

红外地球敏感器摆动扫描机构 长寿命试验方法

谭民涛¹, 王伟华¹, 田信灵¹, 黄澜¹, 刘旭力¹, 吴忠²

(1. 北京控制工程研究所, 北京 100190; 2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: 针对摆动扫描式红外地球敏感器, 文章提出了一种长寿命试验测试方法。设计摆动频率为 55~60 Hz 的加速摆动扫描机构模拟件, 在正弦驱动信号的激励下产生本征频率附近的摆动, 实现红外地球敏感器摆动扫描机构的加速寿命试验; 并研制了试验平台, 实时记录和分析试验参数。试验结果表明: 长寿命试验摆动扫描机构模拟件在窄扫模式时, 摆动次数累计 1.4×10^9 次, 摆动频率和电压峰-峰值的标准差分别小于 0.0020 Hz、0.0309 V。

关键词: 红外地球敏感器; 可靠性; 摆动扫描机构; 加速寿命试验; 状态电压

中图分类号: V448.22

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2012)02-0158-05

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2012.02.009

0 引言

摆动扫描式红外地球敏感器是三轴稳定卫星姿态测量的重要部件, 用于测量卫星相对于地球中心的俯仰角和滚动角。红外地球敏感器的寿命和可靠性将直接影响卫星的在轨运行。国内外针对航天器机构及敏感器进行了长寿命试验研究, 文献[1]介绍了以特征量为寿命指标的航天器机构可靠性试验方法, 文献[2-4]综述了国内外加速寿命试验方法及特点, 文献[5]提出了一种针对圆锥扫描式红外地球敏感器固体润滑轴承组件的寿命试验方法。然而, 目前尚无针对摆动扫描式红外地球敏感器开展寿命试验及其试验方法的文献报道。

摆动扫描式红外地球敏感器依靠扫描镜的摆动实现对地球边缘的扫视, 以确立对地姿态。扫描镜在摆动式扫描机构的驱动下以 5~10 Hz 的摆动频率对地扫视, 其工作稳定性和可靠性对扫描测量结果至关重要。

对红外地球敏感器摆动式扫描机构而言, 若进行 1:1 的实时寿命试验, 不仅费用昂贵, 而且时间进度也不允许^[6]。对摆动式扫描机构的不锈钢关键零件在无腐蚀环境下进行了加载频率范围为 5~200 Hz 的疲劳寿命试验, 试验结果证明加载频率对

不锈钢材料的疲劳强度几乎没有影响^[7]。

本文针对红外地球敏感器摆动式扫描机构提出了一种加速寿命试验方法: 以敏感器产品为基准, 设计了一种摆动式扫描机构的试验模拟件; 模拟扫描机构的摆动频率为 55~60 Hz, 寿命试验的加速因子 < 12。该方法不但降低了试验费用, 缩短了试验时间, 而且对于摆动扫描式红外地球敏感器高可靠、长寿命的试验研究及设计具有重要意义。

1 试验系统组成与要求

寿命试验系统由摆动式扫描机构的模拟件、摆动控制电路、数据采集系统、记录与显示单元等部分组成。模拟件在摆动控制电路的控制下进行正弦摆动的加速寿命试验。控制电路用于模拟件的摆动控制; 数据采集系统负责试验数据采集、处理; 记录与显示单元的功能是监视试验系统的工作状态并记录数据。试验系统组成如图 1 所示。

摆动式扫描机构的模拟件寿命试验系统设计如下:

- 1) 模拟件的摆动频率为 55~60 Hz;
- 2) 显示摆动式扫描机构的工作状态, 可实时

收稿日期: 2011-12-18; 修回日期: 2012-03-06

基金项目: 中国空间技术研究院某平台卫星可靠性专项工程(项目编号: KXX-201009)

作者简介: 谭民涛(1981—), 男, 硕士学位, 现从事卫星光学敏感器总体结构设计方面研究。E-mail: meantop@hotmail.com。

记录与显示摆动次数;

3) 通过采集驱动电机的驱动信号波形并执行相关的控制运算, 可实时控制摆动式扫描机构的摆动;

4) 具有自动、手动以及断电应急的数据存储功能, 支持历史数据波形回放。



图1 试验系统组成示意

Fig. 1 Schematic diagram of the test system configuration

2 试验系统的设计

2.1 摆动式扫描机构的模拟件

1) 结构组成

摆动式扫描机构的模拟件用于模拟红外地球敏感器的摆动扫描工作状态, 通过摆动扫描试验以验证机构的工作寿命。模拟件主要由壳体、枢轴(摆动轴)、配重、驱动电机(磁块和线圈)和指针等组成, 其工作原理如图2所示。

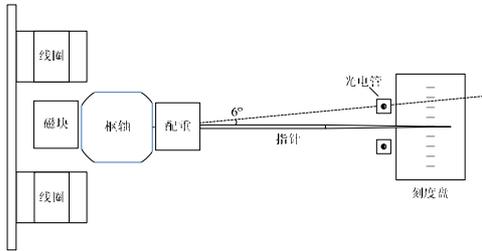


图2 摆动扫描机构工作原理

Fig. 2 Schematic diagram of swing scanning unit

线圈绕组(驱动电机的定子)固定在铝材的壳体上; 磁块(电机的转子)选择高磁通密度的磁钢, 将其固定在摆动轴上。枢轴为轴系结构, 是模拟件的关键部件。为了满足加速试验的需要, 提高整个轴系结构的固有频率是关键。

为了防止摆幅过大而损坏枢轴, 模拟件设置有限位装置。在枢轴上设计了安装孔, 用于电机转子的安装和轴系转动惯量的调整。

为满足试验系统的工作可靠性要求, 模拟件轴系结构所有螺钉装配完毕后均用硅橡胶固封, 枢轴套与枢轴、轴向限位和枢轴等通过环氧胶固封。模拟件的实物如图3所示。

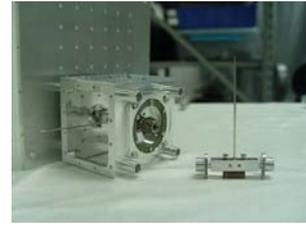


图3 摆动扫描机构模拟件

Fig. 3 The swing scanning unit sample for the life test

2) 机构的受力分析

摆动式扫描机构的传递函数为

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{1}{Js^2 + Ds + K}, \quad (1)$$

式中: J 为系统转动惯量; D 为枢轴阻尼系数; K 为枢轴恢复力矩系数。

为了保证机构模拟件的固有频率为 50Hz 以上, 根据 $\omega_0 = \sqrt{K/J}$, 如枢轴结构已确定, 则 K 为已知量, 因此得模拟件转动惯量 J 应不大于 $5.48 \times 10^{-7} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

磁块与枢轴的受力分析如图4所示。图中, F_m 为电磁驱动力; F'_m 为悬浮装置提供的反作用力; T 为正弦力矩, $T = \theta_m D \omega$ 。磁块作角速度为 $\dot{\theta}$ 的转动时, 离心作用使得悬浮装置向枢轴提供大小为 F_n 的支撑力。考虑重力影响时, 枢轴还受到重力 G 及悬浮装置反作用力 F_g 。

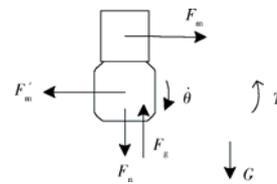


图4 磁块与枢轴的受力分析

Fig. 4 Mechanical analysis of the magnet blocks and pivot

当摆动频率选定后, 机构将作等幅度的正弦摆动, 即 $\theta(t) = \theta_m \sin(\omega t)$ 。当枢轴转过角 θ 时, 其产生的弹性恢复力矩为 $K\theta$, 同时磁块重力产生的力矩为 M_g , 得

$$M_g = G \cdot r \sin \theta \approx G \cdot r \cdot \theta, \quad (2)$$

式中 r 为磁块重心到枢轴的距离。

驱动力 F_m 、重力 G 及离心力 F'_n 分别为

$$F_m = \frac{T \cdot \sin(\omega t)}{r} = \frac{\theta_m D \omega}{r} \sin(\omega t); \quad (3)$$

$$G = mg; \quad (4)$$

$$F'_n = m \dot{\theta}^2 r. \quad (5)$$

由于 $\theta = \theta_m \sin(\omega t)$ ，对 t 求一阶导数，得 $\dot{\theta} = \omega \theta_m \cos(\omega t)$ ，则有

$$F_n' = m[\omega \theta_m \cos(\omega t)]^2 r = m(\omega \theta_m)^2 \frac{1 + \cos(2\omega t)}{2} \quad (6)$$

当 $\theta_m = 6^\circ = 0.1047 \text{ rad}$ 时，计算得： $F_m = 0.174 \sin(\omega t) \text{ N}$ ， $G = 0.036 \text{ N}$ ， $F_n' = 0.0435[1 + \cos(\omega t)] \text{ N}$ 。

由此可见， G 为常值且较小，不影响系统工作状态。 F_m 与 F_n' 均为正弦变载荷。在加装配重后，磁块离心力 F_n' 可被抵消掉。重力力矩 $M_g = Gr\theta = 0.25 \times 10^{-3} \theta$ ，相对于枢轴的弹性恢复力矩 $K\theta = 0.188\theta$ 来说，磁块重力力矩对机构参数的影响甚小，可忽略不计。机构在电磁驱动力 F_m 作用下产生特定频率的摆动。

2.2 控制电路

摆动式扫描机构通过线圈（定子）通电产生的磁场与安装在轴系上的磁钢（转子）作用并按设定的频率改变电流方向来实现摆动，而控制电路就是承担电流的调整与控制，包括电流幅值和频率的调整与控制。控制电路的工作原理如图5所示。

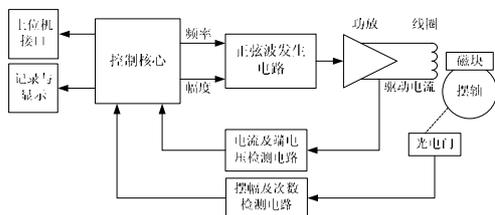


图5 摆动式扫描机构的控制电路工作原理

Fig. 5 Principle diagram of the control circuit for the swing scanning system

线圈的驱动电流的产生电路包括正弦波发生电路和电流放大电路，它们是确保按照设定的频率和摆动幅度正常工作的关键部分。由于摆动式扫描机构工作在 $55 \sim 60 \text{ Hz}$ 频率附近的驱动电流较小，对正弦驱动信号的稳定性提出了较高的要求。为使摆动幅度的稳定性优于 5% ，则要求正弦波频率稳定性达到 0.2% 的水平。为了满足这个要求，电路设计时采用了 DDS 数字合成方法。

电流放大电路的主要功能是将正弦波发生电路产生的正弦电压转换为正弦电流输出并给线圈供电。为了提高系统的控制精度，电流放大电路的设计采用了电流负反馈闭环控制措施，即通过负反馈控制使输出电流准确地跟踪输入电压的变化。为

了满足可靠性要求，须对驱动线圈的正弦电流进行限幅，以防止线圈过流而烧毁漆包层，同时起到限制枢轴摆幅的作用。

以上两个电路的各项控制任务由“控制核心”模块负责承担实现。

对线圈的驱动信号的频率和幅值的稳定性进行测试分析，结果表明：频率稳定性优于 0.017% ，幅度稳定性优于 0.29% ，谐波失真度小于 0.052% ，均满足设计要求。

若摆动式扫描机构的转动惯量发生变化或枢轴弹性系数发生变化，则整个机构的固有频率将产生漂移，摆幅也会随之发生变化（摆幅不足或摆幅超限）。此时，应通过重新调整驱动信号以跟踪系统固有频率的变化，使摆幅达到预定要求。

2.3 数据采集系统

考虑到长寿命试验的需要，要求数据采集系统能可靠连续工作多年。由于 PXI 总线系统具有数据吞吐量大、系统可靠性高等优点，因此数据采集系统选用基于 PC 机的测量平台和 PXI 总线系统。整个系统由机箱、工控计算机、数据采集卡三部分组成。

机箱上封装了稳定可靠的 AC 电源输入模块；工控计算机是数据采集系统的核心单元，其可靠性是关键，本系统采用了 NI 公司的 CPU 主频为 2.53 GHz 、双核 PXI 嵌入式控制计算机 (NI PXI-8108)；数据采集卡选用 PXI-6224 多功能数据采集卡，具有多路单端 A/D 输入通道、16 位的 A/D 转换、宽范围的信号输入（电压范围最大 $\pm 10 \text{ V}$ ）等功能，其采样速率满足系统设计要求，最小分辨率达 0.3 mV 。

2.4 记录与显示单元

记录及显示单元由 CPU、电流电源、备用电池、复位电路、光电开关、信号电路、LCD 显示电路、存储器、485 通信及其地址选择等组成。摆动次数的显示采用 12 位断码 LCD 显示屏，满足 10^{11} 摆动次数的显示位数要求。存储器采用铁电存储器，具有断电数据保存功能。

3 试验结果

如图2所示，摆动扫描机构模拟件安装了3对光电管以用于检测摆动状态。中间位置的1对光电管用于摆动次数检测，位于摆针两侧的2对光电管

用于摆幅不足和摆幅超限检测。光电管对由发光管和接收管组成, 其安装调试采用专用光学系统。根据各个摆动模拟件设定的摆动幅度, 3 对光电管调整好位置后用硅橡胶固封。

试验系统上共装配了 8 套模拟件进行寿命试验。选取其中一套模拟件(摆动角度为 3°)的测试数据, 对其寿命进行预测分析: 测试数据的采样每隔 7 天进行 1 次, 共计 1 年, 累计摆动次数为 1.4×10^9 次, 则机构的摆动频率和电机的电压峰-峰值采集数据分别如图 6、图 7 所示。

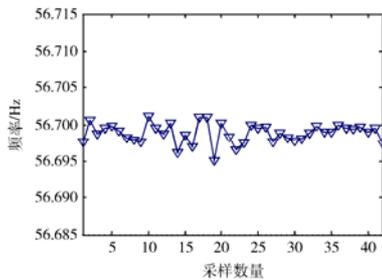


图 6 摆动频率采样曲线

Fig. 6 Sampling curve of the swing frequency

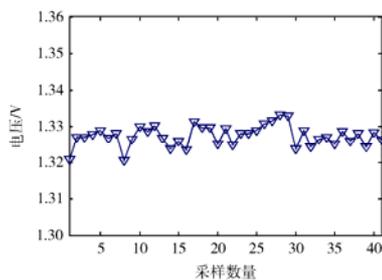


图 7 电压峰-峰值采样曲线

Fig. 7 Sampling curve of the peak-to-peak voltage

为分析摆动式扫描机构运行的稳定性, 选取摆动角度为 3°和 6°的试验模拟件各 4 套, 对试验 1 年的测试数据进行统计, 分析摆动频率和电压峰-峰值的标准差, 结果如表 1、表 2 所示。

表 1 第一组试验结果统计分析

Table 1 Statistical analysis of test results 1

标准差	摆动角度 3°			
	模拟件 1#	模拟件 2#	模拟件 3#	模拟件 4#
频率/Hz	0.001 4	0.002 0	0.001 6	0.001 6
电压峰-峰值/V	0.002 9	0.010 2	0.030 9	0.025 8

表 2 第二组试验结果统计分析

Table 2 Statistical analysis of test results 2

标准差	摆动角度 6°			
	模拟件 5#	模拟件 6#	模拟件 7#	模拟件 8#
频率/Hz	0.003 1	0.001 5	0.002 0	0.001 8
电压峰-峰值/V	0.066 4	0.093 9	0.086 7	0.088 8

由试验结果可见: 对于两种摆动角度的所有模拟件, 摆动频率的标准差均 $\leq 0.003 1$ Hz。电压峰-峰值的标准差在不同摆动角度情况下则不相同: 对于摆动角度为 3°时的 4 套模拟件, 它们的标准差均 $\leq 0.030 9$ V; 对于摆动角度为 6°时的另外 4 套模拟件, 它们的标准差均 $\leq 0.093 9$ V。系统的摆动稳定度 $< 1.89\%$, 满足设计要求。

4 结束语

本文提出了一种红外地球敏感器摆动式扫描机构的长寿命试验方法, 针对该试验方法建立了相应的试验系统。在试验系统开展了 8 套摆动式扫描机构模拟件的测试试验, 结果表明: 试验系统工作稳定, 其摆动稳定度 $< 1.89\%$, 且摆动频率和电压峰-峰值的变化均满足摆动式红外地球敏感器寿命试验的要求。试验积累的数据可为我国红外地球敏感器的长寿命、高可靠设计提供参考依据。在后续的试验研究中, 还应进一步了解环境温度、湿度变化对试验的影响, 找出红外地球敏感器设计方面的薄弱环节并加以改进。

参考文献 (References)

- [1] 刘志全. 航天器机构的可靠性试验方法[J]. 中国空间科学技术, 2007, 27(3): 39-45
Liu Zhiqun. Reliability test methods of spacecraft mechanisms[J]. Chinese Space Science and Technology, 2007, 27(3): 39-45
- [2] 葛广平. 我国加速寿命试验研究的现状与展望[J]. 数理统计与管理, 2000, 19(1): 25-29
Ge Guangping. An outline and outlook on the research of accelerated life tests in China[J]. Application of Statistics and Management, 2000, 19(1): 25-29
- [3] Mita N. An accelerated life test method for highly reliable on-board TWT's with a coated impregnated cathode[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1994, 41(7): 1297-1300
- [4] Shin W G, Lee S H, Song Y S. Development of an accelerated life test procedure for cooling fan motors[J]. International Journal of Automotive Technology, 2006, 7(6): 757-762
- [5] 樊幼温. 红外地平仪固体润滑轴承组件的寿命试验[J]. 空间科学学报, 1996, 16(1): 71-76
Fan Youwen. Life test of a solid-lubricated ball bearing assembly used for satellite infrared earth sensor[J]. Chinese Journal of Space Science, 1996, 16(1): 71-76

- [6] 刘志全, 李新立, 遇今. 长寿命航天器机构的加速寿命试验方法[J]. 中国空间科学技术, 2008, 28(4): 65-71
Liu Zhiquan, Li Xinli, Yu Jin. Methods of accelerated life tests for long-life spacecraft mechanisms[J]. Chinese Space Science and Technology, 2008, 28(4): 65-71
- [7] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003

Methods of long-life test for swing scanning unit of infrared earth sensor

Tan Mintao¹, Wang Weihua¹, Tian Xinling¹, Huang Lan¹, Liu Xuli¹, Wu Zhong²
(1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China;
2. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To test the life and reliability of swing scanning-type infrared earth sensors, an accelerated life test method is proposed. A sample set for simulating the swing scanning unit is designed, with swing frequency of 55~60 Hz. The stable amplitude oscillation is generated by a sine driving signal. A special test platform is developed, to record and analyze the test data automatically. The test results show that the standard deviation of the swing frequency is less than 0.002 0 Hz, and the standard deviation of the peak-to-peak voltage is less than 0.030 9 V.

Key words: infrared earth sensor; reliability; swing scanning unit; accelerated life test; state voltage



世界最大的射电望远镜阵列将于 2016 年开建

据英国《每日邮报》3月26日报道,全球最大、最灵敏的“平方公里级射电望远镜阵列”(SKA)项目将于2016年开始建设。据悉,这个耗资13亿英镑(约合人民币130.5亿元)的项目有助于解开宇宙本源之谜。

该阵列由数千个巨大的碟型天线组成,地区跨度达1900英里(约3057 km)。项目负责人米歇尔·万·霍莱姆说:“这将对我们的洞悉自己在宇宙中所处的位置、宇宙发展历史和未来的走向产生深远影响。”用英国科学与探究中心协会伊恩·格里芬博士的话说,这一项目能彻底转变人类对宇宙的认识。“由于覆盖面积广,这个项目能以前所未有的程度向我们呈现出银河系的细节画面,让天文学家得以对诸如黑洞等激动人心的神秘天体进行研究,进一步了解宇宙早期历史的信息,也有助于验证相对论。”

此外,科学界还普遍认为,SKA项目将是人类在太阳系外寻找外星生命的最好工具。因为SKA具有研究这一问题所必需的开创性技术——它的碟型天线是迄今为止灵敏度最高的天线,可以对来自太空的电磁辐射进行有效的检测。科学家称,SKA甚至可以捕捉到50光年外一架飞机发出的雷达信号。

科学家还表示,SKA从宇宙中获取的信息数量之庞大也令人难以相信——据悉,该项目每秒钟产生的数据量相当于目前全球互联网流量的100倍,每天产生的数据量甚至要用1500万个64 GByte的硬盘才可以填满。

目前,来自20个国家的67个组织都参与实施SKA项目。不过,有关该项目的建设地点仍在讨论之中。经过几轮评审,澳大利亚和南非被确定为SKA的两个最佳候选地址。SKA项目的落户决定将于近期由国际科学界确定。

中国作为SKA项目委员会七个成员国之一,在该项目中起着重要的作用。中科院国家天文台台长助理薛随建说,中国不仅是SKA的首倡者之一,而且曾为成为SKA选址地而积极努力;虽然没有胜出,但在此过程中,中国在相关领域取得了重大进展。积极全面参与SKA项目有助于进一步提高中国天文学水平,更为重要的是参与此类大科学装置的国际合作,将会提升整个国家的工业、制造业水平。

(摘自2012-03-30《中国科学报》和
2012-02-18《人民日报》海外版)