

2.1 CMG 框架系统数学模型

变量定义:

u_d, u_q 为 PMSM 电机 d/q 轴电压;

i_d, i_q 为 PMSM 电机 d/q 轴电流;

L_d, L_q 为 PMSM 电机 d/q 轴电感;

ψ_d, ψ_q 为 PMSM 电机 d/q 轴磁链;

ψ_f 为 PMSM 电机永磁体磁链值;

ω_m 为 PMSM 电机转子机械角速度,亦即 CMG 框架角速度;

ω_e 为 PMSM 电机转子电角速度;

n_p 为 PMSM 电机转子上的磁极对数;

p 为微分算子;

J 为 CMG 框架负载转动惯量;

B 为 CMG 框架轴的黏滞摩擦系数。

CMG 框架系统的数学模型可由电压平衡方程、磁链方程、电磁转矩方程和运动方程描述^[4],其中电压平衡方程:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + p(\psi_d) - \omega_e \psi_q \\ u_q = R_s i_q + p(\psi_q) + \omega_e \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程:

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + \psi_r \\ \psi_q &= L_q i_q \end{aligned} \quad (2)$$

结合式(1)和(2)可得到 d/q 轴电流表达式:

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{1}{L_d} (u_d - R_s i_d + L_q \omega_e i_q) \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{L_q} (u_q - R_s i_q - L_d \omega_e i_d - \omega_e \psi_r) \end{aligned} \quad (3)$$

电磁转矩方程:

$$\begin{aligned} T_e &= n_p (\boldsymbol{\psi}_s \times \boldsymbol{i}_s) = n_p (\psi_d + \boldsymbol{j} \psi_q) \times (i_d + \boldsymbol{j} i_q) \\ &= n_p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = n_p [\psi_r i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \end{aligned} \quad (4)$$

CMG 框架轴运动方程:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_L - B\omega_m) \quad (5)$$

2.2 CMG 框架伺服控制策略

CMG 框架伺服系统采用 $i_d = 0$ 的矢量控制策略,实现速度环、电流环双闭环控制,其结构如图 1 所示。

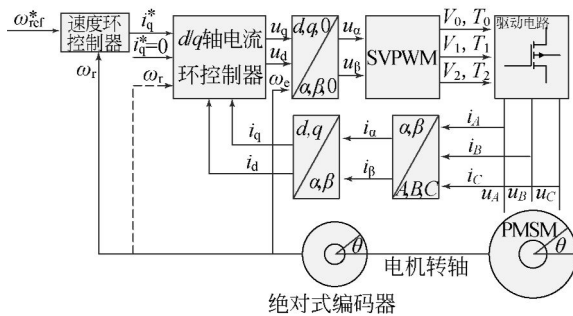


图 1 CMG 框架伺服控制结构框图

Fig. 1 Servo control structure of CMG gimbal system

3 CMG 框架系统干扰力矩及其影响

3.1 摩擦力矩

CMG 框架轴的摩擦力矩是系统外干扰力矩重要组成之一,建立恰当摩擦力矩数学模型,对控制系统实现力矩补偿具有十分重要的意义。在工程应用中, Stribeck 是描述摩擦力矩应用最广泛的一种模型,表明在不同的摩擦阶段,摩擦力矩与速度之间的关系。

Stribeck 模型描述动摩擦力矩模型^[5]可以表示为:

$$M_f(\omega_m) = \text{sgn}(\omega_m) (M_c + (M_s - M_c) e^{-\omega_m/\omega_0}) + B\omega_m, \quad (6)$$

其中: M_s 为静摩擦力矩, M_c 为库仑摩擦力矩, ω_m 为电机瞬时转速, ω_0 为负阻区临界速度, B 为黏滞摩擦系数。

摩擦力矩对 CMG 框架伺服系统静态性能的影响主要表现为较大的静差或稳态极限环振荡,对动态性能的影响主要表现为低速时出现爬行现象和速度穿越零点时的波形畸变。

3.2 齿槽力矩

由于 PMSM 电机定子的齿槽与转子之间所对应的空气气隙、磁阻不同,所以当电机匀速旋转时,这些齿槽要相继交替地经过转子磁极,产生一个周期性力矩作用于电机轴上,即为齿槽力矩。齿槽力矩的数学模型^[6]可以表示为:

$$\begin{aligned} M_d(t) &= M_d(t+T) \\ T &= 1/f = 1/(\omega_m \cdot n_p/2\pi), \end{aligned} \quad (7)$$

$M_d(t)$ 可以通过傅里叶级数展开,当各高次谐波分量同基波相比可以忽略不计时, $M_d(t)$ 可以用它的基波来近似表示:

$$M_d(t) = A \sin(\omega_m \cdot n_p \cdot t)$$

$$A = \frac{\omega_m \cdot n_p}{2\pi} \int_0^T M_d(t) \sin(\omega_m \cdot n_p \cdot t) dt. \quad (8)$$

从式(8)可以看出,齿槽力矩波动频率取决于经过磁极的频率,数值比电机额定力矩小得多。但当电机要求在低速平稳运行,齿槽力矩对 CMG 控制系统的影响会相当显著。

由此可见,为提高 CMG 框架伺服系统性能,控制器必须引入干扰力矩观测项并进行前馈补偿。

4 CMG 框架伺服系统控制算法仿真

ADRC 控制器^[7-11]是由跟踪微分器(Tracking-Differentiator, TD)、扩展状态观测器(Extended State Observer, ESO)和非线性状态误差负反馈控制律(Nonlinear State Error Feedback, NLSEF)三部分组成。其中,TD 可对系统的期望输入及其微分进行跟踪控制,进而合理地提取出输入的跟踪信号和微分信号;ESO 用于观测系统的各阶状态变量和综合扰动项,得到广义状态误差并对扰动项进行前馈补偿;NLSEF 借助非线性函数智能实现“小误差大增益,大误差小增益”控制,提高系统的稳态精度。

本文在 Matlab 中搭建了速度环采用 ADRC 伺服框架的仿真系统,将伺服系统的摩擦力矩和

齿槽力矩看作速度环的一个外部扰动,记作 $a_1(t)$;将 d/q 轴电流和转动惯量 J 对速度的影响视为速度环的内部扰动,记作 $a_2(t)$;并将伺服系统受到的内外扰动之和记作 $a(t)$,则式(5)可以写为:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{n_p \psi_f}{J} i_q + a(t). \quad (9)$$

跟踪微分器:

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_0 = z_{11} - \omega_m^* \\ \dot{z}_{11} = -R * fal(\epsilon_0, \alpha_0, \delta_0) \end{cases} \quad (10)$$

扩展状态观测器:

$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_1 = z_{21} - \omega_m \\ \dot{z}_{21} = z_{22} - \beta_1 * fal(\epsilon_1, \alpha_1, \delta_1) + b * u \\ \dot{z}_{22} = -\beta_2 * fal(\epsilon_1, \alpha_2, \delta_2) \end{cases} \quad (11)$$

非线性状态误差反馈控制律:

$$\begin{cases} \epsilon_2 = z_{11} - z_{21} \\ u_0 = \beta_3 * fal(\epsilon_2, \alpha_3, \delta_3) \\ u = u_0 - z_{22}/b \end{cases} \quad (12)$$

其中:

$$fal(\epsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} |\epsilon|^\alpha \text{sgn}(\epsilon), & |\epsilon| > \delta \\ \epsilon/\delta^{1-\alpha}, & |\epsilon| < \delta \end{cases} \quad (13)$$

当跟踪期望角速度为 1 rad/s,干扰力矩为 $T_d = 0.01 + 0.05 \times \omega_m + 0.05 \sin(12t) N_m$ 时,速度环分别采用 PIC 和 ADRC 控制,得到 CMG 框架伺服系统速度仿真结果如图 2 和图 3 所示。

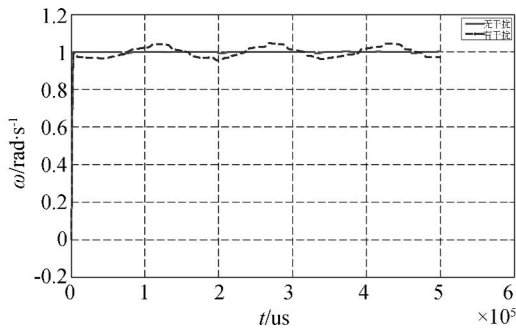


图 2 PIC 跟踪 1 rad/s 速度曲线仿真图

Fig. 2 Dynamic response curve of tracking 1 rad/s using PIC in Matlab

其中:PIC 控制参数为 $[K_p, K_i, K_c] = [2, 5, 0.4]$

其中:ADRC 仿真参数为

$$[\alpha_0, \delta_0, R] = [0.5, 0.01, 50]$$

$$[\alpha_1, \beta_1, \beta_2, \delta_1] = [0.7, 300, 2, 0.01]$$

$$[\alpha_2, \beta_3, \delta_3] = [0.7, 150, 0.01]$$

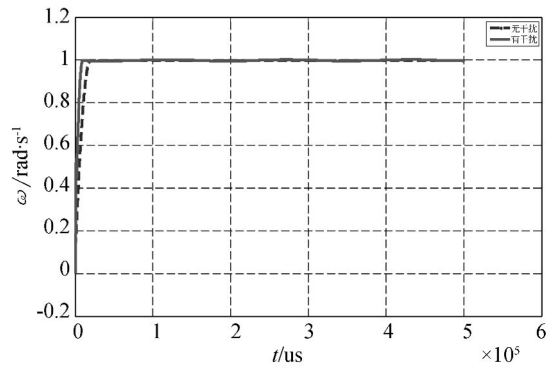


图 3 ADRC 跟踪 1 rad/s 速度曲线仿真图

Fig. 3 Dynamic response curve of tracking 1 rad/s using ADRC in Matlab

从仿真过程和结果来看,PIC 控制的优点在于控制简单,可调参数少,利用控制目标与实际行为之间的误差来确定消除此误差的策略,对数学模型依赖性低;但也存在误差 $e(t)$ 的直接提取,“线性加权和”策略往往不是最好,积分反馈副作用多等缺点。ADRC 控制器在保留 PIC 控制器固有优点的基础上,针对其存在的缺点对控制器进行改进,误差提取时安排合适的过渡过程来估计内外扰动量,设计了非线性组合的负反馈,但参数调试变得复杂。

5 实验结果

5.1 硬件实现

控制力矩陀螺框架伺服硬件系统由框架电机(PMSM)、框架伺服控制器和框架负载三部分组成。其中,框架伺服控制器由数字控制电路、功率驱动电路和传感器组成,数字控制电路采用主从双控制器,主控制器 DSP TMS320F28335 负责电机转子位置值、速度值、相电流采集,和 PMSM 电机矢量控制算法实现;从控制器 FPGA XC3S400 负责产生 PMSM 驱动电路所需的 PWM 波及其保护信号,控制外围电路的通断;功率驱动电路基于 IR2110+IRL540 构建而成,具有快速响应、过压过流保护、泄放母线电流等特点;传感器包括 18 位绝对式编码器和电流传感器,反馈 PMSM 转子的当前的角位置、速度值和三相电流值,以实现速度、电流双闭环控制。控制力矩陀螺框架伺服系统硬件组成如图 4 所示。

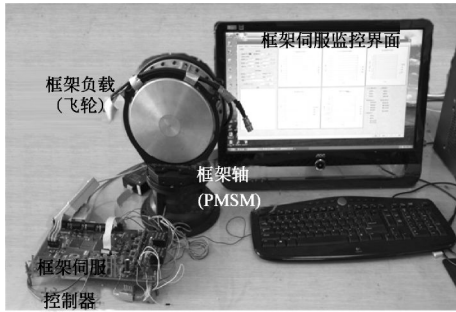


图 4 控制力矩陀螺框架伺服系统硬件组成
Fig. 4 Hardware of CMG gimbal servo system

5.2 实验结果

5.2.1 速度环 ADRC 控制

ADRC 控制器能够实时估算出系统的干扰力矩并进行前馈补偿,根据当前速度误差值得到不同的增益,系统的控制精度和鲁棒性将得到明显增强。

当速度环采用 ADRC 算法跟踪正向、负向角速度时,得到速度阶跃响应曲线如图 5 所示。

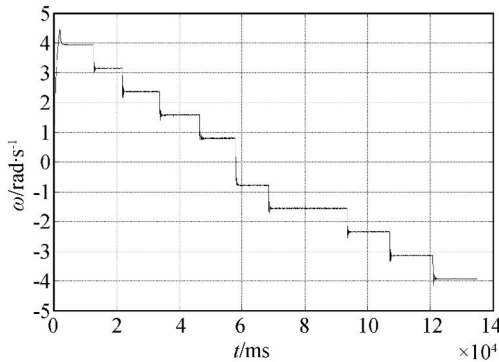


图 5 ADRC 跟踪双向角速度曲线响应图
Fig. 5 Dynamic response curve of tracking bi-directional angular velocity using ADRC

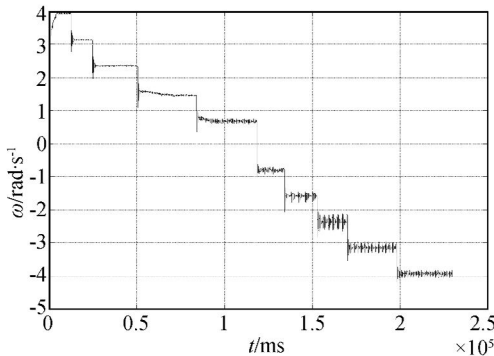


图 6 模糊 PI 跟踪双向角速度曲线响应图
Fig. 6 Dynamic response curve of tracking bi-directional angular velocity using fuzzy-PI controller

速度环采用模糊 PI 算法跟踪正向、负向角速度时,得到速度阶跃响应曲线如图 6 所示。

通过对比图 5 和图 6 可以发现,采用 ADRC 控制器跟踪的角速度稳态精度明显优于模糊 PI 控制,抑制干扰能力更强。

为进一步分析采用 ADRC 控制的 CMG 框架伺服系统速度跟踪性能,跟踪了 0.1~2.0 rad/s 期望角速度,速度阶跃步长为 0.1 rad/s,得到的速度响应曲线如图 7 所示。

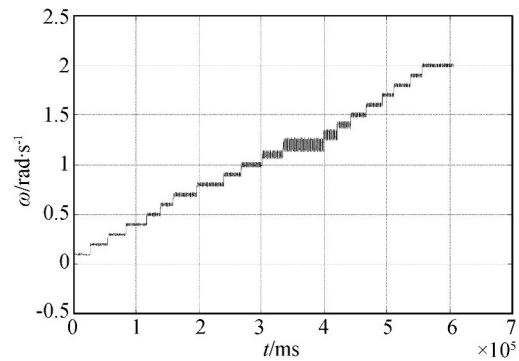


图 7 ADRC 跟踪正向角速度响应曲线图
Fig. 7 Dynamic response curve of tracking positive angular velocity using ADRC

对图 7 进行数学统计分析,得到各速度段稳态跟踪精度,如表 1 所示。

表 1 ADRC 跟踪 0.1~2.0 rad/s 稳态精度统计表

Tab. 1 Statistics of steady-state accuracy using ADRC tracking 0.1~2.0 rad/s

速度值 /rad · s ⁻¹	Beta1	均方根 /rad · s ⁻¹	平均值 /rad · s ⁻¹
0.1	50	0.005 44	0.098 848
0.2	50	0.005 23	0.198 104 5
0.3	50	0.005 24	0.297 927 24
0.4	40	0.006 22	0.398 580
0.5	40	0.008 02	0.499 461 89
0.6	37	0.008 84	0.599 502 37
0.7	34	0.010 49	0.699 437 88
0.8	31	0.009 99	0.799 517 26
0.9	28	0.010 99	0.899 449 84
1	25	0.014 57	0.999 495 16
1.1	22	0.022 89	1.099 497 33
1.2	19	0.038 45	1.199 501 22
1.3	16	0.027 77	1.299 528 68
1.4	13	0.015 92	1.399 666 67
1.5	10	0.010 95	1.499 517 77
1.6	10	0.009 46	1.599 579
1.7	10	0.008 52	1.699 619 8
1.8	10	0.008 15	1.799 670 31
1.9	10	0.007 94	1.899 589 26
2	10	0.007 9	1.999 470 84

其中:ADRC 控制参数^[10]如下:

$$[\alpha_0, \delta_0, R] = [0.5, 0.4, 5]$$

$$[\alpha_1, \beta_1, \beta_2, \delta_1] = [0.3, \beta_1(\omega_t), 15, 0.1]$$

$$[\alpha_2, \beta_3, \delta_3] = [0.3, 3, 0.1]$$

从表 1 可以发现,采用速度环采用 ADRC 控制其稳态精度绝大部分落在 0.005~0.01 rad/s 区间内,但在 1.1~1.4 rad/s 速度区间内,稳态精度相对较差,最大值为 0.038 45 rad/s。

5.2.2 速度环积分反馈 ADRC 控制

通过大量的实验发现,在 ADRC 的 NLESEF 反馈控制器中引入积分环节能够改善稳态性能,即将 ADRC 控制器中的 NLSEF 改进为:

$$\begin{cases} \epsilon_2 = z_{11} - z_{21} \\ u_0 = \beta_3 \times fal(\epsilon_2, \alpha_3, \delta_3) + \beta_1 \times \int \epsilon_2^3 dt. \\ u = u_0 - z_{22}/b \end{cases} \quad (14)$$

再次跟踪 0.1~2.0 rad/s 期望角速度,速度阶跃步长仍为 0.1 rad/s,得到速度响应曲线如图 8 所示。

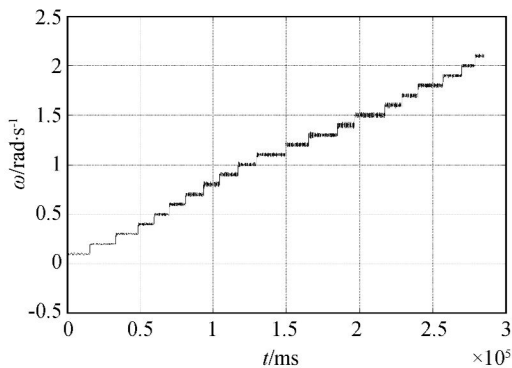


图 8 积分反馈 ADRC 正向角速度响应曲线图

Fig. 8 Dynamic response curve of tracking positive angular velocity using ADRC with integral feedback

对图 8 进行数学统计分析,得到各速度段稳态跟踪精度,如表 2 所示。

其中:ADRC 控制参数如下:

$$[\alpha_0, \delta_0, R] = [0.5, 0.23, R(\omega_t)]$$

$$[\alpha_1, \beta_1, \beta_2, \delta_1] = [0.7, \beta_1(\omega_t), 40, 0.01]$$

$$[\alpha_2, \beta_3, \beta_4, \delta_3] = [0.3, 10, 200, 0.1]$$

通过对比表 1 和 2 可以发现,NLSEF 引入积分反馈环节后,0.1~2.0 rad/s 段稳态精度为 0.005~0.012 rad/s,优于改进前的 0.005~0.038 rad/s。

表 2 积分反馈 ADRC 跟踪 0.1~2.0 rad/s 稳态精度统计表

Tab.2 Statistics of steady-state accuracy using ADRC with integral feedback tracking 0.1~2.0 rad/s

速度值 /rad·s ⁻¹	R1	Beta1	均方根 /rad·s ⁻¹	平均值 /rad·s ⁻¹
0.1	5	30	0.005 164	0.099 664
0.2	5	30	0.005 426	0.199 235
0.3	5	30	0.005 246	0.299 254
0.4	5	30	0.006 393	0.399 339
0.5	5	33	0.006 538	0.499 241
0.6	5	33	0.007 338	0.599 36
0.7	5	33	0.008 794	0.699 124
0.8	5	25	0.010 739	0.799 433
0.9	6	35	0.009 439	0.899 19
1	7	35	0.008 043	0.999 461
1.1	7	35	0.008 49	1.099 518
1.2	7	35	0.009 955	1.199 492
1.3	7	40	0.009 541	1.299 41
1.4	8	10	0.012 755	1.399 246
1.5	8	10	0.011 87	1.499 439
1.6	8	10	0.010 112	1.599 622
1.7	8	10	0.009 227	1.699 553
1.8	9	15	0.008 734	1.799 601
1.9	9	15	0.007 315	1.899 411
2	9	15	0.006 594	1.999 698

单个控制力矩陀螺输出力矩可由式(15)表示:

$$T_{CMG} = \omega_m \times h, \quad (15)$$

其中: ω_m 为 CMG 框架角速度, h 为飞轮转子恒定角动量。从上式易知,提高了框架角速度稳态性能,亦即提高了单个控制力矩陀螺输出力矩精度。

5.2.3 CMG 框架轴临界爬行速度

从式(15)可知,单个控制力矩陀螺输出力矩下限值取决于框架轴临界爬行速度。

速度环分别采用模糊 PI 和积分反馈 ADRC 控制,跟踪 0.0~0.1 rad/s 速度段阶跃响应,测试 CMG 框架伺服系统临界爬行速度,其结果如图 9、图 10 所示。

从图 9、图 10 可以看出,采用模糊 PI 控制时,临界爬行速度约为 0.03 rad/s;而积分反馈

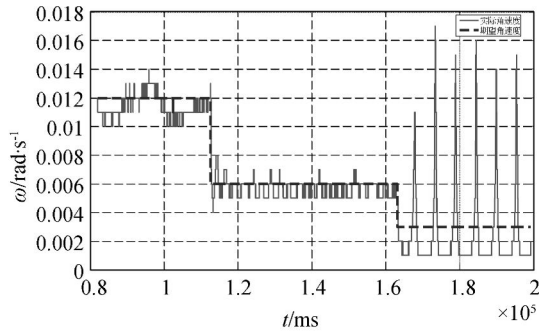


图 9 积分反馈 ADRC 跟踪低速段曲线响应图

Fig. 9 Dynamic response curve of tracking low angular velocity using ADRC with integral feedback

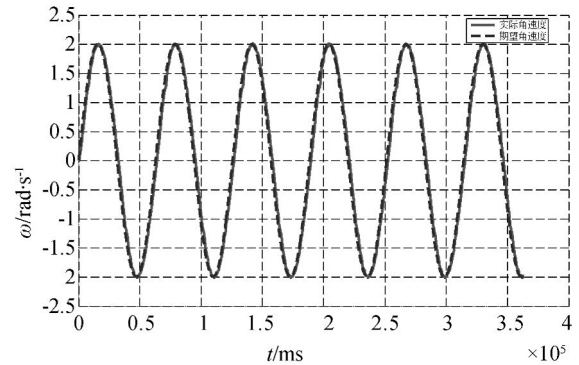


图 11 积分反馈 ADRC 跟踪正弦角速度曲线响应图

Fig. 11 Dynamic response curve of tracking sine velocity using ADRC with integral feedback

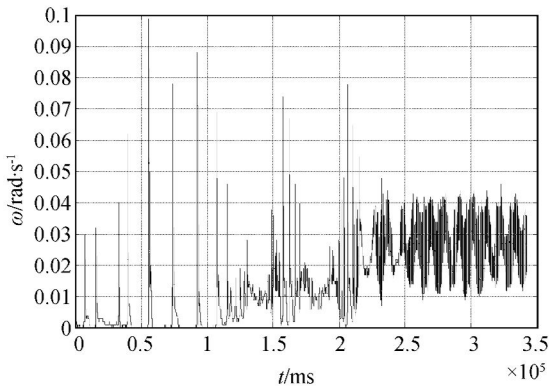


图 10 模糊 PI 跟踪低速段曲线响应图

Fig. 10 Dynamic response curve of tracking low angular velocity using PI controller

ADRC 控制时,临界爬行速度仅约为 0.003 rad/s ,稳态精度为 $0.001 \sim 0.005 \text{ rad/s}$ 。所以,当飞轮转子恒定角动量为 1 Nms 时,单个控制力矩陀螺最小出力矩值由原来的 0.03 Nm 降低至 0.003 Nm ,提高了力矩输出范围。

5.2.4 CMG 框架角速度正弦数引跟踪

CMG 框架伺服系统设计指标:角速度响应为 $-2.0 \sim 2.0 \text{ rad/s}$,角加速度为 2.0 rad/s^2 ,幅值误差低于 2% ,相位滞后小于 0.15 rad 。为了验证该项指标,设计了正弦数引跟踪实验,期望角速度为 $2\sin(t) \text{ rad/s}$,实验结果如图 11 所示。

经分析得知,CMG 框架系统给定转速和实际转速的幅值差为 0.55% ,相位滞后为 0.09978 rad ,满足使用要求。

6 结 论

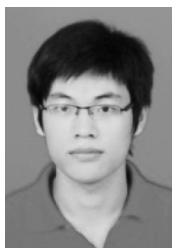
采用正弦永磁同步电机直驱框架轴的方式设计了“转台型”CMG 框架系统,采用 $i_d=0$ 的矢量控制策略实现速度、电流的双闭环控制,并根据框架系统中的外干扰力矩特性,提出速度环采取积分反馈 ADRC 控制算法来提高速度稳态精度和降低临界爬行速度,使 CMG 能够输出高精度和高动态范围的控制力矩。在跟踪 $0.1 \sim 2.0 \text{ rad/s}$ 速度阶跃响应时,稳态精度为 $0.005 \sim 0.012 \text{ rad/s}$;跟踪 $0.0 \sim 0.1 \text{ rad/s}$ 速度阶段阶跃响应,测得 CMG 框架伺服系统临界爬行速度为 0.003 rad/s ,稳态精度为 $0.001 \sim 0.005 \text{ rad/s}$;在跟踪 $2\sin(t)$ 速度正弦数引曲线时,幅值误差为 0.55% ,相位滞后为 0.09978 rad ,满足了系统设计要求。

此外,提高绝对式编码器位数或者采用变控制周期等方法可进一步提高 CMG 框架伺服系统的速度稳态精度;而效仿 Pleiades 卫星采用位置伺服操纵律,在框架角速度低速段将速度跟踪切换到位置伺服模式,在满足一定位置控制精度时伺服系统即可输出可控的连续力矩,从而克服由框架角速度死区而引起的 CMG 出力矩不可控的缺陷。

参考文献:

- [1] 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 strategy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1075-1081. (in Chinese)
- [2] 李海涛,房建成,韩邦成,等.一种双框架磁悬浮控制力矩陀螺框架伺服系统扰动抑制方法研究[J].宇航学报,2009,30(6):2199-2205.
LI H T, FANG J CH, HAN B CH, *et al.*. Study on the system disturbance rejection method used in the gimbal servo system of double gimbal magnetically suspended control moment gyro [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 30(6): 2199-2205. (in Chinese)
- [3] 张激扬,周大宁,高亚楠.控制力矩陀螺框架控制方法及框架转速测量方法[J].空间控制技术与应用,2008,34(2):23-28.
ZHANG J Y, ZHOU D N, GAO Y N. Gimbal control technique and gimbal rate measurement method for the control moment gyro [J]. *Aerospace Control and Application*, 2008, 34(2): 23-28. (in Chinese)
- [4] 张成,王富东,李胜宁,等.基于 MATLAB/Simulink 的永磁同步电机矢量控制[J].苏州大学学报:工科版,2011,31(3):63-67.
ZHANG CH, WANG F D, LI SH N, *et al.*. The vector control of PMSM based on MATLAB/simulink [J]. *Journal of Soochow University Engineering Science Edition*, 2011, 31(3): 63-67. (in Chinese)
- [5] 许振伟.永磁交流伺服系统及其控制策略研究[D].浙江大学博士论文,2003.
XU ZH W. *Research on AC PMSM Servo System and Control Strategy* [D]. zhejiang: Graduate University of Zhejiang University, 2003. (in Chinese)
- [6] 郭劲,陈娟,任一平.光电跟踪系统低速干扰力矩动态补偿[J].电气传动和自动控制,2003,25(6):19-22.
GUO J, CHEN J, REN Y P. Dynamic compensation of Low-speed disturbances for optoelectronic tracking system [J]. *Electric Drive & Automatic Control*, 2003, 25(6): 19-22. (in Chinese)
- [7] 陈娟,张淑梅,黄艳秋,等.电机波动力矩的重复学习控制补偿[J].光学精密工程,2003,11(4):390-393.
CHEN J, ZHANG SH M, HUANG Y Q, *et al.*. Repetitive study control to compensate motor moment fluctuation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(4): 390-393. (in Chinese)
- [8] 邱晓波,窦丽华,单东升,等.光电跟踪系统自抗扰伺服控制器的设计[J].光学精密工程,2010,18(1):220-226.
QIU X B, DOU L H, DAN D SH, *et al.*. Design of active disturbance rejection controller for electro-optical tracking servo system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 220-226. (in Chinese)
- [9] 廉明,韩振宇,富宏亚.自抗扰技术在卫星姿态模拟系统中的应用[J].光学精密工程,2010,18(3):616-622.
LIAN M, HAN ZH Y, FU H Y. Application of active disturbances rejection control technique to satellite attitude simulation system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 616-622. (in Chinese)
- [10] 黄浦,葛文奇,李友一,等.航空相机前向像移补偿的线性自抗扰控制[J].光学精密工程,2011,19(4):616-622.
HUANG P, GE W Q, LI Y Y, *et al.*. Linear auto disturbance rejection control of forward image motion compensation in aerial cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 616-622. (in Chinese)
- [11] PAN J F, KWOK S C, CHEUNG N C, *et al.*. Auto disturbance rejection speed control of linear switched reluctance motor [C]. *Proceedings of Fortieth Industry Applications Conference Annual Meeting*, IEEE, USA, 2005: 2491-2497.
- [12] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]. *Proceedings of American Control Conference*, Colorado, IEEE, USA, 2003: 4989-4996.

作者简介:



陈茂胜(1985—),男,江苏盐城人,博士研究生,2007年于南京理工大学获得学士学位,主要从事控制力矩陀螺、卫星姿态控制的研究。E-mail: chenms0911@yahoo.com.cn



戴路(1980—),男,吉林长春人,副研究员,2009年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要从事卫星姿态控制的研究。E-mail: zjdailu@yahoo.com.cn



朴永杰(1984—),男,吉林梅河口人,助理研究员,2011年于中国科学院研究生院获得博士学位,主要从事星上综合电子学系统的研究。E-mail: pyj0314@163.com

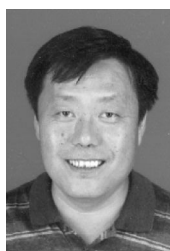


周美丽(1986—),女,内蒙通辽人,研究实习员,2011年于北京交通大学获得硕士学位,主要从事电机伺服控制的研究。E-mail: zhoumeili2011@126.com



曲宏松(1980—),男,辽宁大连人,副研究员,硕士生导师,2008年于中国科学院研究生院获得博士学位,现为主要从事空间相机 TDI CCD 成像系统方面的研究。E-mail: quhongsong@yahoo.com.cn

导师简介:



金光(1958—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事空间遥感光机总体研究工作。E-mail: jing@ciomp.ac.cn



张涛(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事航空侦察相机总体设计等方面研究。E-mail: ZhangT@ciomp.ac.cn