

文章编号 1004-924X(2007)02-0243-05

储能/姿控一体化飞轮能耗试验研究

白 越^{1,2}, 杨作起^{2,3}, 黎海文^{1,2}, 贾宏光², 吴一辉^{1,2}, 宣 明²

(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 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 3. 中科院研究生院, 北京 100049)

摘要:给出了储能/姿控一体化飞轮在高速运转下能量损耗测试原理及方法,建立了飞轮能耗试验系统,进行了能耗试验,分析了飞轮能耗的组成及其影响因素,在试验的基础上,给出了降低飞轮系统能耗的方法。飞轮能耗包括机械损耗、风阻损耗及电损耗,其中比重最大的部分为轴承摩擦导致的机械损耗。提高真空度可以有效降低风阻损耗及电损耗,但机械损耗不受影响,机械损耗随转速升高而增大。在 10 000 r/min 以下飞轮能耗较低,飞轮具有较好的性能,当转速高于 10 000 r/min 后机械损耗急剧上升,需要采用磁轴承支撑来降低机械损耗。

关键词:储能/姿控一体化;能耗;试验研究;飞轮

中图分类号:TH133 **文献标识码:**A

Experimental study on power loss of integrated energy storage and attitude control flywheel

BAI Yue^{1,2}, YANG Zuo-qi^{2,3}, LI Hai-wen^{1,2}, JIA Hong-guang², WU Yi-hui^{1,2}, XUAN Ming²

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China*; 2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China*;
3. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The calculating method and the testing theory of power loss experiment were introduced, the flywheel power loss testing system was presented. By analyzing the component and influencing element of power loss in experiment, a approach of reducing power loss was given. Power loss of flywheel is composed of mechanical loss, wind loss and electric loss, in which mechanical loss caused by bearing friction is the most proportion. Our results show that the losses of wind and electricity can be decreased by enhancing vacuum degree, However, the mechanical loss is not influenced and it increases with the speed rising. When the speed is less than 10 000 r/min, the flywheel is better in capability because of the low mechanical loss. While the speed exceeds 10 000 r/min, the mechanical loss sharply increases. So the magnetic bearing is used to decrease the mechanical loss.

Key words: integrated energy storage and attitude control; power loss; experimental study; flywheel

收稿日期:2006-04-22;修订日期:2006-11-18.

基金项目:国家 863 项目(No. B02X04Z);中科院“十五”预研项目(No. 42201030108);长春光机所青年基金项目(No. O59X12Q050)

1 引言

现代卫星技术的发展要求卫星具有尽量高的功能密度,利用飞轮同时完成能量供给与姿态控制可以有效减轻卫星体积、重量,进而提高卫星功能密度。飞轮储能/姿态控制一体化的基本原理^[1,2]是由电动/发电机驱动飞轮升速,电能转变为机械能存储,当负载需要电能时,飞轮降速,此时电动/发电机工作于发电状态,将飞轮机械能转变为电能,飞轮的升、降速实现了电能的存储和释放。同时,飞轮的升、降速对应着电动/发电机驱动力矩的变化,而驱动力矩反作用于卫星,影响其姿态。因此,通过一定的解耦控制,飞轮同时完成能量供应和姿态控制要求^[3]。随着复合材料、磁悬浮等相关技术的突破,飞轮储能技术正以其储能密度高、体积小、质量轻、充电快、寿命长、无任何废气废料污染等突出优势受到国内外研究的重视^[4-6]。

对于飞轮系统来说,其能量损耗主要由三部分组成:机械损耗、电损耗以及风阻损耗^[7],其中机械损耗为电机支撑轴承的摩擦损耗,电损耗包括电机的铜损和铁损,风阻损耗为转子与真空室内残余空气间的摩擦损耗。飞轮储能除了要求高的储能密度外,还要求在储能和放能过程中有高的能量转换效率,也就是要求飞轮具有高的使用效率。飞轮的能量损耗主要受其工作状态和工作条件影响,本文在研制的单轴储能/姿控一体化飞轮演示系统相关试验结果的基础上,分析一体化飞轮能量损耗的影响因素及降低能量损耗的途径和方法,为一体化飞轮的进一步实用化提供理论及实验依据。

2 一体化飞轮能耗试验系统

2.1 飞轮构成及其动平衡

图 1 为飞轮结构示意图,飞轮由惯量转子、电动/发电机、角速度传感器三部分组成。能量密度为 79.8 whr/kg。惯量转子为碳纤维/环氧树脂复合材料周向缠绕而成。电动/发电机在 45 000 r/min 转速下理论直流无刷电机,通过一体化设计使电机具有电动与发电双功能,通过控制器根据需要在电动与发电状态间切换。角速度

编码器为 8 位光电编码器,在低速与高速段分别采用不同的测速方法,其可以使转速测量具有优于 1% 的测量精度。

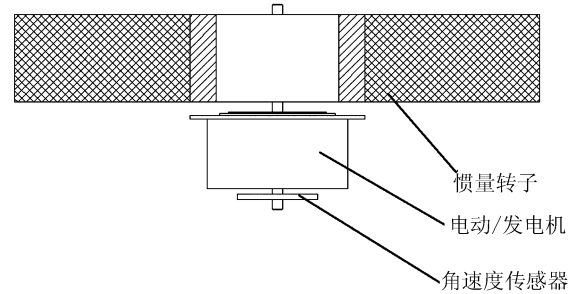


图 1 飞轮结构示意图

Fig. 1 Flywheel configuration sketch

飞轮转子材料为碳纤维/环氧树脂复合材料,在缠绕成型过程中容易产生较大的不平衡量。飞轮在工作过程中径向载荷主要来源于不平衡量导致的惯性离心力,该载荷也是引起系统振动的激振源。为了降低飞轮运行时的振动,应该尽量减小转子的不平衡量。对通用动平衡机进行改进,飞轮通过平衡轴支撑在平衡机弹性支撑上,由橡胶带驱动飞轮升速到 2 500 r/min,最终剩余不平衡量小于 5 mg,平衡精度达到了 G0.4 级。两个飞轮的平衡结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 1[#] 飞轮动平衡试验结果

Tab. 1 Testing result of 1[#] flywheel dynamic balance

参数	数值
原始不平衡量(mg)	550
平衡转速(r/min)	2 500
平衡半径(mm)	90
剩余不平衡量(mg)	3.12
平衡等级	G0.4

表 2 2[#] 飞轮动平衡试验结果

Tab. 2 Testing result of 2[#] flywheel dynamic balance

参数	数值
原始不平衡量(mg)	564
平衡转速(r/min)	2 500
平衡半径(mm)	90
剩余不平衡量(mg)	3.41
平衡等级	G0.4

2.2 能耗试验系统

为了进行飞轮系统能耗试验,研究影响飞轮能耗的因素,建立了如图2所示的飞轮能耗试验系统。试验系统包括:惯性轮本体、一体化的电机/发电机、真空室、负载、电力电子转换器、速度传感器、供电电源以及电量测量仪器。在储能模拟试验过程中,电能通过电力电子转换器驱动电动机升速,将电能转换成飞轮的旋转动能,实现了电能向机械能的转换;在放能模拟试验过程中,飞轮转速下降,此时电机做发电机运行,电能通过电力电子转换器给负载供电,实现了机械能向电能的转换。

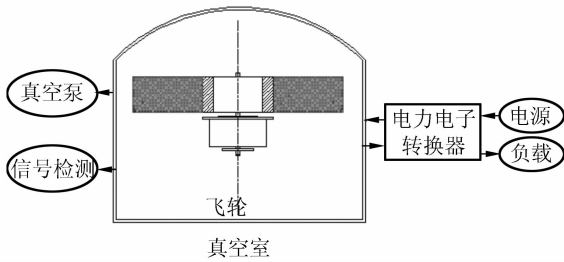


图2 飞轮能耗试验系统

Fig.2 Flywheel energy loss testing system

3 试验结果及分析

3.1 测试原理

3.1.1 机械损耗及风阻损耗的测试原理

飞轮在空载降速过程中其功耗包括轴承的摩擦功耗和转子的风阻功耗。测试原理如下:

飞轮空载降速过程由于轴承摩擦损耗和转子风阻损耗导致转速降低动能损失,测量转速由 ω_1 降到 ω_2 ,所需时间为 Δt ,此过程动能损失

$$\Delta E = \frac{1}{2} I_p (\omega_1^2 - \omega_2^2), \quad (1)$$

式中 I_p —飞轮转子轴向转动惯量

当 Δt 取一小时间段时

$$\Delta E \approx \frac{1}{2} I_p \omega_1 (\omega_1 - \omega_2), \quad (2)$$

空载降速损失功率为

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{I_p \omega_1 (\omega_1 - \omega_2)}{\Delta t}, \quad (3)$$

保持真空度 p_i ,将飞轮升速到需要的转速 ω_i 点,关闭电源,测试真空度 p_i 下转速 ω_i 处的降速损失功率 P_i ;改变真空度为 p_{i+1} ,重复上述过程

测试该真空度下转速 ω_i 处的降速损失功率 P_{i+1} ;重复几次上述过程,以真空度为横坐标,损失功率为纵坐标,可得到转速 ω_i 下的损失功率-真空度曲线,其拟合曲线与纵轴的交点的纵坐标即为转速 ω_i 下的无风阻损耗的空载损耗功率 P_0 (仅轴承摩擦损耗功率)。则转速 ω_i 下的轴承摩擦损耗功率为 $P_{0,i}$,真空度 p_i 转速 ω_i 下的转子风阻损耗功率为

$$P_{\omega_i} = P_i - P_{0,i}, \quad (4)$$

转速 ω_i 下的轴承摩擦力矩

$$T_i = \frac{P_{0,i}}{\omega_i}, \quad (5)$$

3.1.2 电损耗的测试原理

飞轮在升速过程中除了轴承和转子的风损外,驱动电机的电损耗(铜损和铁损)在整个能量损失中占有较大比重。无铁芯无刷直流电机的电损耗相比传统电机其铜损和铁损小,但其仍然存在。以星上应用为目标的飞轮系统需要有尽量小的消耗功率,因此有必要了解飞轮电损耗大小及其与转速的关系。

电损耗测试原理如下:

飞轮以一定转速 ω_j 在真空度 p_j 下稳定运转对应一稳定功耗 P_j ,其中包括电损耗(铜损和铁损)、轴承损耗、转子风阻损耗,即

$$P_j = UI = P_{\omega_j} + P_{0,j} + P_{e,j}, \quad (6)$$

其中 U —供电电源电压, I —转速 ω_j 下的相应消耗电流, P_{ω_j} —转速 ω_j 、真空度 p_j 下的风阻损耗功率, $P_{0,j}$ —转速 ω_j 、真空度 p_j 下的轴承摩擦损耗功率, $P_{e,j}$ —转速 ω_j 、真空度 p_j 下的电损耗功率,因此

$$P_{e,j} = UI - (P_{\omega_j} + P_{0,j}), \quad (7)$$

由式(7)可知,飞轮在真空度 p_j 下以转速 ω_j 稳定运转对应的功耗可以由供电电压与电流的乘积 UI 得到,而机械损耗(轴承损耗)与风阻损耗可以由真空度 p_j 以及转速 ω_j 下的降速过程测得,因此,真空度 p_j 以及转速 ω_j 下对应的电损耗 $P_{e,j}$ 即可得到。

3.2 结果及分析

飞轮的机械损耗主要是轴承的摩擦损耗,因此其影响因素主要是飞轮的转速;而风阻是由飞轮转子与空气相互摩擦产生的,因此真空度和转速是其主要的因素;电损耗包括电机的铜损和铁损,与电流及频率有关,因此电损耗受转速和

真空影响。根据前面机械损耗、风阻损耗以及电损耗的测试原理,在能耗试验系统上进行了相应的试验,得到了如图 3 所示不同转速下空载降速功率与真空度关系曲线、图 4 所示机械损耗与转速关系曲线、图 5 所示不同真空度下飞轮风损与转速关系曲线、图 6 所示不同真空度下飞轮电损耗与转速关系曲线。由图 3~6,飞轮的空载损耗随真空度的升高而减小,当真空度达到理想的“绝对真空(真空度为 0)”时,此时飞轮的空载损耗只有轴承摩擦导致的机械损耗,且随着转速升高,空载损耗受真空度的影响加大。飞轮机机械损耗(轴承的摩擦损耗)随转速升高而增大,且转速越高,飞轮机机械损耗增加趋势越大;转速在 4 500 r/min 以下时,机械损耗等效增长率为每千转转速变化对应 1 W 的能量消耗;转速在 4 500 r/min 到 7 500 r/min 范围时,机械损耗等效增长率为每千转转速变化对应 1.83 W 的能量消耗;转速在 7 500 r/min 到 10 000 r/min 范围时,机械损耗等效增长率为每千转转速变化对应 3.04 W 的能量消耗;当转速达到 12 000 r/min 时,机械损耗等效增长率增加到了每千转转速变化对应的能量消耗为 5.1 W。飞轮转子的风阻损耗随转速升高而增大,转速越高这种趋势越明显;相同转速下真空度越高风损越小;真空度越高,风损随转速升高而增大的趋势越平缓;因此,飞轮需要的真空环境不是真空度越高越好,考虑到高真空的难于获得和保持,需要一个合适的较高的真空度即可。飞轮的电损耗随转速升高而增大,且随着转速升高,这种增大趋势越加明显。由前面分析可知,机械损耗及转子风阻损耗随转速升高而增大,且转速越高

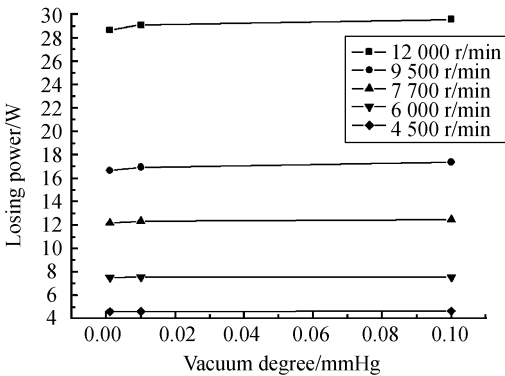


图 3 不同转速下空载降速功耗与真空度关系曲线
Fig. 3 Relationship between power loss and degree of vacuum under different speeds

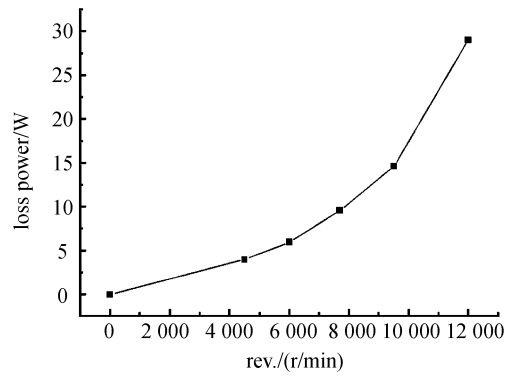


图 4 机械损耗与转速关系曲线
Fig. 4 Relationship between mechanical loss and speed

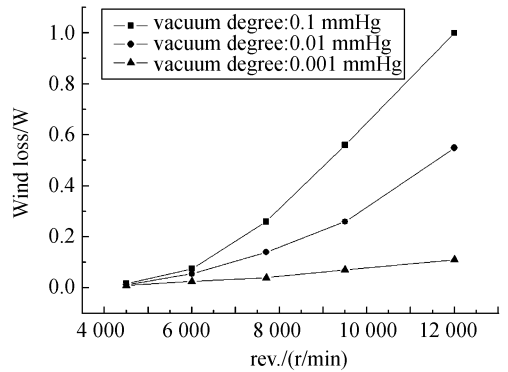


图 5 不同真空度下飞轮风损与转速关系曲线
Fig. 5 Relationship between wind loss and speed under different degrees of vacuum

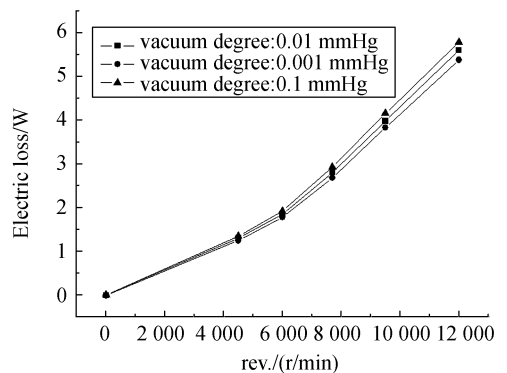


图 6 不同真空度下飞轮电损耗与转速关系曲线
Fig. 6 Relationship between electric loss and speed under different degrees of vacuum

增大趋势越剧烈,因此供电电源的电流也越大,导致铜损增加。随着转速的升高,铁损随旋转磁场频率增加而增大。与机械损耗相比,飞轮电损耗相对较小,特别在高速下,主要的损耗大部分来自于机械轴承的摩擦损耗。

4 结 论

(1)机械轴承支撑的飞轮能耗主要由机械损耗、转子风阻损耗及电磁损耗三部分组成,机械损耗是其主要成份。

(2)提高飞轮系统真空室内真空度可以有效降低飞轮风阻损耗,同时减小飞轮的电损耗,但机械损耗不受影响,机械损耗主要受飞轮转速影响,随转速升高而增大。

(3)与机械损耗相比,风阻损耗与电损耗相对较小,特别在高速下,主要的损耗大部分来源于轴承的摩擦损耗;当转速低于10 000 rpm时,飞轮具有较好的性能;当转速高于10 000 rpm后飞轮的机械损耗急剧增加,为了提高飞轮系统的效率,有效降低其机械损耗,较合理的支撑方案为采用磁悬浮轴承。

参考文献:

- [1] BITTERLY J G. Flywheel technology: past, present, and 21st century projects[J]. *IEEE Aero. Electron. Sys. Mag.*, 1998, 13: 13-16.
- [2] 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(3): 504-509.
JIA H G, ZHAO H B, BAI Y, *et al.*. Single axis double flywheels integrated power and attitude control system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(3): 504-509. (in Chinese)
- [3] KASCAK P E, JASEN R H. Single axis attitude control and DC BUS regulation with two flywheels [C]. *IECEC*, 2002-20078.
- [4] 刘志华,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 ZH H, BAI Y, LI H W, *et al.*. Analysis on errors of single axis energy storage/attitude control system with double flywheels[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 127-132. (in Chinese)
- [5] 赵韩,杨志轶,王忠臣. 新型高效飞轮储能技术及其研究现状[J]. *中国机械工程*, 2002, 13(17): 1521-1524.
ZHAO H, YANG ZH Y, WANG ZH CH. Advanced flywheel energy storage technology and research[J]. *China Mech. Eng.*, 2002, 13(17): 1521-1524. (in Chinese)
- [6] 韩邦成,虎刚,房建成. 磁悬浮控制力矩陀螺高速转子的优化设计[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 662-666.
HAN B CH, HU G, FANG J CH. Optimization design of magnetic suspended gyroscope rotor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 662-666. (in Chinese)
- [7] WOLSKY A M. An overview of flywheel energy systems with HTS bearings[J]. *Supercond. Sci. Technol.*, 2002, 15: 836-837.

作者简介:白越(1979—),男,辽宁人,中科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博士,助理研究员,主要研究方向为空间飞轮实用技术、空间摩擦及润滑学研究。E-mail: baiy@ciomp.ac.cn