

光纤陀螺静态温度综合误差建模及补偿

刘洁瑜 余志勇 马学文

(第二炮兵工程大学自动控制系, 陕西 西安 710025)

摘要 针对光纤陀螺温度稳定性低、受环境温度影响参数变化, 导致使用精度不高的问题, 提出了一种光纤陀螺静态温度综合误差建模补偿方法。综合考虑温度、光纤陀螺标度因数非线性以及零偏漂移的影响, 建立了以时间、温度和输入角速率为参量的光纤陀螺静态温度混合模型; 采用分类拟合方法确定模型阶次, 辨识模型参数; 基于温度速率实验, 提出迭代补偿算法。实验结果表明, 经过综合误差补偿后的光纤陀螺消除了温度和标度因数非线性对其性能的影响, 使它在全温度和全速率下的测量精度得到了极大提高, 从而证明了该方法的有效性。

关键词 光学器件; 光纤陀螺; 温度; 标度因数非线性; 零偏漂移; 输入角速率

中图分类号 U666.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0823005

Modeling and Compensation of Static Temperature Error Synthetically for Fiber Optic Gyroscope

Liu Jieyu Yu Zhiyong Ma Xuewen

(Department of Automatic Control, The Second Artillery Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710025, China)

Abstract To solve the problem of the low accuracy of the fiber optic gyroscope (FOG), which is influenced by the bad temperature stability of FOG that the parameters are changed, a new static synthetically compensation method is proposed. Thinking of the property of the temperature, the scale factor nonlinearity and the null-bias drift of FOG, a novel model is researched, which is related to factors of operating time, temperature and input angular rate. The model orders are identified using the classification fitting method. Based on a great deal of tests of temperatures and input angular rates, error-compensation iterative algorithm is proposed. The test results show that the compensation algorithm is effective at full temperatures and full rotate rates, which eliminates the influence of temperature and nonlinearity of FOG.

Key words optical devices; fiber optic gyroscope; temperature; the scale factor nonlinearity; null-bias drift; input angular rate

OCIS codes 230.4685; 060.2370; 060.2800

1 引 言

基于光学 Sagnac 效应的光纤陀螺(FOG)可用于测量载体相对惯性空间的角运动, 因其全固化、使用寿命长、启动时间短和测量动态范围大等特点, 而具有广泛的应用前景^[1,2]。但由于光学部件对温度都较为敏感, 因此光纤陀螺自身发热和环境温度变化都将影响其性能^[3~5], 主要表现在零偏漂移和标度因数等性能参数的变化。而建立温度模型进行补

偿是减小这一影响的有效途径^[6~11]。文献[6,7]主要是针对光纤陀螺零偏温度模型进行了方案设计及相关讨论, 而没有分析温度对标度因数的影响; 文献[9]提出了分段复合建模方法建立了温度与标度因数非线性模型, 但没有考虑陀螺零偏随时间漂移的影响; 文献[10]建立了温度漂移模型和标度因数温度模型, 但没有考虑标度因数的非线性问题; 而文献[11]建立了基于标度因数非线性的温度误差模型,

收稿日期: 2012-02-14; 收到修改稿日期: 2012-04-16

基金项目: 陕西省自然科学基金(2011JQ8021)资助课题。

作者简介: 刘洁瑜(1970—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光学惯性器件及应用技术等方面的研究。

E-mail: ostar@stu.xjtu.edu.cn

但模型设计过程中将光纤陀螺视为完全对称,忽视了非对称性问题。

基于上述分析,本文综合考虑标度因数非线性和零偏漂移影响,以 VG951 光纤陀螺仪为对象,基于静态温度试验,建立了一种温度、角速度和时间的综合模型,利用该模型可以有效提高光纤陀螺的使用精度。

2 综合误差建模

理想状态下,光纤陀螺的输出模型为

$$U = S\Omega + U_0 + \xi, \quad (1)$$

式中 U 为陀螺输出电压; S 为标度因数; Ω 为输入角速度; U_0 为零偏电压; ξ 为随机误差。

考虑温度对光纤陀螺的影响,包括对标度因数和对零偏的影响^[8],以 T 表示温度,(1) 式可改写为 T 的函数:

$$U = S(T, \dots)\Omega + U_0(T, \dots) + \xi. \quad (2)$$

由于光纤陀螺标度因数存在非线性问题^[11],因此,标度因数应为温度与输入角速度的综合函数,(2)式可进一步展开为

$$U = S(T, \Omega)\Omega + U_0(T, \dots) + \xi. \quad (3)$$

实际应用中,温度和输入角速度为相对独立的两个因素,标度因数可表示为温度和输入角速度相互独立的表达式,即可令 $S(T, \Omega) = S_1(T)S_2(\Omega)$ 。理想状态下光纤陀螺具有良好的对称性,但实际使用的光纤陀螺并非完全对称,而且这对光纤陀螺性能具有一定影响。所以, $S(T, \Omega)$ 应包含温度 T 和输入角速度 Ω 的奇次项。因此(3)式可进一步改写为

$$U_0 = S_1(T)S_2(\Omega)\Omega + U_0(T, \dots) + \xi, \quad (4)$$

式中

$$\begin{cases} S_1(T) = a_0 + a_1T + a_1T^2 + a_3T^3 + \dots \\ S_2(\Omega) = b_0 + b_1\Omega + b_2\Omega^2 + b_3\Omega^3 + \dots \end{cases}, \quad (5)$$

由于零偏电压与时间成近似线性关系^[11]:

$$U_0(T, \dots) = U_{01}(T)U_{02}(t), \quad (6)$$

式中

$$\begin{cases} U_{01}(T) = c_0 + c_1T + c_2T^2 + c_3T^3 + \dots \\ U_{02}(t) = d + et \end{cases}, \quad (7)$$

因此,光纤陀螺的静态综合模型可表示为

$$\begin{aligned} U &= S_1(T)S_2(\Omega)\Omega + U_0(T, \dots) + \xi = \\ &= S_1(T)S_2(\Omega)\Omega + U_{01}(T)d + U_{01}(T)et + \xi = \\ &= S_1(T)S_2(\Omega)\Omega + U_0(T) + U_1(T)t + \xi, \quad (8) \end{aligned}$$

式中 $U_0(T) = U_{01}(T)d$, $U_1(T) = U_{01}(T)e$ 。

3 基于拟合的模型辨识

对 VG951 型光纤陀螺进行全温下的全速率试验。根据其性能指标,选取 $-30\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-5\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 共 10 个温度点,在每个温度条件下,选取 $\pm 1^\circ/\text{s}$ 、 $\pm 2^\circ/\text{s}$ 、 $\pm 5^\circ/\text{s}$ 、 $\pm 10^\circ/\text{s}$ 、 $\pm 20^\circ/\text{s}$ 、 $\pm 40^\circ/\text{s}$ 和 $\pm 80^\circ/\text{s}$ 共 14 个速率点进行测试。

将测试数据按如下步骤进行处理,确定模型阶次。其中随机误差 ξ 可以通过平均运算进行消除。

1) 令温度为 T_i ($i = 1, 2, \dots, 10$)、转速为 Ω_j ($j = 1, 2, \dots, 14$) 时,光纤陀螺输出 U_{ij} 为

$$U_{ij} = S_1(T_i)S_2(\Omega_j)\Omega_{ij} + U_0(T_i) + U_1(T_i)t. \quad (9)$$

2) 对采集的信息进行时间的一阶拟合,可以得到

$$U_{ij} = A_{ij} + B_{ij}t. \quad (10)$$

3) 对于模型中的时间相关项 $U_1(T)$,可以令其

为 $U_1(T_i) = \frac{1}{14} \sum_{j=1}^{14} B_{ij}$,进而由多组温度对应的数组

$U_1(T_i)$ ($i = 1, 2, \dots, 10$) 进行最小二乘方法拟合确定阶次。 $U_0(T)$ 与 $U_1(T)$ 是同阶项,因此, $U_0(T)$ 的阶次也确定。

4) 对 A_{ij} 进行温度拟合确定 $S_1(T)$ 的阶次;

5) 对 A_{ij} 进行速率拟合确定 $S_2(\Omega)$ 的阶次。

考虑计算的实时性要求,针对温度影响,选取不同温度、相同转速的测试数据,对标度因数和零偏进行温度的 1~4 阶多项式拟合。针对标度因数的非线性问题,选取相同温度、不同转速的测试数据对标度因数进行角速度的 1~4 阶多项式拟合。同时,考虑到光纤陀螺的输出模型(8)式中含有角速度的一次项,因此,对于角速度的拟合应当为 2~5 阶多项式拟合。

对于系数拟合多项式的阶次 d 的确定可利用拟合均方根误差最小的原则来确定。拟合均方根误差 σ_d 的表达式为^[11]

$$\sigma_d = \sqrt{\left[\sum_{j=1}^n (k_j - \hat{k}_j)^2 \right] / (n - d - 1)}, \quad (11)$$

式中 k_j 为各系数值; \hat{k}_j 为由拟合多项式算出的值; n 为测试的温度点数; d 为拟合多项式阶次。

通过拟合均方根误差判断,可确定

$$U_1(T) = 1.4774 \times 10^{-4} + 7.2173 \times 10^{-6} T - 2.0527 \times 10^{-7} T^2, \quad (12)$$

$$\begin{cases} S_1(T) = a_0 + a_1T + a_2T^2 \\ S_2(\Omega) = b_0 + b_1\Omega + b_2\Omega^2 + b_3\Omega^3 \end{cases}, \quad (13)$$

综上所述,确定静态温度综合模型为

$$U = S_1(T)S_2(\Omega)\Omega + U_0(T) + U_1(T)t = [1 \quad T_i \quad T_i^2] \begin{bmatrix} a_0b_0 & a_0b_1 & a_0b_2 & a_0b_3 \\ a_1b_0 & a_1b_1 & a_1b_2 & a_1b_3 \\ a_2b_0 & a_2b_1 & a_2b_2 & a_2b_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \Omega_{ij} \\ \Omega_{ij}^2 \\ \Omega_{ij}^3 \end{bmatrix} \Omega_{ij} + [1 \quad T_i \quad T_i^2] \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} + (d_0 + d_1T + d_2T^2)t, \quad (14)$$

利用与时间无关项系数 A_{ij} 可以辨识求得

$$\begin{bmatrix} a_0b_0 & a_0b_1 & a_0b_2 & a_0b_3 \\ a_1b_0 & a_1b_1 & a_1b_2 & a_1b_3 \\ a_2b_0 & a_2b_1 & a_2b_2 & a_2b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.9621 \times 10 & -5.9735 \times 10^{-4} & -7.9343 \times 10^{-4} & 7.1717 \times 10^{-8} \\ -1.3299 \times 10^{-2} & 7.5276 \times 10^{-6} & 5.5587 \times 10^{-7} & -1.1835 \times 10^{-9} \\ 2.5685 \times 10^{-5} & 1.3955 \times 10^{-7} & -9.9851 \times 10^{-9} & -5.2857 \times 10^{-12} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.2774 \\ 1.6725 \times 10^{-2} \\ -7.3068 \times 10^{-4} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

即静态温度综合模型为

$$U = S_1(T)S_2(\Omega)\Omega + U_0(T) + U_1(T)t = [1 \quad T_i \quad T_i^2] \begin{bmatrix} 3.9621 \times 10 & -5.9735 \times 10^{-4} & -7.9343 \times 10^{-7} & 7.1717 \times 10^{-8} \\ -1.3299 \times 10^{-2} & 7.5276 \times 10^{-6} & 5.5587 \times 10^{-7} & -1.1835 \times 10^{-9} \\ 2.5685 \times 10^{-5} & 1.3955 \times 10^{-7} & -9.9851 \times 10^{-9} & -5.2857 \times 10^{-12} \end{bmatrix} \Omega_{ij} + [1 \quad T_i \quad T_i^2] \begin{bmatrix} 4.2774 \\ 1.6725 \times 10^{-2} \\ -7.3068 \times 10^{-4} \end{bmatrix} + (1.4774 \times 10^{-4} + 7.2173 \times 10^{-6}T - 2.0527 \times 10^{-7}T^2)t. \quad (17)$$

4 基于温度综合模型的补偿算法

由于所建立的模型为非线性模型,直接将温度和时间代入进行解算比较困难。采用迭代方法可降低解算难度,并通过增加迭代次数来保证精度,具体算法如下:

1) 获得光纤陀螺内部温度传感器测量值、工作时间,计算零偏以及初始标度因数 $S_0(T, \Omega) = 3.9621 \times 10 - 1.3299 \times 10^{-2}T - 2.5685 \times 10^{-5}T^2$ 和标度因数温度项

$$S(T) = [1 \quad T_i \quad T_i^2] \begin{bmatrix} 3.9621 \times 10 & -5.9735 \times 10^{-4} & -7.9343 \times 10^{-4} & 7.1717 \times 10^{-8} \\ -1.3299 \times 10^{-2} & 7.5276 \times 10^{-6} & 5.5587 \times 10^{-7} & -1.1835 \times 10^{-9} \\ 2.5685 \times 10^{-5} & 1.3955 \times 10^{-7} & -9.9851 \times 10^{-9} & -5.2857 \times 10^{-12} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

2) 代入陀螺输出的电压值 U_m , 令 $\omega = [U_m - U_0(T, t)]/S_0(T, \Omega)$ 。

3) 把 ω 代入到(19)式,得到补偿后的测量角速度 Ω :

$$\Omega = [U_m - U_0(T, t)] \left[S(T) \times \begin{bmatrix} 1 \\ \omega \\ \omega^2 \\ \omega^3 \end{bmatrix} \right]^{-1}. \quad (19)$$

4) 令 $\omega = \Omega$, 重复第3)步,直到相邻两次测得的 Ω 相等或二者之差小于某一值为止。试验表明,迭代2次就已达到足够的精度了,因此实际计算中可以将迭代次数固定为2次,以消除计算时间的不可控性。

5 试验结果分析

为了验证补偿效果,选取20℃条件下,多个输

入角速度的输出进行补偿分析,补偿前后陀螺输出如图 1 所示,其对应的补偿结果如表 1 所示。

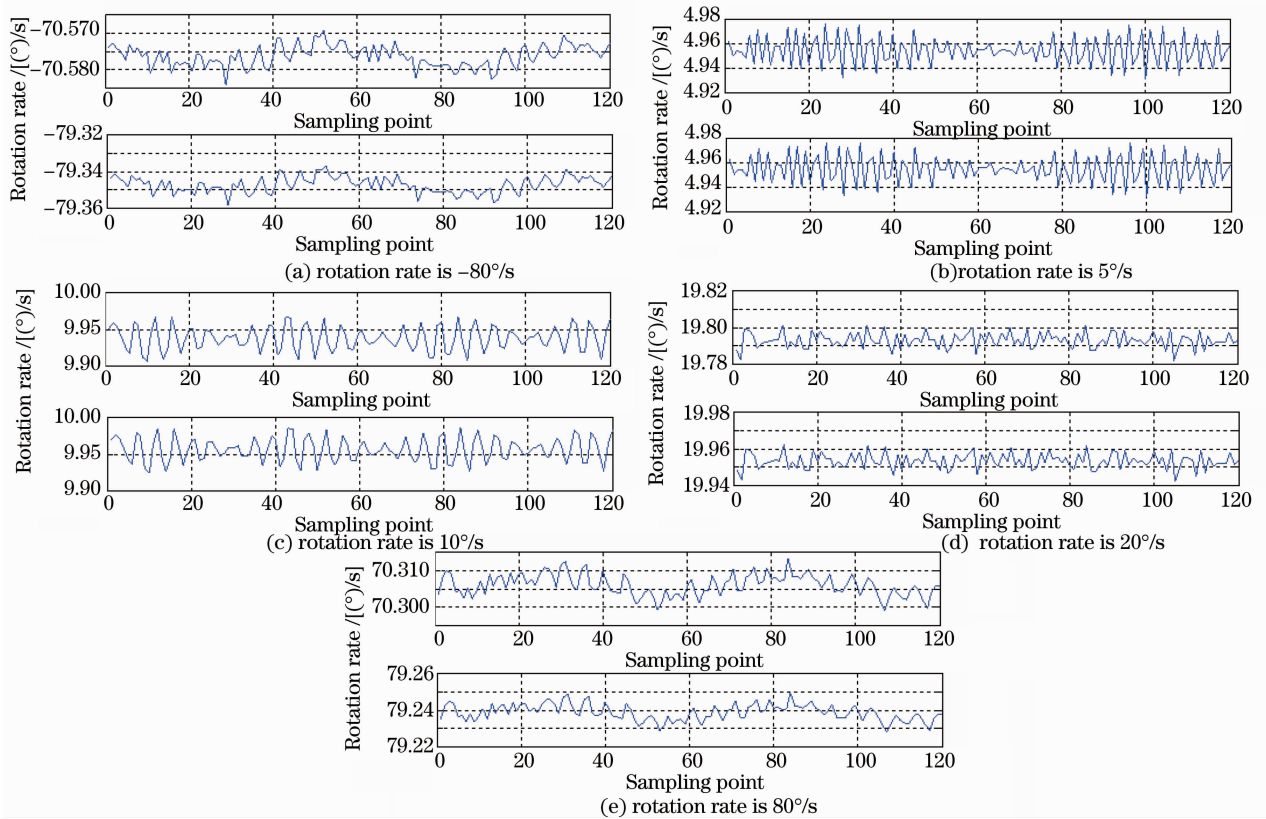


图 1 温度 20 °C 时不同转速下补偿前后的输出对比图

Fig. 1 Output contrast figures before and after compensation under different rotation rates at the temperature of 20 °C

表 1 温度 20 °C 时补偿前后结果

Table 1 Contrast results before and after compensation at the temperature of 20 °C

Actual rotation rate /[(°)/s]	Result before compensation /[(°)/s]	Relative error /%	Result after compensation /[(°)/s]	Relative error /%
-80	-70.576	11.78	-79.347	0.82
5	4.917	1.67	4.957	0.85
10	9.946	0.54	9.959	0.41
20	19.894	0.53	19.954	0.23
80	70.306	12.12	79.239	0.95

由图 1 和表 1 可以看出,在恒定温度条件下,没有经过补偿的陀螺受温度影响输出相对误差大,且从相对误差的变化情况(低转速到高转速)可看出标度因数存在严重的非线性。经过综合补偿后,可有效降低相对误差,提高了测试精度,同时降低了标度因数非线性问题的干扰。

为进一步验证所建立的模型对温度补偿的效

果,选取测试时的两个极值温度点 -30 °C 和 60 °C 进行补偿,每个温度点下选择 -80°/s、5°/s 和 80°/s 的测试数据,补偿结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,通过对两个极值温度点的 3 个特征速率条件下的测试补偿可以有效消除温度对光纤陀螺的影响。因此,本文建立的综合模型在光纤陀螺的极值工作温度下依然有效。

表 2 极值温度下补偿前后结果

Table 2 Contrast results before and after compensation at the extreme temperature

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Actual rotation rate / $[(^{\circ})/\text{s}]$	Result before compensation / $[(^{\circ})/\text{s}]$	Relative error /%	Result after compensation / $[(^{\circ})/\text{s}]$	Relative error /%
-30	-80	-71.519	10.60	-79.311	0.86
	5	5.013	0.27	4.999	0.02
	80	71.263	10.92	79.303	0.87
60	-80	-69.455	13.18	-79.147	1.07
	5	4.866	2.69	5.007	0.13
	80	69.296	13.38	79.165	1.04

6 结 论

通过分析和试验,建立了光纤陀螺的温度、角速度和时间的静态综合模型,对常温和极值工作温度条件下的补偿试验,验证了所建立的模型能够降低温度以及标度因数非线性的干扰,有效提高了光纤陀螺的使用精度。

参 考 文 献

- 1 I. K. Meshkovsky, V. I. Strigalyov, G. B. Deineka. A three-axis fiber-optic gyroscope for marine navigation systems [C]. Saint Petersburg: 16th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 2009. 7~11
- 2 Rob McEwen, Hans Thomas, Don Weber *et al.*. Performance of an AUV navigation system at arctic latitudes [J]. *IEEE J. Oceanic Engng.*, 2005, **30**(2): 443~454
- 3 Li Xuyou, Zhang Chen, He Zhou *et al.*. Temperature performance research of fiber coil in fiber optic gyroscope based on polarization coupling theory [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1053~1057
李绪友, 张琛, 何周等. 基于偏振耦合理论的光纤陀螺环温度性能研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1053~1057
- 4 Li Maochun, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng *et al.*. Transient characteristic testing of fiber optic gyro fiber coil based on temperature excitation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 435~441
李茂春, 刘铁根, 江俊峰等. 基于温度激励的光纤陀螺光纤环瞬态特性检测[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 435~441
- 5 Ning Tigang, Qin Xi, Pei Li *et al.*. A novel way to measure the temperature characteristic of polarization-maintaining fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1078~1080

- 宁提纲, 秦曦, 裴丽等. 新型保偏光纤温度特性的测试方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1078~1080
- 6 Li Jialei, Xu Hualong, He Jing. Temperature compensation of start-up drift for fiber optic gyroscope based on wavelet network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0506005
李家垒, 许化龙, 何婧. 基于小波网络的光纤陀螺启动漂移温度补偿[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0506005
 - 7 Li Jialei, Xu Hualong, He Jing. Modeling of static temperature drift for fiber optic gyroscope based on wavelet network [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 2980~2985
李家垒, 许化龙, 何婧. 光纤陀螺静态温度漂移的小波网络建模[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 2980~2985
 - 8 Han Bin, Lin Yurong, Deng Zhenglong. Overview on modeling and compensation of FOG temperature drift [J]. *J. Chinese Inertial Technology*, 2009, **17**(2): 218~224
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
 - 9 Wang Xinlong, Ma Shan. Nonlinearity of temperature and scale factor modeling and compensating of FOG [J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, **35**(1): 28~31
王新龙, 马闪. 光纤陀螺温度与标度因数非线性建模与补偿[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, **35**(1): 28~31
 - 10 Wang Hai. Affects of temperature and error compensation for fiber optic gyro [J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007, **33**(5): 549~551
王海. 光纤陀螺温度影响与误差补偿[J]. *北京航空航天大学学报*, 2007, **33**(5): 549~551
 - 11 Wang Xinguo. The Key Research on Composite Guidance of FSINS/CNS for Ballistic Missile[D]. Xi'an: Dissertation of the Second Artillery Engineering College, 2008
王新国. 弹道导弹 FSINS/CNS 复合制导关键技术研究[D]. 西安: 第二炮兵工程学院, 2008

栏目编辑: 何卓铭