文章编号:1673-5005(2007)01-0154-05

单轴储能及姿态控制系统建模与仿真研究

刘治华1, 王春丽2, 李 成1, 杨杰伟1, 韩邦成3

(1. 郑州大学 机械工程学院,河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 管理工程系,河南 郑州 450001;
 3. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100083)

摘要:为了验证在同一轴上安装两个反向旋转飞轮能够同时完成能量存储与姿态控制问题,对一种由偏置动量轮构 成的集成化单轴储能及姿态控制系统进行了理论分析及仿真研究。根据实验系统构成及其储、放能过程的特点,推 导了系统的数学模型,给出了相应的控制算法,并以 Matlab 软件下的 Simulink 为平台,对系统在充、放电过程中气浮 转台的角度调节过程和上下飞轮转速变化过程进行了仿真分析。仿真结果表明,利用两个反向旋转飞轮能够在控 制转台角度的同时完成储、放能,证明了控制方案的有效性与可行性,为进一步研究储能及姿态控制系统提供了理 论和设计依据。

关键词:控制系统;集成储能;姿态控制;数学模型;仿真 中图分类号:0231 文献标识码:A

Modeling and simulation of single axis energy storage and attitude control system

LIU Zhi-hua¹, WANG Chun-li², LI Cheng¹, YANG Jie-wei¹, HAN Bang-cheng³

(1. School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Department of Management Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

3. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering in Beijing University of Aeronautics and

Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to demonstrate that it is possible to use two reverse rotating flywheels to simultaneously provide energy storage and attitude control in a single axis, a kind of integrated energy storage and attitude control system composed of bias momentum wheels was researched by theory analysis and simulation. Based on the experimental system and its characters in energy storage and release process, the system models during the energy storage and release were obtained and their corresponding control algorithms were given. In the energy storage and release process of the system, the angle regulation of air table and the speed variable of double flywheels were simulated on the Matlab/Simulink platform respectively. The simulation results show that the energy storage and release could be realized with double flywheels during the angle regulation, which verifies the feasibility and effectiveness of the control scheme, and provides the theory and design basis for further research. Key words: control system; integrated energy storage; attitude control; mathematical model; simulation

集成化飞轮储能与姿态控制系统(IPACS)是以 高速旋转飞轮储存的能量和角动量来代替卫星中的 化学电池储能系统和姿态执行元件,用电动/发电机 和电子控制设备来控制能量的输入和输出^[1-2]。在 能量变化的同时,利用动量矩的变化进行姿态控制, 从而实现卫星的轻量化和长寿命,使卫星储能系统 具有高比能、高效率、高可靠性和宽工作温度范围的 优点^[3-5]。Flantley 研究了利用4个动量飞轮组成四 面体阵列的飞轮储能与姿态控制系统,第一次在动 量飞轮中引入了 IPACS 的概念^[6]。Rodriguez 等对 飞轮储能系统进行了详细的研究,并简要提到不同 的速度控制可以提供姿态控制功能。美国的 NASA

收稿日期:2006-07-09

基金项目: 国家"863"计划(2002AA715061)和中国科学院预研资助项目(42201030108)

作者简介:刘治华(1971-),男(汉族),河北栾城人,讲师,博士,研究方向为微光机电集成系统。

成立了专门的研究小组进行 IPACS 的研究,目前正 在开发利用两个飞轮进行能量管理及单自由度姿态 控制系统的试验研究,基本上处在研究开发阶段,并 没有走向实用化^[2]。从理论上来说,集成化飞轮储 能及姿态控制系统有三正交、一斜交,双 V 形安装 及三轴成对反转飞轮配置等3 种方案^[6]。为了证明 飞轮配置方案的可行性,笔者以三轴成对反转飞轮 配置方案中的单轴为例,采用理论分析和仿真相结 合的方法,对系统模型建立及其工作过程等方面进 行研究。

1 系统基本构成及其工作原理

单轴飞轮储能与姿态控制系统总体结构框图如 图1所示。从图中可以看出,该系统由单自由度气 浮转台、上飞轮系统、下飞轮系统、真空装置及系统 控制部件等组成。以单自由度气浮转台模拟卫星的 单自由度旋转运动,飞轮采用同轴结构,用角位置编 码器作为单轴姿态敏感器,真空罐模拟卫星运转的 真空环境,直流可调稳压电源模拟太阳能电池阵列 给系统供电,两个性能相同的直流无刷电动/发电机 控制两个结构及参数基本相同的飞轮来完成系统的 储能及单轴姿态控制^[7]。

根据卫星系统的工作需要,单轴飞轮储能及姿态控制系统是一个周期性的工作系统,通过探测太阳能阵列电流是否满足负载需要来判断系统工作在日阳期、日阴期还是过渡阶段,而系统主要工作在日阳期和日阴期过程。





(1)日阳期。根据星上负载,太阳能电池阵列 需要调节 DC 总线电压,给负载供电的同时以充电 流设定点对飞轮组进行充电。

实验系统中,通过 DC 稳压电源给飞轮组充电, 上、下飞轮反向旋转,此时电机工作在电动机状态, 将电能转化为机械能。系统首先根据飞轮储能情况 和单自由度气浮转台指向精度分别计算充电控制电 压设定值与实际充电控制电压的偏差和姿态偏差, 其值分别通过单片机控制系统中的充电控制电压调 节器和姿态调节控制器模块进行调节,然后再经过 飞轮储能/姿态控制解耦器分别计算两个电机系统 进行充电的控制电压值和输出扭矩,根据充电控制 电压对两个飞轮分别进行充电。当两个飞轮都没有 达到极限转速时,重复飞轮储能过程;而当两个飞轮 中的任意一个达到极限转速时,储能过程结束。在 系统储能的同时,根据两个电动/发电机的输出扭矩 调节单自由度气浮转台的姿态,判断单自由度气浮 转台的姿态是否满足指向精度要求,如果不满足则 重复姿态调节过程,如果满足指向精度要求则姿态 调节过程结束。

(2)过渡期。太阳能电池阵列提供的电流不能 同时满足负载和对飞轮组充电的需要,这时由飞轮 组调节 DC 总线电压并控制卫星姿态。

实验系统中,飞轮组通过能量的交换与控制,输

出满足指向精度要求的动量矩,从而实现单自由度 气浮转台旋转角度的调节与控制。在飞轮组进行能 量交换过程中,上下飞轮系统根据单自由度气浮转 台的指向精度要求分别工作在储能和放能状态,系 统首先根据飞轮储能情况和单自由度气浮转台指向 精度分别计算充电控制电压的偏差和姿态偏差,其 值分别通过单片机控制系统中的充电控制电压调节 器和姿态调节控制器模块进行调节,然后再经过飞 轮储能/姿态控制解耦器分别计算两个电机系统进 行充电的控制电压值和输出扭矩,根据充电控制电 压对飞轮组进行充、放电控制,从而实现单自由度气 浮转台旋转角度的调节,同时监测 DC 总线电压,如 果总线电压小于设定值,则过渡过程结束。

(3)日阴期。若太阳能电池阵列提供的电流不 能满足负载所需电流,系统切换为放电状态,由飞轮 系统释放能量给星上负载供电。

实验系统中,以功率电阻模拟星上负载,系统工 作在恒功率放电控制模式,飞轮不断减速,电机作为 发电机运行,电机的输出电压与频率随转速变化不 断变化,发出的电能先整流成直流电,再由稳压装置 变换成稳定的直流电后给负载供电。系统首先计算 气浮转台角度偏差、飞轮系统转速和总线电压,如果 总线电压小于设定电压值,则放电过程结束;如果等 于设定电压值,则根据气浮转台角度偏差计算飞轮 系统放电控制电压,然后通过差动控制器控制两飞 轮系统的放电深度和放电速度,通过两飞轮系统的 输出扭矩来调节转台角度偏差,直至单轴转台满足 指向精度要求为止,姿态调整过程结束。

2 系统建模与控制

由前述系统构成及工作原理可知,集成化单轴 飞轮储能及姿态控制实验系统包括气浮转台、上下 飞轮系统、永磁无刷电机及其驱动控制板和可控差 动恒流源等。

2.1 储能过程

在飞轮储能及姿态调整过程中,系统工作于恒 功率充电模式,各部分传递函数如下。

(1)气浮转台系统。模拟卫星的单自由度气浮转台在进行姿态角调节过程中,可以建模为一个二阶系统,其动力学方程为

$$J_0 \frac{\mathrm{d}^2 \theta(t)}{\mathrm{d}t^2} + c \frac{\mathrm{d}\theta(t)}{\mathrm{d}t} + k\theta = \sum T. \tag{1}$$

式中, J₀ 为气浮转台系统绕中心旋转轴的转动惯 量; θ 为转台的转动角度; c 为转台阻尼系数; k 为转 台刚度; ΣT 为转台所受扭矩之和。

由于在该系统中阻尼和刚度对转台角度的影响 很小,可以忽略不计。对式(1)进行拉氏变换并设 初始条件为零,可以得到

$$\theta(s)/T(s) = 1/(J_0 s^2).$$
 (2)

(2)上、下飞轮系统。电机转子及飞轮的动力 学方程为

$$T - T_1 - B\omega = J_1 d\omega/dt.$$
 (3)

式中,**T**为电磁转矩;**T**₁为负载转矩;**J**₁为电机转子 及飞轮转动惯量;**B**为粘滞摩擦和磁滞涡流阻尼系 数;ω为转子角速度。

由于系统工作在真空环境下,阻力矩可以忽略 不计,且无负载转矩,而由摩擦和磁滞产生的转矩相 对电磁转矩很小,故对式(3)进行拉氏变换并化简 得

$$T(s)/\omega(s) = J_1 s. \tag{4}$$

(3) 永磁无刷直流电机及其驱动控制板。在本 控制系统中,永磁无刷直流电机及其驱动控制板的 传递函数可以通过实验的方法来建立,以控制电压 为输入,转速为输出,一般带有电机的飞轮可以表示 为一个二阶系统,有两个极点。在本研究中,为满足 储能的需要,飞轮的转动惯量做得很大,电机的电 感、电阻比较小,导致两个极点之间相差很大(超过 100 倍),所以将整个飞轮部分简化为一阶惯性环 节,可以表示如下^[8]:

 $\omega(s)/V(s) = K_{\rm m}/(T_{\rm m}s+1).$

式中,V为输入控制电压;K_m为电机的增益常数。

综上所述,可以得到系统储能与调姿过程的开 环传递函数如下:

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{2K_m J_1}{J_0 s (T_m s + 1)}.$$

式中,J₁为电机转子及飞轮的转动惯量;T_m为电机 的机电时间常数。系数2表示上、下电机的飞轮转 速变化,一增一减,同时作用。

系统在储能过程中采用比例 - 积分控制和前馈 控制(PI+FF)相结合的方法。PI 控制是典型的闭 环控制,主要是基于偏差进行控制。PI 控制的缺点 是系统进行调节之前,必须等待偏差信号的出现。 同时 PI 控制的增益越大,系统对于偏差反应越快, 但是增益过大,将导致系统不稳定或者产生不希望 的系统噪声。为了克服 PI 控制的不足,采用 PI 加 前馈控制的方法,PI 控制部分确保转台稳定于期望 的角度,而前馈控制部分确保 PI 控制器低增益情况 下实现转台位置的快速调节,因此储能过程中系统 采用 PI 加前馈控制的闭环传递函数为

 $\phi_1(s) = \frac{1}{2} \cdot \frac{J_0 T_m T_i s^3 + J_0 T_i s^2 + 2J_1 K_m T_i K_p s + 2J_1 K_m K_p}{J_0 T_i T_m s^2 + (J_0 T_i K_m K_p + J_0 T_i) s + J_1 K_m K_p}$ 式中, K_n 为比例系数; T_i 为积分时间常数。

2.2 放能过程

系统在放能与姿态调整过程中是通过调节双路 差动控制器的控制端电压来实现的。控制电压与电 流呈线性关系,设比例系数为 α ,电机放电效率为 η ,飞轮的角加速度为 ε ,差动控制电压为V',放电电 阻为R,放电电流和为 $2i_0$,则可以得到能量释放时 飞轮部分的传递函数为^[1]

 $\varepsilon(s)/V'(s)=2i_0R/(\alpha\eta J_1\omega_1).$

以飞轮的角加速度为输入,转台的角度为输出, 得到传递函数为

 $\theta(s)/\varepsilon(s) = J_1/(J_0s^2).$

因此,系统在放能与姿态调整过程的开环传递 函数为

$$\theta(s)/V'(s) = \frac{2i_0R}{\alpha\eta J_1\omega_1} \cdot \frac{J_1}{J_0s^2} = \frac{2i_0R}{\alpha\eta J_0\omega_1s^2}.$$

在放能过程中,根据气悬浮转台本身欠阻尼的 特性,采用 PD 控制,比例微分具有提前控制的作 用,其控制效果取决于微分时间常数 $\tau_{\rm D}$ 。设 PD 控 制器的比例项和微分项系数分别是 $K_{\rm P}$ 和 $\tau_{\rm D}$,由此 可以得到系统在放能过程中的闭环传递函数为

$$\phi_2(s) = \frac{2\tau_{\rm D}i_0Rs + 2K_{\rm P}i_0R}{\alpha\eta J_0\omega_1s^2 + 2\tau_{\rm D}i_0Rs + 2K_{\rm P}i_0R}.$$

3 系统仿真分析

对系统工作在日阳期及日阴期过程中转台对阶 跃变化信号的响应进行了仿真。系统的转动惯量为 $J_0 = 1.65 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,上、下电机转子及飞轮的转动惯 量为 $J_1 = J_2 = 0.023 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,飞轮充电电压为48 V, 飞轮放电电压为24 V,角度阶跃信号为1 rad,负载 电阻为10 Ω 。系统在充电过程中的转台角度调节 仿真演示了转台在角度阶跃信号下的响应,表示卫 星以命令角度进行姿态调节。角度命令 θ ·在1s时 刻为1 rad 阶跃信号,转台角度调节有真结果如图2 所示。在约52 s 时转台角度调节到设定点。相应 的飞轮转速变化曲线如图3 所示。在1 s 以前两飞 轮以充电控制电压设定值控制电流充电,在1 s 时 刻开始进行转台角度调节,为获得调节转台角度所 需转矩两飞轮系统交替以更大的加速度上升,调节 过程结束后仍以充电控制电压设定值控制飞轮系统







系统在放电时的转台角度调节仿真演示了转台 对角度阶跃信号的响应,代表卫星在放电过程的姿 态调节。角度调节命令 θ^* 在5s时刻为1 rad 阶跃 信号,转台角度调节的仿真结果如图4 所示。



图4 放电时转台角度调节曲线

在5s时刻对转台角度进行调节,在50s左右 调节到设定点。相应的飞轮转速变化曲线如图5所 示。由于放电时负载电流来自于飞轮,所以其速度 曲线整体上呈下降趋势。



图5 角度调节时的飞轮转速曲线(放电)

4 结束语

研究了一种集成化飞轮储能及姿态控制方案。 通过对单轴储能及姿态控制系统总体结构、工作原 理和控制算法进行分析,建立了系统的动力学模型, 对系统在充、放电过程中气浮转台的角度调节过程 和飞轮转速变化过程进行了仿真。仿真结果表明, 利用两个反转飞轮能够在控制转台角度的同时进行 能量储、放,证明了一体化单轴飞轮储能及姿态控制 方案的有效性及可行性,这为进一步研究和设计集成 化储能及姿态控制系统提供了理论基础和设计依据。

参考文献:

- [1] 吴一辉,贾宏光,白越,等.飞轮储能与姿态控制一体 化技术研究报告[R].长春:中国科学院长春光学精
 · 密机械与物理研究所,2004.
- [2] PETER E. KASCAK, RALPH H, JANSEN, et al. Single axis attitude control and DC bus regulation with two flywheels[C]. 37th IECEC 2002;214-221.
- [3] 夏永江,张云,牛容.卫星储能/姿控一体化飞轮构型 及其误差分析[J].上海航天,2005,22(1):19-23.
 XIA Yong-jiang, ZHANG Yun, NIU Rui. Analysis on configuration and errors of integrated power and attitude control flywheel in satellite [J]. Aerospace Shanghai, 2005,22(1):19-23.

[4] 李松松,段秋实,吴一辉.遗传算法在碳纤维复合材料高速转子优化设计中的应用[J].石油大学学报:自然科学版,2003,27(3);80-83.

LI Song-song, DUAN Qiu-shi, WU Yi-hui. Application of genetic algorithm to optimization design of high-speed rotor with carbon fiber composite material [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003,27(3):80-83.

[5] 刘治华,贾宏光,白越,等.集成化储能与姿控系统中 飞轮高精度测速方法研究[J].吉林大学学报(工学 版),2006,36(增1):99-104.

LIU Zhi-hua, JIA Hong-guang, BAI Yue, et al. High precision speed measurement method of flywheels in integrated energy-storage and attitude-control system [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006, 36(s1):99-104.

- [6] 韩邦成. 单轴飞轮储能/姿态控制系统的仿真及其实 验研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物 理研究所, 2004.
- [7] 刘治华,白越,黎海文,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 Zhi-hua, BAI Yue, LI Hai-wen, et al. Analysis on errors of single axis double function flywheels integrated power and attitude control system [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(1): 127-132.

[8] 贾宏光,赵华兵,白越,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(5):504-509.

> JIA Hong-guang, ZHAO Hua-bing, BAI Yue, et al. Single axis double flywheels integrated power and attitude control system [J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(5); 504-509.

> > (编辑 沈玉英)

中国石油大学(华东)一项目获得山东省高新技术自主创新工程专项支持

山东省科技厅下达 2006 年高新技术自主创新工程专项计划,中国石油大学(华东)化学化工学院承担 的"重质油高效加工新技术开发研究"获资助经费 100 万元。

山东省高新技术自主创新工程主要是通过培育具有自主知识产权的高新技术支柱产业、骨干企业和知 名品牌,加快山东半岛高新技术产业带创新发展,围绕全省重点发展的7个产业链,加强关键共性技术的研 究开发,发展壮大具有优势和特色的高新技术支柱产业,为全省经济社会发展提供强有力的支撑。

(摘自中国石油大学(华东)校园网)