光纤陀螺温度影响与误差补偿

王 海

(国防科技大学 航天与材料工程学院，长沙 410073)

摘 要：温度性能是光纤陀螺工程化面临的难题之一，建立温度模型是提高光纤陀螺温度性能的有效方法.从理论上推导了光纤陀螺零偏、标度因数温度误差是由于热作用于光纤环导致光路非互易性所引起.分析了光纤陀螺热源产生的两个主要原因：光纤陀螺内部有源器件工作过程中产生的热；外界环境温度变化引起光纤环内部温度场分布变化.二者对光纤陀螺的影响是随机的，引起的光纤陀螺零偏漂移和标度因数误差可以通过建立温度模型进行补偿.采用线性回归方法，建立了光纤陀螺零偏温度漂移模型和标度因数温度模型，对光纤陀螺输出数据进行补偿，有效改善了光纤陀螺温度性能，实验验证了模型的正确型和补偿算法的有效性.

关 键 词：光纤陀螺；线性回归；温度模型

中图分类号：V 241

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)05-0549-03

Affects of temperature and error compensation for fiber optic gyro

Wang Hai

(College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The thermal characteristic of fiber optic gyro(FOG) is one of difficult questions, it is a efficient method to improve the thermal characteristic of FOG by modeling. The characteristic of thermal affect induced nonreciprocity of optic loop was introduced , and it is one of the main reasons that affect the steability of Bias and scale factor of FOG. The thermal affect produced by the inner instruments of FOG is the main reason of warm-up time. And the warm-up time can be shortened by modeling and compensating. The influence of surrounding temperature for FOG is random. The error can be modeled and compensated by temperature model. The error model of temperature drift and scale factor of FOG is settled. The raw data of FOG is compensated with the model and the validity of the model is tested.

Key words: fiber optic gyro; line regression; temperature modeling

光纤陀螺是一种以 Sagnac 效应为原理的全固态惯性仪表，具有体积小、重量轻、启动快、动态范围大、抗过载和耐冲击等优点，引起世界各国的普遍重视.

由于构成光纤陀螺的核心——光纤环具有温度敏感性.热传导或环境温度变化会引起光纤陀螺光路的非互易性，给光纤陀螺带来大的温度漂移.从实际测试来看，当环境温度发生变化时，光纤陀螺的标度因数、失准角和噪声也发生变化，如何克服温度影响是光纤陀螺工程化面临的重大难题之一[1].对光纤陀螺温度特性进行研究，建立零偏温度漂移、标度因数温度模型，是工程上解决上述问题的有效手段之一.

本文从理论上分析了热作用于光纤环引起的光纤陀螺光路非互易性，并分析了光纤环热效应与陀螺温度性能之间的关系，建立了光纤陀螺零

收稿日期：2006-04-30

基金项目：2005 年航天科技集团科学技术基金资助项目(光纤陀螺误差模型研究)

作者简介：王 海(1969－)，男，北京人，博士生，zhukuibao@163.com.

偏温度漂移模型和标度因数温度模型，通过实验验证了模型的正确性.

1 光纤环引入热导致光路非互易性

考虑光纤的温度效应，当光束以传输常数 $\beta(z)$ 通过长度为 L 的光纤时，其相位延迟为

$$\Phi=\beta_0 nL+\beta_0\left(\frac{\partial n}{\partial T}+n\alpha\right)\int_0^L\Delta T(z)\mathrm{d}z \quad (1)$$

其中，$\beta_0=2\pi/\lambda_0$ 为光在真空的传输常数；n 为光纤有效折射率；$\partial n/\partial T$ 为石英材料的折射率温度系数；α 为热膨胀系数；$\Delta T(z)$ 为沿着光纤温度分布的变化量. 在 Sagnac 干涉仪中，两束干涉光分别以顺时针(CW)和逆时针(CCW)方向通过同一长度为 L 的光纤. 设 CW 光波在 t 时刻到达光纤输出端，则 CCW 光波到达某一坐标点 z 的时刻为 $\bar{t}=t-(L-z)/C_n$，$C_n=C_0/n$ 为光在波导中传输的波速. 在主要考虑泊松效应、应变效应情况下，由(1)式得到的 CW 和 CCW 光波到达 z 点的相位延迟分别为

$$\Phi_{\mathrm{CCW}}(t)=\beta_n nl+\beta_0\frac{\partial n}{\partial T}\int_0^L\Delta T(L-z,t-z/C_n)\mathrm{d}z \quad (2)$$

$$\Phi_{\mathrm{CW}}(t)=\beta_n nL+\beta_0\frac{\partial n}{\partial T}\int_0^L\Delta T(z,t-z/C_n)\mathrm{d}z \quad (3)$$

于是，检测的光纤环热导致非互易相位误差为

$$\Delta\Phi(z)=\frac{\beta_0}{C_0}n\frac{\partial n}{\partial T}\int_0^L[\Delta T(z)-\Delta T(L-z)](2z-L)\mathrm{d}z \quad (4)$$

(4)式经过整理得

$$\Delta\Phi(z)=\frac{2\pi}{\lambda}\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}T}\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}(z)\frac{L-2z}{v}\delta z \quad (5)$$

其中，v 为权因子；T 为光纤环温度. (5)式表明，光纤环由于温度效应引起的 $\Delta\Phi(z)$ 与光纤折射率随温度变化率 $\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}T}$ 成正比，与该段光纤上的温度变化率 $\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}$(即温度梯度)和与位置有关的 v 成正比，距光纤中点越远，v 越大. 对于一种光纤来讲，$\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}T}$ 可以认为是常数.

由上述推导可知，光纤环引入的热导致光路非互易性，是引起光纤陀螺零偏漂移、标度因数不稳定的主要原因之一. 这种非互易性与光纤环的参数和绕制方法有关，可以通过光纤环的绕制，如“四极对称绕法”抑制由于 T 变化及 $\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}$ 引起的光路非互易性[2-3]. 但由于光纤参数的不均匀性和绕制工艺的不完善，这种非互易性仍然存在.

影响光纤陀螺内部温度场变化的主要因素包括外界环境温度和工作过程中由于内部有源器件发热引起陀螺内部温度变化[4-5]. 对于特定的光纤陀螺，光纤环绕制方式和内部热分布模式是一定的，当外界 T 恒定，陀螺工作一定时间后，内部环境达到热平衡，光纤陀螺进入稳定工作状态. 因此陀螺内部有源器件工作过程产生的热对陀螺启动过程影响最大. 光纤陀螺启动过程可以通过建立数学模型进行补偿；外界温度对光纤陀螺输出影响是不确定因素，变化是随机的，对光纤环的影响也是随机的，由(5)式可知，光纤环对 T 和 $\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}$ 的敏感性是引起光纤陀螺相位误差的主要因素，这一误差也可以通过建立温度模型进行补偿.

2 光纤陀螺各参数的温度模型

2.1 光纤陀螺零偏与标度因数温度模型

在恒定温度点，光纤陀螺输出数学模型为

$$\Omega=A_1^{\mathrm{r}}(T)+A_2^{\mathrm{r}}(T)\omega+A_3^{\mathrm{r}}(T)\,|\,\omega\,| \quad (6)$$

其中，Ω 为光纤陀螺输出角速度；$A_1^{\mathrm{r}}(T)$ 为陀螺零偏；$A_2^{\mathrm{r}}(T)$ 为陀螺标度因数；$A_3^{\mathrm{r}}(T)$ 为陀螺标度因数非对称性系数；ω 为陀螺输入角速度. $A_1^{\mathrm{r}}(T)$、$A_2^{\mathrm{r}}(T)$ 和 $A_3^{\mathrm{r}}(T)$ 随温度变化为

$$A_i^{\mathrm{r}}(T)=a_{i1}+a_{i2}(T-T_0)\quad i=1,2,3 \quad (7)$$

其中，T_0 为参考温度(光纤环内、外壁温度平均值)；a_{i1}，a_{i2} 和 a_{i3} 为参数的温度系数.

$A_3^{\mathrm{r}}(T)$ 随 T 变化较小，对于中精度陀螺可以不考虑[6-7]，则光纤陀螺输出温度线性模型为

$$\Omega=[a_{11}+a_{12}(T-T_0)]+[a_{21}+a_{22}(T-T_0)]\omega \quad (8)$$

其中，a_{11} 为 T_0 时 $A_1^{\mathrm{r}}(T_0)$；a_{12} 为 $A_1^{\mathrm{r}}(T)$ 随 T 变化系数；a_{21} 为 T_0 时 $A_2^{\mathrm{r}}(T_0)$；a_{22} 为 $A_2^{\mathrm{r}}(T)$ 随 T 变化系数.

2.2 光纤陀螺零偏与标度因数温度实验

对一只常温精度为 0.1(°)/h 的光纤陀螺进行温度特性测试，在 50～58 ℃每间隔 1 ℃测试一组陀螺输出数据，得到陀螺在该温度点的 $A_1^{\mathrm{r}}(T)$ 和 $A_2^{\mathrm{r}}(T)$，重复测试 6 次取均值，得到陀螺在每个固定温度点的 $A_1^{\mathrm{r}}(T)$ 和 $A_2^{\mathrm{r}}(T)$，如表 1 所示. 陀螺输出采样频率 400 Hz.

$A_2^{\mathrm{r}}(T)$ 随 T 变化曲线如图 1 所示，$A_1^{\mathrm{r}}(T)$ 随 T 变化曲线如图 2 所示.

陀螺工作 T 从 50～58 ℃，$A_1^{\mathrm{r}}(T)$ 变化 0.106(°)/h，随 T 变化速率 0.012 (°)/h/℃，$A_2^{\mathrm{r}}(T)$ 变化 564×10^{-6}，随 T 变化速率为 $62.7\times$

10^{-6}/℃,$A_3^r(T)$ 随 T 变化速率为 0.2 × 10^{-6}/℃.

表 1　$A_1^r(T)$、$A_2^r(T)$和 $A_3^r(T)$测试数据

T/℃	$A_2^r(T)/10^{-6}$	$A_3^r(T)/10^{-6}$	$A_1^r(T)$/((°)·h^{-1})
50	203.967 9	2.18	0.207
51	203.989 3	7.72	0.196
52	204.004 7	1.31	0.211
53	204.019 3	1.15	0.223
54	203.996 3	9.53	0.241
55	204.019 0	14.97	0.243
56	204.059 6	1.58	0.275
57	204.068 2	4.72	0.278
58	204.083 1	4.33	0.302

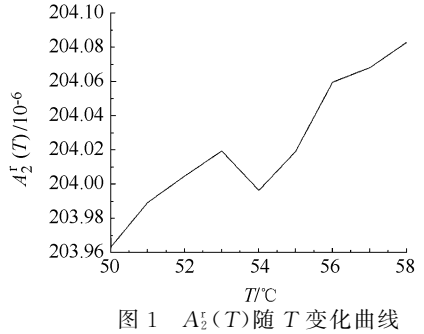


图 1　$A_2^r(T)$随 T 变化曲线

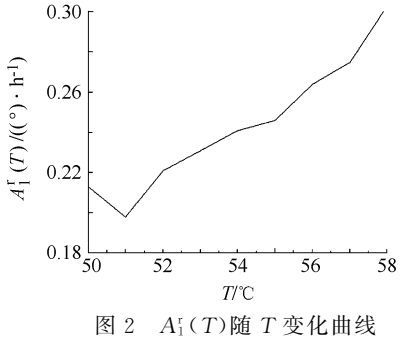


图 2　$A_1^r(T)$随 T 变化曲线

3　光纤陀螺温度误差补偿

将该光纤陀螺放置在带温箱的转台上,温度传感器分别放置在光纤环的内壁和外壁,取内外壁 T 平均值,作为陀螺环体的温度.温箱温度从+50～+58 ℃以 0.2 ℃/min 的速率变化,转台以 10 (°)/s 恒定角速度转动,测试陀螺输出曲线如图 3 所示.

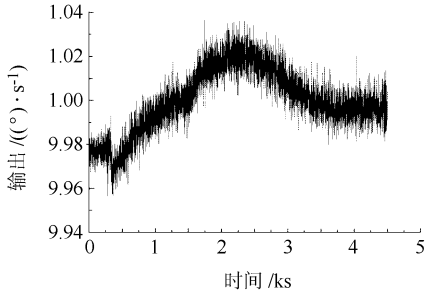


图 3　陀螺输出随 T 变化曲线

由(8)式及此只光纤陀螺的温度数据,可以建立光纤陀螺的 $A_1^r(T)$误差模型和 $A_2^r(T)$误差模型.

1) 光纤陀螺 $A_1^r(T)$温度模型

以 55 ℃作为温度基准点,得到模型中 $a_{11}=0.243$(°)/h.采用线性回归方法,拟合变温情况下 $A_1^r(T)$温度模型系数,得到 $a_{12}=0.006\,232$.陀螺 $A_1^r(T)$温度误差模型为

$$\Omega_1 = 0.226 + 0.006\,232(T-55) \tag{9}$$

2) 光纤陀螺 $A_2^r(T)$温度模型

在 T=55 ℃时,转台以固定角速度转动,拟合模型中 $a_{21}=204.019$.采用线性回归拟合 $A_2^r(T)$随温度变化系数 $a_{22}=0.000\,022\,1$.陀螺 $A_2^r(T)$温度模型为

$$\Omega_2 = 204.019\omega + 0.000\,022\,1(T-55)\omega \tag{10}$$

利用(9)式及(10)式对光纤陀螺输出进行补偿,得到补偿后陀螺输出曲线如图 4 所示.

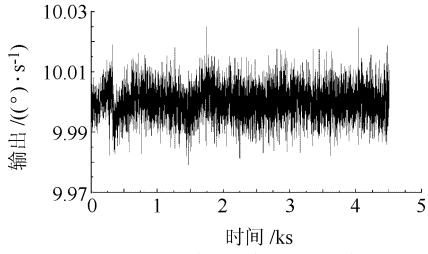


图 4　陀螺补偿后输出曲线

从输出数据中减掉输入转速 $\omega_i=10$ (°)/s,得到陀螺输出的残差,包括陀螺的 $A_1^r(T)$及 T 变化引起的 $A_1^r(T)$误差,$A_2^r(T)$随 T 变化引起误差等.补偿前残差的标准偏差转换成角速度为 0.27(°)/h,经过补偿后残差的标准偏差转换成角速度为 0.15(°)/h,接近恒温时陀螺的精度.

4　结　论

在理论分析热作用于光纤环导致光纤陀螺非互易特性基础上,对光纤陀螺的温度特性进行了研究,表明由于光纤环温度变化导致光纤陀螺的零偏、标度因数等参数发生变化.在理论分析的基础上建立了光纤陀螺零偏和标度因数温度误差模型,通过测试辨识了误差模型的参数值.通过实验对光纤陀螺输出数据进行补偿,验证了光纤陀螺零偏和标度因数温度误差模型正确性.补偿后光纤陀螺的温度性能有了明显提高,其残差的标准偏差补偿后达到 0.15(°)/h,与光纤陀螺恒温时精度指标相当,补偿方法有效.

(下转第 584 页)