

## 光纤陀螺组合的热设计及分析

刘颖<sup>1</sup>, 范永青<sup>1</sup>, 徐金涛<sup>2</sup>

(1. 西安邮电大学 自动化学院, 陕西 西安 710121;

2. 中国科学院西安光学精密机械研究所 光纤惯性测量与传感工程中心, 陕西 西安 710119)

**摘要:** 为了满足环境温度的要求, 快速、可靠的完成光纤陀螺组合的设计方案, 对光纤陀螺组合进行热分析和热设计。建立光纤陀螺组合模型和有限元模型, 设定要求的边界和约束条件, 分析光纤陀螺组合内部关键元器件及组件在整个温度循环的温度及可靠性。最后通过热设计的方式, DSP 的最高温度降低了 10 °C, DC/DC 电源模块的最高温度由原来的 90 °C 降到了 70 °C, 所有关键元器件都工作在其额定温度范围内, 光纤陀螺组合内部温度场的均匀性得到了改善, 由原来的 30 °C 降到了 10 °C, 为设计方案的确定提供了依据。

**关键词:** 光纤陀螺; 有限元; 热分析; 热设计

**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3750-05

## Thermal design and analysis for fiber optic gyroscope combination

Liu Ying<sup>1</sup>, Fan Yongqing<sup>1</sup>, Xu Jintao<sup>2</sup>

(1. School of Automation, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China;

2. Center of Fiber Optic Inertial Measure and Sensor Engineering, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy Science, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** In order to meet the requirements of environmental temperature, complete quickly and reliably the design scheme of FOG combination, the thermal design and analysis of FOG combination were carried out. The combination model and finite element model were established, the boundary conditions and constraints conditions were set, the temperature and the reliability of the key components and assemblies of the combination FOG were analyzed in entire temperature cycles. Finally, the maximum temperature of DSP was reduced by 10 °C, the maximum temperature of DC/DC power modules was from the original 90 °C down to 70 °C, the all critical components and assemblies were working within their rated temperature range through the way of thermal design, the uniformity of fiber optic gyroscope combination of internal temperature field was improved, from the original 30 °C down to 10 °C, a basis was provided to determine the design of scheme.

**Key words:** fiber optic gyro; finite element; thermal analysis; thermal design

收稿日期: 2015-04-05; 修订日期: 2015-05-03

基金项目: 国家青年基金项目(51405387)

作者简介: 刘颖(1979-), 女, 博士, 主要从事优化设计和数据处理方面的研究。Email: ly676@163.com

## 0 引言

现代导航、制导、精确打击等领域对惯性导航系统在复杂环境下的可靠性和精度提出了越来越高的要求,而惯性导航系统的性能主要取决于其核心器件光纤陀螺组合<sup>[1-2]</sup>。温度是影响光纤陀螺组合精度和可靠性的关键因素之一。一方面,组合内部温度场不均匀会使光纤陀螺产生温度漂移和相位误差<sup>[3-5]</sup>。国内外学者针对单轴光纤的温度漂移和相位误差的研究,大多是对光纤陀螺的输出进行温度补偿<sup>[2,6-7]</sup>。另一方面,惯性导航系统的发展趋势,光纤陀螺组合迅速朝小型化方向发展,内部结构紧凑,热流密度随之增加,内部器件散热困难,局部温度过高,这会造成组合内部元器件产生失效、使用寿命过短,严重降低组合的可靠性<sup>[8-10]</sup>。如何从根源上降低温度对光纤陀螺组合的影响,降低局部温度值,使内部温度场更加均匀,不仅能保证各元器件、组件在规定的热环境下参数正常、可靠的工作,而且可以降低温度对光纤陀螺的影响,有效提高光纤陀螺组合的精度和可靠性。

以光纤陀螺组合为研究对象,首先建立了光纤陀螺组合的实体模型,然后研究了热传递理论,利用有限元理论分析了在 2 个交变的高低温循环(-10~60℃)下组合内部各个元器件、组件的温度分布,并对仿真结果进行分析,对超过预定温度的关键元器件进行热设计,最后对经过热设计后的组合重新进行验证,使各个元器件、组件在整个温度循环内的节点温度都保持在其额定温度范围内,为整个光纤陀螺组合的设计方案提供指导和保证。

## 1 光纤陀螺组合的实体模型

光纤陀螺组合是由 3 个光纤陀螺、3 个加速度计、光源、电路板、机械支撑结构等若干零部件构成。材料有铝合金、环氧树脂材料。工装方式包括紧配合、胶粘接、螺栓固接等多种方式。

在 Solidworks 中对光纤陀螺组合进行实体建模,在利用 Ansys 进行有限元分析之前,要对模型进行必要的简化<sup>[11]</sup>。这里简化了倒角、倒圆、沟槽装配孔、凸台以及垫片等对热分析影响不大的几何特征和零部件,并尽可能采用合并的方式简化,减小零部件的数量,这样即可以保证计算的精度,又可以提高

分析计算的速度。图 1 为光纤陀螺组合简化后的结构图。

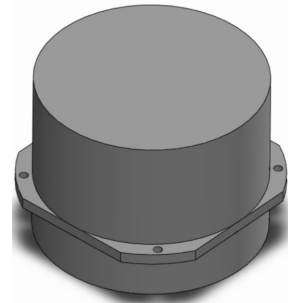


图 1 光纤陀螺组合结构模型

Fig.1 Structure model of FOG combination

## 2 热传递理论

热传递的方式主要有三种:热传导、热对流和热辐射。光纤陀螺组合内部有很多热源,热源传递热量的主要方式之一是热传导。当热源安装到结构上,通过接触进行热传导。热传导遵循傅里叶定律:

$$q^* = -K_m \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1)$$

式中: $q^*$  为热流密度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $K_m$  为导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\frac{\partial T}{\partial n}$  为沿  $n$  向的温度梯度,即沿  $n$  向温度的变化率,负号表示热量流向温度降低的方向。导热系数是物质固有的热物性参数之一,但会受环境温度、材料的压力、密度、湿度等因数的影响,这里靠实验测试得到。

热对流是光纤陀螺组合热量散发到环境中的主要方式之一。对流一般作为面边界条件施加。热对流用牛顿冷却方程来描述:

$$q^* = h_f(T_s - T_b) \quad (2)$$

式中: $h_f$  为对流换热系数;  $T_s$  为固体表面的温度;  $T_b$  为周围流体的温度。

热辐射是光纤陀螺组合表面的散热方式之一。在组合中每个物体同时辐射并吸收热量。它们之间的净热量传递可以用斯蒂芬-波尔兹曼方程来计算:

$$Q = \varepsilon \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

式中: $Q$  为热流率;  $\varepsilon$  为吸收率(黑度);  $\sigma$  为斯蒂芬-波尔兹曼常数,约为  $5.6 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ;  $A_1$  为辐射面 1 的面积;  $F_{12}$  为由辐射面 1 到辐射面 2 的形状系数;  $T_1$  为辐射面 1 的绝对温度;  $T_2$  为辐射面 2 的绝对温度。

### 3 热分析过程

利用 Ansys 提供的与 Solidworks 专用接口将模型导入到 Ansys 中,这样可以保证模型的完好性<sup>[1]</sup>。材料设计如表1 所示。

表 1 材料列表

Tab.1 Materials list

Material	Young's modulus $E$ /Pa	$\mu$	Density $\rho$ /Kg·M <sup>-3</sup>	Material strength /MPa
Aluminum alloy	7.30E+010	0.33	2 800.0	280-300
Resin fiber	8.14E+010	0.322	1 630.0	4 400

用 Ansys 进行热分析要先将所处理的对象划分成有限个单元,对各个部件进行网格划分,然后根据能量守恒原理求解一定边界条件和初始条件下每一个节点处的热平衡方程,计算出各个节点的温度及其他相关量。

这里薄板部分使用板壳单元,较厚的部位使用体单元,加速度计部件用质量元模拟;零件-零件的装配使用 RBE2 线刚性单元模拟。包含约束的有限元模型如图 2 所示。模型中共包含节点 13 815 个,单元 10 365 个,多点约束 21 个,单元性质集 3 个。



图 2 光纤陀螺组合的有限元模型

Fig.2 Finite element model of FOG combination

光纤陀螺组合在工作时间内需要承受高低温的热冲击,从光纤陀螺组合内部取关键部位进行 2 个交替的高低温循环(-10~60℃)下的热分析。计算模型中节点与器件的对应关系如表 2 所示。

表 2 中上下外壳分别取 1 个节点,支架、基座分别取 1 个节点,3 个光纤陀螺分别从各自的陀螺支架上各取 1 个节点,3 个电路板、导航计算机板和二

次电源板的 4 个角上分别取 1 个节点,FPGA、DSP 和电源模块的中心位置各取一点。分析比较表 1 中各个节点的温度。

表 2 器件与节点对应关系

Tab.2 Correspondence relationship between devices and nodes

Name	Node numbering
Shell	101、102
Bracker	103
Base	104
FOG 1,2,3	105,106,107
Circuit board 1	108,109,110,111
Circuit board 2	112,113,114,115
Circuit board 3	116,117,118,119
Navigation computer power	120,121,122,123
Secondary power supply board	124,125,126,127
FPGA	128
DSP	129
Power modules	130

### 4 热设计与热分析

光纤陀螺组合的机械结构各部件受环境温度影响较小,外壳、支架与基座部分其温度变化曲线与环境温度变化基本一致,它们 2 个交替的高低温循环(-10~60℃)下的温度分布如图 3 所示。

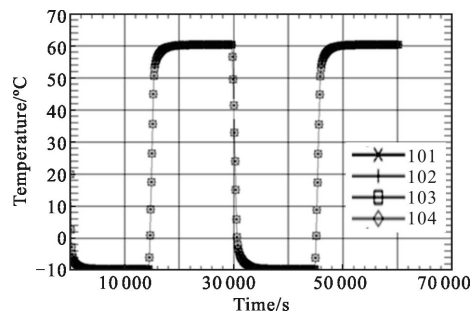


图 3 外壳、支架与基座部分的温度变化曲线

Fig.3 Temperature change curve of the enclosure, bracket and base

3 个光纤陀螺其温度变化曲线在高温保持阶段比环境温度略高,最高温度分别在 62~65℃之间。

2 个交变的高低温循环(-10~60℃)下的温度分布如图 4 所示。

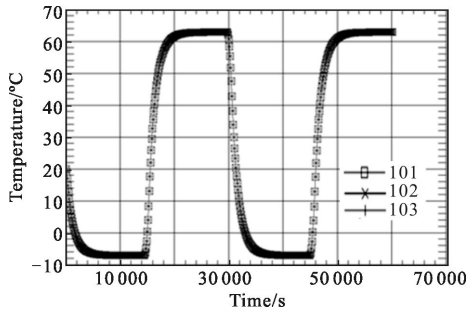


图 4 3 个陀螺的温度变化曲线

Fig.4 Temperature change curves of the three gyroscopes

三块电路板的温度变化曲线与环境温度变化较大,最高温度分别在 62~70℃之间。2 个交变的高低温循环(-10~60℃)下的温度分布如图 5 所示。

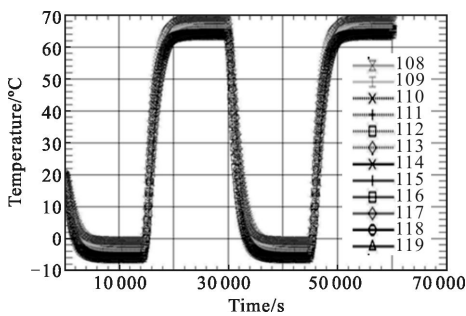


图 5 2 个电路板的温度变化曲线

Fig.5 Temperature change curves of the three circuit boards

导航计算机板和电源板的温度变化曲线与环境温度变化基本一致。

FPGA、DSP、电源模块的温度变化曲线如图 6 所示。从中可以看出,FPGA 的最高温度将近 70℃;DSP 的最高温度则达到了 79℃,DC/DC 电源模块在高温保持阶段最高温度达到了 90℃。

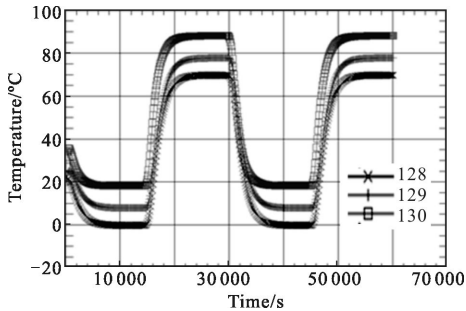


图 6 FPGA、DSP、电源模块的温度变化曲线

Fig.6 Temperature change curves of the FPGA, DSP and power modules

由以上分析结果可以看出,光纤陀螺组合的结构件、3 个光纤陀螺、3 块电路板、导航计算机板和二次电源板的温度与环境温度相差较小。而光纤陀螺组合的局部电子元器件由于自身的功耗,温升较高,在不采取任何散热措施的情况下,DC/DC 电源模块和 DSP 则超出了元器件最高许用温度,造成了光纤陀螺组合内部温度的均匀性较差,严重影响光纤陀螺组合的精度和可靠性。因此,有必要针对 DC、DC 电源模块、DSP、FPGA 等大功耗元器件采取散热措施。

对光纤陀螺组合的热控措施综合起来考虑主要要保证良好的热通道,具体措施主要有两方面:一方面,对于自身功耗高的电子元器件采用使用紫铜导热板,一端与元器件外壳相连接,另一端连接基座,接触面加装导热绝缘垫;对于直接安装到底座上的光学器件采用加入导热硅脂的方式;所用连接到底座上的热通道均要加入到热垫,避免点式接触。另一方面,增加安装接触面的面积,外表面喷黑漆,内表面做黑色氧化处理,加大导热系数。图 7、图 8 和图 9 分别为进行热设计,采取散热措施后光纤陀螺组合各零部件的温度变化曲线。从图中可以看出,在采取散热措施之后,3 个光纤陀螺的温度变化曲线与环境温度的变化基本一致,在高温保持阶段,最高温度降低了 5℃。3 块电路板的温度变化曲线与环境温度的变化也基本一致,在高温保持阶段,最高温度降低了 10℃。在高温保持阶段,FPGA 的最高温度由原来的 72℃左右降到了 62℃左右;DSP 的最高温度由原来的 79℃左右降到了 68℃左右;DC/DC 的最高温度由原来的 90℃左右降到了 70℃左右。光纤陀螺组合内部的所有元器件的温度均符合使用要求,且内部温度的均匀性也得到了很好的改善,温差由原来的 30℃,降低到 10℃。

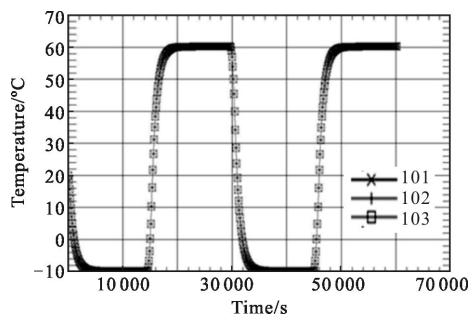


图 7 3 个陀螺的温度变化曲线

Fig.7 Temperature change curves of the three gyroscopes

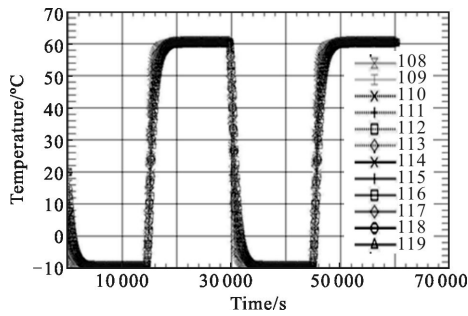


图 8 3 个电路板的温度变化曲线

Fig.8 Temperature curves of the three circuit boards

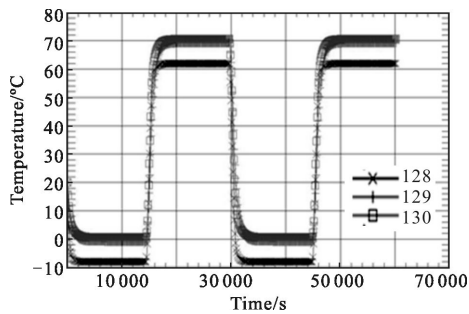


图 9 FPGA、DSP、电源模块的温度变化曲线

Fig.9 Temperature change curves of the FPGA, DSP and power modules

## 5 结论

为了保证光纤陀螺组合在复杂温度环境下正常工作可靠的工作,对光纤陀螺组合设计方案进行了基于有限元的热仿真分析。分析发现,自身热耗大的电子元器件,在温度循环中局部节点温度过高,尤其在高温保持阶段,FPGA 的最高温度将近  $70^{\circ}\text{C}$ ;DSP 的最高温度则达到了  $79^{\circ}\text{C}$ ,DC/DC 电源模块在高温保持阶段最高温度达到了  $90^{\circ}\text{C}$ ,超过了最高许用温度。为了降低局部的节点温度,引入了热设计,仿真结果表明,散热措施效果明显,光纤陀螺组合内部的所有元器件的温度均符合使用要求,且内部温度的均匀性也得到了很好的改善,温差由原来的  $30^{\circ}\text{C}$ ,降低到  $10^{\circ}\text{C}$ ,从而保证了组合在整个温度循环工作的高可靠性。光纤陀螺组合的热设计与热分析可以为设计方案的确定提供依据。

## 参考文献:

- [1] Liu Ying, Zhao Xiaodong, Li Yan, et al. Optimize and analysis of fiber optic gyroscope combination bracket based on redundancy design [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1556-1560. (in Chinese)
- [2] Zhang Tong, Zhang Jun, Hu Junjie. Thermally induced bias drift integral compensation for triaxial FOG strapdown inertial navigation system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(5): 1173-1179. (in Chinese)
- [3] Liu Ying, Li Yan, Xu Jintao. New adaptive threshold filtering for fiber optic gyroscopes [J]. *Journal Of Applied Sciences*, 2010, 28(1): 56-60. (in Chinese)
- [4] Liu Haixia, Jiang Yaofei, Song Ningfang, et al. FOG ring modules thermal analysis based on thermoelectric analogy[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(5): 596-600. (in Chinese)
- [5] Zhang Chunxi, Du Shisen, Jin Jing, et al. Thermal analysis of the effects of thermally induced nonreciprocity in fiber optic gyroscope sensing coils[J]. *Optik*, 2011, 122: 20-23.
- [6] Zhou Qi, Qin Yongyuan, Cheng Yan, et al. Fuzzy compensation of thermally induced bias drift in fiber optical gyro [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, 18(4): 471-476.
- [7] Chen Xiyuan, Shen Chong. Study on error calibration of fiber optic gyroscope under intense ambient temperature variation [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(17): 3755-3760.
- [8] Shen Chong, Chen Xiyuan. Analysis and modeling for fiber-optic gyroscopoe scale factor based on environment temperature [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(14): 2541-2547.
- [9] Wang Wei, Xiang Zheng, Meng Xiangtao. Step -stree accelerated degradation technique with two accelerating stresses for fiber-optic gyroscope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1565-1570. (in Chinese)
- [10] Choi W S. Analysis of temperature dependence of thermally induced transient effect in interferometric fiber-optic gyroscopes [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2011, 15 (3): 237-243.
- [11] Liu Ying, Li Yan, Xu Jintao. Dynamic characteristic of FOG and its structure optimization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 520-524. (in Chinese)