光纤陀螺系统热建模及仿真

孟照魁 崔佳涛 杜新政 元春峰

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院，北京 100083)

摘 要：在热状态方程的数学离散的基础上，从系统的角度出发，建立某一高精度光纤陀螺的热模型，介绍光纤陀螺电子系统热模型的建立过程，包括结构体几何模型的建立、内部热源模型的建立以及热敏光纤环体模型的建立. 模型建立的方法不仅适用于研究对象，对于结构和组成类似的其他类型的陀螺也是适用的. 并通过稳态热仿真研究了系统内热点分布及温度场分布；瞬态仿真分析了陀螺在常温(25.6℃)、低温(－40℃)以及高温(＋60℃)环境下，启动过程中陀螺内部温度的变化，实验测试对比分析验证了模型的正确性. 在此基础上得出了几个有意义的结论，这将有益于高精度光纤陀螺的工程化.

关 键 词：光纤陀螺；建模及仿真；光纤环

中图分类号：TN 06

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)06-0701-04

Building model and simulation about heat of fiber optical gyroscope

Meng Zhaokui Cui Jiatao Du Xinzheng Yuan Chunfeng

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the mathematical discreteness of the heat state equation, a high precision FOG (fiber-optic gyroscope) thermal model was built as system angel. The building course of the system thermal model of the fiber-optic FOG was introduced, including of building structure geometry model, inner heat source model and fiber coil model which is sensitive to the heat. The method building model is not only applicable to this type of FOG, but also to other type whose structure and composition is analogous. The heat point distribution and temperature field distribution of the system was studied by steady state thermal simulation. The inner temperature change during the startup at 25.6℃, －40℃ and ＋60℃ was analyzed by instantaneous state simulation, and the validity of the model was approved by the experiments. At last, some significative conclusions were gained. And this work will advance the batch production of the high precision optical fiber gyroscope.

Key words: fiber-optic gyroscope; building model and simulation; fiber coil

温度对光纤陀螺性能有很大影响，温度的变化一方面来源于光纤陀螺自身发热，另一方面来源于环境温度的变化[1]. 工程化要求光纤陀螺的工作温度在－40～＋60℃之间，在低温(－40℃)与高温(＋60℃)环境下，陀螺性能会降低甚至不能正常工作. 本文从系统的角度出发，建立了某一高精度光纤陀螺的热模型，详细介绍了光纤陀螺电子系统热模型的建立过程，包括结构体几何模型的建立、内部热源模型的建立以及热敏光纤环体模型的建立. 模型建立的方法不仅适用于本研究对象，对于结构和组成类似的其他类型的陀螺也是适用的.

1 热状态方程的数学离散

在只考虑一维稳态问题前提下，热状态方程

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho\boldsymbol{u}\phi)=\mathrm{div}(\Gamma\mathrm{grad}\,\phi)+S$$

式中，ρ 为密度；$\boldsymbol{u}$ 为速度矢量分量；ϕ 为通用变

收稿日期：2006-08-21

作者简介：孟照魁(1973－)，男，山东单县人，讲师，mybuaa@buaa.edu.cn.

量；Γ 为广义扩散系数；S 为源项. 对于特定的方程，ϕ，Γ 和 S 具有特定的形式. 上式可简化为

$$\frac{\mathrm{d}(\rho u\phi)}{\mathrm{d}x}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left[\Gamma\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}x}\right]+S$$

在控制体上积分，则

$$\int_{\Delta V}\frac{\mathrm{d}(\rho u\phi)}{\mathrm{d}x}\mathrm{d}V=\int_{\Delta V}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left[\Gamma\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}x}\right]\mathrm{d}V+\int_{\Delta V}S\mathrm{d}V$$

式中，ΔV 是控制体的体积值. 当控制体很微小时，ΔV 可以表示为 $\Delta x\cdot A$，这里 A 是控制体界面的面积. 从而离散后的控制体，如图 1，在点空间域上放置节点 W 和 E，将控制体的边界(面)取在两个节点中间的位置 w 和 e.

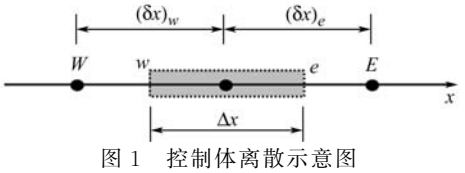

图 1 控制体离散示意图

$$(\rho u\phi A)_e-(\rho u\phi A)_w=\left[\Gamma A\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}x}\right]_e-\left[\Gamma A\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}x}\right]_w+S\Delta V$$

对于 S，通常是时间和物理量 ϕ 的函数，为简化处理，将 S 转化为如下线性方式：

$$S=S_C+S_P\phi_P$$

式中，S_C 是常数；S_P 是随时间和物理量 ϕ 变化的项.

在控制体 P 及时间段 Δt 上积分控制方程，有

$$\int_t^{t+\Delta t}\int_{\Delta V}\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}\mathrm{d}V\mathrm{d}t+\int_t^{t+\Delta t}\int_{\Delta V}\mathrm{div}(\rho u\phi)\mathrm{d}V\mathrm{d}t=\int_t^{t+\Delta t}\int_{\Delta V}\mathrm{div}(\Gamma\mathrm{grad}\,\phi)\mathrm{d}V\mathrm{d}t+\int_t^{t+\Delta t}\int_{\Delta V}S\mathrm{d}V\mathrm{d}t$$

进行积分运算，得到全隐式时间积分方案下的三维瞬态的离散方程为

$$a_P\phi_P=a_W\phi_W+a_E\phi_E+a_S\phi_S+a_N\phi_N+a_B\phi_B+a_T\phi_T+b$$

式中，a 为积分变量；下标 N,S,T,B 是在一维基础上增加的 4 个相邻节点；b 为积分常数. 式中各系数的表达式根据所采用的离散格式来确定.

2 光纤陀螺热模型

光纤陀螺是结构紧凑、内部元器件排布错综复杂的高集成度光机电一体化传感器仪表[2]. 从系统结构组成上看，包括主电路板、光源、耦合器、Y 波导、光电探测器、光源驱动电路板、光纤环以及光源温控功率管等部件. 这些部件中，既有对陀螺的内热产生显著贡献的器件(光源、光源驱动电路板、光源功率放大器、光电探测器)，又有对周围环境温度及温度变化均非常敏感的器件(光纤环). 正确合理地建立热分析模型是对光纤陀螺进行精确热仿真分析的前提.

如何在不影响模型准确的前提下对系统结构进行适当合理的简化是非常必要的. 在基于已获得的准确光纤陀螺主电路板模型的基础上，从各部件对陀螺的发热以及传热贡献大小对陀螺系统进行合理地简化，建立了陀螺系统的整体热分析模型.

光纤陀螺的散热路径可由图 2 简要表示. 光纤陀螺内部热源产生的热通过辐射、气隙以及安装接触面的传导将热传导至外壳，再由外壳以对流、辐射以及安装面的传导把热量散出.

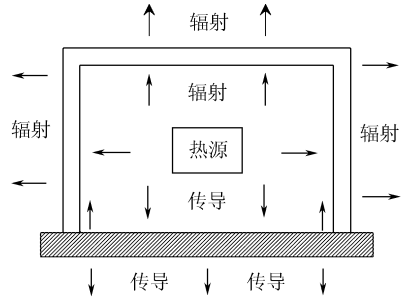

图 2 光纤陀螺热路图

2.1 光纤陀螺结构体几何模型

实际的光纤陀螺结构体采用了硬铝合金以及黄铜材料. 材料参数如表 1.

表 1 光纤陀螺结构体材料参数

材料	导热率/(W·(m·K)$^{-1}$)	密度/10^3(kg·m^{-3})	比热容/(J·(kg·K)$^{-1}$)
硬铝合金	120	2.78	880
黄铜	388	8.93	385

图 3 所示为简化后的结构体模型，与实际陀螺的结构体在几何形状方面是非常吻合和一致的.

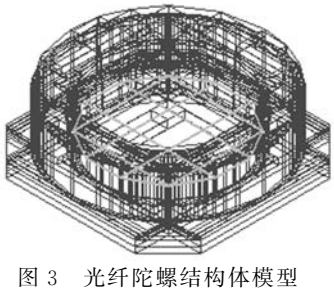

图 3 光纤陀螺结构体模型

2.2 光纤陀螺内部热源模型

光纤陀螺正常工作时，内部热量主要由主电路板、光源、功放、光源驱动板以及光电探测器产生. 当环境温度发生变化尤其是在恶劣的环境温

度下,光源为提高出纤功率的稳定性,功耗将大大超出常温下的功耗,成为内部最主要的热源,陀螺的整体功耗也将发生显著变化,同时产生大量的热[3].图 4 为通过实验测试获得的光纤陀螺在常温(25.6℃)、低温(－40℃)以及高温(＋60℃)环境温度下的功耗变化曲线.

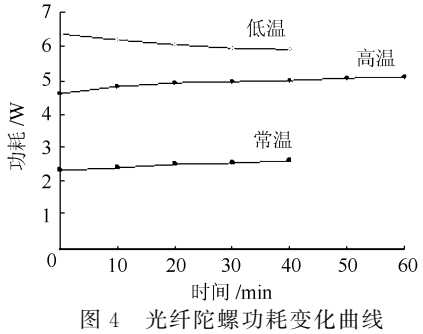

图 4　光纤陀螺功耗变化曲线

对于系统级的热分析研究,主要研究与分析的是系统整体的温度特性与温度场分布[4－5],对于各元器件内部的温度场分布不做研究,所以可对光源、功放、光源驱动板等热源进行简化处理,简化的途径是按照具有一定导热率和热耗的发热模块处理.

表 2 为建立的光纤陀螺内部其它热模型的参数列表.

表 2　光纤陀螺内部其余热源参数列表

器件	长×宽×高/mm	导热率/(W·(m·K)$^{-1}$)	密度/10^3(kg·m^{-3})	比热容/10^3(J·(kg·K)$^{-1}$)
光源	12×12×4	3	2.0	1.0
功放	10×10×5	10	0.5	0.5
光电探测器	22×14×4	1.5	3.0	1.2

2.3　光纤环环体模型与参数

光纤环环体是光纤陀螺内部的热敏器件,通过将数百米乃至上千米直径微细的光纤通过绕环机或由人工缠绕并用胶粘剂固化而成.光纤的结构主要由内外涂覆层、包层、高掺杂石英棒、纤芯组成.根据环体的物性参数,采用一个导热率、比热容以及密度均匀分布的模型来代替.

表 3 为光纤环环体详细物性参数综合后光纤环采用的参数.

表 3　光纤环环体物性参数表

参数	导热率/(W·(m·K)$^{-1}$)	比热容/10^3(J·(kg·K)$^{-1}$)	密度/10^3(kg·m^{-3})
胶粘剂	0.165	1.60	0.97
光纤外涂覆层	0.210	1.40	1.19
光纤内涂覆层	0.165	1.60	0.97
石英光纤	1.380	0.74	2.20
综合	0.330	1.37	1.33

3　光纤陀螺热仿真分析

在建立起符合实体几何特征、热源以及光纤环环体的模型之后,选取适当的参数、设置边界条件并采用合适的网格划分方案[6],便可对所建立起的系统进行热仿真分析.并在光源、功放、环体内壁、主电路板的 DSP(Digital Signal Processor)与 FPGA (Field Programmable Gate Array)、陀螺外壳的表面处分别设置了温度监测点,记录器件的温度值.

图 5 所示为建立好的光纤陀螺系统热模型三维视图.

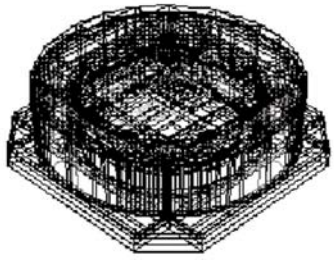

图 5　光纤陀螺系统热模型

3.1　常温稳态仿真

系统的常温稳态仿真设定环境温度与初始温度均为 25.6℃,陀螺顶面与底面的换热系数设置为 6 W/(m^2·K).

常温环境下,主电路板上的 DSP、FPGA 稳态温度值比裸露在空气中的温度上升 10.6℃与 11.5℃左右,考虑到初始环境温度存在着 6.2℃的差异,可以认为主电路板从裸露在空气中到密闭在系统中温升并不是很高,大约只有 4～5℃.主要原因在于,小间隙气体的热传导与电路板同外壳之间的热传导在散热中起到了重要作用.

光源与功放直接安装在高导热率的底座上,能将热快速的导出,所以其温度上升不是很高.图 6 为小温度区间内的温度云图.

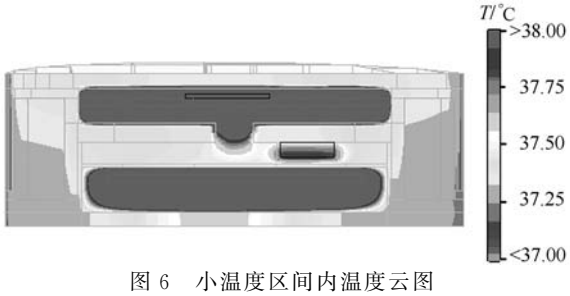

图 6　小温度区间内温度云图

图 6 说明,在小温度区间的范围内(37～38℃).系统温度达到稳态后,光纤环与陀螺结构体的温度基本一致,且均存在重力方向上的温度梯度,这与陀螺表面的自然对流散热有关.下方温度稍高于上方温度.

3.2　高温稳态仿真

设定环境温度与初始温度均为 60℃,设置陀螺表面换热系数为 8 W/(m^2·K).从图 4 的光纤

陀螺功耗变化图中可以看出,高温下陀螺的总功耗在达到温度平衡之前是缓慢上升的,随着陀螺整体温度的上升,需要更高的功耗来稳定光源的光功率,光路功耗的增加导致了陀螺总功耗的增加.仿真分析时取陀螺的总功耗为5 W.图7显示了仿真后陀螺 z 方向截面上的温度云图.

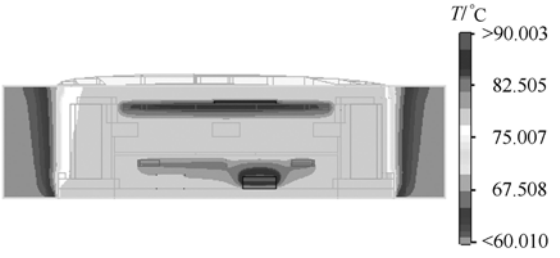

图7 光纤陀螺高温稳态温度云图

同常温相比,光源所处区域为系统中的高温区域.虽然设计时考虑了光源的散热要求,将光源固定在高导热率的底板上,来增强其散热能力,但由于高温下光源功耗的大幅增加,从而成为系统中温度最高的区域.稳态时的温度为90.0℃.受其影响,陀螺结构体、主电路板上的元器件的温升较常温下相比均有5℃左右的温升.

3.3 低温稳态仿真

设定环境温度与初始温度均为−40℃,设置陀螺表面换热系数为8 W/(m^2 · K).系统的总功耗设置为5.9 W.图8为计算机仿真后陀螺 z 方向截面上的温度云图.同高温的结果相仿,光源为系统内最高热点.

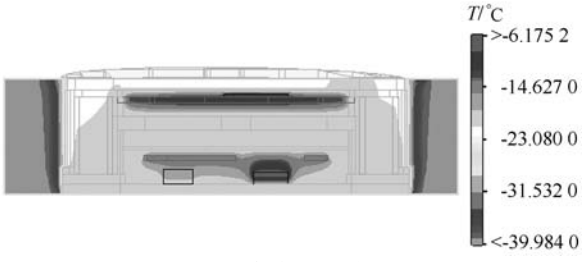

图8 光纤陀螺低温稳态温度云图

光纤陀螺高、低、常温下的热仿真表明,达到稳态后,光纤环与结构体的温度基本一致,温度较高的区域集中分布于系统内部各热源及其周围的空间区域,陀螺主电路板、光源驱动板、光源以及功放等热源周围同陀螺的结构体之间是温度梯度较大的区域,内部热量的散失只能通过有限的传导与辐射进行.

瞬态仿真分析主要是研究光纤陀螺在不同环境条件下的启动过程中系统温度从初始温度上升的规律、温度场的分布、时间常数等,在工程应用以及优化陀螺温度性能方面都具有重要意义.

4 结束语

温度仿真与实验研究是避免不了误差的.仿真方面的误差来源于建模方面系统的简化、参数设置不是很精确等因素,也有本身计算方面的误差,其中最主要的误差在于功耗方面,陀螺功耗测试数据表明,陀螺从启动开始,功耗均处于变化的状态,高温和常温的功耗随时间的变化在缓慢增大,而低温时则是减小,直至达到温度平衡为止.仿真时没有根据实际的功耗建立准确的功耗曲线模型,而是采用了功耗的平均值,从而也不可避免的引入了误差.高、低温启动时,陀螺内部没有完全达到与环境温度一致的状态,从而使得陀螺内部局部区域的初始温度值同环境温度值有偏差,但从温度研究领域以及本课题的研究目的来看,仿真还是符合实际状态的.

参考文献(References)

[1] MIL-HDBK-217B, Reliability prediction of electronic equipment[S]. US Dept Defense, Springfield, Va NTIS, 1974

[2] 张桂才,杨清生.干涉式光纤陀螺温度特性研究[J].光电子技术与信息,2001, 14(1):17−22
Zhang Guicai, Yang Qingsheng. Study on temperature characteristics of interferometric fiber-optic gyro[J]. Optoelectronic Technology & Information, 2001, 14(1):17−22 (in Chinese)

[3] 马迎建,李敏,简红清.光纤陀螺中热电致冷器的热分析[J].中国惯性技术学报,2006, 14(2): 82−84
Ma Yingjian, Li Min, Jian Hongqing. Thermal analysis of thermo-electric cooler for FOG[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2006, 14 (2):82−84(in Chinese)

[4] 于慈远,于湘珍,杨为民.电子设备热分析/热设计/热测试技术初步研究[J].微电子学,2000, 30(5):334−337
Yu Ciyuan, Yu Xiangzhen, Yang Weimin. A preliminary study on the techniques for thermal analysis/design/test of electronic equipments[J]. Microelectronics, 2000, 30 (5): 334−337(in Chinese)

[5] 余建祖.电子设备热设计及分析技术[M].北京:高等教育出版社,2002
Yu Jianzu. Thermal design and analysis technology for electronic equipments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002 (in Chinese)

[6] Versteeg H K, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method[M]. New York: Wiley, 1995

(责任编辑:赵海容)