# 数字式精密温控对 FOG MU性能的影响

任卓恒 宋凝芳 崔佳涛

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

**摘 要**: 以战术级光纤陀螺 (FOG, Fiber-Optic Gyro)惯性测量组合 (MU, Inertial Measurement Unit)为研究对象,分析了环境温度与其测量精度的关系. 为抑制外界温度对 MU的干扰,提出了一种实用的 MU温度控制方法,即根据 MU的热分析与仿真,优化温度控制方案和控制算法,并依此方法为 MU设计了基于模糊 PID (Proportion Integration Differentiation)算法的数字式温控系统,研究了有温控和无温控对陀螺和加速度计测量精度的影响. 试验表明,对 MU进行精密温控,改善了惯性器件的热环境,有助于提高 MU的综合性能.

**关 键 词**: 惯性; 导航系统; 光纤; 陀螺仪; 热仿真; 温度控制; 模糊 PID

**中图分类号**: V 241

**文献标识码**: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)06-0694-04

## Effect of digital precision temperature control on FOG IMU performance

Ren Zhuoheng Song Ningfang Cui Jiatao

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

Abstract: Referring to the object of tactical FOG (fiber-optic gyro) IMU (inertial measurement unit), the relationship between the environmental temperature and its measurement accuracy was analyzed. An applied temperature control method was put forward to bate the interference of external temperature on IMU. It optimizes temperature control scheme and control algorithm, which are based on thermal analysis and simulation. And according to it, a digital temperature control system based on fuzzy PID (proportion integration differentiation) algorithm was designed for IMU. Influence to the precision of gyros and accelerometers when without temperature control and with temperature control was respectively studied. The results of experimentation indicate precision temperature control to ameliorate inertial parts' thermal condition could favor to improve the performance of IMU.

Key words: inertial; navigation systems; fiber optic; gyro; thermal simulation; temperature control; fuzzy PID

随着光纤陀螺 (FOG, Fiber-Optic Gyro)抗恶劣环境性能的不断完善及其关键技术的日趋成熟,它将完全可能在航海和宇航的惯性导航领域处于战略性地位[1-2]. 作为惯性测量组合 (MU, Inertial Measurement Unit)核心部件的 FOG,尤其是长时间工作的中高精度 FOG,环境温度带来的漂移更是不容忽视,它将对 MU的精度产生直接影响. 相对温度补偿法消除温度误差,因元器件温度系数不稳定,所造成的建模难度大且准确度不高的缺点,采取温度控制,使惯性器件内、外部温度保持恒定,则为抑制环境温度变化对惯性器件影响的有效途径.

温控的质量主要由控制方案,控制线路和控制算法等因素决定. 其中,脉宽调制 (PWM)式的数字线路具有简单、功耗低、精度高和易于小型化等优点;分级和分时段的控制方案能保持局部环境的温度稳定以提高温度稳定精度,减小温度超调量和加快温度稳定的速度;控制算法为衡量温控系统质量的关键. 传统 PID (Proportion Integration Differentiation)算法因简单、可靠和易实现等

**收稿日期**: 2006-09-01

**作者简介**: 任卓恒 (1980 - ),男,贵州印江人,硕士生, renzhuoheng@sohu.com.

优点而被广泛使用,然而针对非线性和不确定系统,或当其控制参数因外界干扰而发生变化时,其控制性能会大大降低,结合模糊算法(Fuzzy)自整定 PID参数便成为一个选择[3].

## 1　MU的热分析与仿真

### 1.1　温度对 MU的影响

温度对惯性导航系统的精度影响主要表现在两方面:惯性器件本身对温度的敏感性和惯性测量组合内温度场的影响[4].

环境温度对 FOG性能的影响表现在噪声和漂移两方面[5].其中,温度噪声对采用信号调制为基础的全数字闭环光纤陀螺影响极小,可忽略;而用于评价 FOG输出信号长期变化的漂移,对高精度导航系统则为更基本的参数.采用 4级对称绕法绕制光纤环从理论上可以抑制径向温度梯度产生 Shupe误差.但对于轴向的温度扰动、光路系统中光路元件的温度灵敏性、调制/解调电路所产生的与环境温度相关的电子漂移、光纤环绕制状态的非理想性等因素所造成的残余温度漂移[5],4级对称绕法则失去其优势甚至无能为力.

温度对石英挠性加速度计的影响主要是表芯部分产生温度误差,造成表芯温度变化的原因是由于力矩线圈在通反馈电流时自身发热造成的表芯温度变化和工作环境温度的变化[6].

### 1.2　热流分析

在温控过程中,MU的温度达到稳定须经历热不平衡和热平衡两个状态.热不平衡状态即为预热状态,在这个过程中,MU的参数会随温度的变化而变化,应尽量减少热不平衡状态所需的时间.热平衡状态是一个热传递达到动态平衡的状态.当 MU进入热平衡状态时,它各处的温度和热流量达到相对稳定的状态,其参数不再受到外界温度变化的干扰而趋于稳定.图 1为 FOG MU的热流图,当 MU达到热平衡状态时,热源不断给陀螺、加速度计和本体提供热量,MU上的热量通过腔体内的空气传给箱体,最后经箱体壁传到外界.此时,MU向外界散发的热量与热源提供的热量相等.

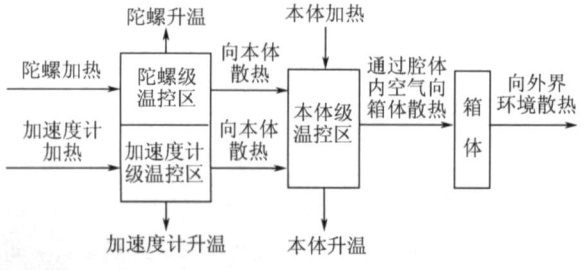


图 1　FOG MU的热流图

### 1.3　热设计与仿真

温控时,要求热源应尽可能分布均匀,温度采集点必须能正确反映敏感元件的温度情况.由于光纤陀螺为环形结构,以加热膜为热源均匀粘贴在外壁上,结构体的材料为导热系数高的金属,根据传热学的理论,陀螺内部温度场应呈圆周均匀分布,故测温点初步选在环体内壁.图 2为建立的 FOG热模型.对于封装结构的加速度计,测温点只能选择在外部.考虑其在本体上安装情况后,选择把加热膜环绕粘贴在加速度计下部圆周,将温度传感器粘贴于加速度计的顶部.

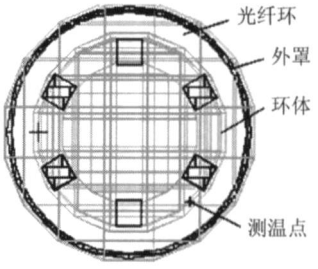


图 2　FOG热模型俯视图

按上述热源和温度采集点的分布方式建立热模型,将惯性器件稳定在 55℃,待温度稳定之后可得到系统的瞬态温度场.图 3为装在箱体中的 MU温度场云图.在系统的瞬态温度场中,得到各测温点的温度为 55～55.6℃,而整个光纤环和加速度计的温度在 55～55.8℃之间,测温点温度基本反映了它们的温度值.

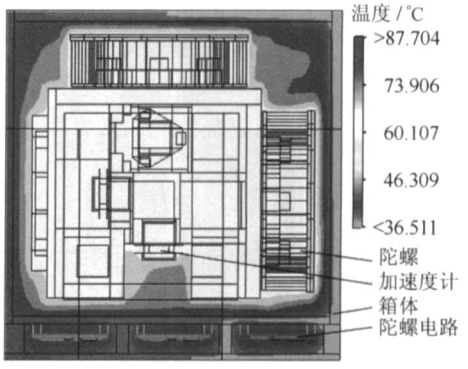


图 3　MU温度稳定时的温度场

因此,采取圆周环绕方式安装的加热膜能够均匀分布热源,测温点的温度值可以在差值比较小的范围内代表光纤环的平均温度值,可认为上述测温点的选择是合理的.

## 2　温控方案设计

MU的温度控制目标是在 -40～+50℃的外界条件下,经恒温调节,本体温度控制在(+52 ±

0.2)℃,陀螺和加速度计的温度控制在(+55±0.06)℃.温控质量有两种途径可保证[4]:①隔离外界温度变化的干扰,使 MU 温度场均匀分布让惯性器件局部温度受外界干扰最小;②提高加热效率,缩短热不平衡状态的时间和减小温度超调量.为此,本文设计了分级和分时段的控制方案.

### 2.1 分级控制

表 1为所设计的两级温度控制方案.其中,第1级为本体温控,目的是提供一个小环境,减小陀螺(及加速度计)与本体的温度差.第 2级温控是在第 1级温控的基础上,对陀螺和加速度计温度进行精密控制,使其工作温度高精度地稳定在设定点,以保持内部温度场均匀分布.

表 1 分级温控表

| 控制级 | 第 1级(本体) | 第 2级(陀螺和加速度计) |
|---|---|---|
| 温度值/℃ | 52 | 55 |

两级温控不仅可把惯性器件与恶劣的外环境隔离,抑制外界恶劣条件的影响,还能优化惯性元件局部温度环境,维持自身温度的均匀性,使 MU 受外界大环境的温度波动影响达到最小.

### 2.2 分时段控制

采用的分时段控制方案见图 4,与常规方法相比,它可确保 MU 的温度能以最快速度,最小的超调升高到设定的温度点,并稳定下来.

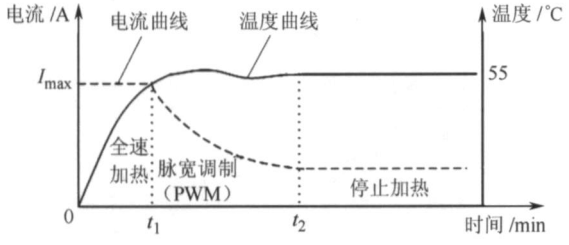


图 4 分时段温控方案

上电初始为全速加热阶段(0～$t_1$).此时,控制对象上的加热膜以全功率工作,它们的温度快速上升.当它们的温度接近各自的设定点时,温控进入第 2阶段即脉宽调制阶段($t_1$～$t_2$).此时,温度传感器的实时温度进入处理器结合控制算法,计算出 PWM 相应的占空比,调节加热电流.当 MU 的温度升高到设定点时,系统的加热功率与热耗散功率保持动态平衡.当被控对象的温度超过设定点则停止加热,以自然散热迫使其降温.

### 2.3 全数字温控系统

基于上述方法,本文为 FOG MU 设计的数字温控系统的电路框图如图 5所示.从数字温度传感器采集的陀螺、加速度计以及本体温度进入 DSP,与设定的目标温度值相减得到温度误差.若控制对象温度与目标温度相差较大时,控制量为最大,输出的 PWM 占空比为 100%,PWM 经过光电耦合和功率放大后驱动加热膜全速加热;若接近目标温度值,调用控制算法计算出控制量,实现对加热电流的自动调节;若控制对象的温度高于目标温度值,输出量为 0,PWM 占空比为 0,加热膜停止加热.如此反复,直到控制对象的温度在目标温度值达到动态平衡的状态.

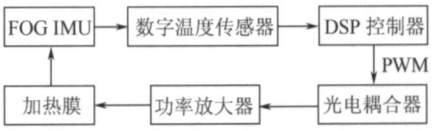


图 5 数字温控系统电路框图

该温控系统的控制算法为模糊自整定 PID 参数的控制算法,其控制结构见图 6.算法是在一定论域内,以误差和误差变化率为输入量,依据整定 PID 控制器参数的经验和专家知识为基础建立输出量 $K_P$,$K_I$和 $K_D$的模糊规则集,模糊化输入/输出量并用隶属度函数表示,把模糊化的结果按合成推理法进行模糊推理做出决策,最后以最大隶属度法解模糊得到输出量为精确值的控制表.求取 $K_P$,$K_I$和 $K_D$控制表的过程可以离线进行,通过离线计算出控制表后,经在线查表程序实现对 PID 参数的 Fuzzy自整定.最后由 PID 运算得对应于 PWM 占空比的实时控制量.

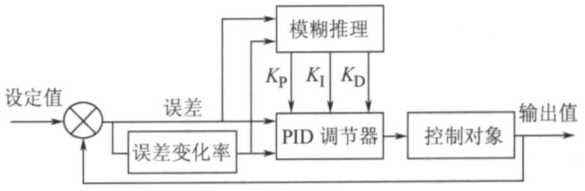


图 6 模糊自整定 PID 算法的控制结构

## 3 试验验证

在上述温控技术基础上,作者对 MU 实现了精密温度控制,并针对 MU 在无温控状态和有温控状态下,测试了光纤陀螺的零偏、零偏稳定性(零漂),加速度计的零偏、标度因数.测试状态为:无温控时,把 MU 自然放置在室温条件下;有温控时,把 MU 放置在恒温箱内,设置其温度在 -40～50℃范围内以 2℃/min的速度循环变化.在上述温度条件下,按 1 s的采样时间间隔,得到部分测试结果见图 7～图 9和表 2、表 3.

图 7为 MU 无温控时,上电后连续测试 2 h 的 $x$轴 FOG零偏;图 8为 MU 有温控时,连续测

试 5 h(验证此时 MU长时间工作的稳定性) $x$轴 FOG的零偏. 表 2为 3个轴向的 FOG零漂结果,无温控时是 2 h内 10 s平滑后的零漂,有温控时是在经 25 min温度稳定下来后,4. 5 h内 10 s平滑后的结果. 图 9为 MU在无温控状态下,加速度计单温度点的短期稳定性测试,外界温度在 20～60℃范围内变化时,$x$轴加速度计的零偏、标度因数随温度变化的曲线. 表 3为在 MU有温控时,3个轴向加速度计的零偏、标度因数.

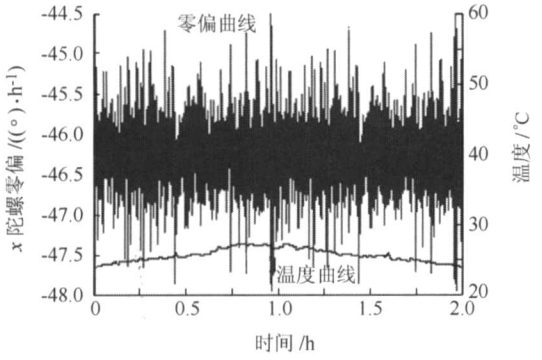


图 7　MU无温控时 $x$轴 FOG的零偏

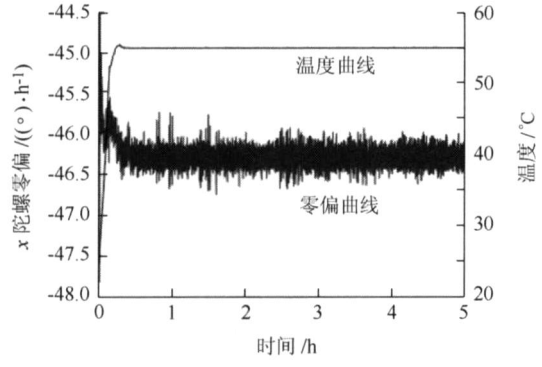


图 8　MU有温控时 $x$轴 FOG的零偏

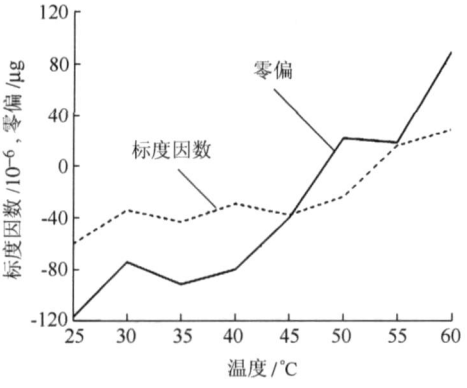


图 9　MU无温控时 $x$轴加速度计指标

表 2　有/无温控时 FOG的指标

| 陀螺 | 标度因数 /$10^5$ | 零漂 /((°)·$h^{-1}$) | |
|---|---|---|---|
| | | 无温控时 | 有温控时 |
| $x$轴 | 6. 12 | 0. 145 | 0. 0385 |
| $y$轴 | 6. 27 | 0. 225 | 0. 0502 |
| $z$轴 | 6. 18 | 0. 139 | 0. 0321 |

表 3　在 MU有温控时石英加速度计的指标

| 加速度计 | 零偏 /μg | 标度因数 /$10^{-5}$ |
|---|---|---|
| $x$轴 | 18. 6 | 1. 62 |
| $y$轴 | 34. 9 | 1. 45 |
| $z$轴 | 20. 0 | 1. 85 |

由试验结果可知,相对 MU无温控状态,在有温控时,温度变化对陀螺和加速度计的影响大大削弱,具体体现在陀螺零漂的改善,加速度计零偏、标度因数不再随外界环境温度的变化而变,以及温控状态下 MU长时间工作的可能性.

## 4　结 束 语

本文采用所述温控方法设计的数字温控系统,对 FOG MU进行温度控制. 通过对惯性器件的精密温控,抑制了外界环境温度变化对 MU的干扰,并对 MU在无温控、有温控以及有温控状态的长时间进行测试. 结果表明,数字式精密温控对 FOG MU的综合性能有较大改善,主要表现为 FOG零漂的改善和石英挠性加速度计的零偏、标度因数对外界温度变化不再敏感,提高了 MU的测量精度.

## 参考文献 (References)

[1] Barbour N, Schmidt G. Inertial sensor technology trends [J]. IEEE Sensors Journal, 2001, 1(4): 332 - 339

[2] Gaiffe T. From R&D brassboards to navigation grade FOG-based INS: the experience of Photonetics/Ixsea [J]. IEEE0-7803-7289-1/02, 2002: 1 - 4

[3] Carvajal, Chen Guanrong, Ogmen. Fuzzy PID controller: design, performance, evaluation, and stability analysis[J]. Information Sciences, 2000, 123: 249 - 270

[4] 孙谦, 谢玲, 陈家斌, 等. 精密温控对惯性导航平台系统性能的影响 [J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(3): 379 - 382
Sun Qian, Xie Ling, Chen Jiabin, et al. On the influence of precision temperature control to the performance of an inertial platform system [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2002, 22(3): 379 - 382 (in Chinese)

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

[6] 王洋, 商顺昌. 石英挠性加速度计的温场分析 [J]. 传感技术, 1996, 9(3): 8 - 14
Wang Yang, Shang Shunchang. The temperature field analysis of quartz-flex accelerometer[J]. Journal of Transducer Technology, 1996, 9(3): 8 - 14 (in Chinese)

(责任编辑:赵海容)