

光纤陀螺温度场分析及结构优化设计*

张伟,蔡迎波,魏学通

(92941 部队 95 分队,辽宁 葫芦岛 125001)

摘要:从导热微分方程出发,建立了光纤陀螺温度场有限元模型,对模型进行了稳态温度场和瞬态温度场仿真分析。利用铂电阻测温电路对仿真结果进行实验验证,两者相对误差小于3%,证明仿真分析的结果是正确和有效的。针对光纤环温度场分布不均匀的情况,对光纤陀螺结构进行了优化设计。光纤陀螺在25℃环境中稳定工作时,稳态温度场分析结果表明,优化设计后光纤环最高与最低温度差为0.05℃,较优化前的0.19℃减小了73.7%;将陀螺置于60℃环境且处于非开机状态时,10min瞬态温度场分析结果表明,优化设计后光纤环最高与最低温度相差0.11℃,较优化前的0.19℃减小了42.1%。

关键词: 光纤陀螺;温度场;有限元分析;结构优化

中图分类号: V241.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2013)02-0169-04

Temperature field analysis and structure redesign of fiber optic gyroscope

ZHANG Wei, CAI Yingbo, WEI Xuotong

(Element 95, 92941 Unit of PLA, Huludao 125001, China)

Abstract: Based on partial differential equation of heat conduction, a temperature field model of fiber optic gyroscope (FOG) was established. The steady-state temperature field and the transient temperature field were given. A circuit to measure temperature using a platinum resistor was designed. The experiment results are compared with the simulated ones and the error is less than 3%, which validates the legitimacy of the simulation. The structure of FOG was redesigned to improve the thermal symmetry of the fiber ring. The steady-state temperature field indicates that the temperature difference of the fiber ring is reduced 73.7 percent to 0.05 degree after structure redesign. The transient temperature field in 10 min shows that the temperature difference of the fiber ring is reduced 42.1 percent to 0.11 degree after structure redesign.

Key words: fiber optic gyroscope; temperature field; finite element analysis; structure redesign

光纤陀螺是一种基于 Sagnac 效应的全固态惯性测量仪表,由于构成光纤陀螺的核心部件光纤对温度较为敏感,当沿着光纤存在一个随时间变化的温度分布梯度时,光纤陀螺会产生热致非互易性相位差,即所谓的 Shupe 效应^[1],这使得温度均匀性已成为光纤陀螺迈向工程化所面临的难题之一。

已有理论研究表明,当沿相反方向传播的两束光经历相同的温度变化时,Shupe 效应将会被抵消,因此光纤环广泛采用各种对称缠绕方式,更有研究者提出光纤环随机绕法^[2]来实现统计意义上的热对称。但是,上述的对称绕法和现有的绕制工艺无法保证理想的热对称性,为降低这种非理想情况下非对称性引入的 Shupe 效应,国内外学者广泛采用各种预测模型对光纤陀螺温度漂移误差进行建模,然后进行补偿^[3-4]。本文提出对光纤陀螺整体结构采用对称化结构设计的思

想,利用有限元分析方法对光纤陀螺的温度场分布进行分析,根据分析结果对光纤陀螺的结构进行对称优化设计,以提高光纤陀螺光纤环的温度分布均匀性,改善光纤陀螺温度补偿效果。

1 光纤陀螺热分析原理

由能量守恒定律和傅里叶定律可知,物体中的温度场都应该满足导热微分方程^[5]:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\Phi} \quad (1)$$

其中 t 为摄氏温度, λ 为导热系数, ρ 、 c 、 $\dot{\Phi}$ 及 τ 分别为密度、比热容、单位时间内单位体积中内热源的生成热及时间。

当 $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$ 时,即系统内各点的温度不再随时

* 收稿日期:2012-09-01

基金项目:国家部委基金项目

作者简介:张伟(1983—),男,重庆潼南人,工程师,博士,E-mail:zw650@tom.com

间变化,且系统参数为常物性时,式(1)变为泊松方程:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\dot{\Phi}}{\lambda} = 0 \quad (2)$$

该式即为常物性、稳态、三维且有内热源问题的温度场控制方程式。

为求解出该导热微分方程,还需要对该导热微分方程施加定解条件,固体加热问题适用于第三类边界条件:

$$-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) = h(t_w - t_f) \quad (3)$$

即规定了边界上物体与周围流体间的表面传热系数 h 及周围流体的温度 t_f ,上式中 n 为换热表面的外法线, t_w 为表面温度。

2 有限元模型建立与载荷加载

2.1 光纤陀螺有限元模型

本文所采用的光纤陀螺主要由陀螺盒体、前置放大电路、信号处理电路、光纤环、光纤环骨架、超辐射发光二极管(SLD)光源、光电探测器、压电陶瓷环(PZT)等组成。由于光纤陀螺的结构比较复杂,在对其进行建模时需作适当的简化。光纤陀螺内部热源主要有信号处理电路板上的 DSP 与 FPGA,SLD 光源以及光电探测器,由于只需要关心系统整体的温度特性和温度场分布,而不需要知道热源内部的温度场分布,所以建模时只需根据热源几何尺寸用均匀材质的块状发热材料来代替。

2.2 载荷的加载

光纤陀螺与外界环境的热交换主要有以下几种方式:陀螺腔体内部的有限空间自然对流换热;陀螺腔体与盒体之间的有限空间自然对流换热;陀螺盒体侧壁和上表面与外界环境的无限空间自然对流换热;陀螺内部热源与电路板、电路板与光纤环骨架、光纤环骨架与盒体、光电探测器和 SLD 光源通过导热硅胶与陀螺盒底、陀螺盒底面与外界环境的热传导换热。由于系统温升较小,暂不考虑辐射换热对系统的影响。在 ANSYS 分析中,需要设定材料的热参数、加载初始条件和载荷边界条件,其中载荷边界条件主要包括元器件热生成率的计算和对流换热系数的计算。

3 光纤陀螺温度场分析

3.1 稳态温度场分析

本文稳态温度场分析的是环境温度为 25℃

时,光纤陀螺开机后的稳态温度场分布。在用 ANSYS 进行仿真分析时,选用 20 节点的空间单元 SOLID90,共划分 393606 个节点,249325 个单元。光纤陀螺稳态温度场分布如图 1 所示,光纤环稳态温度场分布如图 2 所示。

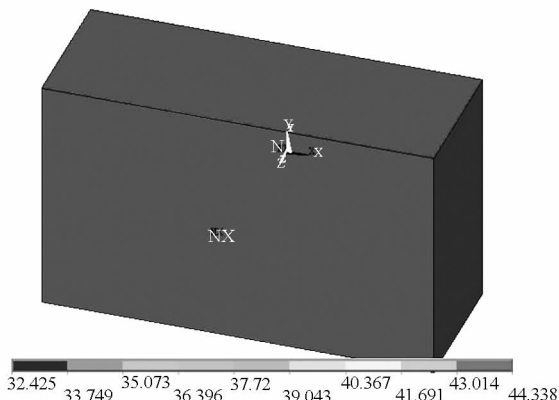


图 1 光纤陀螺稳态温度场分布

Fig. 1 Steady-state temperature field of FOG

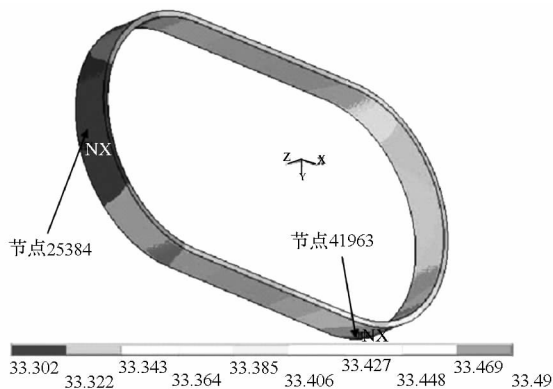


图 2 光纤环稳态温度场分布

Fig. 2 Steady-state temperature field of fiber circle

从图 1 中可知,由于光纤陀螺的热源主要分布在信号处理板和前置放大电路板上,故光纤陀螺整体的温度呈现出内高外低的分布趋势,温度范围为 33.4℃ 至 44.3℃。由于电路板的导热系数较低,光纤陀螺信号处理板上 DSP 和 FPGA 的热量无法迅速被传导出去,造成了局部的热量堆积,该处的最高温度达到 44.3℃。SLD 光源和光电探测器虽然置于前置放大电路板上,但由于将它们通过导热硅胶与陀螺盒底相连,热量通过盒底被很好地传导出去,故温度较低,在 34.2℃ 左右。远离陀螺内部热源的陀螺盒顶处温度最低,约为 32.4℃。

由图 2 可以看出,光纤环上的温度分布并不均匀,温度值最大相差 0.19℃。这是由于光纤陀螺信号处理板通过四角固定在光纤环骨架上,加上信号处理板上 DSP 和 FPGA 位置分布不对称(DSP 跟节点 41963 比较靠近),导致陀螺工作时

信号处理板上 DSP 与 FPGA 的热量通过电路板的四角传导至光纤环骨架上,造成光纤环骨架和光纤环沿环向方向上温度非均匀分布,光纤环上节点 25384 和节点 41963 之间温度相差 0.19℃。

为验证仿真分析数据的正确性和有效性,采用粘贴铂电阻的方法在光纤陀螺内部选取若干点进行了温度测试实验,表 1 为各监测点温度的仿真及实验测试结果。从表中可以看出,仿真分析结果与实验测试结果较为一致,两者误差小于 3%,证明本文所建立的光纤陀螺温度场仿真模型是正确有效的。

表 1 各监测点温度的仿真及实验测试结果

Tab.1 Thermal comparison of analysis and measurements

测温点	仿真值(℃)	测量值(℃)	相对误差(%)
SLD 光源	34.21	34.93	2.06
光电探测器	35.87	36.41	1.48
DSP	44.32	45.25	2.05
FPGA	44.05	44.84	1.76
节点 25384	33.30	33.58	0.83
节点 41963	33.49	33.87	1.12

3.2 瞬态温度场分析

瞬态温度场分析主要分析外界环境的变化对光纤陀螺光纤环温度场分布的影响。设定陀螺初始温度为 25℃,将其放入环境温度为 60℃的恒温箱中,陀螺处于不开机状态,仿真时间为 5h,时间步长取为 10min,共进行了 30 个子步。图 3 和图 4 分别为光纤环 10min 和 1h 的温度瞬态分析结果。

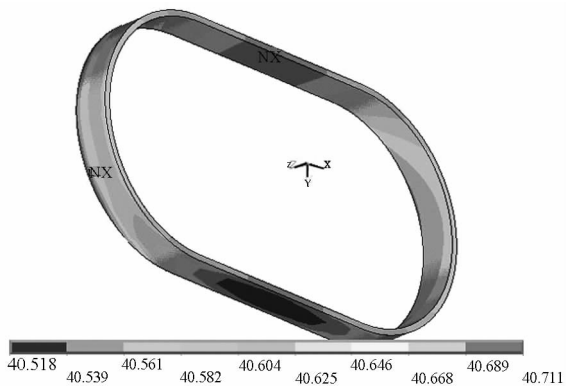


图 3 光纤环 10min 的瞬态温度仿真结果

Fig.3 Transient temperature field of fiber circle for 10 minutes

从瞬态温度场分布可以看出,由于光纤陀螺自身结构的原因,外界热量也是非均匀传导至光纤环的。外界热量首先均匀传导至陀螺盒体,陀螺盒体再经由四个台阶热传导面传导给光纤环骨架,造成光纤环温度呈现出两边(椭圆长轴方向)

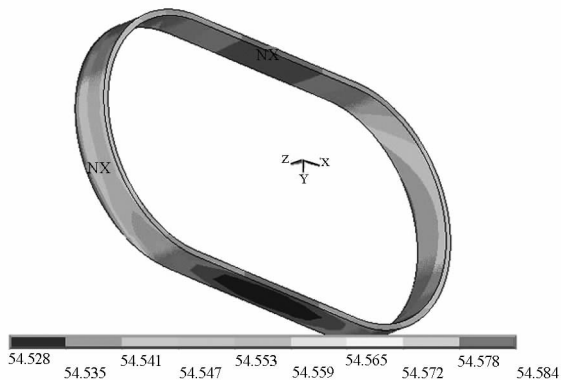


图 4 光纤环 1h 的瞬态温度仿真结果

Fig.4 Transient temperature field of fiber circle for 1 hour

高、中间(椭圆短轴方向)低的不均匀分布。由图 3 和图 4 可知,10min 时,由于结构设计的原因,外界热量主要通过陀螺盒体四角的台阶热传导面传导给光纤环骨架,导致光纤环中间与两端的最大温差 0.19℃,随着时间推移,光纤环中间与两端的热传导使得两部分温差逐渐缩小。

由上述光纤陀螺的稳态和瞬态温度场分析可以看出,采用此种结构的光纤陀螺的光纤环在内部自身热源或外界环境热源作用时会产生非均匀分布的温度场。当光纤陀螺内部自身热源作用时,稳态温度场分析表明光纤环上最高与最低温度相差 0.19℃;当外界环境温度为 60℃时,10min 瞬态温度场分析表明光纤环上最高与最低温度也相差 0.19℃。

4 光纤陀螺结构优化设计

为降低光纤陀螺光纤环温度分布非均匀性,减小热致非互易性相位差,对光纤陀螺结构进行了优化设计。结构优化设计的核心是提高结构的对称性和增加导热通道,从而使得热量的传导更加均匀。根据这一原则,对原有光纤陀螺结构作了如下改进:将信号处理板上的 DSP 和 FPGA 改为左右对称分布;将原有信号处理板与光纤环骨架之间的四角台阶导热面增加为 6 个,即在中间位置对称施加一对台阶导热面;将原有光纤环骨架与盒体之间的四角台阶导热面改为环形导热面,即使得光纤环骨架与盒体由原来的四角接触变为一个环形面接触。图 5 与图 6 为光纤陀螺结构优化设计后光纤环的稳态温度场分布与 10min 瞬态温度场分布,分别对应于优化设计前的图 3 和图 4。由光纤环稳态温度场分布图可以看出,结构优化设计后光纤环最高与最低温度差为 0.05℃,较优化前的 0.19℃减小了 73.7%;由 10min 瞬态温度场分布图可以看出,结构优化设

计后光纤环最高与最低温度相差 0.11°C ,较优化前的 0.19°C 减小了 42.1% 。

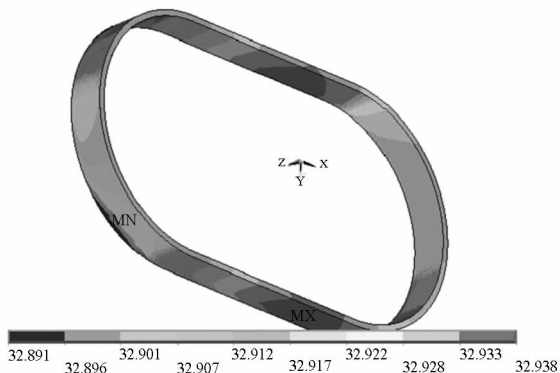


图 5 优化后光纤环稳态温度场分布

Fig. 5 Steady-state temperature field of fiber circle

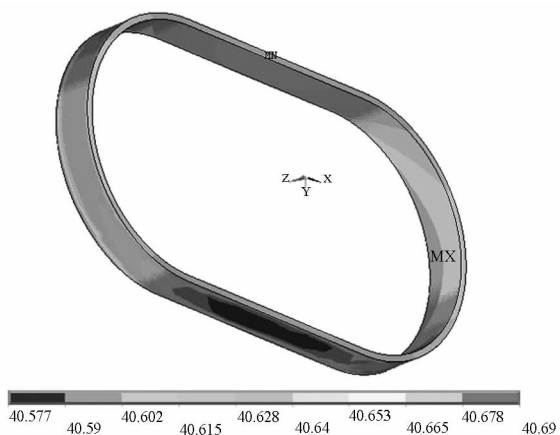


图 6 优化后光纤环 10min 的瞬态温度分布

Fig. 6 Transient temperature field of fiber circle for 10 minutes after redesigned

5 结论

本文建立了光纤陀螺的有限元模型,并对其进行了稳态和瞬态温度场分析,得到了光纤陀螺的稳态和瞬态温度场分布结果。通过粘贴铂电阻的方法对光纤陀螺内部若干点进行了温度测试实验,实验测试结果与仿真结果吻合较好,误差小于 3% ,说明所建立的光纤陀螺有限元模型合理,仿真结果正确有效。针对光纤陀螺光纤环温度分布不均匀的情况,对光纤陀螺结构进行了优化设计。在稳态温度场分析时,结构优化设计后光纤环最高与最低温度差为 0.05°C ,较优化前的 0.19°C 减小了 73.7% ;在 10min 瞬态温度场分析时,结构优化设计后光纤环最高与最低温度相差为 0.11°C ,较优化前的 0.19°C 减小了 42.1% 。

参考文献 (References)

- [1] Shupe D M. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer[J]. Appl. Opt. , 1980,19(5) :654 – 655.
- [2] Dyott R B. Reduction of the Shupe effect in fiber optic gyros, the random-wound coil[J]. Electron. Lett. , 1996,32(23) : 2177 – 2178.
- [3] Mohr F. Thermo-optically induced bias drift in fiber optical Sagnac interferometers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(1) : 27 – 41.
- [4] Song Y S, Zhou S Q, Lu Z. Technical ways to improve the temperature stability of fiber optic gyros[J]. Proceedings . Of SPIE, 2001, 4540: 420 – 423.
- [5] 杨士铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2006. YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. Beijing: Advanced Education Press, 2006. (in Chinese)