

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.03.003

# 惯组中光纤陀螺温度漂移的二维插值建模研究

白子杰,蔡春龙,牟玉涛

(北京航天时代光电科技有限公司,北京 100094)

**摘要:** 光纤陀螺对温度较为敏感,输出受温度及温度变化率影响严重,在实际工作中需要对温度漂移误差进行建模补偿。传统多项式拟合方法如最小二乘法,无法很好地满足精度要求。因此,首先对光纤陀螺工作原理与温度漂移误差产生原理进行分析,得出光纤陀螺温度漂移误差特性。利用传统多项式模型对不同温度下启动的光纤陀螺进行建模补偿,得到补偿后的精度并不理想。利用新的二维插值模型对上述试验重新进行建模补偿,结果表明二维插值模型明显优于多项式模型,光纤陀螺的零偏稳定性由补偿前的  $0.0153(^{\circ})/h$  提高到  $0.0051(^{\circ})/h$ ,有利于工程上应用。

**关键词:** 光纤陀螺;温度漂移误差;二维插值模型;建模补偿

中图分类号:V241.5

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号:2095-8110(2020)03-00015-08

## Research on Two-dimensional Interpolation Modeling of Temperature Drift of Fiber Optic Gyro in IMU

BAI Zi-jie, CAI Chun-long, MU Yu-tao

(Beijing Aerospace Times Optical-electronic Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China)

**Abstract:** Fiber optic gyroscope(FOG) is sensitive to temperature, and the output can be easily affected by temperature and temperature change rate. In actual work, it is necessary to use a modeling method to compensate for the temperature drift error. Traditional polynomial fitting methods, such as the least square method, cannot meet the accuracy requirements. In order to solve this problem, the operation principle of the FOG and the generating mechanism of temperature drift error are analyzed. Then the temperature drift error characteristic of FOG is calculated. And the polynomial model is used to model and compensate for FOGs at different temperatures. The accuracy after FOG compensation is not ideal. The two-dimensional interpolation model is used to model and compensate for the previous experiment. The results show that the two-dimensional interpolation model is significantly better than the polynomial model. The bias stability of the fiber optic gyro is improved from  $0.0153(^{\circ})/h$  (before compensation) to  $0.0051(^{\circ})/h$ , which is beneficial to engineering applications.

**Key words:** Fiber optic gyro; Temperature drift error; Two-dimensional interpolation model; Modeling compensation

收稿日期:2019-12-26;修订日期:2020-03-16

作者简介:白子杰(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为惯性导航系统及其应用。E-mail:bai9113@qq.com

通信作者:蔡春龙(1967-),男,研究员,主要从事光纤陀螺捷联惯性导航系统技术方面的研究。

E-mail:cai\_chun\_long@163.com

## 0 引言

光纤陀螺是基于萨格纳克(Sagnac)效应进行角速度测量的光学惯性仪表。因其具备可靠性高、体积功耗小、生产工艺相对简单等优点,被越来越广泛地应用于航空航天及武器装备领域中。以光纤陀螺为基础的捷联惯性导航系统也正逐步向高精度发展。

光纤陀螺工作于惯性测量组合中,输出惯组自身三轴方向的角速度,用于对应惯导系统的对准与导航计算。光纤陀螺因本身仪表的精度限制和所处不同工作环境的影响,输出与真实值会存在误差,其中零偏是主要误差之一。光纤陀螺的工作原理和器件构成使其对温度较为敏感,温度相关变量的变化会使其输出产生很大波动,从而使零偏产生温度漂移。零偏的温度漂移会对惯组所在惯导系统的导航精度产生影响,因此该误差是光纤惯导向高精度发展过程中必须解决的问题之一。

20世纪80年代初期D. M. Shupe发现在干涉型光纤陀螺中,光纤环温度变化时会产生热致非互易性相位延迟,并命名为Shupe效应<sup>[1]</sup>。Shupe效应从理论上分析了温度漂移产生的原因。在此之后F. Mohr研究证实了使用四极对称绕法绕制光纤环可以极大地降低光纤陀螺中因温度变化产生的相位误差,但是这种方法绕制的光纤环过于理想,在实际应用中并不能完美实现。

目前,针对温度漂移误差可以使用温度控制或温度建模补偿来消除。当光纤惯组的工作环境温度范围较大时,温度控制的升温幅度较大、启动时间过长,升温相对较难实现且不利于系统的快速响应。温度建模补偿则能更好地解决此问题。目前,温度建模多采用多项式模型的拟合方法,如最小二乘法,因其原理简单、用法成熟被广泛应用于各种产品中。同时随着计算机技术的发展,神经网络也得到了人们的重视。单独使用各种不同的神经网络或与其他方法组合建立非线性模型的方法也得到了研究。张潇等在研究分类建模的过程中使用了最小二乘法建模<sup>[2]</sup>;周琪等研究了利用自适应神经模糊推理系统(Adaptive Network-based Fuzzy Inference System, ANFIS)对光纤陀螺温度漂移误差进行建模补偿<sup>[3]</sup>;胡国欣等在研究基于跟踪微分器的建模时,使用了径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络的方法进行建模<sup>[4]</sup>;李健等研

究了基于小波神经网络的光纤陀螺温度建模补偿<sup>[5]</sup>。

但是多项式模型的拟合方法在较复杂的输出情况下,拟合效果有限;而神经网络的方法计算量较大,所需时间较长,且无法直观得到所建立模型,不利于在工程上的应用。本文经研究发现,可以利用二维插值模型对温度漂移误差进行补偿<sup>[6]</sup>,并对比多项式模型进行分析。

本文首先通过研究光纤陀螺的工作原理及温度漂移误差产生的原因,分析了相关变量对温度漂移误差的影响。在对比使用多项式模型中最小二乘法建模补偿的结果后,基于二维插值的方法对光纤陀螺的输出进行建模补偿,并通过试验对其结果进行了验证。

## 1 温度漂移误差机理分析

光纤陀螺是基于萨格纳克效应进行工作的,即沿闭合光路相向传播的两束光波之间的相位差正比于闭合光路法向的输出角速度。在光纤陀螺相对惯性空间存在转动时,两束相向传播的光传播路程发生变化,从而产生时间差 $\Delta t$ ,最终引起相应的相位差,其相位差如式(1)

$$\Delta\phi = \frac{4\pi lr}{\lambda_0 c} \Omega \quad (1)$$

其中, $\lambda_0$ 为光的波长, $\Omega$ 为转速, $\Delta\phi$ 为相位差, $l$ 为光纤环长度, $r$ 为光纤环半径。

光纤陀螺所在工作环境温度的不同以及在工作中自身温度的不断上升,使其输出发生变化,即产生温度漂移误差。光纤线圈是光纤陀螺的重要部件之一,当光纤线圈上某段光纤的温度随着时间发生变化时,自身的折射率也会随之变化。相向传播的光在光纤线圈中经过该段光纤的时间不同,因其折射率的不同,它们所经历的光程也不同,从而产生相位误差,被称为非互易性相位延迟,即Shupe效应。这种相位误差无法与萨格纳克效应相区分,从而产生了零偏的温度漂移误差<sup>[7-9]</sup>。

假设光纤线圈的总长度为 $L$ ,其中因温度变化产生的相位延迟为

$$\phi = knL + k \left( \frac{\partial n}{\partial T} + n\alpha \right) \int_0^L \Delta T(l) dl \quad (2)$$

其中, $k$ 为真空中的波数,即波长 $\lambda$ 的倒数,理论物理中定义为 $k = 2\pi/\lambda$ , $n$ 为折射率, $\alpha$ 为光纤线性膨胀系数, $L$ 为光纤总长, $\Delta T$ 为光纤温度的变化。

当两束光波分别沿顺时针(Clock Wise,CW)与逆时针(Counter Clock Wise,CCW)传播时,达到初始端时刻为  $t$ ,则经过  $l$  处的时刻分别为

$$t_{cw} = t - \frac{L-l}{c_0} \quad t_{ccw} = t - \frac{l}{c_0} \quad (3)$$

其中,  $c$  为真空中光速,  $c_0$  为光在光纤中的传播速度  $c_0 = c/n$ 。

代入(2)式可求出两束光分别产生的相位延迟  $\Delta\phi_{cw}$  与  $\Delta\phi_{ccw}$ 。相减后,再经过整理得到相位差公式

$$\Delta\phi = \frac{kn}{c} \left( \frac{\partial n}{\partial T} + \alpha \cdot n \right) \int_0^{L/2} \left( \frac{\partial T}{\partial t}(l, t) - \frac{\partial T}{\partial t}(L-l, t) \right) \cdot (L-2l) dl \quad (4)$$

其中,  $\frac{\partial T}{\partial t}$  为温度变化率。由式(4)可以看出,此相位误差与环境温度的变化、折射率随温度的变化率均相关<sup>[10-12]</sup>。

为了抑制 Shupe 效应,减少相位误差,在实际中可以采用对称法来绕制光纤线圈,这样可以很大程度上保证光纤环对称部分的一小段光纤具有相同的温度,从而具有相同的折射率。但是这种方法要求光纤线圈绕制处于绝对理想的状态中,在实际中无法完美实现,并不能完全解决 Shupe 效应带来的误差。

同时,本文使用的某型号光纤惯组要求工作环境温度范围较大。在温度不同的环境下,光纤陀螺内部的光源、光纤环、探测器等光学器件以及惯组中其他结构零件,由于热胀冷缩造成的形变和挤压等也会产生漂移误差。惯组在通电启动后,光纤陀螺等各部件会产生热量使自身温度升高并向外传播,此过程光纤陀螺的温度持续升高,直到工作一定时间后,温度才会达到稳态。在温度由低升高到最终稳态的过程中,温度变化率在从大向小发生变化,相应也造成了温度漂移误差。最后惯组在工作时,内部会产生一个变化的温度场,若当前环境温度变化较快时,内部器件因受热不均也会产生温度延迟,造成漂移误差<sup>[13]</sup>。

本文使用的光纤惯组陀螺在某温度下工作一段时间,其温度、温度变化率、角速度原始输出如图 1 所示,可见在惯组正常工作时陀螺因温度的变化使输出产生了较大的漂移误差,远远高于陀螺本身的精度,因此必须针对温度相关信息对陀螺进行建模补偿,抑制温度漂移误差。

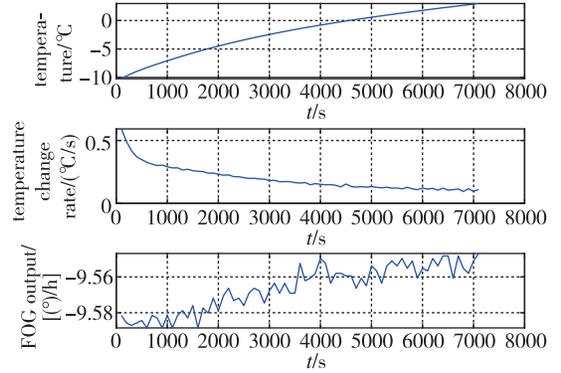


图 1 光纤陀螺温度、温变率与原始输出

Fig. 1 Temperature, temperature change rate and original output of fiber optic gyroscope

## 2 误差模型的分析与建立

光纤陀螺安装于惯组中,陀螺转动将两束光传播产生的相位差转化为电信号,然后转换为脉冲信号输出,信号输出在 DSP 中经过标度因数等参数的计算后得到惯组的角速度。光纤陀螺在工作时其输出与输入角速度存在如下简化关系

$$D = K\omega + D_0 + \Delta D_T + \varepsilon \quad (5)$$

其中,  $K$  为陀螺标度因数,  $\omega$  为输入角速度,  $D_0$  为零偏,  $\Delta D_T$  为零偏温度漂移误差,  $\varepsilon$  为随机误差。其中  $\Delta D_T$  主要由 Shupe 效应产生的非互易性相位延迟所造成。

光纤陀螺在工作时环境较为复杂,其输入输出存在某种特定的关系,同样温度、温度变化率等温度相关变量与温度漂移误差也存在某种特定的关系。通过第 1 节的理论分析得出,温度与温度变化率能够直接造成光纤陀螺漂移误差的产生,但因为在惯组中温度对其他部件也造成影响,多种效应共同作用产生最终的漂移误差,所以很难理论分析出具体的数学关系。因此需要使用系统辨识的方法,把惯组视为一个黑箱,通过对惯组试验所得数据进行分析,建立数学模型,使用模型拟合出这种特定的关系,从而用数学的方法补偿掉光纤陀螺的温度漂移误差,使其输出更加逼近真实情况。

### 2.1 多项式模型

传统建模方法多使用多项式模型进行拟合,最小二乘法是其中一种在工程中被广泛应用的多项式拟合方法。所谓最小二乘,是一种数学上的优化方法,使拟合出的模型与实际数据的偏差平方和最小。但在实际试验中发现,仅使用单一的温度  $T$  与

温度变化率  $\Delta T$  作为输入时,往往拟合效果并不理想。分析发现其他的温度相关变量,如温度与温度变化率的不同幂次项、温度与温度变化率的乘积,以及各自不同幂次项与对方的乘积都会对温度漂移误差产生影响,因此应在自变量的选择中添加上述变量。

在 MATLAB 中对光纤陀螺输出与温度、温度的不同幂次项、温度变化率、温度变化率的不同幂次项、温度与温度变化率的乘积等变量进行逐步回归分析<sup>[14]</sup>。在分析中将变量逐个引入模型,每次引入一个新变量进行 F 检验,同时对已经引入的变量进行 t 检验,在检验的过程中删除不显著的变量,使模型中任意一个变量都是显著的。当最终引入所有变量后,不再有新的变量引入时,模型中剩下的所有变量均为显著。

根据显著性分析所得结果判断,选取下列各项作为自变量

$$\mathbf{H} = [T \quad T^2 \quad T^3 \quad \Delta T \quad \Delta T^2 \quad \Delta T^3 \quad T \times \Delta T \\ T^2 \times \Delta T \quad T \times \Delta T^2 \quad T^3 \times \Delta T \quad T \times \Delta T^3]$$

建立陀螺输出与上述变量相关的模型为

$$Y(T, \Delta T) = Y_0 + f_1(T) + f_2(T^2) + f_3(T^3) + \\ f_4(\Delta T) + f_5(\Delta T^2) + f_6(\Delta T^3) + \\ f_7(T \times \Delta T) + f_8(T^2 \times \Delta T) + \\ f_9(T \times \Delta T^2) + f_{10}(T^3 \times \Delta T) + \\ f_{11}(T \times \Delta T^3) \quad (6)$$

对上述模型进行最小二乘拟合:设  $\mathbf{X}$  是某一确定性常值向量,无法直接观测到  $\mathbf{X}$ ,只能观测到  $\mathbf{X}$  各个分量的线性组合  $\mathbf{Z}$ 。其中关系如下

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{V} \quad (7)$$

通过估计出的  $\mathbf{X}$  即  $\hat{\mathbf{X}}$ ,可以确定估计出的量测值  $\hat{\mathbf{Z}} = \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}$ 。最小二乘法要求实际的量测值  $\mathbf{Z}$  与估计出的量测值  $\hat{\mathbf{Z}}$  之差的平方和最小,即

$$J(\hat{\mathbf{X}}) = (\mathbf{Z} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}})^T (\mathbf{Z} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}) = \min \quad (8)$$

经过推导得出使式(8)成立的条件为

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{X}} \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} = -2\mathbf{H}^T (\mathbf{Z} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}) = 0 \quad (9)$$

最终得出  $\mathbf{X}$  的最小二乘估计  $\hat{\mathbf{X}}$  为

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{Z} \quad (10)$$

因此,构造矩阵  $\mathbf{H}$  包含所有温度相关变量自变量,同时构造参数矩阵  $\mathbf{X}$  包含模型中温度相关变量的系数, $\mathbf{y}$  为陀螺原始输出,可得

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \times \mathbf{X} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (11)$$

利用最小二乘法得

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{H}^T \cdot \mathbf{H})^{-1} \cdot \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{y} \quad (12)$$

此时,求得了此多项式模型中的所有参数,代入其他数据即可完成模型的建立。

## 2.2 二维插值模型

在以往的试验分析中,使用多项式模型往往不能很好地适应不同位置下的输出,尤其在试验数据较为复杂的情况下,会产生很大的误差。因为把惯组在不同温度下工作的数据放在一起时波动较大,在不同温度下升温速率也不相同,许多关键的数据点在多项式拟合中会被当作误差所忽略。所以在最小二乘建模中,仅在选取的自变量上优化也不能很好地拟合出整个试验范围内的输出结果。针对这一规律,本文发现使用插值法更适合在该情况下的模型建立。插值法会使模型一定通过所选中的数据点,保留数据中这些具有特点的真实结果,同时也能使模型更好地符合真实情况。

根据之前理论分析,使用插值法建模时需要使用温度  $T$  与温度变化率  $\Delta T$  这 2 个变量进行二维插值。一般的二维插值使用的数据为等间距且单调变化的网格形式,但是惯组实际工作时的数据并不能按照温度与温变率这 2 个方向排列成标准的网格形式,无论是温度还是温变率均难以在试验中控制为不同的标准大小。因此在建模时只能使用基于不规则的散点数据进行插值的方法。

在插值法建模中,第一要考虑已知数据点的选择,需要让选出的数据点大致均匀地分布在需要估计出的点的周围,在数据密集处选择较多的数据点,在数据稀疏处选择较少的数据点,分布不均的数据往往会造成较大的插值误差。第二要注意数据点的筛选,过多的数据点并不会使插值的准确度提高,反而会因为数据过多造成冗余,掩盖住真实的结果,对某一次的试验数据过度拟合后,对其他位置试验数据的重复适应性会相应变差。过多的数据点也会造成数据计算量过大,增加计算时间。惯组在启动初期温度变化较大,相同时间内数据较少且变化较为规律,百秒平滑后每个数据均可选择,随着温度变化幅度变小后,温度在较小范围内波动,相同时间内数据变多,为了更好地反映数据变化规律,每隔 2~3 个数据择一个<sup>[15]</sup>。

经过多次测试,在每个启动温度点下根据温度变化的快慢且参考变化趋势的规律性,选择适量的原始数据点,画出以温度与温变率为自变量,陀螺输出为因变量的三维曲面图(其中  $x$ 、 $y$  轴为温度与

温变率,  $z$  轴为陀螺原始输出), 图 2 所示即为二维插值模型的基础。

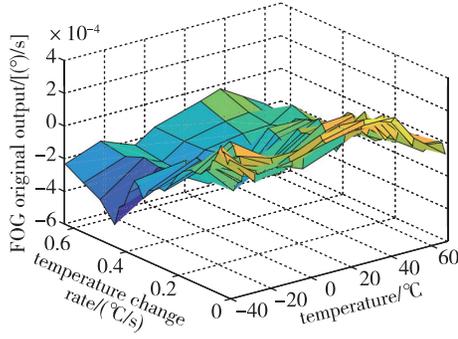


图 2 陀螺原始输出曲面

Fig. 2 Gyro original output surface

在图 2 的基础模型上进行插值, 得出自变量范围内所需新的温度与温变率下陀螺的输出值。相较于一维插值, 二维插值更为复杂, 但许多一维插值的方法无法适用。对于曲面上的插值, 首先把数据点投影至自变量所在平面, 需要根据已知的数据点表示出自变量平面内任意一点, 当使用的数据点是标准的网格形式时较容易实现。但是因为惯组的数据为不规则的散点, 不能根据横纵坐标分割成标准的矩形, 因此要重新对  $x$ 、 $y$  轴所在的二维平面进行分割。Delaunay 三角剖分法可以根据一定的算法, 建立空间中散点的联系, 最终使平面形成三角网格的形式, 然后可以依据此三角网格进行插值。

首先, 把温度与温变率所在平面组成的平面点集按 Delaunay 方法进行三角剖分, 然后进行数据的插值计算。假设经过分割后平面内某 3 个点组成三角形, 3 个点分别为  $A$ 、 $B$ 、 $C$ , 其中每个点对应的值为  $f(A)$ 、 $f(B)$ 、 $f(C)$ , 此三角形内任意一点  $X$  可以用相对此三角形的重心坐标来表示

$$X = lA + mB + nC \quad (13)$$

其中,  $l$ 、 $m$ 、 $n$  为坐标系数, 当  $0 < l, m, n < 1$  时, 任意点  $X$  位于三角形内部。

$X$  点输出线性插值表示为

$$f(X) = l \cdot f(A) + m \cdot f(B) + n \cdot f(C) \quad (14)$$

因此, 想要求得任意点的线性插值, 需要求出式(14)中的系数  $l$ 、 $m$ 、 $n$ 。假设三角形 3 个顶点为 3 个已知数据点, 其中每个顶点温度表示为  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ , 温变率表示为  $\Delta T_1$ 、 $\Delta T_2$ 、 $\Delta T_3$ , 陀螺输出表示为  $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$ 。所求插值点  $X$  的温度为  $T$ 、温变率为  $\Delta T$ 、陀螺输出为  $y$ 。

陀螺输出可使用自变量线性表示为

$$y_i = aT_i + b\Delta T_i + c \quad (15)$$

以此建立三元一次方程组

$$\begin{cases} y_1 = aT_1 + b\Delta T_1 + c \\ y_2 = aT_2 + b\Delta T_2 + c \\ y_3 = aT_3 + b\Delta T_3 + c \end{cases} \quad (16)$$

求解可得

$$\begin{cases} a = \frac{(\Delta T_3 - \Delta T_2)y_1 + (\Delta T_1 - \Delta T_3)y_2 + (\Delta T_2 - \Delta T_1)y_3}{(\Delta T_3 - \Delta T_2)T_1 + (\Delta T_1 - \Delta T_3)T_2 - (\Delta T_2 - \Delta T_1)T_3} \\ b = \frac{(T_2 - T_3)y_1 + (T_3 - T_1)y_2 + (T_1 - T_2)y_3}{(\Delta T_3 - \Delta T_2)T_1 + (\Delta T_1 - \Delta T_3)T_2 - (\Delta T_2 - \Delta T_1)T_3} \\ c = \frac{(T_3\Delta T_2 - T_2\Delta T_3)y_1 + (T_1\Delta T_3 - T_3\Delta T_1)y_2 + (T_2\Delta T_1 - T_1\Delta T_2)y_3}{(\Delta T_3 - \Delta T_2)T_1 + (\Delta T_1 - \Delta T_3)T_2 - (\Delta T_2 - \Delta T_1)T_3} \end{cases} \quad (17)$$

对于三角形任意一点  $X$  的输出, 可表示为

$$\begin{cases} y = ly_1 + my_2 + ny_3 \\ y = aT + b\Delta T + c \end{cases} \quad (18)$$

将式(16)代入式(17)中, 可求得系数  $l$ 、 $m$ 、 $n$

$$\begin{cases} l = \frac{[(\Delta T_3 - \Delta T_2)T + (T_2 - T_3)\Delta T + (T_3\Delta T_2 - T_2\Delta T_3)]}{(\Delta T_3 - \Delta T_2)T_1 + (\Delta T_1 - \Delta T_3)T_2 - (\Delta T_2 - \Delta T_1)T_3} \\ m = \frac{[(\Delta T_1 - \Delta T_3)T + (T_3 - T_1)\Delta T + (T_1\Delta T_3 - T_3\Delta T_1)]}{(\Delta T_3 - \Delta T_2)T_1 + (\Delta T_1 - \Delta T_3)T_2 - (\Delta T_2 - \Delta T_1)T_3} \\ n = \frac{[(\Delta T_2 - \Delta T_1)T + (T_1 - T_2)\Delta T + (T_2\Delta T_1 - T_1\Delta T_2)]}{(\Delta T_3 - \Delta T_2)T_1 + (\Delta T_1 - \Delta T_3)T_2 - (\Delta T_2 - \Delta T_1)T_3} \end{cases} \quad (19)$$

将式(19)代入式(13)中, 即可求得任意点  $X$  在二维线性插值下的陀螺输出。依照此方法可以根据图 2 中的原始模型, 插值出任意定义域范围内陀螺的输出值, 以此进行建模补偿。

### 3 试验设计与验证

根据模型需求搭建试验平台, 试验用光纤陀螺采用了光电公司某型号光纤惯组产品中的光纤陀螺, 其精度达到 5‰。试验以此惯组为基础, 同时还包含温箱、直流稳压电源、通信电缆、数据串口盒、测试电脑等设备。试验具体设计为: 使惯组在不同温度下启动并工作 2h, 直到内部陀螺温度趋于稳定并记录采集数据。

首先进行第 1 组试验, 将惯组放置于温箱中, 在  $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$  范围内设置以下温度点:  $-40^\circ\text{C}$ ,  $-25^\circ\text{C}$ ,  $-10^\circ\text{C}$ ,  $5^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $35^\circ\text{C}$ ,  $45^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$ 。在第 1 个温度点充分保温, 在确保惯组中的陀螺处于设定温度点后, 惯组上电进行测试。2h 后惯组断电, 在第 2 个温度点再次充分保温后上电测试。依次完成所有温度点的测试并保存好数据后, 改变惯组位置进行第

2组试验,同样按照设定的温度重复进行上述步骤,用于验证模型效果。实验平台如图3所示。



图3 试验平台  
Fig.3 Test platform

本惯组采样频率为1000Hz,所得数据在叠加了白噪声后,其真实的输出结果被淹没在噪声中无法看出变化,同时过多的原始数据会造成冗余对于插值建模反而不利。因此对于原始数据进行百秒平滑,减少噪声对惯性器件输出的影响,消除了不稳定的噪声对输出数据的影响,之后对经过平滑的温度数据使用差分法求得对应的温度变化率。经过平滑后的陀螺温度、温度变化率、输出数据如图4所示。

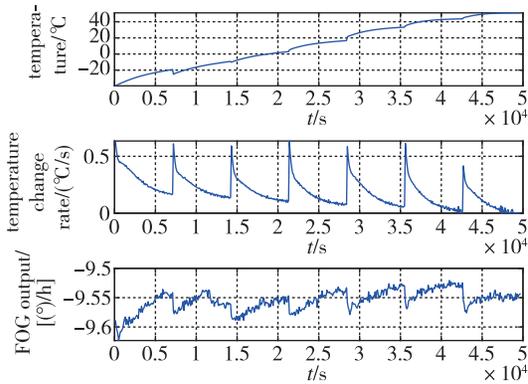


图4 经平滑处理后的试验数据  
Fig.4 Test data after smoothing

使用平滑处理后的第1组试验数据建立多项式模型,之后把第2组试验中相同陀螺的输出数据输入该模型。其模型拟合效果及补偿后的结果如图5所示。

通过补偿结果可见,以此方法拟合的模型,对相同陀螺的不同试验数据补偿的结果并不理想,尤其是在-25℃下的补偿结果。这种在不同温度下启动的工作数据组合在一起波动较大,而传统多项式模型在此情况下拟合能力有限,无法满足更高精度的要求。

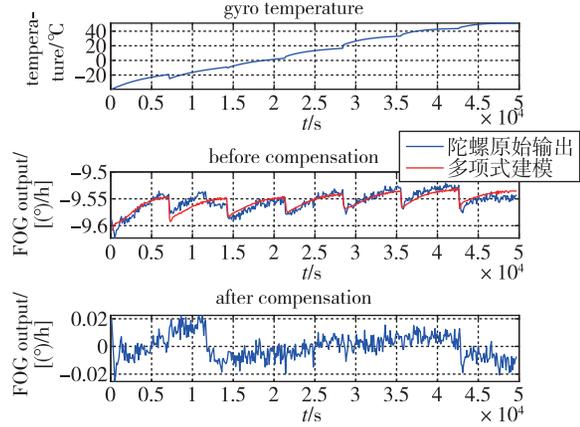


图5 最小二乘建模结果

Fig.5 Modeling results of the least squares model

之后使用二维插值方法建模,按2.2节中图2所选择的数据点作为插值的基础模型。把另一组验证数据的温度和温变率作为插值点的自变量输入模型,得到插值点的输出值。此模型补偿后结果如图6所示。

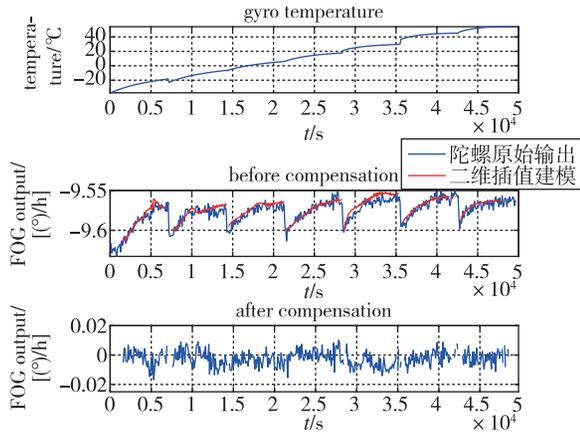


图6 二维插值建模结果

Fig.6 Modeling results of the two-dimensional interpolation model

通过图6与图5对比可以看出,二维插值模型的补偿效果明显优于最小二乘法的多项式模型拟合。惯组在-25℃启动时的数据也得到了较好的补偿。

表1列出了陀螺输出数据补偿前与多项式模型和二维插值模型进行温度建模补偿后的结果对比。

表1 补偿前后陀螺零偏稳定性

Tab.1 Bias stability of gyro before and after compensation

	补偿前	多项式模型	二维插值模型
零偏稳定/[ $^{\circ}$ /h]	0.0153	0.0084	0.0051

从表 1 中可以看出,通过二维插值建模对陀螺输出数据进行补偿,很大程度上减小了因温度造成的零偏漂移误差,使陀螺的零偏稳定性由补偿前的  $0.0153(^{\circ})/h$  减小到  $0.0051(^{\circ})/h$ ;使惯组在刚刚启动工作温度并未达到稳态势时,输出仍较为稳定,继而使惯导系统在上电短时间内对准导航精度得到提升。

#### 4 结论

目前,光纤惯组中陀螺输出因受温度影响而产生温度漂移误差,很大程度上限制了其向高精度的进一步发展,本文经研究分析:

1)从光纤陀螺温度漂移误差产生的机理入手,分析了 Shupe 效应的影响以及产生温度漂移误差的事实。

2)建立光纤陀螺的温度误差模型,对比了传统的多项式拟合方法,得出的补偿结果并不理想。

3)提出了一种使用二维插值法对惯组中光纤陀螺温度漂移误差进行建模补偿的方法。经过试验的设计与验证,有效地补偿了惯组输出因温度相关信息而产生的误差项,使陀螺的零偏稳定性大大减小,且优于传统多项式模型,在工程中具有一定的应用价值。

#### 参考文献

[1] 戴旭涵,杨国光,刘承. 光纤环中的 Shupe 效应及其补偿方法研究[J]. 光子学报, 2001(12): 1470-1473.  
Dai Xuhan, Yang Guoguang, Liu Cheng. The Shupe effect in fiber optic coil and its compensation method [J]. Acta Photonica Sinica, 2001(12): 1470-1473(in Chinese).

[2] 张潇,卓超. 基于分类建模的光纤陀螺温度效应补偿方法[J]. 航天控制, 2016, 34(3): 36-40+50.  
Zhang Xiao, Zhuo Chao. A compensation method for FOG temperature effect error based on modeling of classified data[J]. Aerospace Control, 2016, 34(3): 36-40+50(in Chinese).

[3] 周琪,秦永元,赵长山. 光纤陀螺温度漂移误差的模糊补偿方案研究[J]. 传感技术学报, 2010, 23(7): 926-930.  
Zhou Qi, Qin Yongyuan, Zhao Changshan. Research on fuzzy compensation method of temperature drift for fiber optical gyro[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(7): 926-930(in Chinese).

[4] 胡国欣,李安,覃方君. 基于跟踪微分器的光纤陀螺

温度误差建模方法[J]. 计算机应用, 2018, 38(S1): 245-248+252.

Hu Guoxin, Li An, Qin Fangjun. Modeling method of gyroscope temperature error based on tracking differentiator[J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(S1): 245-248+252(in Chinese).

[5] 李健,李淑英. 基于小波神经网络的光纤陀螺系统级温度补偿[J]. 压电与声光, 2018, 40(6): 864-867+871.

Li Jian, Li Shuying. System-level temperature compensation of FOG based on wavelet neural network [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2018, 40(6): 864-867+871(in Chinese).

[6] 陈玲侠,张军利. 基于三角剖分的空间数据插值方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2016(10): 35-36.

Chen Lingxia, Zhang Junli. Spatial data interpolation method based on triangulation[J]. Automation & Instrumentation, 2016(10): 35-36(in Chinese).

[7] 冯卡力,李安,覃方君,等. 光纤陀螺温度误差自适应神经模糊补偿方法[J]. 兵工学报, 2016, 37(4): 641-647.

Feng Kali, Li An, Qin Fangjun, et al. Temperature error compensation method based on adaptive neuro fuzzy inference for fiber-optic gyro[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(4): 641-647(in Chinese).

[8] 郭士萃,许江宁,李峰,等. 优化 BP 神经网络的光纤陀螺温度漂移建模与补偿[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(1): 93-97.

Guo Shiluo, Xu Jiangning, Li Feng, et al. Modeling and compensation algorithm of FOG temperature drift with optimized BP neural network[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(1): 93-97(in Chinese).

[9] 王楠. 高精度光纤捷联惯导系统温度误差建模与补偿技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.

Wang Nan. High precision fiber optic strapdown inertial navigation system temperature error modeling and error compensation technology research [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012 (in Chinese).

[10] 凌卫伟. 光纤陀螺温度效应机理分析及补偿措施研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.

Ling Weiwei. Research on temperature effect mechanism analysis and compensation measures of fiber optic gyroscope[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017(in Chinese).

[11] 李光耀,侯宏录,杜鹏,等. 采用小波降噪和神经网络的 FOG 温度漂移补偿方法[J]. 光电工程, 2019,

- 46(9): 58-66.
- Li Guangyao, Hou Honglu, Du Juan, et al. FOG temperature drift compensation method based on wavelet denoising and neural network[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(9): 58-66(in Chinese).
- [12] 许辰希, 吴刚, 石春, 等. 光纤陀螺温度误差模型研究[J]. *光学技术*, 2014, 40(6): 492-498.
- Xu Chenxi, Wu Gang, Shi Chun, et al. Temperature compensation model research on fiber optic gyroscope [J]. *Optical Technique*, 2014, 40(6): 492-498 (in Chinese).
- [13] 侯宏录, 李光耀, 李媛. 光纤陀螺零偏漂移的温度特性与补偿[J]. *自动化仪表*, 2019, 40(3): 59-63+68.
- Hou Honglu, Li Guangyao, Li Yuan. Temperature characteristic and compensation of FOG bias drift[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2019, 40(3): 59-63+68(in Chinese).
- [14] 陶彧敏. 激光陀螺惯性测量系统温度补偿技术研究[D]. 北京: 中国航天科技集团公司第一研究院, 2017.
- Tao Yumin. Research on technologies of the temperature compensation for laser gyro inertial measurement system [D]. Beijing: China Academy of Launch Vehicle Technology, 2017(in Chinese).
- [15] 熊敏谔. Delaunay三角剖分法在降水量插值中的应用[J]. *气象学报*, 2012, 70(6): 1390-1400.
- Xiong Minquan. Delaunay triangulated method with an application to the precipitation interpolation[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 70(6): 1390-1400 (in Chinese).