

文章编号 1004-924X(2009)04-0801-06

姿控飞轮控制系统设计及转速过零分析

武俊峰^{1,2}, 安 静^{1,2}, 徐春剑^{1,2}, 白 越¹, 黎海文¹, 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)

摘要: 为了缩短姿控飞轮控制系统的设计周期和快速验证设计方案的可行性及有效性, 在分析姿控飞轮电机本体数学模型的基础上, 结合该姿控飞轮控制系统所采用的加速控制、制动控制、换相控制, 建立了姿控飞轮控制系统模型。针对姿控飞轮的共性问题: 飞轮过零响应问题, 以速度模式下的指令响应为例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、电流、端电压以及力矩响应。分析结果表明: 在 0.025 Hz 的速度指令下, 调压调速结合反接制动方式具有更好的过零响应。

关 键 词: 姿控飞轮; 系统设计; 反接制动

中图分类号: V448.222; TH133.7 **文献标识码:** A

Design of control system of flywheel and analysis on approach to zero speed

WU Jun-feng^{1,2}, AN Jing^{1,2}, XU Chun-jian^{1,2}, BAI Yue¹, LI Hai-wen¹, WU Yi-hui¹, 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: To shorten the design period of control system of a satellite attitude control flywheel, and to verify the feasibility and effectiveness of design schemes, a control model based on a mathematics model for flywheels was established combined with acceleration techniques, reversal connection braking control and commutation control for the control system of flywheels. By taking the speed instruction in a speed control mode for an example, the speed responses, currents, terminal voltages and torques were analyzed by the variable voltage speed control method and the variable voltage speed control combined with reversal connection braking method. The results indicate that the latter has better performance than that of the variable voltage speed control method at a speed instruction of 0.025 Hz.

Key words: satellite attitude control flywheel; system design; reversal connection braking

1 引言

卫星姿态控制系统通过控制飞轮的加速或减速可以产生控制力矩,从而控制星体的姿态^[1-3]。这类飞轮的驱动和控制本质上就是带有惯性飞轮的无刷直流电机的驱动和控制。

传统姿控飞轮控制系统的设计方法是采用整体分析法,将飞轮电机的传递函数等值为直流电机,并从传递函数出发进行姿控飞轮控制系统的分析和设计^[4-11]。这样做忽略了飞轮电机固有的一些特性,如换相转矩脉动、逆变桥的拓扑结构对系统特性的影响等,修改控制算法或添加删除闭环也很不方便。为了克服这一不足,采用功能模块方式建模。这一方法可观性好,并且可以在原有的建模基础上添加删除闭环或改变控制策略,十分便捷。同时可以采用傅里叶变换(FFT)等方法求取频域特性,为电磁干扰分析提供依据。采用该方法不仅可以节省控制方案的设计周期,快速验证所设计的有效性,更可以通过修改系统参变量或人为加入不同扰动因素来考察不同实验条件下飞轮系统的动静态性能,也可以模拟不同控制策略的优劣,为分析和设计飞轮控制系统提供了有效的手段和工具。

当反作用轮的转速过零时,由于摩擦力矩忽然反向,会对卫星的姿态产生较大影响。文献[12]提出建立反作用轮在内的卫星系统的特征模型,并由此设计了控制律对摩擦补偿的方式改善转速过零时的响应,提高了卫星姿态控制的精度及稳定度。文献[13]提出一种具有鲁棒性的非线性控制方法,对于摩擦力矩的不确定性有较强的鲁棒性。本文由飞轮电机三相绕组的等效数学模型出发,结合飞轮姿控系统所采用的加速控制、制动控制、换相逻辑等,建立了姿控飞轮控制系统的模型,并分析了在给定速度指令下,系统的速度、电流、力矩、电机端电压的响应曲线。以速度模式下的指令响应为例,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,说明调压调速结合反接制动方式具有更好的过零

响应。

2 飞轮控制系统建模

2.1 飞轮电机本体模块建模

系统中采用的是梯形波反电动势直流无刷电动机,在换相逻辑的控制下,转子与定子通过永磁场和电磁场相互作用,从而使转子发生旋转。由三相定子的电压方程表达式可得:

$$U_a = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + e_a + U_n, \quad (1)$$

$$U_b = L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + e_b + U_n, \quad (2)$$

$$U_c = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + e_c + U_n, \quad (3)$$

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; L, R 分别为各相绕组的电阻和电感。等效模型为:

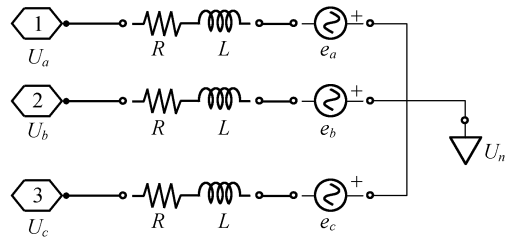


图 1 三相绕组等效模型

Fig. 1 Equivalent model of three-phase winding

永磁无刷直流电动机的电磁转矩是由定子绕组中的电流与转子磁钢产生的磁场相互作用而产生的定子绕组产生的电磁转矩,表达式为

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega}, \quad (4)$$

式中, ω 为转子角速度(rad/s)。

又有:

$$e_a = k_e \phi_a \omega, e_b = k_e \phi_b \omega, e_c = k_e \phi_c \omega, \quad (5)$$

其中, k_e 为反电动势系数, ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c 为单位电动势。可用Look-up Table方法建立。

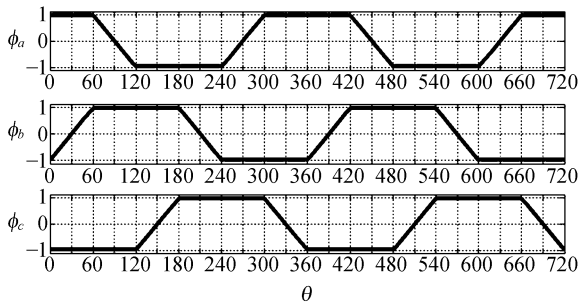


图 2 单位电动势 ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c

Fig. 2 Electromotive force ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c

则电磁转矩为:

$$T_e = k_e (\phi_a i_a + \phi_b i_b + \phi_c i_c), \quad (6)$$

等效模型为:

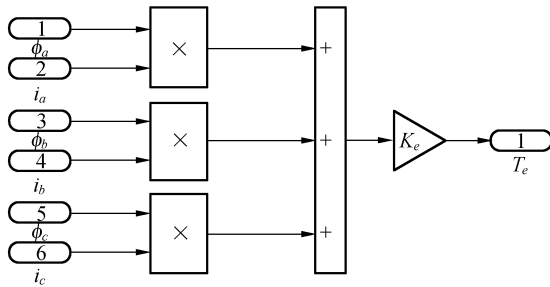


图 3 力矩等效模型

Fig. 3 Equivalent model of torque

则运动方程为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_L - \text{sign}\left(\frac{d\omega}{dt}\right) T_f, \quad (7)$$

式中, J 为转子转动惯量, 负载转矩 T_L , 摩擦力矩为 T_f :

$$T_f = B\omega, \quad (8)$$

式中, B 为粘滞摩擦系数。

模型如下(见图 4):

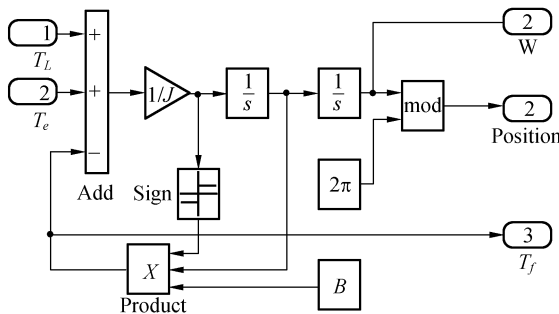


图 4 运动方程等效模型

Fig. 4 Equivalent model of motion equation

综合以上等效模型可得到飞轮电机的本体功能模块。

2.2 姿控飞轮加速、制动方式设计

普通的永磁无刷直流电机多采用 PWM 模式驱动, 具有效率高的优点, 但是, 它是通过调节占空比来调节绕组上的电流的。电流较小时, 占空比较小, 电流波动很多; 取电流作为反馈量时, 较大的纹波使系统性能变差, 同时这种方式电流检测麻烦, 需要使用电流传感器, 电流传感器体积大, 难以在空间装置中采用。卫星在外层空间所受到干扰力矩也有自身的特点, 这就决定了卫星姿态控制系统中的电机控制与普通的电机控制有所不同。针对姿控飞轮的使用环境, 采用端电压 PAM 全桥驱动方式, 可以减小电机的非换相转矩波动。为了精确地获得反作用力矩, 减速时飞轮多采用反接制动的方式。姿控飞轮控制系统的设计如下:

飞轮调压调速方式, 由上位机发出的速度指令 n_{ref} 的幅值与速度反馈值 n 的幅值进行比较形成误差信号。该信号经过 PI 控制器后形成端电压控制信号, 调节电机端电压的大小, 从而改变电机绕组电流的大小, 即改变飞轮速度的大小。

飞轮调压调速结合反接制动方式, 是在飞轮调压调速的基础上, 当发出的速度指令小于当前反馈速度时, 可以通过改变电机的换向信号的相位, 产生反转的换向逻辑, 从而绕组中电流反向, 产生制动电磁力矩, 使飞轮减速, 同时通过 PAM 方式控制桥臂电压, 电机此时呈现出双极性控制特性。姿控飞轮控制系统模型如图 5 所示。

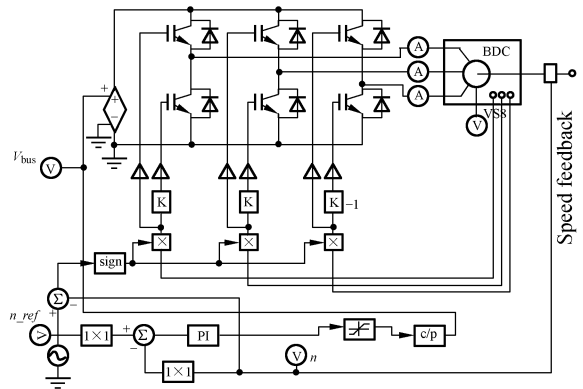


图 5 控制系统模型

Fig. 5 Model of control system

姿控飞轮参数为实验样机参数,可由实验测得,如表 1 所示。单相绕组电阻(Ω)、电感(mH)、反电动势系数($V/(kr/min)$)、粘滞摩擦系数($N \cdot s/rad$)、转动惯量($kg \cdot m^2$)。

表 1 飞轮参数

Tab. 1 Simulation parameters of flywheel

R	L	k_e	B	J
0.5	0.1	6.7	0.000 01	0.023

3 姿控飞轮控制系统响应分析

3.1 调压调速方式下速度指令的响应分析

由于空间中多为周期性干扰,假定速度指令为 0.025 Hz, ± 500 r/min。

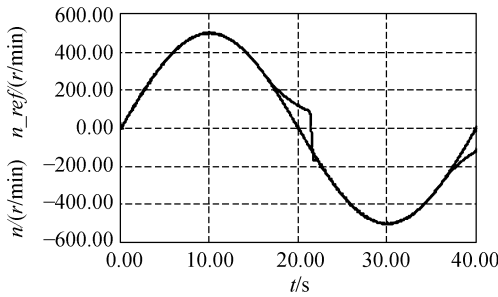


图 6 速度响应

Fig. 6 Speed response

从图 6 可以看出,调压调速方式下,在转速过零时飞轮转速发生失调,飞轮发生抖动,产生较大的误差。

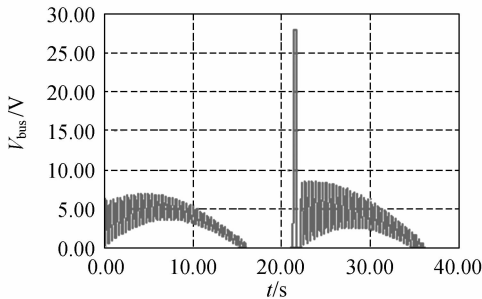


图 7 端电压响应

Fig. 7 Response of terminal voltage

从图 7 看到,在 17~22 s 这段时间,由于采用调压方式,即便电压降到 0,速度也很难响应。

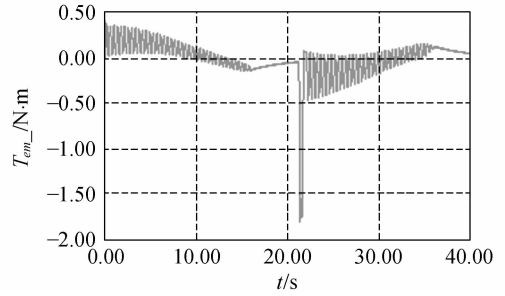


图 8 力矩响应

Fig. 8 Torque response

图 8 为在速度指令下的转矩响应,在 22 s 处产生的较大的转矩波动。由于控制模型中没有加入限流环节,电流峰值较大,实际应用中可加入限流环节。图 9 给出了电流响应的局部放大图。

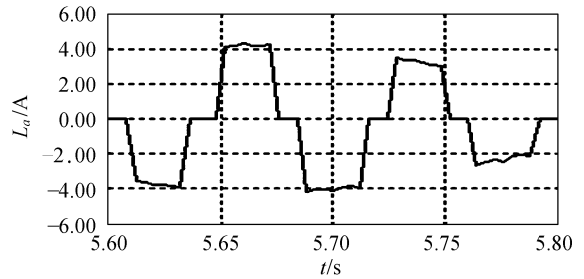


图 9 电流响应局部放大图

Fig. 9 Local amplification of current response

3.2 结合反接制动控制方式响应分析

当结合反接制动方式时,在转速过零时,速度的跟踪曲线明显得到改善,如图 10 所示。

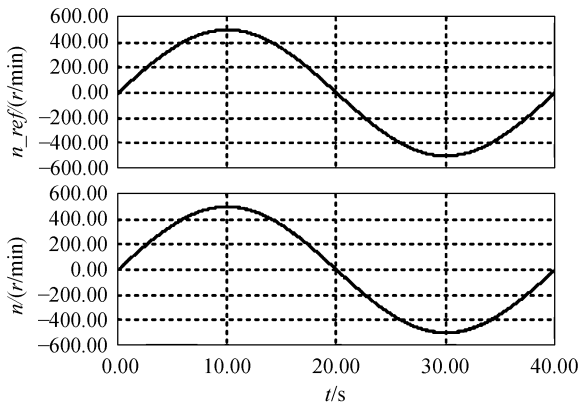


图 10 速度响应

Fig. 10 Speed response

4 结 论

本文根据姿控飞轮控制系统的要求,设计了飞轮控制系统,并针对飞轮转速过零问题,研究了调压调速控制方式与调压调速结合反接制动方式两种控制方式下的飞轮速度、电流、端电压以及力矩响应。通过分析,得出如下结论:采用调压调速

结合反接制动方式,飞轮在过零时呈现出双极性控制方式,相当于在伺服系统中加入一个高频颤动信号来提高系统克服摩擦的能力,达到提高低速特性的目的。在转速过零时,速度的跟踪曲线明显得到改善。结果表明:0.025 Hz 的速度指令下,调压调速结合反接制动方式具有更好的过零响应。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] 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)
- [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 SH 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] 李慧,沈湘衡.光电经纬仪的机电动力学建模与耦合[J].光学精密工程,2007,15(10):1577-1582.
LI H, SHEN X H. Electromechanical dynamic modeling and coupling for optoelectronic theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10):1577-1582. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 王昊,杨宇,田蔚风,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):5-37. (in Chinese)
- [8] 杜坤梅,李铁才.惯性飞轮电动力矩伺服控制系统[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)
- [9] KANG B H, KIM C J, MOK H S, *et al.*. Analysis of Torque Ripple in BLDC Motor with Commutation Time [C]. *Proceedings of IEEE International Symposium On Industrial Electronics*, 2001:1044-1048.
- [10] CARLSON R, LAJOIE-MAZENC M, C. DOS S J. Fagundes. Analysis of torque ripple due to phase commutation in brushless dc machines [J]. *IEEE transactions on industry application*, 1992, 28(3):632-638.
- [11] 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)

- [12] 丁建钊. 一种抑制反作用轮低速摩擦对卫星姿态扰动的方法[J]. 空间控制技术与应用, 2008, 34(2): 55-58.

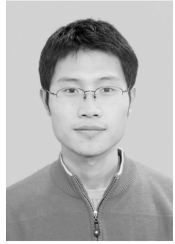
DING J ZH. A Method for Reducing Reaction Wheel Low Speed Friction Disturbance to Satellite Attitude[J]. *Aerospace Control and Application*.

2008, 34(2): 55-58. (in Chinese)

- [13] 费从宇, 李英堂. 飞轮转速过零时卫星姿态的非线性控制[J]. 航天器工程, 2000, 9(1): 37-41.

FEI C Y, LI Y T. Flywheel cross zero rating nonlinear control of satellite attitude [J]. *Spacecraft Engineering*, 2000, 9(1): 37-41.

作者简介:



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



安 静(1980—), 男, 吉林人, 博士, 2004 年于长春工业大学获学士学位, 2007 年于长春工业大学获硕士学位, 主要研究方向为空间飞轮电磁兼容技术。E-mail: anjingcoward@tom.com

徐春剑(1983—), 黑龙江人, 硕士, 2005 年于吉林大学获学士学位, 主要研究方向为 FPGA 在空间飞轮中的应用。E-mail: xcj0419@sina.com

白 越(1979—), 男, 辽宁人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为空间飞轮实用技术和空间摩擦及润滑学。E-mail: baiy@ciomp.ac.cn

黎海文(1976—), 男, 江西人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为微型生化分析仪、集成微光机电系统方面的研究。E-mail: lihaiwen2004@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 年毕业于天津科技大学获学士学位, 1991 年和 1996 年分别于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获工学硕士和博士学位。主要从事微光机电系统 (MEMS) 和精密机电系统方面的研究。E-mail: yihuiwu@ciomp.ac.cn



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