

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.04.014

光纤陀螺标度因数及零偏温度误差补偿研究

孙娜, 高枫, 姜见龙

(湖北三江航天红峰控制有限公司, 湖北 孝感 432000)

摘要:首先分析了光纤陀螺产生温度误差的机理,在此基础上分别指出标度因数与零偏的误差补偿模型,提出了一种利用一组数据同时补偿标度因数及零偏的方法,直接表示输入与标度因数零偏补偿后的关系。最后通过实验验证了该方法不仅能够有效地补偿陀螺的温度误差,且其补偿精度优于原单独补偿的方法,同时该方法仅需一次温度实验,节省实验成本,具有较大的现实意义。

关键词:光纤陀螺;温度误差;标度因数;零偏

中图分类号:V241.5

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2017)04-0092-05

Temperature Compensation Research of the Scale Factor and Bias on Fiber Optic Gyroscope

SUN Na, GAO Feng, JIANG Jian-long

(Hubei Sanjiang Space Hongfeng Control Co., Ltd., Xiaogan, Hubei 432000, China)

Abstract: The principles causing the temperature error of fiber optic gyroscope(FOG) are analyzed, according to which, the temperature compensation model of FOG scale factor and bias are established. A method is raised that the scale factor and bias of FOG are compensated by using a set of data. The experimental results indicate that the error of FOG can be compensated availablely, and the precision of compensation is better than the original one. The method raised here only need a temperature experimentation, which can reduce the cost and be valuable to the practical applications of FOG.

Key words: Fiber optic gyroscope; Temperature error; Scale factor; Bias

0 引言

光纤陀螺是一种基于 Sagnac 效应的角速率传感器,由于其成本低、工艺简单、可靠性高、抗冲击振动能力强,其应用前景备受重视,已经成为主流的传感器之一。然而构成光纤陀螺的主要器件如光纤环、光源等对温度较为敏感,导致光纤陀螺输出受到温度的影响较大,造成陀螺温度误差,因此,对于光纤陀螺温度误差的补偿已经引起了广泛的重视。

光纤陀螺的温度补偿主要包括标度因数的温

度补偿和零偏的温度补偿。在文献[1]中研究了一种软硬件结合的补偿方案,对标度因数进行了温度补偿;文献[2]中利用陀螺开机后前 2min 采样所得到的零偏作为零偏主值,建立了温度补偿模型,减小零偏;文献[3]根据实验数据,建立零偏温度补偿模型,实现对零偏的补偿。但这些方法都是对标度因数及零偏分别进行补偿,在此过程中会重复考虑温度对于陀螺输出的影响,导致输出误差的增大。

因此,本文提出了一种利用一组数据同时补偿标度因数及零偏的方法,既有效补偿了温度误差,又节省了温度实验成本,具有较大的实用价值。本

收稿日期:2016-07-25;修订日期:2016-09-18

作者简介:孙娜(1988-),女,硕士,工程师,主要从事光纤陀螺及相关方面的研究。E-mail:sunhappy1988@163.com

文首先对陀螺的温度误差机理进行分析,在此基础上提出温度补偿方法,最后进行实验验证和总结。

1 光纤陀螺温度误差机理

光纤陀螺系统由光路系统与电路系统两部分组成,电路受温度影响较小,受温度变化影响主要是由光学器件引起的,其中最主要的是光纤环,这是由于光纤环受温度影响会导致折射率、导热系数、膨胀系数等物理参数的变化,从而造成标度因数变化和非互易效应的产生。

光纤陀螺的标度因数可表示为

$$K_{\text{标度}} = \frac{K_s}{K_{\text{反馈系数}}} = \frac{2^N}{2\pi} \cdot \frac{2\pi LD}{\lambda c} \quad (1)$$

其中, $K_{\text{反馈系数}}$ 为反馈到 Y 波导上的对应相位与陀螺输出的数字量的比值, K_s 为 Sagnac 比例系数, N 为 DA 转换器的位数, L 为光纤环长度, D 为光纤环直径, λ 为光源波长, c 为光在真空中的传播速度。

由式(1)可以看出,温度对于标度因数的影响主要表现在以下几个方面^[4]:

1) 温度对反馈系数 $K_{\text{反馈系数}}$ 的影响: 当光纤陀螺系统无第二反馈回路时, 或者角速率较小未能及时调整 2π 电压时, 导致其反馈系数不能严格地等于 $2\pi/2^N$, 但目前陀螺通常会使用第二反馈回路, 因此该项一般变化不大, 可以忽略不计;

2) 温度对光纤环的影响: 光纤环的长度 L 和直径 D 在不同的温度条件下会有所不同;

3) 温度对于波长的影响: 光源的波长会随着温度的变化而变化, 虽然会对光源进行温度控制, 但该影响仍然存在。

而对于陀螺漂移, 早在 1980 年, Shupe 撰文曾指出^[5], 干涉式光纤陀螺仪中, 与时间有关的光纤环上的温度变化引起的非互易性(Shupe 误差), 会给光纤陀螺带来不可忽视的漂移并限制其应用。

Shupe 误差原理如图 1 所示, 当两束干涉光分别沿着顺时针和逆时针方向传输通过长度为 L 、折射率为 n 的光纤环时, 光纤环温度变化产生的热致非互易相位延迟为

$$\Delta\phi = \frac{\beta_0}{c_0} n \frac{\partial n}{\partial T} \int_0^{\frac{L}{2}} (\Delta T(z) - \Delta T(L-z)) (2z-L) dz \quad (2)$$

式中, $\beta_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为光在真空中的传播常数, $c_0 = nc$, $\Delta T(z)$ 为光纤 z 点温度分布的变化量。

由此得到距离端点 M 为 z 处的一段光纤单元

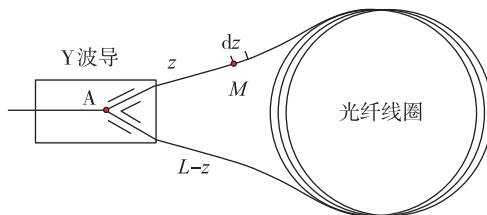


图 1 光纤线圈中 Shupe 误差示意图

Fig. 1 The scheme of Shupe error in the fiber

dz 产生的 Shupe 误差为

$$\Delta\phi(z) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{dn}{dT} \frac{dT}{dt}(z) \frac{L-2z}{v} \delta z \quad (3)$$

其中, $\frac{dn}{dT}$ 为光纤折射率随温度的变化率, T 为 z 处光纤环的温度, $(L-2z)/v$ 为权因子。

式(3)表明, 环境温度引起的相位误差 $\Delta\phi$ 与该段光纤上的温度变化率 $\frac{dT(t)}{dt}$, 以及与位置有关的权因子 $(L-2z)/v$ 成正比, 且距光纤环中心越远该误差越大。

在理想情况下, 完全对称的光纤上热扰动是相同的, 则 $\Delta\phi(z) = \Delta\phi(L-z)$, 总误差为 0。然而, 由于光纤环在绕制过程中不可能完全对称, 残余的不对称将会导致温度误差的产生, 从而产生了陀螺非固有零偏 B_0 , 与非互易误差成正比, 并与温度、温度变化率等相关。因此, 需要对光纤陀螺进行一定的温度补偿, 才能保证陀螺输出的准确性。

2 光纤陀螺温度误差补偿

2.1 标度因数温度补偿

根据对光纤陀螺温度误差机理的分析可以看出, 标度因数温度误差只与温度有关, 与温度梯度和温度梯度导数无关, 因此标度因数随温度变化模型可表示为

$$K_T = K_0 \cdot \sum_0^p b_p T^p \quad (4)$$

其中, K_T 为与温度相关的标度因数, K_0 为标度因数参考值(一般取常温 25°C 的标度因数值), b_p 为 T 的 p 阶多项式系数。只要测得不同温度点下的标度因数, 就可拟合出多项式的系数。

为了便于软硬件的补偿实现, 将标度因数补偿量设为参考标度因数与实际标度因数的比值, 即

$$\frac{K_0}{K_T} = k_{\text{补偿系数}} = 1 / \sum_0^p b_p T^p \approx \sum_0^n a_n T^n = \hat{k}_{\text{补偿系数}} \quad (5)$$

其中, $k_{\text{补偿系数}}$ 为实际陀螺需要补偿系数, $\hat{k}_{\text{补偿系数}}$ 为根据实验数据拟合的陀螺补偿系数。

因此, 陀螺补偿后的输出解调过程为

$$\begin{aligned}\omega &= D_{\text{补后}}/K_0 = D \cdot \hat{k}_{\text{补偿系数}}/K_0 \\ &= D \frac{\hat{K}_0}{\hat{K}(T)}/K_0 = \frac{D}{\hat{K}(T)}\end{aligned}\quad (6)$$

得到接近实际的角速率, 其中, D 为陀螺未补偿前的数字量输出。

对于精度要求不高的光纤陀螺 n 可取值为 1, 精度要求较高的陀螺 n 可以取值为 3、4, 甚至更高, 阶数越大补偿效果越好, 但与此同时硬件计算量越高, 计算出错的可能性越高, 因此并不是阶数越大越好, 一般可令 $n=2$ 。

2.2 零偏温度补偿

目前研究的光纤陀螺温度误差模型有很多, 例如: 线性模型、多项式模型、小波网络模型、模糊逻辑模型、马尔可夫链模型等。其中线性模型或分段线性模型结构简单、运算速度快, 能够满足中低精度需求; 多项式模型结合了温度场的变化速率和不同温度条件下的数据, 比较适合温度场均匀变化的情况; 小波网络和模糊逻辑模型分别利用观测数据建立参数表, 数据处理比较复杂, 暂处于研究阶段^[6]。目前一般还是采用线性模型进行分析。

考虑陀螺输出漂移受到温度、温度变化率和光纤环内外温度差(根据传热学理论, 认为环内外温度差可以表示光纤环内部的温度梯度)的影响, 将陀螺零偏模型建立如下:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{B}}_{\Omega} &= a_0 \times T_2 + a_{21} \times (T_2 - T_1) + \dots + a_{2m} \times \\ &\quad (T_2 - T_1)^m + a_3 \times \frac{dT_2}{dt} \\ &= [T_2, (T_2 - T_1), \dots, (T_2 - T_1)^m, \frac{dT_2}{dt}] \cdot \\ &\quad [a_0, a_{21}, \dots, a_{2m}, a_3]^T \\ &= \mathbf{X} \cdot \boldsymbol{\alpha}\end{aligned}\quad (7)$$

其中, $\hat{\mathbf{B}}_{\Omega}$ 为陀螺零偏的估计值, T_2 为陀螺光纤环内部温度传感器的测量值, T_1 为位于光纤环外部的温度传感器的测量值, $T_2 - T_1$ 为光纤环内外温度差, $\frac{dT_2}{dt}$ 代表内部温度变化率, $\boldsymbol{\alpha} = [a_0, a_{21}, \dots, a_{2m}, a_3]$, $\mathbf{X} = [T_2, T_2 - T_1, \dots, (T_2 - T_1)^m, \frac{dT_2}{dt}]$, m 根据实际情况决定, 一般取值为 1。

温度补偿系数矩阵 $\boldsymbol{\alpha}$ 可以通过最小二乘拟合求得

$$\boldsymbol{\alpha} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{B}_{\Omega} \quad (8)$$

2.3 标度因数及零偏一次补偿法

目前对温度的补偿都是对标度因数及零偏分别进行补偿, 一般先补标度因数, 后补零位, 这样的补偿方法不仅费时费力, 而且会造成标度因数补偿的不准确性。这是由于用于检测标度因数的陀螺输出中附加了零偏误差信息, 使得待补偿的标度因数信息不准, 则补偿后的标度因数不可能准确。

本文提出了一种利用一组数据同时补偿标度因数及零偏的方法, 直接表示陀螺输出与标度因数零偏补偿后的角速度信号关系。

陀螺非固有零偏的数字量可表示为 $B = B_{\Omega} \cdot K_T$, 其中 B_{Ω} 为陀螺由于非互易相位差导致的非固有零偏值, 由式(7)知其与温度、温度变化率等相关。而由式(5)可知 $K_T = \frac{K_0}{k_{\text{补偿系数}}}$, 因此陀螺输出数字量 D 与解调角速度 Ω 之间的关系为

$$D = K_T \Omega + B = K_T (\Omega + B_{\Omega}) = \frac{(\Omega + B_{\Omega}) K_0}{k_{\text{补偿系数}}}$$

则

$$\begin{aligned}K_0 \Omega &= k_{\text{补偿系数}} D - B_{\Omega} + K_0 \\ &= (a_0 + a_1 T_2 + a_2 T_2^2) D + \\ &\quad [b_1 T_2 + b_2 (T_2 - T_1) + b_3 \frac{dT_2}{dt}] \\ &= [D, T_2 D, T_2^2 D, T_2, (T_2 - T_1), \frac{dT_2}{dt}] \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}\end{aligned}$$

根据实验数据, 并设置基准标度因数 K_0 , 通过最小二乘拟合即可拟合出补偿系数矩阵 $\mathbf{A} = [a_0, a_1, a_2, b_1, b_2, b_3]$, 在实际补偿中根据上式即可求得陀螺的输出角速率 Ω 。

3 实验验证

根据上述补偿方法, 设计光纤陀螺温度实验如下: 将温度由常温以 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 速度降温至 -40°C , 再以 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度升温, 在该过程中每间隔一段时间以 $\pm 10^\circ/\text{s}$ 的速度正反转动一次陀螺后静止, 如此反复直至温度升至 70°C 为止, 记录陀螺和

温度数据。

实验测得陀螺输出及陀螺内温度曲线分别如图 2(a)和图 3 所示,其中图 2(b)为陀螺正转输出局部放大图(陀螺垂直指向地为正向),图 2(c)为陀螺反转输出局部放大图。

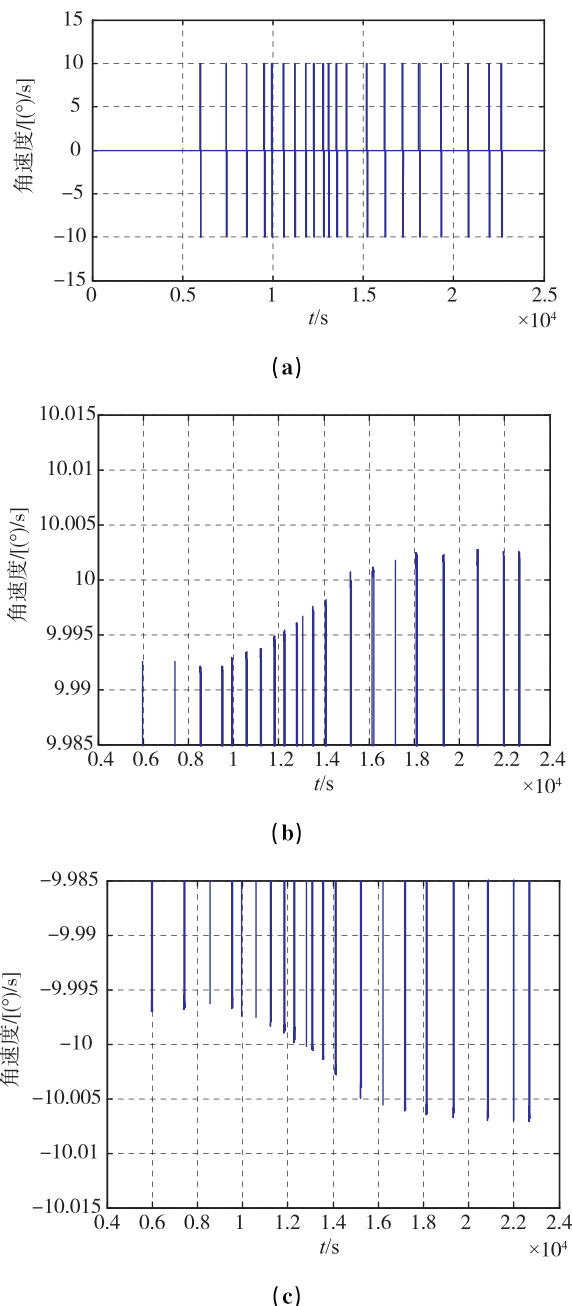


图 2 陀螺输出数据曲线图

Fig. 2 The output graph of FOG

通过对数据的处理(去除转台初始转动的影响),并根据标度因数及零偏一次补偿法计算求得补偿系数矩阵 $A = [0.99999873, -1.04018835 \times 10^{-5}, 3.48202187 \times 10^{-9}, -6.10355435 \times 10^{-5},$

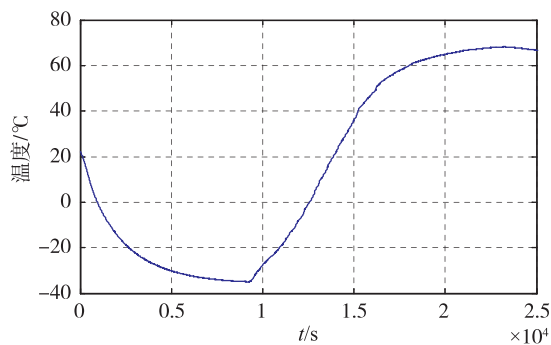


图 3 陀螺内部温度曲线

Fig. 3 The graph of the temperature in FOG

$-0.06827428, -0.02395809]$, 根据软件计算要求,舍弃无效位,取补偿系数矩阵 $A = [1, -1.04018835 \times 10^{-5}, 3.48 \times 10^{-9}, -6.104 \times 10^{-5}, -0.06827428, -0.02395809]$ 。

根据该补偿系数,得到陀螺补偿前后的标度因数随温度变化曲线如图 4 所示,经计算得到,补偿前陀螺的标度因数非线性为 1.045×10^{-3} ,采用单独标度因数补偿计算其非线性仅可达到 1.041×10^{-4} ,而根据标度因数及零偏一次补偿法补偿后,陀螺的标度因数非线性可达到 3.45×10^{-5} ,远优于单独补偿的方法。

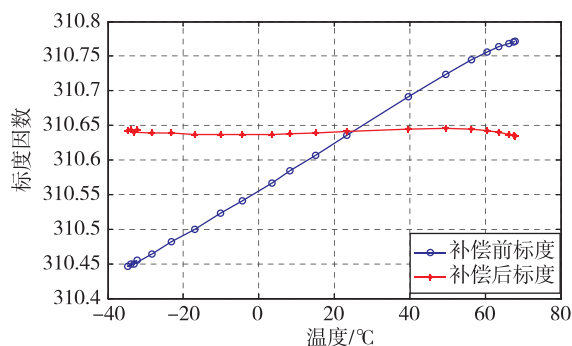


图 4 补偿前后标度因数与温度关系对比

Fig. 4 The comparison of scale factor before and after the compensation

根据该补偿系数,得到陀螺补偿前后的零偏随时间的变化曲线如图 5 所示,经计算得到,补偿前陀螺的零偏稳定性为 $0.1131(^{\circ})/h$,采用单独零偏补偿计算其零偏稳定性可达到 $0.0409(^{\circ})/h$,而根据标度因数及零偏一次补偿法补偿后,陀螺的零偏稳定性可达到 $0.0347(^{\circ})/h$,补偿精度优于原单独补偿方法。

根据实验结果来看,利用一组数据同时补偿标度因数及零偏的方法切实有效,不仅补偿方法简

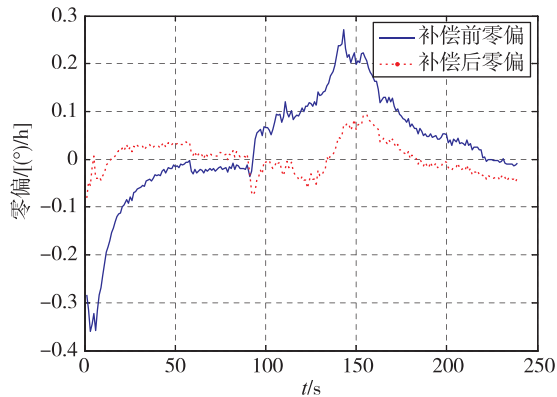


图5 补偿前后零偏随时间变化对比

Fig. 5 The comparison of the bias with time before and after the compensation

单,只需进行一次温度实验即可计算出所有的补偿系数,且其补偿精度优于原单独补偿方法。

4 总结

本文从光纤陀螺温度误差机理出发,分别建立了标度因数与零偏的误差补偿模型,并提出了一种利用一组数据同时补偿标度因数及零偏的方法。最

后通过实验验证并分析得出,本文提出的方法不仅能够有效地补偿陀螺的温度误差,并且其补偿精度优于原单独补偿的方法,同时该方法仅需要一次温度实验,极大地节省了实验时间及成本,对光纤陀螺补偿具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 张燕萍,潘子军,魏志武,等. 光纤陀螺标度因数温度补偿硬件实现[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(5):660-662.
- [2] 左瑞芹,王仲涛,杨育荣. 光纤陀螺的温度补偿研究[J]. 火箭与制导学报, 2005, 25(4):464-466.
- [3] 李锸,颜树华,周春雷,等. 光纤陀螺温度漂移建模与补偿[J]. 半导体光电, 2009, 30(4):517-520.
- [4] 陈永奇,张春熹,朱奎宝. 神经网络在光纤陀螺标度因数温补中的应用[J]. 压电与声光, 2007, 29(5):516-518.
- [5] Shupe D M. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic inerferometer [J]. Applied Optics, 1980, 19(5): 654-655.
- [6] 韩冰,林玉荣,邓正隆. 光纤陀螺温度漂移误差的建模与补偿综述[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(2):218-224.