光纤陀螺温度与标度因数非线性建模与补偿

王新龙 马 闪

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 研究了光纤陀螺 FOG(Fiber Optic Gyroscope)温度效应和标度因数非线性误差的复合建模及补偿方法. 分析了热作用于光纤环引起光路非互易性的机理, 针对由温度和标度因数非线性引起的严重非线性漂移误差, 提出了一种改进的实用精确补偿 FOG 温度和标度因数漂移的分段复合建模方法. 通过对 VG951 型 FOG 全温度和全角速率范围内实际测试数据进行建模及处理表明, 经分段复合模型补偿后, 陀螺漂移从 4.4 (°)/h 减小到 0.1 (°)/h, 较传统补偿方法的精度得到大幅度提高, 实验验证了建模方法的精确性及补偿方法的有效性.

关 键 词: 光纤传感器; 温度模型; 标度因数; 非线性模型

中图分类号: TP 319.9

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2009)01-0028-04

Nonlinearity of temperature and scale factor modeling and compensating of FOG

Wang Xinlong Ma Shan

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract The error composite modeling and compensating of temperature effect and scale factor nonlinearity of fiber optic gyroscope(FOG) was studied. The mechanism of thermal affect arising from nonreciprocity of optic-loop was analyzed. Based on the severe nonlinearity drift error induced by temperature change and scale factor nonlinearity, an practical and precise composite model was proposed to compensate the error caused by temperature and scale factor's nonlinearity. The test experiment and data processing were carried out at full temperatures and full rotate rates of FOG-VG951 and indicate, utilizing piece-wise modeling and compensating the FOG, its drift error can be minished from 4.4 (°)/s to 0.1 (°)/s, which is much better than the conventional modeling and compensating means, and the experimental results indicate that the method is useful and feasible.

Key words fiber optic sensors; temperature model; scale factor; nonlinear model

作为一种新型的惯性仪表, 光纤陀螺 FOG (Fiber Optic Gyroscope)具有结构简单、动态范围宽、可靠性高、抗振动性强、启动快、成本低等优点, 因此, 近年来在海陆空天、机器人控制及雷达稳定系统等领域得到了广泛应用.

为提高 FOG 的应用水平及适用范围, 要求 FOG 具有较宽的工作温度范围. 但由于构成 FOG 的主要器件如光纤线圈、集成光学器件、光源、耦合器等对温度较为敏感, 当工作环境温度发生变化时, 在 FOG 的输出信号中将产生非互易相位误差. 这种误差是导致 FOG 零位漂移不稳定的主要原因, 严重影响着 FOG 在实际工作过程中的精度及稳定性. 此外, 由于 FOG 的标度因数也具有温度依赖性, 因此 FOG 的工作点随输入角速度和温度的不同而发生变化, 温度变化愈大、输入角速度越大非线性度就越大[1]. 因此, 标度因数的非线性也是影响 FOG 精度的一个重要因素.

针对以上问题, 本文研究了一种精确补偿

收稿日期: 2008-01-21

基金项目: 航空科学基金资助项目(2007ZC51027); 航天支撑基金资助项目

作者简介: 王新龙(1969-), 男, 陕西渭南人, 副教授, xlwon@163.com.

FOG温度和标度因数非线性误差的复合误差模型,利用 VG951型开环 FOG的实测数据,验证了该建模方法的有效性.

1　FOG光纤环温度效应机理

FOG是基于 Sagnac干涉原理,利用同一波长的光束在闭合路径中沿顺、逆两个方向行进的光程差,以确定载体相对于惯性空间的旋转角速率.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[2]

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

式中, $\beta_0 = 2\pi/\lambda_0$为光在真空的传输常数, λ_0为光源波长; n为光纤的有效折射率; $\partial n/\partial T$为石英材料的折射率温度系数; α为热膨胀系数; $\Delta T(z)$为沿光纤温度的变化量.

在 FOG中,当两束干涉光分别以顺时针和逆时针方向通过同一长度为 L的光纤环,设顺时针光波在 t时刻到达光纤输出端,则逆时针光波到达某点 z的时刻为 $\bar{t} = t - (L - z)/c_n$, $c_n = c/n$为光在波导中传播的速度, c为真空中的光速.由式(1)可推得光纤环热导致的非互易相位误差为

$$\Delta\Phi(z) = \frac{2\pi}{\lambda_0}\frac{\partial n}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial t}\frac{L - 2z}{c_n}\mathrm{d}z \qquad (2)$$

式中, c_n为光波速度; T为光纤环的温度.

可见,光纤环由温度效应引起的 $\Delta\Phi(z)$与光纤折射率随温度变化率 $\mathrm{d}n/\mathrm{d}T$及该段光纤上的温度变化率 $\mathrm{d}T/\mathrm{d}t$成正比,与光波传输的速度 c_n成反比.温度对 FOG性能的影响主要表现在:从热源来说,陀螺工作时,自身要发热,而且在环境温度发生变化时,温度场将变得更为复杂,所以陀螺自身与环境温度的变化都将影响陀螺的性能.从物理特性来说,气体的折射率、材料的导热系数、光学器件的光学性质也会发生变化.从几何特征来说,器件的热胀冷缩、弯曲变形都可造成光路发生变化.这些变化引入的热使光纤环产生光路非互易性,直接影响 FOG的测量精度,是引起光纤陀螺漂移误差的主要原因之一.

2　*FOG* 温度角速率联合测试实验

2.1　测试方法

测试时,首先将 VG951 FOG通过安装夹固定在带温度试验箱的速率转台上,且陀螺输入基准轴平行于转台轴,并与地垂线构成的倾斜角为试验场所在的地理纬度角;然后根据 FOG的工作温度环境指标,选取 13个试验温度点,℃: -30, -20, -10, 0, 10, 20, 25, 30, 35, 45, 50, 60, 70;由温度试验箱将 FOG加热或冷却至相应的温度点,并由温度监测控制装置将试验箱内温度控制在设定温度点上;再根据 FOG的工作范围,选取 23个试验角速度点,(°)/s: -80, -70, -60, -50, -40, -30, -20, -10, -5, -2, -1, 0, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80,最后设定采样频率及测试时间,本文取采样频率为 300Hz,测试时间 1 h.

实际操作时,温度由低到高顺序改变,转台旋转角速度由小到大顺序改变,对 FOG输出及其内部温度进行采样,可得到 $n = 13 \times 23 = 299$组测试数据.

2.2　测试实验结果及分析

根据以上步骤,对 VG951 FOG进行温度及角速率联合测试实验, FOG漂移随温度和角速度的变化如图 1~图 3所示.从图 1可以看出,当温度为 -30℃、角速度为 50(°)/s时, FOG输出角速度达到最大的正向漂移,为 4.423 6(°)/h;当温度为 -30℃、角速度为 -50(°)/s时, FOG输出角速度达到最大的负向漂移,为 -4.439 6(°)/h.

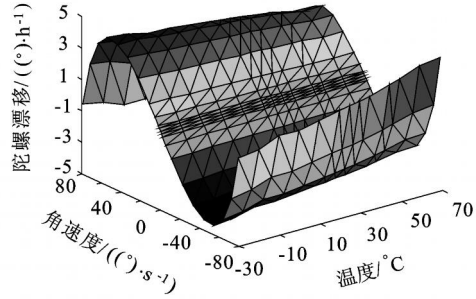

图 1　FOG漂移随温度和角速度的变化

从 FOG漂移随角速度的变化图 2可以看出,在每一固定的温度下, FOG漂移随角速度的变化大致呈中心对称的形式.在 -40~40 (°)/s角速度范围内, FOG漂移随角速度的增大而增大,而且接近线性变化,在 -80~-50 (°)/s和 50~80 (°)/s范围内, FOG漂移随角速度的增大而减小,而且非线性程度高.

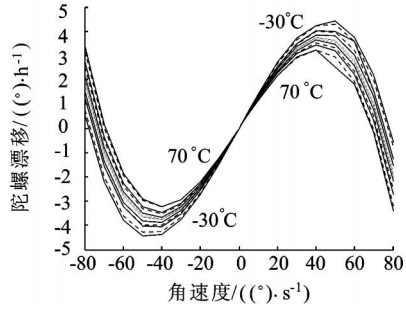

图 2　FOG漂移随角速度的变化

从图 3 FOG 漂移随温度的变化可以看出, FOG漂移随温度的变化大致呈轴对称的形式, FOG漂移的幅值随温度的升高而减小.

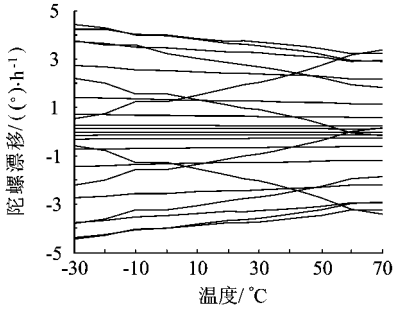

图 3 FOG漂移随温度的变化

3 FOG温度角速率复合建模与补偿

对 FOG漂移的实测数据处理时, 为消除白噪声和转台振动噪声的影响, 将每个测试点的温度值和角速度值取为 m 个采样数据的平均值, 即

$$\omega_{gi} = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\omega s_{gij}$$

$$T_i = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}T s_{ij}$$

式中, ωs_{gij}和 $T s_{ij}$ $(j=1, 2, \cdots, m;\ i=1, 2, \cdots, n)$分别是温度和角速度在第 i个测试点的采样值. 那么, 在温度为 T_i、陀螺输出角速度为 ω_{gi}时, FOG漂移 $\varepsilon_{\omega_i T_i}$就是陀螺输出角速度 ω_g与设定的平台角速度 ω_i之差, 即 $\varepsilon_{\omega_i T_i} = \omega_{gi} - \omega_i$.

FOG 漂移随角速度的变化图 2反映了标度因数非线性引起的陀螺漂移特性. 在每一固定的温度下, FOG 漂移 ε与角速度 ω_g 的关系可以用下面的 p 阶多项式来拟合[3]:

$$\varepsilon(\omega_g) = a_0 + a_1\omega_g + a_2\omega_g^2 + \cdots + a_p\omega_g^p \quad (3)$$

图 3反映了温度对 FOG 漂移的影响. 在恒定的角速度下, FOG漂移 ε与 T 的关系可以用下面的 q阶多项式来拟合:

$$\varepsilon(T) = b_0 + b_1T + b_2T^2 + \cdots + b_qT^q \quad (4)$$

由于 FOG漂移不仅是温度的函数, 还与角速度有关, 因此式 (3)和式 (4)中的系数 a_i, b_i并不是常数, a_i是与温度有关的变量, b_i是与角速度有关的变量. 因此, 综合考虑温度和角速度的影响, FOG漂移可表示为温度和角速度的二元函数:

$$\varepsilon = f(T, \omega_g) \quad (5)$$

取如下形式的双输入单输出模型为 FOG 的温度和角速率复合漂移误差模型:

$$\varepsilon = [T^q \quad \cdots \quad 1]\begin{bmatrix} C_{00} & \cdots & C_{0\,p+1} \\ \vdots & & \vdots \\ C_{q+1\,0} & \cdots & C_{q+1\,p+1} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \omega_g^p \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, p是 ω_g的阶次; q是 T的阶次, C_{ij} $(i=0, 1, \cdots, q+1;\ j=0, 1, \cdots, p+1)$为复合模型系数. 通常取 $p=3$, $q=2$, 即

$$\varepsilon = [T^2 \quad T \quad 1]\begin{bmatrix} C_{00} & C_{01} & C_{02} & C_{03} \\ C_{10} & C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{20} & C_{21} & C_{22} & C_{23} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \omega_g^3 \\ \omega_g^2 \\ \omega_g \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

为方便工程应用, 将模型 (6)转化为如下形式的单输入单输出系统形式:

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{V}\boldsymbol{C}_s \quad (8)$$

式中 $\boldsymbol{E} = [\varepsilon_{\omega_1 T_1}, \varepsilon_{\omega_2 T_2}, \cdots, \varepsilon_{\omega_n T_n}]^{\mathrm{T}}$

$\boldsymbol{C}_s = [C_{00}, C_{01}, C_{02}, C_{03}, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{20}, C_{21}, C_{23}, C_{23}]^{\mathrm{T}}$

$\boldsymbol{V}_k = [\omega_{gk}^3T_k^2, \omega_{gk}^2T_k^2, \omega_{gk}T_k^2, T_k^2, \omega_{gk}^3T_k, \omega_{gk}^2T_k, \omega_{gk}T_k, T_k, \omega_{gk}^3, \omega_{gk}^2, \omega_{gk}, 1]$

式中, $\boldsymbol{V}_k$是 $\boldsymbol{V}$阵的第 k行; ω_{gk}和 T_k $(k=1, 2, \cdots, n)$分别是不同角速率和温度下的测试数据组合.

由最小二乘法可得:

$$\boldsymbol{C}_s = (\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V})^{-1}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E} \quad (9)$$

式中, $\boldsymbol{C}_s$是一列向量; 再根据 $\boldsymbol{C}_s$与矩阵 $\boldsymbol{C}$中元素的关系 $C_{ij} = C_{s[(j+i)\cdot(p+1)]}$求得矩阵 $\boldsymbol{C}$, 从而得到了 FOG漂移随温度和角速度的变化模型:

$$\varepsilon = [T^2 \quad T \quad 1]\cdot\boldsymbol{C}\cdot[\omega_g^3 \quad \omega_g^2 \quad \omega_g \quad 1]^{\mathrm{T}} \quad (10)$$

这样就得到了温度为 T、陀螺输出角速度为 ω_g时 FOG的漂移值, 并用下式进行补偿:

$$\omega_g^* = \omega_g - \varepsilon \quad (11)$$

式中, ω_g^*为补偿后的 FOG输出角速度.

补偿后, FOG的漂移为

$$\varepsilon^* = \omega_g^* - \omega = \omega_g - \varepsilon - \omega \quad (12)$$

式中, ω是设定的平台角速度.

按上述方式对 FOG 实测数据进行补偿, 补偿后 FOG的漂移 ε^* 如图 4所示, 补偿后 FOG漂移最大幅值由 4.4 (°)/h减小到 0.66 (°)/h, 说明模型 (10)较好反映了 FOG漂移随温度和角速度

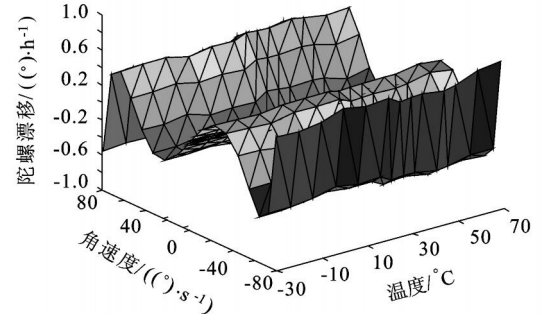

图 4 补偿后 FOG 漂移随温度和角速度的变化

的变化特性.

4　*FOG* 分段漂移建模方法

从对 VG951 O-FOG 漂移随温度及角速度的联合测试实验数据图 1与图 2可见,在测试的角速度范围内,特别是在大角速度区域, FOG 漂移随角速度的变化呈现严重的非线性.如果要在全温度范围使温度漂移模型达到较高的补偿精度,模型的阶次将相当高,计算量很大,将无法满足实时在线补偿的需要[4].因此,在全温度和全角速度范围内采用单个模型式(10)拟合 FOG 由温度和标度因数非线性带来的测量误差时,补偿精度较低.

为了提高模型补偿精度并实现在线补偿,针对 VG951 FOG随温度和角速度变化所引起的严重非线性漂移误差,采用分段建模的思想,在不同的角速度范围内分别采用不同模型拟合陀螺漂移,从而可提高建模的精度.

根据 VG951 FOG 漂移随角速度的变化特点,采用分段建模的方法,分别在 - 80~ - 40(°)/s, - 40~ 40(°)/s和 40~ 80(°)/s三个角速度范围内建立模型Ⅰ、模型Ⅱ和模型Ⅲ.由测试得到的 VG951 FOG各角速度范围的漂移数据,按式(8)求解相应段的系数向量 $\boldsymbol{C}$,再转化为误差模型的系数矩阵 $\boldsymbol{C}$,从而得到 VG951 FOG 漂移的分段模型为

模型Ⅰ　(- 80(°)/s≤ω_g≤ - 40(°)/s):

$$\varepsilon_1 = [T^2 \quad T \quad 1] \cdot \boldsymbol{C}_1 \cdot [\omega_g^3 \quad \omega_g^2 \quad \omega_g \quad 1]^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

模型Ⅱ (- 40(°)/s< ω_g < 40(°)/s):

$$\varepsilon_2 = [T^2 \quad T \quad 1] \cdot \boldsymbol{C}_2 \cdot [\omega_g^3 \quad \omega_g^2 \quad \omega_g \quad 1] \tag{14}$$

模型Ⅲ(40(°)/s≤ω_g≤80(°)/s):

$$\varepsilon_3 = [T^2 \quad T \quad 1] \cdot \boldsymbol{C}_3 \cdot [\omega_g^3 \quad \omega_g^2 \quad \omega_g \quad 1]^{\mathrm{T}} \tag{15}$$

式(13)~式(15)中的 $\boldsymbol{C}_1$, $\boldsymbol{C}_2$ 和 $\boldsymbol{C}_3$ 即为求得的分段模型Ⅰ、模型Ⅱ及模型Ⅲ的系数矩阵.这样即得到相应输出角速度 ω_g 时 FOG 漂移的补偿值 ε_i (i= 1, 2, 3),将陀螺输出角速度 ω_g 减去补偿值 ε_i (i= 1, 2, 3),就得到补偿后 FOG 的输出角速度 ω_g^*.分段建模与补偿后 FOG 的漂移 ε^* 如图 5所示.

比较图 5和图 4可以看出,采用分段方法建模与补偿后, FOG 的漂移进一步减小,说明补偿模型(13~ 15)精确地反映了 FOG 的输出随温度和角速度变化的漂移特性.从图 5可以看出,补偿后的 FOG漂移的最大幅值由 4.4(°)/h减小到 0.1(°)/h,较单一补偿模型式(10)补偿后的陀螺精度 0.66(°)/h相比得到大幅度提高.另外,通过对 VG951型 FOG进行不同条件下的多次重复性实验验证,表明了该建模方法的有效性及适用性.

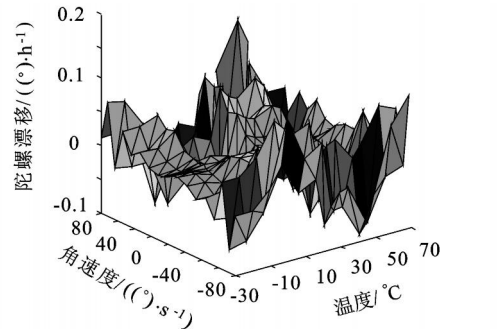

图 5　分段补偿 *FOG* 漂移随温度和角速度的变化

5　结　论

本文对 FOG 的温度效应和非线性特性影响光纤陀螺测量精度的机理进行了分析;通过对 VG951型 FOG 进行全温度和全角速率范围内的漂移特性进行实际测试,得到了以陀螺输出角速度和陀螺内部温度为输入,以陀螺漂移为输出的复合模型;考虑到 VG951型 FOG 漂移在工作范围内存在严重非线性,采用了分段建模的方法,在不同的角速度范围进行分段建模,不仅可降低模型的阶次,降低了运算量,而且提高了建模的精度.此建模方法具有补偿计算量小、补偿精度高、实时性好的优点,具有工程应用参考价值.

参考文献 (**References**)

[1] 王新国,李家垒,许化龙.光纤陀螺温度和标度因数非线性误差建模研究[J].系统仿真学报, 2007, 19(9): 1922- 1924
Wang Xinguo, Li Jialei, Xu Hualong. Research of FOG's error modeling based on temperature and scale factor nonlinearity[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(9): 1922- 1924(in Chinese)

[2] Shupe D M. Thermally induced non reciprocity in the fiber optic interferometer[J]. Appl Opt, 1980, 19(5): 654- 655

[3] Ojeda L, Chung H, Borenstein J. Precision-calibration of fiber-optics gyroscopes for mobile robot navigation[C]//Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco: IEEE, 2000: 2064- 2069

[4] Guo Pengfei, Wang Mei, Ren Zhang. The new calibrating algorithm for the low-cost fiber optics gyroscope[C]//Proceedings of the 2006 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. Globalspec: Ispec IEEE/ION, 2006: 739- 743

(责任编辑:张　嵘)