

基于光纤陀螺温度漂移误差补偿方法研究

汪红兵,王新宇,阳 洪,卜继军

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

摘 要:惯性导航系统中光纤陀螺的漂移受温度变化影响显著,导致其在导航系统中的应用受到各种制约。该文提出了一种软件上的温度补偿法,建立基于光纤陀螺多参量联合多项式温度补偿模型,并设计相应的试验方法对陀螺仪的漂移进行了温度补偿。试验证明,提出的温度模型准确有效,可补偿因温度变化引起的光纤陀螺仪的漂移影响,达到提高系统的导航精度及温度适应性的目的。

关键词:光纤陀螺;温度梯度;温度补偿;漂移误差;多参量联合多项式模型

中图分类号:V241.62

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.02.012

Study on Compensation Method of Temperature Drift Error Based on Fiber Optic Gyro

WANG Hongbing, WANG Xinyu, YANG Hong, BU Jijun

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: The drift of fiber optic gyroscope in inertial navigation system is significantly affected by temperature changes, which leads to various restrictions on its application in navigation systems. In this paper, a software temperature compensation method is proposed, and a multi-parameter polynomial temperature compensation model based on the fiber optic gyro is established, and the corresponding test method for the temperature compensation of gyroscope drift is designed. The experiment show that the proposed temperature model is accurate and effective, which can compensate for the drift of optical fiber gyroscope caused by temperature changes, so as to improve the navigation accuracy and temperature adaptability of the system.

Key words: fiber optic gyro; temperature gradient; temperature compensation; drift error; multiparameter union polynomial model

0 引言

温度是影响光纤陀螺精度的一个重要因素^[1],由于所用光纤陀螺在输出脉冲数的同时都提供了内部温度输出,可研究温度和零位偏移之间的关系^[2]。工程中常用的工作温度为 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,在变温过程中,需要尽量减小温度对陀螺产生的影响,因此,有必要采取一定的措施(包括软、硬件)控制或补偿温度误差。

软件上,光纤陀螺温度漂移模型很多,如 IEEE 标准光纤陀螺输出模型、线性模型或多项式模型、神经网络模型、小波网络逼近、模糊逻辑及受控马氏链模型。在工程应用中,由于光纤陀螺所在的系统对实时性要求较高,一般采用数字信号处理/现场可编程门阵列(DSP/FPGA)做解算的芯片,计算复杂的

模型不利于工程化实践。硬件上,通常使用结构改进或增加控温装置等方式,但实现中从硬件上补偿常受到工艺生产技术等方面的制约,较难应用于实际的产品中。因此,本文考虑从软件系统层面补偿,选用合理的多项式模型来对陀螺输出进行建模,有效的减小温度带来的系统误差。

1 温度对光纤陀螺的影响

光纤陀螺是一种基于萨格纳克(Sagnac)效应的测量旋转角速度的传感器。温度效应是光纤陀螺的主要误差源之一,是指温度条件变化导致光纤陀螺输出漂移的现象。光纤陀螺中重要器件如光纤线圈、光源、Y波导、探测器及耦合器等都对温度较敏感,在不同温度环境下输出信息不同,且与变温过程中温度梯度等因素有关。

收稿日期:2018-01-29

作者简介:汪红兵(1966-),男,重庆人,高级工程师,硕士,重庆市自动化与仪器仪表学会现任理事,主要从事特种电子元器件开发与生产工作的研究。

在干涉式光纤陀螺中,受工作环境温度的影响主要因为光纤环上的温度变化引起的非互易性,对光纤线圈上作用了不均匀的温度场,会带来随机漂移。当光纤环长度 L 、折射率 n 的光纤环内两束干涉光分别以顺时针和逆时针方向传输通过时,光纤环温度变化产生的非互易相位延迟误差,即 Shupe 效应^[3]为

$$\Delta\varphi_e(z) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{dn}{dT} \int_0^L \frac{\partial T}{\partial t}(z) \frac{L-2\pi}{c} dz \quad (1)$$

式中: $\Delta\varphi_e$ 为非互易相位误差; λ 为光源波长; $\frac{dn}{dT}$ 为光纤折射率温度系数; $\frac{\partial T}{\partial t}$ 为温度变化率; c 为波导中的光速。

可见,在变化的温度环境中,光纤环由温度带来的误差 $\Delta\varphi_e(z)$ 与外界环境温度的分布及其变化有关,与 $\frac{dn}{dT}$ 及 $\frac{\partial T}{\partial t}$ 成正比。

温度造成光纤陀螺的误差主要是噪声和漂移两方面,噪声影响光纤陀螺的检测灵敏度及零偏稳定性,与光纤的折射率有关,可用滤波消除;漂移影响陀螺的零偏性能,需要选择相关温度参数,建立恰当的温度补偿模型,对光纤陀螺误差进行补偿,这是有效改善光纤陀螺热致非互易效应的措施之一。

2 光纤陀螺温度补偿模型

通常情况下,光纤陀螺含误差的输出模型表示为

$$\omega' = \omega + b + \varepsilon \quad (2)$$

式中: ω' 为陀螺输出值; ω 为载体实际输入角速度; K 为标度因数; b 为常值漂移(零偏漂移); ε 为随机误差(量测噪声)。

陀螺的零偏漂移实际上是一个非平稳随机过程。实际的陀螺零偏包括常值零偏、异位零偏、温度偏移、重复性零偏、周期性偏移及随机漂移等^[4]。现为了简化模型,只将其温度相关的零偏分离出来,表示为

$$b = b_0 + \omega_r + \psi(t, T) + \varepsilon_0 \quad (3)$$

式中: b_0 为漂移常量值; ω_r 为地球自转角速度在陀螺测量面上的分量; $\psi(t, T)$ 为与温度和时间有关的漂移; ε_0 为其他引起的随机漂移,这几种漂移互不相关,对与温度有关的漂移可进行独立分析。

温度对光纤陀螺漂移的影响主要体现在不同温度、温度变化、温度梯度引起的误差。

实践发现,不同的温度环境下,陀螺输出有偏差,通常在多个特殊点温度值下做定温试验,标定陀螺的输出误差。温度的变化随外界情况而定,变化

规律无法做到准确的估计预测,但温度的变化率(即温度梯度)是温度变化的一个特征值,可转化为分析温度梯度与光纤陀螺的关系。根据光弹效应,即在受到应力作用时,介质的折射率会随之改变,当光纤陀螺所处的环境温度发生变化时,光纤环由于热胀冷缩会产生应力,导致光纤的折射率变化,引起漂移误差。在折射率 n_0 、半径 R 、光纤环长度 L 的光纤环内,由此引起的误差 Ω_e 可表示为

$$\Omega_e = \frac{n_0}{2R} \int_0^L D_T \hat{T} \left(1 - \frac{2x}{L}\right) dx \quad (4)$$

可见,光弹效应误差与陀螺工作环境的温度梯度在一定范围内成正相关。

光纤陀螺温度补偿模型的研究可分为线性和非线性模型两种。线性模型计算复杂程度低,可高效实时传送数据,适用于工程的实现^[5]。实际上,光纤陀螺漂移的温度特性受多方面因素制约,具有复杂的函数特征,单独考虑温度因素的模型补偿效果不好,需要建立更为全面的漂移数学模型。考虑将温度梯度和温度同时引入,设计多参数变量联合的多项式模型。

设某时刻温度为 T_0 ,上一时刻的温度为 T_1 ,则温度梯度为 $dT = \frac{T_1 - T_0}{\Delta t}$ (其中 Δt 为 T_1 和 T_0 两个时刻的时间间隔),考虑计算过程中矩阵的满秩,使用修改后的温度梯度 $dT' = \frac{T_1 - T_0}{\Delta t} + 1$ 。

陀螺温度补偿模型为

$$\psi(t, T) = A_1 T^3 + A_2 T^2 + A_3 T + A_4 dT'^3 + A_5 dT'^2 + A_6 dT' + A_7 \quad (5)$$

式中 $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7$ 为多项式拟合系数。

$$G' = G - \psi(t, T) \quad (6)$$

式中: G 为陀螺未做温补偿的输出; G' 为陀螺做定温补偿后的输出。

最后,通过最小二乘拟合,可确定这 7 个参数的系数。

3 实验验证和结果分析

3.1 实验数据处理方法

对陀螺进行 $-40 \sim 50$ °C 的高、低温环境试验,陀螺的原始输出码值经过平滑处理,在 Matlab 中用最小二乘法计算,分别得到 $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7$ 参数值,将其固化写入到产品软件中,根据式(2)估算陀螺的漂移,再从陀螺实测的漂移中将估计出的零偏减去,便完成了温度补偿。在相同设置条件下重新做高、低温实验验证温度补偿的效果。

3.2 实验结果分析

图1为1号陀螺的输出数据。由图可看出,系统启动后,陀螺随温度漂移变化趋势明显,而升温 and 降温对其影响趋势也不同,陀螺漂移极差约为80个码值,通过最小二乘法拟合,Matlab 计算得到7个参数值。重做试验得到陀螺的输出极差约为20个码值,且高、低温条件下陀螺输出值更集中,无明显的变化趋势。

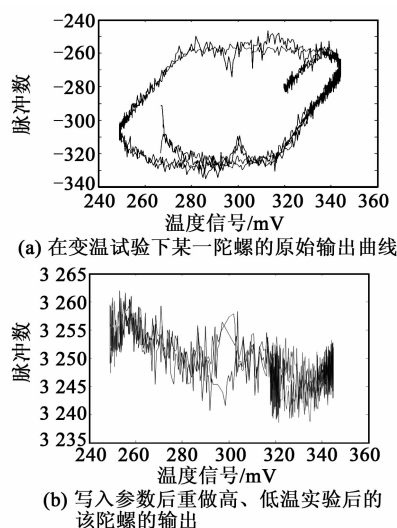


图1 1号陀螺的输出数据

图2为2号陀螺的输出数据。计算后写入其参

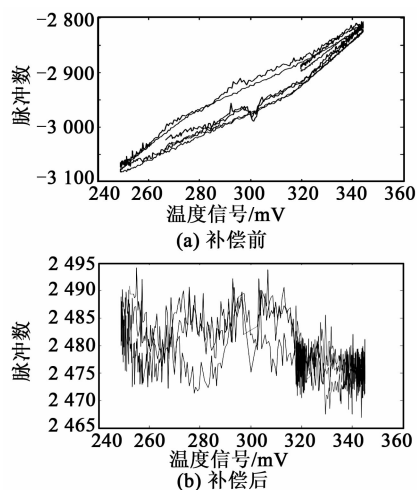


图2 2号陀螺的输出数据

数可看出补偿效果。补偿前陀螺漂移极差约为300个码值,补偿后陀螺的输出极差约为30个码值。

4 结束语

本文分析了温度对光纤陀螺的影响,设计了光纤陀螺温度补偿模型,通过 $-40\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 光纤陀螺的温度试验,验证光纤陀螺的变温多参量联合多项式补偿模型有效性,可得出结论:

光纤陀螺漂移与温度、温度变化率相关,采用4阶温度多项式模型与3阶温度梯度多项式模型组合的形式补偿,该模型可减小温度引起的光纤陀螺误差,并消除了陀螺漂移随温度变化的趋势,变温环境中陀螺输出极差减小,比补偿前平稳,使陀螺输出在小范围内波动。该补偿方法简明有效,满足工程中对实时性的要求,对提高光纤陀螺的精度和温度适应性有一定的价值。

参考文献:

- [1] 张广莹,邓正隆,傅振宪. 陀螺仪温度建模研究[J]. 系统仿真学报,2003,15(3):369-371.
ZHANG Guangying, DENG Zhenglong, FU Zhenxian, Study on temperature modeling of gyroscope[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(3):369-371.
- [2] YARIV A, YEB P. Optical waves in crystals[M]. New York: John Wiley & Sons, 1983.
- [3] SHUPE D M. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic inerferometer[J]. Appl Opt, 1980, 19(5): 654-655.
- [4] 赵龙,胡少波,纪文涛,光纤惯组温度补偿模型和测试技术研究[J]. 导弹与航天运载技术,2016:39-41.
ZHAO Long, HU Shaobo, JI Wentao. Research on temperature compensation model and test technology of optical fiber inertial group[J]. Missile and Space Vehicle Technology, 2016:39-41.
- [5] 杨萌,孙强,尹剑. 基于多项式模型的光纤陀螺温度补偿技术研究[J]. 电子测试,2010:58-59.
YANG Meng, SUN Qiang, YIN Jian. Research on temperature compensation technology for fiber optic gyro based on polynomial model [J]. Electronic Test, 2010: 58-59.