

文章编号 1004-924X(2010)09-2016-06

# 微小卫星用陶瓷轴承脂润滑姿控飞轮的性能试验

白 越<sup>1</sup>, 曹 萍<sup>2</sup>, 高庆嘉<sup>1</sup>, 黄敦新<sup>1</sup>, 吴一辉<sup>1</sup>

(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. 长春工程学院 理学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:**为解决微小卫星姿态控制执行元件—姿控飞轮的轻量化、高效支撑及润滑问题,提出了应用脂润滑陶瓷轴承为微小卫星姿控飞轮提供支撑和润滑的方法。试验研究了陶瓷轴承脂润滑姿控飞轮的启动、摩擦功耗、温度特性、抗振动性能及寿命特性,试验结果显示:与同型号钢制球轴承相比,陶瓷球轴承在静态摩擦力矩及功耗方面性能更优良,可以有效减小姿控飞轮的启动电流和摩擦功耗。陶瓷轴承脂润滑姿控飞轮在 $-30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 具有良好的启动性能,低于卫星最低工作温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时仍能保持良好的启动特性,无冷焊问题,完全满足卫星发射时抵抗振动的要求。振动试验后的姿控飞轮在4年的地面真空试验中功耗电流变化率在有真空度和温度变化的影响下小于1%,验证了陶瓷轴承脂润滑姿控飞轮使用寿命优于4年,满足国内微小卫星对姿控飞轮轻量化和使用寿命的要求。

**关 键 词:**姿控飞轮;脂润滑;陶瓷轴承;微小卫星

中图分类号:V448.222;TH133.7 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20101809.2016

## Performance testing of attitude control wheel under ceramic bearing support and grease lubricating for micro-small satellites

BAI Yue<sup>1</sup>, CAO Ping<sup>2</sup>, GAO Qing-jia<sup>1</sup>, HUANG Dun-xin<sup>1</sup>, WU Yi-hui<sup>1</sup>

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

2. *School of Sciences, Changchun Institute of Technology, Changchun 130022, China*)

**Abstract:** In order to solve the problems on lightweight, efficient support and lubricating for the attitude control wheel in a micro-small satellite, a method using grease lubricated ceramic bearing to support and lubricate the attitude control wheel was proposed. The static friction torque, power loss, anti-temperature, anti-vibration and life of the wheel using ceramic bearing support and grease lubricating were analyzed through experiments. The results show that the static friction torque and power loss of the ceramic bearing under grease lubricating are less than those of all-steel bearings, and the starting characteristics of the proposed wheel are very well at the temperature from  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Moreover, the vibration resistance performances of the wheel under the testing conditions equal to the conditions when a satellite is launched perfectly. After the vibration testing, the wheel has been tested for four years under a vacuum degree of  $0.02\text{ Pa}$  and a rotation speed of  $5\,000\text{ min/s}$  and results show the variations of current are less than 1%, which proves that the life of the attitude control wheel has

收稿日期:2009-12-21;修订日期:2010-03-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50905174);中科院十一五重点项目(No. 61501020304);吉林省自然科学基金资助项目(No. 20101530)

more than four years and can meet the lightweight and life requirements of micro-small satellites in space.

**Key words:** attitude control wheel; grease lubricating; ceramic bearing; micro-small satellite

## 1 引 言

随着现代航天技术的不断发展,质量在 100 kg 以下的微小卫星因其成本低、发射容易等优点,已逐渐成为当今国际卫星技术研究的热点。目前,国内外都在大力开展这项很有发展前途的卫星技术研究。与普通卫星的姿态控制技术一样,动量轮/反作用轮系统也是三轴稳定小卫星首选和必备的关键执行部件之一<sup>[1-6]</sup>。

在空间技术中,轴承被大量应用于卫星系统的多个功能部件中,例如控制力矩陀螺、姿态敏感器、太阳帆板驱动机构、消旋组件及动量轮等。在这些应用中多数优先采用球轴承支撑方式,而不使用其它的支撑技术,如磁浮轴承,这是因为球轴承在价格、可靠性、质量及抗冲击能力等方面更具有优势<sup>[7-8]</sup>。卫星飞轮用轴承在我国已经有 20 多年的应用经验,从早先的套圈滚道预制膜固体润滑方式发展到目前带有供油装置的油润滑全钢轴承技术,轴承的动态性能、寿命和可靠性都有了明显的提高<sup>[9-10]</sup>。目前,国内微小卫星对姿控飞轮的重量、功耗等主要技术指标提出了越来越苛刻的要求,如通信小卫星使用的  $1\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$  动量轮,它的整机要求功耗低并在中速下运转,由于此类轴承普遍采用带有供油装置的油润滑技术,因此其质量和体积对微小卫星来说太大;同时使用传统的全钢轴承,轴承滚道与滚动体之间很难形成充分的 EHL 润滑,动量轮易发生早期失效,其特征是运转几十小时后电流增大并发出异常声响,分解轴承发现钢球粗化(表面粗糙度  $R$  值从 0.012 增大到 0.06)、滚道磨损痕迹明显、润滑油变色<sup>[11-13]</sup>。分析表明,动量轮轴承的失效形式,不是疲劳,而是在润滑不充分情况下的磨损。此时,配副材料相同的表面凸起由于冷焊在高压下产生粘着撕脱,磨损粒子进入润滑油及相互运动元件的接触处,破坏了接触副之间的 EHL 润滑,从而加剧了轴承内元件的磨损,形成了磨损和润滑油

污染之间的恶性循环。

本文针对微小卫星中使用的姿控飞轮轻量化的要求,提出应用脂润滑陶瓷轴承为微小卫星姿控飞轮提供支撑和润滑的方法。通过试验分析陶瓷轴承同全钢轴承在脂润滑情况下的启动及摩擦性能,进而研究陶瓷轴承脂润滑姿控飞轮的抗振动性能、高低温性能和润滑脂真空下的挥发损失性能,并在此基础上在地面的真空装置中进行了连续 4 年的寿命试验,4 年寿命试验中功耗电流  $<1\%$ ,验证了陶瓷轴承脂润滑姿控飞轮具有优于 4 年的寿命能力,该姿控飞轮满足国内微小卫星的轻量化和寿命要求。

## 2 试验

### 2.1 试验用轴承

试验轴承为陶瓷轴承 FAG(型号为 HCS7002C, T, P4S, UL)和全钢轴承 NSK(型号为 7002CTY, P4S, UL)各 4 套轴承,2 种轴承的结构尺寸完全相同,精度等级都为 P4 级,润滑方式都是脂润滑,所用润滑脂是 FAG 低挥发高速优质润滑脂,其型号为 L52。

### 2.2 静态摩擦力矩试验

在 YZC-II 型轴承摩擦力矩仪上进行了 2 种轴承的静态摩擦力矩对比试验,结果如表 1 所示,陶瓷球轴承静态摩擦力矩平均值比同型号的钢制球轴承小。

表 1 静态摩擦力矩对比测试结果

Tab. 1 Testing results of static friction torque

轴承编号	钢制球摩擦力矩	陶瓷球摩擦力矩
	/N·m	/N·m
1	$1.36\times 10^{-3}$	$0.85\times 10^{-3}$
2	$1.18\times 10^{-3}$	$0.84\times 10^{-3}$
3	$1.33\times 10^{-3}$	$0.92\times 10^{-3}$
4	$1.18\times 10^{-3}$	$0.99\times 10^{-3}$
平均值	$1.26\times 10^{-3}$	$0.90\times 10^{-3}$

### 2.3 高速摩擦功耗对比试验

高速摩擦功耗试验在型号为 B8-25 的高速电主轴上进行。测试转速为 0~20 000 r/min, 保持试验条件相同, 分别测得 4 套陶瓷轴承和刚制轴承在上述转速范围内的功耗, 结果如图 1 所示。

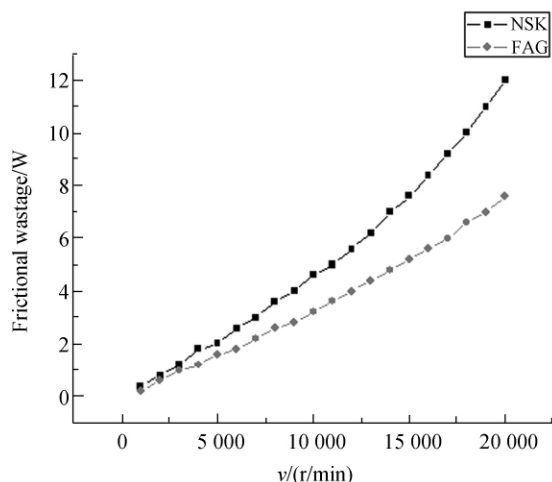


图 1 轴承摩擦功耗对比试验结果

Fig. 1 Testing results of the wear of bearing

### 2.4 振动测试

为了验证飞轮支撑结构的抗振性能是否满足卫星发射的要求, 按照卫星发射时振动试验条件对研制的陶瓷轴承脂润滑姿控飞轮进行了振动试验, 试验条件如表 2, 表 3 所示:

表 2 正弦振动条件

Tab. 2 Sine vibration conditions

频率范围/Hz	振级(0-P)	扫描速率
5~13	11.75 mm	2 oct/min
13~70	8 g	
70~100	12 g	

表 3 随机振动条件

Tab. 3 Random vibration conditions

频率范围/Hz	加速度功率谱密度	总均方根加速度/ $g(rms)$	时间/min
20~100	+3 dB/oct	12.82	2
100~600	0.2 $g^2/Hz$		
600~2000	-9 dB/oct		

按上述振动条件分别进行了飞轮的正弦和随机振动试验。试验后, 分别检查飞轮的运转特性, 试验前、后的启动电流保持 0.11 A 不变, 同时飞轮运转平稳无噪声。

### 2.5 高低温测试

卫星平台在空间运转时, 环境温度变化很大, 其内部温度一般控制在  $-5 \sim 50^\circ\text{C}$ , 考虑到足够的可靠性, 一般地面温度试验在  $-10 \sim 55^\circ\text{C}$  进行。姿控飞轮在 0.02 Pa 真空度和不同温度下的启动电流试验结果如图 2 所示。

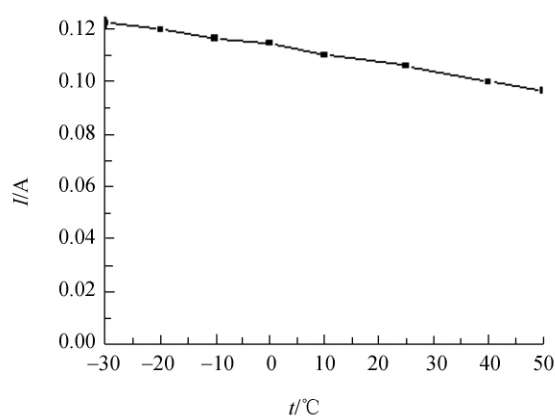


图 2 飞轮启动电流随温度变化曲线

Fig. 2 Starting current varies with temperature

### 2.6 真空环境下的寿命测试

姿控飞轮所用陶瓷轴承采用脂润滑, 润滑脂在飞轮壳体真空条件下将要缓慢挥发, 因此, 需要确定陶瓷轴承脂润滑在真空下的挥发损失率。润滑脂两相结构与复杂流变学性能导致润滑脂的挥发损失率无法通过理论进行精确的计算, 因此, 将通过真空下的实验来确定姿控飞轮所用陶瓷轴承的润滑脂的挥发损失率。将姿控飞轮使用的陶瓷轴承放入真空装置内进行旋转寿命实验, 实验条件尽量模拟实际使用情况, 电机转速保持 5 000 r/min, 真空装置的真空度为 0.02 Pa, 实验结果如图 3 所示。

为了获得姿控飞轮实际的寿命能力, 将振动测试后的姿控飞轮安置于真空装置内, 进行了 4 年的连续寿命试验, 试验真空度保持 0.1~0.02 Pa, 姿控飞轮转速保持在 5 000 r/min, 姿控飞轮 4 年的电流曲线如图 4 所示。从试验结果可以看出, 陶瓷轴承脂润滑姿控飞轮已经具有超过 4 年的实际运行寿命, 该地面试验仍在继续进行。

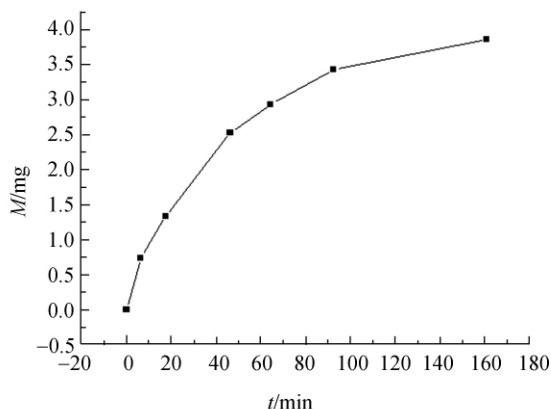


图3 润滑脂损失—时间曲线

Fig. 3 Curve of grease loss with time

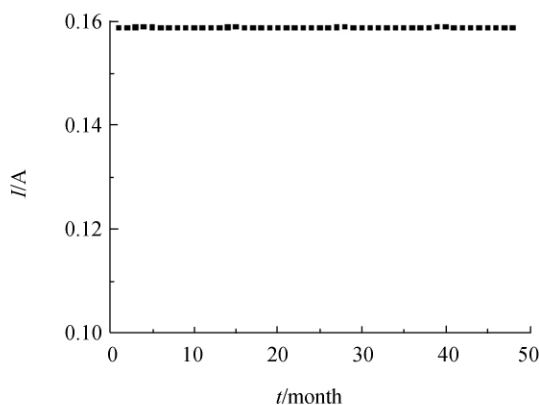


图4 4年真空寿命试验期间电流曲线

Fig. 4 Curves of current during life testing for four years under vacuum condition

### 3 分析及讨论

(1)由试验2.2可以看出:试验用陶瓷球轴承的静态摩擦力矩值均小于同型号钢制球轴承,其平均值前者比后者小28.8%,即陶瓷球轴承的启动摩擦力矩比同型号钢制球轴承小。

(2)由试验2.3结果图1可以看出:陶瓷轴承的摩擦功耗小于同型号的钢制轴承,随转速的增加,陶瓷轴承的摩擦功耗优于同型号钢制轴承的趋势更加明显。在1 000 r/min转速下陶瓷轴承摩擦功耗比钢制轴承摩擦功耗小17.3%;当转速升高到20 000 r/min时,陶瓷轴承摩擦功耗相对于同型号的钢制轴承摩擦功耗减小47.6%。这

是由于陶瓷材料密度比钢小、陶瓷球质量小、离心力小、旋滚比低,所以陶瓷球轴承自旋滑动摩擦小,发热少,其摩擦功耗低,并且随着转速的升高这一趋势将愈发明显。

(3)由试验2.4可知:试验前、后姿控飞轮启动电流保持不变,从低速到高速范围内运转平稳无噪声,因此,陶瓷轴承脂润滑姿控飞轮完全满足卫星发射时抵抗冲击和振动的要求。

(4)由试验2.5可以看出:姿控飞轮真空下的启动电流随温度的升高而减小,和常温(25℃)下启动电流相比,40℃下启动电流小11%,50℃下启动电流小14%;而-30℃时启动电流增加了8%, -20℃时启动电流增加了5.6%, -10℃时的启动电流增加了3.5%。从试验结果可以看出,飞轮在真空下的低温特性很好,在低于要求试验温度20℃下仍然具有良好的启动特性,没有冷焊问题且阻力增加有限。高温下启动电流减小,主要是因为润滑脂在高温下粘度指数减小,导致姿控飞轮功耗降低,这正是飞轮运行所期望的。

(5)分析试验2.6的试验结果,由图3可以看出:润滑脂初始挥发速度较快,随着时间的推移,润滑脂的挥发速度逐渐降低,这是因为随着润滑脂的挥发,真空室内润滑脂挥发的基础油的浓度不断升高,降低了润滑脂的挥发率。理论上应该存在一个饱和点,此时脂的挥发和“凝结”将达到一个平衡点,此时润滑脂的挥发损失率为0。但是,在实际中飞轮壳体无法保持完全密封,因此长期的挥发率将保持一个很小的数值。对图6实验得到的试验结果进行拟合,得到润滑脂在试验条件下的挥发损失率为:

$$y=0.4t^{0.45}$$

对应于使用的陶瓷轴承,当轴承空腔填充30%的润滑脂时,润滑寿命大于15年。

由图4的试验结果可以看出,姿控飞轮在4年的地面高速真空试验中,电流波动率<1%,这主要是受试验环境温度和真空度变化的影响。由于该试验飞轮是在进行完如试验2.4所示条件的振动试验之后开始的,因此,进一步证明了陶瓷轴承脂润滑姿控飞轮完全满足飞轮发射时的过载

要求。4 年的寿命已经能满足当前国内大部分微小卫星的寿命要求。

## 4 结 论

本文提出了应用脂润滑陶瓷为微小卫星姿控飞轮提供支撑和润滑的方法,分析了陶瓷轴承同全钢轴承在脂润滑情况下的启动和摩擦性能,研究了陶瓷轴承脂润滑姿控飞轮的抗振动性能、高低温性能和润滑脂在真空下的挥发性能。分析和研究表明,陶瓷球轴承和同型号钢制球轴承相比,前者在静态摩擦力矩及功耗方面具有更优良的性能,

可以有效减小姿控飞轮的启动电流和摩擦功耗;陶瓷轴承在脂润滑条件下在卫星典型的工作温度范围内具有优良的启动和运行性能;陶瓷轴承脂润滑姿控飞轮在  $-30\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  具有良好的启动性能,低于卫星最低工作温度  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时仍能保持良好的启动特性,无冷焊问题,完全满足卫星发射时抵抗振动要求。振动试验后的姿控飞轮在 4 年的地面真空试验中功耗电流变化率在真空度和温度变化的影响下小于  $1\%$ ,运转平稳,验证了陶瓷轴承脂润滑姿控飞轮具有优于 4 年的寿命能力,完全满足国内微小卫星对姿控飞轮轻量化和使用寿命的要求。

## 参考文献:

- [1] 尤政,张高飞. 基于 MEMS 的微推进系统的研究现状与展望[J]. 微细加工技术, 2004(1):1-7.  
YOU ZH, ZHANG G F. The review of micro propulsion system based on MEMS[J]. *Micr of Abri-cation Technology*, 2004(1):1-7. (in Chinese)
- [2] 余文革,钟先信,李晓毅,等. 皮卫星发展展望[J]. 压电与声光, 2004, 26(4):289-292.  
YU W G, ZHONG X X, LI X Y, *et al.*. Prospects of picosat development[J]. *Piezoelectrics & Acous-tooptics*, 2004, 26(4):289-292. (in Chinese)
- [3] 武俊峰,安静,徐春剑,等. 姿控飞轮控制系统设计及转速过零分析[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(4):801-806.  
WU J F, AN J, XU CH J, *et al.*. Design of control system of flywheel and analysis on approach to zero speed[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4):801-806. (in Chinese)
- [4] 白越,吴一辉,韩邦成. 飞轮单轴姿态控制及储能系统[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(8):1446-1451.  
BAI Y, WU Y H, HAN B CH. Single axis attitude control and energy storage system with two flywheels[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8):1446-1451. (in Chinese)
- [5] 白越,杨作起,黎海文,等. 储能/姿控一体化飞轮能耗试验研究[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(2):243-247.  
BAI Y, YANG Z Q, LI H W, *et al.*. Experimental study on power loss of integrated energy storage and attitude control flywheel[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2):243-247. (in Chinese)
- [6] 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 ZH H, BAI Y, LI H W, *et al.*. Analysis on errors of single axis energy storage/attitude control system with double flywheel[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1):127-132. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 黄敦新,白越,黎海文,等. 飞轮轴系润滑剂损失及寿命分析[J]. 润滑与密封, 2009, 34(9):20-24.  
HUANG D X, BAI Y, LI H W, *et al.*. Analysis of molecular diffusion of lubricants and lubrication life of flywheel shafting[J]. *Lubrication Engineering*, 2009, 34(9):20-24. (in Chinese)
- [9] 钱桂山,郭景良. 美国军事空间应用技术的基本趋势和重要军用卫星系统[J]. 国外卫星动态, 2004, 3:4-11.  
QIAN G SH, GUO J L. The basic trend of applied space technology of U. S. and the important military

- satellite system [J]. *Foreign Satellite Trends*, 2004,3:4-11. (in Chinese)
- [10] ZHONG SH, HOU P M. Review of space information technology[J]. *Journal of System Engineering and Electronics*, 2006,17(2):237-244.
- [11] WILLIAM R J, MARK J J. Lubrication for space applications[R]. Glenn; NASA Glenn Research Center, 2005.
- [12] 陈晓伟,梁宇翔. 液体空间润滑剂的现状与发展[J]. *润滑与密封*, 2006(6):176-179.
- CHEN X W, LIANG Y X. Status and development of liquid space lubricant[J]. *Lubrication Engineering*, 2006(6):176-179. (in Chinese)
- [13] WILLIAM M, J J ROAMER E P. Evaluation of temperature and material combinations on several lubricants for use in the geostationary operational environmental satellite (GOES) mission filter wheel bearings [R]. Glenn; NASA Glenn Research Center, 2001.

## 作者简介:



白越(1979—),男,辽宁北票人,博士,副研究员,2001年于厦门大学获得学士学位,2006年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事极限条件下的摩擦润滑学、空间飞轮实用化技术及微小型飞行器的研究。E-mail: baiy@ciomp.ac.cn



曹萍(1982—),女,辽宁北票人,博士,讲师,2003年于内蒙古大学获得学士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事半导体材料制备、表征及应用的研究。E-mail: caoping8233@yahoo.com.cn



高庆嘉(1983—),男,辽宁丹东人,硕士研究生,2007年于东北大学获得学士学位,主要从事集成微光机电系统方面的研究。E-mail: qingjiagao@163.com



黄敦新(1980—),男,安徽淮北人,博士研究生,主要从事空间摩擦与润滑方面的研究。E-mail: huangdunxin@126.com



吴一辉(1965—),女,浙江温州人,博士,研究员,博士生导师,1986年于天津科技大学获得学士学位,1991年、1996年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士和博士学位,主要从事集成微光机电系统(MEMS)方面的研究。E-mail: yihuiwu@ciomp.ac.cn