

## 技术专论

## 光纤陀螺高可靠、长寿命保证技术探讨

曹敏<sup>1</sup>, 寿芳<sup>2</sup>, 马超<sup>2</sup>

(1. 上海卫星工程研究所, 上海 200240; 2. 中国航天科技集团公司第八研究院, 上海 200240)

**摘要:** 随着卫星控制系统技术的不断发展, 卫星在轨寿命的要求不断提高。后续中低轨卫星普遍设计寿命要求达到 5~8 a, 高轨卫星设计寿命要求达到 10~15 a。光纤陀螺作为卫星的一项关键部件, 是目前制约我国卫星寿命和可靠性的主要瓶颈之一。从可靠性角度, 对光纤陀螺的技术特点进行了分析, 提出了适用于长寿命卫星平台的光纤陀螺的建议。

**关键词:** 光纤陀螺; 特点分析; 高可靠; 长寿命

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2013.04.018

**中图分类号:** V438<sup>+</sup>.4      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2013)04-0076-04

High Reliability and Long Lifetime Guarantee Technology  
of Fiber-optic GyroscopesCAO Min<sup>1</sup>, SHOU Fang<sup>2</sup>, MA Chao<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Engineering, Shanghai 200240, China;

2. No.8 Academy of China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** With the development of satellite control system technology, in-orbit life of satellites is increasingly improved. The designed life of follow-up medium and low earth orbit satellites is required to be 5~8 years, and that of high earth orbit satellites is required to be 10~15 years. As one of the critical parts of satellites, fiber-optic gyroscope is one of the main factors limiting the life and reliability of satellites. Form the reliability point of view, the technical features of fiber-optic gyroscopes was analyzed. Further suggestions to improve fiber-optic gyroscopes for long-life satellites were put forward.

**Key words:** fiber-optic gyroscope; feature analysis; high reliability; long life

目前中低轨卫星普遍设计寿命已由 2~3 a 提高到 5~8 a, 高轨卫星由 5~8 a 提高到 10~15 a。光纤陀螺作为卫星控制系统的重要测量部件, 在卫星上的运用越来越广泛, 光纤陀螺的寿命和可靠性也随着卫星平台要求不断提升。

根据国内外卫星在轨故障统计分析, 陀螺故障是较为常见的现象, 且不易恢复, 对卫星平台影响严重, 危害度大。因此, 光纤陀螺的高可靠、长寿命是卫星平台一项关键、系统问题。

随着卫星寿命要求的不断提高, 如何在恶劣的

收稿日期: 2013-02-23

作者简介: 曹敏(1961—), 女, 上海人, 研究员, 主要研究方向为星用设备可靠性。

空间环境中使卫星长期稳定工作已经成为光纤陀螺技术发展和应用的关键。要很好地解决这一难题,首要的工作就是针对光纤陀螺的特性和历经环境进行风险分析,提出系统性的可靠性保障建议。

## 1 光纤陀螺特点分析

### 1.1 光纤陀螺原理

光纤陀螺不同于以往传统的机械式陀螺,它是以萨格纳克效应为原理发展起来的,即在闭合光路中,由同一光源发出的沿顺时针方向和逆时针方向传输的两束光干涉,利用相位差或干涉条纹的变化,测出闭合光路旋转角速度。

光纤陀螺由激光陀螺进化而来,当绕闭合光路等效平面旋转时,相反传输的两束光谐振频率不同,频率差正比于谐振腔相对惯性空间转动的角速度,输出脉冲数正比于转过的角度,通过检测频差及脉冲数,即可分别知道陀螺转动的角速度和角度。不同之处在于,光纤陀螺采用光纤绕成环形光路并检测出随转动而产生反向旋转的两束激光束之间的相位差,由此计算出旋转的角速度。在设计上通过将200~2000 m的光纤绕成直径为10~60 cm的光纤环,从而增加激光束的检测光路,检测灵敏度和分辨率比激光陀螺提高了多个数量级,有效克服了激光陀螺所存在的闭锁现象<sup>[1]</sup>。

作为一种先进的光电式惯性敏感仪器,光纤陀螺具有以下优点:1)性能稳定,抗干扰能力强,可承受高加速度和振动冲击;2)精度高,动态范围宽,可测转速的动态范围高。

光纤陀螺也存在一些缺点:1)受灵敏度限制,体积较大;2)由于制作工艺复杂和材料昂贵,成本较高。

### 1.2 星用光纤陀螺的组成

星用光纤陀螺从研制到在轨寿命结束,经历地面环境、主动段力学环境、在轨真空热环境、空间辐射环境、电磁环境等。光纤陀螺主要完成姿态测量功能,由光路和电路两部分组成,如图1所示<sup>[2]</sup>。

由光纤陀螺组成以及历经环境可知,光纤陀螺要实现高可靠、长寿命,必须确保它的每个组成部分安全通过主动段环境,适应星内电磁环境,并能抵御

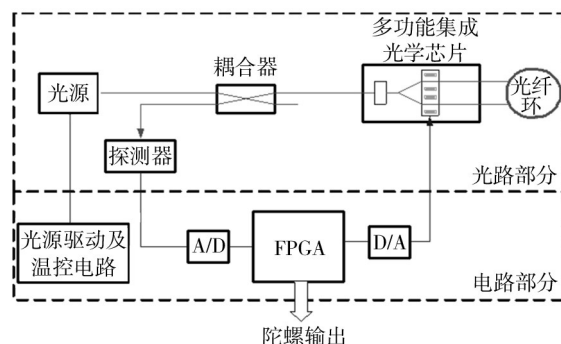


图1 光纤陀螺组成原理

Fig. 1 Schematic diagram of fiber-optic gyroscope composition

5~8 a空间热环境和空间辐射环境。

## 2 影响光纤陀螺高可靠、长寿命因素

光纤陀螺主要由光学部件、光电器件和电子器件组成,具有体积小、质量轻、灵敏度高、动态范围大、功耗低、性能稳定等优点。影响光纤陀螺高可靠、长寿命的因素包括以下几个方面。

1) 结构设计不合理,易导致力学环境损伤大质量元器件。

2) 真空热环境易导致大功耗或热敏感元器件失效。

3) 空间辐射环境(包括高能粒子、太阳光)造成电子元器件性能下降或失效,尤其是光学器件(光源、光纤环)、光电器件会产生性能漂移、功能衰退,严重时甚至会完全失效或损坏。例如光源的光功率下降,光纤环的损耗增加,耦合器、集成光学相位调制器的分束比、串音、损耗发生变化,探测器的暗电流、噪声增加等,各种半导体器件性能衰退,运算放大器输入失调变大;单粒子效应使微电子器件的逻辑状态发生改变等,最终导致光纤陀螺失效。

4) 光纤陀螺安装在星体内,电磁兼容设计不合理,影响电路信号质量,造成工作异常。

5) 电源拉偏能力、元器件参数漂移的容差设计、一次/二次电源的接口电路、浪涌防护均影响光纤陀螺的高可靠、长寿命。

以上各因素中空间辐射环境是影响光纤陀螺高可靠、长寿命的主要因素,光纤陀螺的高可靠、长寿命应从元器件选用、设计保障、工艺过程控制、试验

验证等全方位进行系统保障。

### 3 光纤陀螺高可靠、长寿命设计措施

#### 3.1 系统保障

结合光纤陀螺高可靠、长寿命因素分析,针对单机特性,制定了光纤陀螺高可靠、长寿命系统保障措施。

1) 通过力学环境、热环境适应性分析,为光纤陀螺在整星上布置了一个适宜的振动、温度环境,确保光纤陀螺在主动段、在轨长期真空环境的可靠工作。

2) 采用全方向、点对点的空间辐射环境效应分析,通过等效屏蔽为光纤陀螺设计了一个适宜的在轨空间环境,确保其长期稳定工作。

3) 解剖和分析影响单机寿命和可靠性的元器件与部件,并进行薄弱环节分析、高可靠性长寿命设计。

4) 分析振动、温度等环境应力对单机中选用元件和组件失效的激励作用、损伤机理以及它们的量级关系,进行针对性设计。

5) 通过分析找出设计、工艺、实际运用等方面的敏感缺陷类型,制定过程保障措施。

6) 通过分析及试验,研究温度应力在单机试验的有效性、试验数据、失效规律,在必要的试验基础上,采取最大商原理,进行寿命评估。

#### 3.2 电路高可靠设计

为了在轨可靠工作,光纤陀螺惯导组合内设4只光纤陀螺,采用3/4表决,安装方式为三只正交和单只斜置,四只陀螺各自独立;为了保证可靠性,电源和信号处理电路采用热备份;每份信号处理电路都能同时接收四路光纤陀螺数据,主、备份数据处理电路同时只有一份工作,数据处理电路的切换通过二次电源完成;二次电源采用冷备份方案,组成如图2所示<sup>[2]</sup>。

同时在设计过程采取了以下确保高可靠的设计措施。

1) 采用两套完全相同的二次电源电路供电,二次电源设计过流和短路防护措施,利用熔断器构造的输入过流保护为不可恢复式保护电路,在二次电

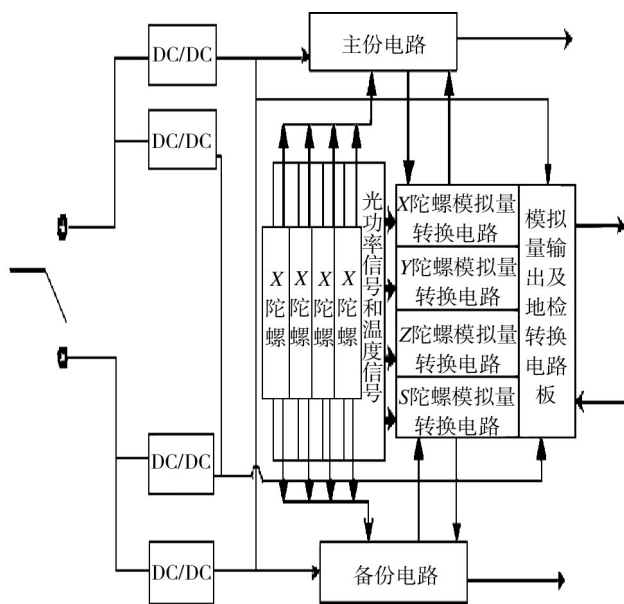


图2 光纤陀螺设计原理

Fig. 2 Design principle of fiber-optic gyroscope

源输入发生过流故障,通过熔断器熔断将故障电源与一次母线断开,保护一次母线安全;

2) 设计浪涌抑制电路有效抑制电源开机瞬间的浪涌电流,增加限流电阻,使组合启动电流限制在其相应额定电流的1.5倍以内;

3) 主备份遥控切换电路采用两只继电器的触点串联使用方案,保证了电源能够可靠地开通。故障情况下使用快速熔断器对系统进行保护。主备份有各自的输入过流保护电路,同路输出加二极管后并接,保证了工作电源出现任何故障不致于影响备份电源的正常工作;

4) 设计输出过流保护功能,在每一支路上增加熔断器保护电路的方法,可避免某一支路的短路故障引起其他支路的工作。

#### 3.3 电磁兼容(EMC)设计保障

光纤陀螺电磁兼容是实现产品电磁兼容达标的关键,重点考虑电路板级、产品接口部分和产品机壳EMC设计。

1) 首选能噪小和对电磁干扰有抑制作用的元器件,对元器件可能产生的振荡问题及瞬态电压耐受能力进行分析;从元器件选择、材料选用开始,进行基本电路组件设计,使电子元器件远离可能发生

放电的平面。

2) 依据电磁特性进行元器件布局,设计中将模拟电路和数字电路分开,将地线环绕,布线尽可能粗,电源增加滤波电容,敏感器件采取隔离和保护措施,并且将它们在空间上和电气上拉开距离。

3) 在PCB布线时,保持环路面积最小,电源线尽可能靠近地线,并联的导线紧紧放在一起,电源与地之间增加高频滤波电容;采用多层板设计。

4) 对不必要的电磁能量分别采取限制、转换或吸收等抑制方法,采取抑制共模干扰措施等。

5) 电路板上信号线、电源线分开布线、走向。

6) 机壳适当添加螺钉以减小机壳缝隙,机壳接缝严实,尽可能采用镶嵌咬合形式的连接,增加结构整体的强度,并使产品通过EMC试验。

### 3.4 设计仿真

在设计阶段进行设计仿真,特别是进行综合力学和温度环境的半仿真验证。

由力学环境适应性分析可知,应力主要集中于光纤陀螺下部,其固有频率偏低,极易共振,因此采用了弹性模量/密度比高、屈服强度/密度比高、导热性好的铝合金,极大地减轻了质量,使关键部件的安全裕度接近2倍。

合理布置光纤陀螺的发热元器件,使温度敏感器件远离热源;考虑了极限环境温度下部件接触面间的接触热阻和散热措施,增强印制板的导热措施,功率器件加装导热条、散热片或增加焊盘面积,确保大功率、热敏感器件长期可靠工作。

用分析软件,对电路板进行电磁兼容扫描和分析,为电路布局提供合理的设计依据。

### 3.5 空间辐射环境分析与保障

由分析可知,空间辐射环境是影响光纤陀螺高可靠、长寿命的主要因素,因此在设计保障的基础上,设计了动态和实态两种空间辐射环境验证试验。

#### 3.5.1 抗总剂量性能分析

对辐照较为敏感的集成电路芯片,逐一进行分析,参照辐照剂量深度表,选择辐射设计余量 $RDM > 3$ 、组合最薄处等效铝厚度为3 mm、无抗辐照总剂量数据的器件进行总剂量“耐量”摸底试验,对于不满足辐射设计余量要求的器件实施抗辐加固。

组件进行实态空间辐射环境摸底试验。

单机进行动态空间辐射环境拉偏试验。

#### 3.5.2 抗单粒子锁定性能分析

梳理了光纤陀螺组件中使用的CMOS器件及其抗锁定情况,针对不满足单粒子锁定要求的器件,分关键和非关键,电路中分别设计器件电源端电阻限流保护以及检测反馈报警电路。

限流电阻的取值保证限流电阻上压降不大于0.25 V,确保电路正常可靠工作;一旦出现闩锁时能起到限流作用,以不损伤集成电路芯片为原则;对报警电路的反馈,采用开关机解除集成电路芯片的闩锁效应。

#### 3.5.3 FPGA抗单粒子翻转分析

单粒子翻转多为瞬时故障,引起位翻转,且多为软故障。根据国内外公开的FPGA单粒子效应研究,从单粒子的翻转比例分析,资源占有率越大翻转比越大,达到90%以上;其次为LUT型的存储器(RAM),再次之为块状RAM;触发器比例很少;反熔丝型FPGA不存在配置数据翻转问题。因此光纤陀螺FPGA抗单粒子翻转措施应包括:1)尽可能选用反熔丝型FPGA;2)对于非熔丝型FPGA资源占有率控制在75%以下;3)对关键部位进行三模冗余防护设计;4)每个采样周期内进行更新;5)关键数据和标识采取三取二措施;6)采用由CD4060BDMSR构成的非可编程看门狗;7)在程序跑飞等情况下对系统进行复位处理;8)电路备份设计。

将上述措施量化于单粒子翻转计算模型中,对措施逐一进行计算分析,得到量化值。通过激光手段验证位翻转概率;通过电子加速器验证系统翻转概率。

### 3.6 高可靠、长寿命筛选试验设计

从设计寿命5~8 a、可靠度0.99,反推地面验证试验时间。考虑卫星试验的特点,并通过一定的子样情况,从系统角度设计试验包括:1)特定元器件的筛选、淘汰试验;2)设计参数拉偏试验、温度交变拉偏试验、力学环境拉偏试验;3)光纤温度冲击后的空间辐射环境(5~8 a辐射剂量)辐照耐量摸底试验;4)发光二极管空间环境适应性设计验证试验(考虑长期辐照下光性能退化)、抗振动能力验证;5)光纤陀

(下转第113页)

录见表1。

表1 待发程控装置储存可靠性试验结果

Table 1 Storage reliability test result of ready-to-fire program control device

| 储存时间/a | 样本量/发 | 失效数/发 |
|--------|-------|-------|
| 8      | 25    | 1     |
| 10     | 25    | 0     |
| 14     | 25    | 2     |

根据式(13)—(15),对表1的失效数据进行修正,修正后结果见表2。

表2 待发程控装置储存可靠性试验修正结果

Table 2 Corrected storage reliability test result of ready-to-fire program control device

| 储存时间/a | 样本量/发 | 失效数/发 |
|--------|-------|-------|
| 8      | 25    | 1     |
| 10     | 25    | 1.413 |
| 14     | 25    | 3.171 |

取待发程控装置的置信水平为90%,储存可靠度下限为95%,计算得到其可靠储存寿命为19 a,即制导弹药储存19 a,待发程控装置的可靠度仍可保证在0.95以上。

## 5 结论

应用可靠性统计分析法确定了试验方案,建立了制导弹药的可靠储存寿命模型,并且通过对储存试验数据的处理,得出了在一定置信水平和可靠度下限的制导弹药火工品中的待发程控装置可靠储存寿命,为研究制导弹药质量变化规律,对其质量监控和储存管理,确保其储存可靠性和使用可靠性都具有重大的意义。

### 参考文献:

- [1] 李淦,郑波. 基于步进应力加速寿命试验的某新型制导弹药储存寿命评估[J]. 弹箭与制导学报,2007,27(2): 307—308.
- [2] 刘传模. 弹药可靠性工程基础[M]. 石家庄:军械工程学院,1996:81—82.
- [3] 郑波,梁兵,方兴桥. 湿热环境下某引信储存寿命评估[J]. 装备环境工程,2011,8(6):1—3.
- [4] 赵志会. 高原环境弹药储存可靠性及评估方法研究[D]. 南京:南京理工大学,2008:39—42.
- [5] 李明伦,李东阳,郑波. 弹药贮存可靠性[M]. 北京:国防工业出版社,1997:63—97.
- [6] 总装备部通用装备保障部. 弹药质量管理学[M]. 北京:国防工业出版社,2007:118—120.

(上接第79页)

螺温度特性验证试验、参数偏移验证试验、子样可靠度验证试验;6)系统环境与可靠性试验;7)光纤陀螺寿命试验;8)光纤陀螺关键组件高应力、高加速验证试验。

## 4 结论

光纤陀螺作为空间飞行器的“眼睛”,其可靠性水平直接决定了飞行器的可靠性。采用冗余设计可以进一步提高系统可靠性。长寿命、高可靠卫星是我国今后航天技术重点发展的方向之一,是国民经济和社会发展的迫切要求。光纤陀螺作为卫星的一

项关键部件,是目前制约我国卫星寿命和可靠性的主要瓶颈之一。光纤陀螺在长寿命和可靠性方面具备在空间应用的特点,国外已开展了大量研究工作,并且获得了空间的实际应用。我国在光纤陀螺研究领域已进行了大量研究,并已成功进行了在轨应用。进一步推动光纤陀螺高可靠、长寿命研究,将为提高我国航天产品的寿命和可靠性做出贡献。

### 参考文献:

- [1] 马静,辛波. 基于空间应用环境的光纤陀螺可靠性分析[J]. 中国惯性技术学报,2006,14(6):81—85.
- [2] 张峰. 光纤陀螺组合正样设计报告[R]. 北京:时代光纤,2011.