光纤陀螺零偏温度误差补偿方法分析*

张春梅，刘晓庆

（中国航天科工集团 7801 研究所·长沙·410205）

摘　要：根据光纤陀螺光纤环受温度效应影响的机理，分析了光纤陀螺零偏产生温度误差的原因，提出了光纤陀螺基于光纤环附近多点温度的误差补偿方法，建立光纤陀螺零偏随光纤环附近多点温度及温度变化率变化的数学补偿模型。根据全温温度实验，分析光纤陀螺零偏随温度变化的规律，确定补偿模型的补偿系数，对光纤陀螺零偏进行温度误差补偿。并将多点温度补偿方法与传统的基于单点温度补偿方案的补偿效果进行对比分析。结果表明，基于两点及以上温度的温度误差补偿模型能将全温零偏稳定性降低 2 个数量级，全温极差降低 1 个数量级，优于基于单点类的温度补偿方案，且具有很高的工程应用价值。

关键词：光纤陀螺；零偏；温度误差；多点温度补偿方法；光纤环

中图分类号：TN253　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：2096-5974(2020)02-0070-05

Research of Bias Temperature Error Compensation Method in Fiber Optic Gyroscopes

ZHANG Chunmei，LIU Xiaoqing

（China Aerospace Science and Industry Corporation 7801 Graduate School，Changsha，410205）

Abstract：According to the mechanization that temperature influence the fiber ring，the reason of producing bias temperature error in fiber optic gyroscopes is analyzed，temperature error compensation method based on the multiple points' temperature of fiber ring is proposed，and temperature error compensation model is established，which relies on multiple points' temperature and the speed of temperature variation around the fiber ring. On the base of full temperature experiment，the rule that fiber optic gyroscopes' bias changes with temperature is analyzed，coefficient of compensation model is confirmed. So fiber optic gyroscopes' bias temperature error gets compensated. Meanwhile，the multiple points' temperature compensation method is analyzed and compared with traditional single point's temperature compensation scheme. The result shows that multiple points' temperature compensation method is better than single point's scheme，bias stability in the full temperature range reduces 2 orders of magnitude，range in the full temperature reduces 1 order of magnitude，and the multiple points' temperature compensation method has great engineering application value.

Keywords：FOG；bias；temperature error；multiple points temperature error compensation method；fiber ring

0　引　　言

作为新型全固态光学陀螺，光纤陀螺已经被广泛应用于海、陆、空等各个领域，并且以其自身独特的优势，即抗冲击、灵敏度高、寿命长、动态范围大、启动时间短的优点，在惯性领域得到了大力发展与应用[1-2]，并向着高精度和超高精度方向不断发展与进步。但由于光纤陀螺的核心部件光纤环对温度极其敏感，只要光纤环周围的温度发生变化就会被光纤陀螺的零偏输出所敏感到，进而产生零偏漂移[3]，严重地限制了光纤陀螺向高精度方向的发展。

* 收稿日期：2019-12-07；修回日期：2020-01-01
基金项目：国家高技术研究发展计划（863 计划）（2018H096）
作者简介：张春梅（1991—），女，硕士，工程师，从事惯性技术研究。E-mail：zhangchunmei@hrbeu.edu.cn

为了减小零偏漂移对光纤陀螺的影响，通常的方法是改变光纤环的绕法，使其自身能够对温度进行更有效的自补偿，但这种方法有一定的技术难度[4-6]；另一种方法是对陀螺的零偏输出直接进行软件补偿。在实际应用与学术研究中第二种方法的普遍接受程度较高，且补偿方法简单，不必改变光纤环的初始状态。

李战等的零偏温度补偿因子只有温度，没有反映出温度变化对输出的影响，补偿效果较差[7]；冯卡力等虽然对整段温度补偿进行分段，但补偿因子依然只有温度，且分段情况视陀螺个体的温度特性而定，存在不稳定因素，工程应用不便[8]；赵冰等的零偏补偿模型中只有单点的温度和温度变化率以及它们的交叉项作为补偿因子，一点温度的变化不能充分反映整个陀螺的温度变化形态，且有交叉项的存在不仅增加了应用难度，也没有证明它存在的意义[9]；刘颖等则应用了包括单点温度和两点温度差为因子的补偿模型[10]；杨智杰等则只用了温度差和温度变化率的差作为补偿因子[11]；这些方法都没能全面地体现光纤环的温度真实变化情况，而其他的一些带有智能算法的补偿方式如神经网络和小波变换等方式工程应用困难[12]。

所以基于此情况，本文提出了一种基于光纤环附近多点温度及温度变化率为补偿因子的零偏温度误差补偿模型，根据光纤环的温度敏感特性机理，通过采样光纤环附近多个温度点的温度和温度变化率对光纤陀螺的零偏进行有效补偿，并通过温度实验进行了验证，再与其它单点温度类的温度误差补偿方法的补偿效果进行对比分析，结果表明基于多点温度误差补偿方法的补偿效果更佳。

1　温度对光纤陀螺零偏漂移的影响

环境温度变化和光纤陀螺内部热源是造成光纤陀螺零偏漂移的两个主要方面，当温度发生变化时，光纤环上就会产生热致非互易相移（Shupe 误差），进而光纤陀螺就会发生零偏漂移。光纤陀螺中由于 Shupe 误差引起的热致旋转速率误差为

$$\Omega_{\mathrm{E}}(t)=\frac{n}{DL}\frac{\partial n}{\partial\theta}\int_0^L\dot{\theta}(z,t)(L-2z)\mathrm{d}z \qquad (1)$$

其中，D 为光纤环的平均直径，L 为光纤的总长度，$\frac{\partial n}{\partial\theta}$ 为光纤折射率随温度变化的系数，$\dot{\theta}(z,t)$ 表示 z 点光纤在 t 时刻的温度变化速率，L-2z 则表示 z 点光纤相对于光纤环中点的位置因子。分析式（1）可以发现，由于实际应用中整个光纤环所处的热环境并不是均匀分布的，所以在不同的位置所产生的热致旋转速率误差不同，温度变化大的地方误差大，各位置所有的误差和构成整个光纤环的温度误差。所以传统的单点测试光纤环附近某位置温度对整个光纤陀螺进行温度补偿根本不能反映出整个光纤环的温度变化情况，因此本文提出了一种基于光纤环附近多点温度的误差补偿方法，能对光纤陀螺的温度误差提供更有效的补偿。

2　多点温度误差补偿模型

为了获取光纤环周围的温度，在光纤环的内侧和外侧分别贴附温度传感器，如图 1 所示，环内侧和外侧的温度传感器在空间上的位置是一一对应的。考虑到贴附传感器的难度以及可能对光纤环本身造成影响，仅贴附 4 个温度传感器。

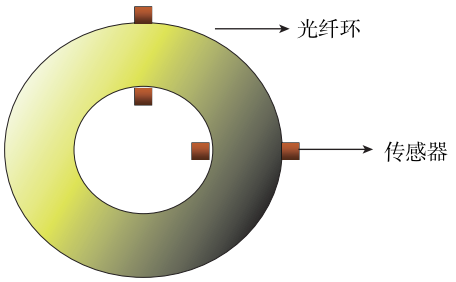


图 1　光纤环上温度传感器分布

Fig. 1　Distribution of temperature sensor on the fiber ring

4 个传感器采集的温度分别为 T_1、T_2、T_3、T_4，则光纤陀螺的温度误差模型为

$$\begin{aligned}
Y&=Y_1+Y_2+Y_3+Y_4\\
Y_1&=[a_1\quad a_2\quad\cdots\quad da_1\quad da_2\quad\cdots]\\
&\quad[T_1\quad T_1^2\quad\cdots\quad \mathrm{d}T_1/\mathrm{d}t\quad(\mathrm{d}T_1/\mathrm{d}t)^2\quad\cdots]^{\mathrm{T}}\\
Y_2&=[b_1\quad b_2\quad\cdots\quad db_1\quad db_2\quad\cdots]\\
&\quad[T_2\quad T_2^2\quad\cdots\quad \mathrm{d}T_2/\mathrm{d}t\quad(\mathrm{d}T_2/\mathrm{d}t)^2\quad\cdots]^{\mathrm{T}}\\
Y_3&=[c_1\quad c_2\quad\cdots\quad dc_1\quad dc_2\quad\cdots]\\
&\quad[T_3\quad T_3^2\quad\cdots\quad \mathrm{d}T_3/\mathrm{d}t\quad(\mathrm{d}T_3/\mathrm{d}t)^2\quad\cdots]^{\mathrm{T}}\\
Y_4&=[e_1\quad e_2\quad\cdots\quad de_1\quad de_2\quad\cdots]\\
&\quad[T_4\quad T_4^2\quad\cdots\quad \mathrm{d}T_4/\mathrm{d}t\quad(\mathrm{d}T_4/\mathrm{d}t)^2\quad\cdots]^{\mathrm{T}} \qquad (2)
\end{aligned}$$

其中，a_i，b_i，c_i，e_i，da_i，db_i，dc_i，$de_i(i=1,2\cdots)$对应的是各温度项的系数，$dT_i/dt(i=1,2\cdots)$是光纤环对应温度点处的温度变化率，各项系数由回归分析方法确定。从模型（2）中可以看出，由于多点温度误差补偿模型参考的温度条件增多，更能充分地反映出光纤环受温度效应影响的情况。

3 温度实验与模型验证

根据图 1 温度传感器的位置对无骨架光纤环（环总长 1500 m）进行实际贴附操作，并装成整机光纤陀螺进行温度实验。将光纤陀螺放入高低温箱内，温度条件为：从常温 25℃以 1 ℃/min 的温变速率降到－40℃，保温 2 h，再以同样温变速率升温到 60℃，同样保温 2 h。根据温箱内静态采集的光纤陀螺零偏输出和多路温度数据，利用提出的多点温度误差补偿模型对其进行温度补偿。考虑到实际应用条件以及补偿效果，每个温度点的温度因子为 5 阶、温度变化率 3 阶具有最佳补偿效果，再增加阶数已无实际意义，下面的分析皆基于此阶数。

光纤环内侧传感器的温度和其空间位置对应的外侧传感器的温度分布如图 2 所示，可见，光纤环内外侧的温差还是非常可观的，正是这种存在的温度差异才导致光纤陀螺温度误差的产生。由图 3 和图 4 可知，补偿后光纤陀螺的零偏分布比补偿前降低了一个数量级。补偿前后的零偏稳定性和极差对比如表 1 所示，零偏稳定性降低了两个数量级，极差降低了一个数量级，可见多点温度补偿模型的优势。

为了证明多点温度补偿模型的特殊优势，对比分析了单点、两点、三点温度补偿时光纤陀螺的零偏稳定性和极差，并与四点温度误差补偿模型进行对比（见图 5），类比推理出拥有更多点温度因子情况的误差补偿效果。表 2 是各点温度补偿后的零偏稳定性和极差对比，从表中可以看出，单点温度误差补偿模型相比多点温度误差补偿模型具有一定的劣势，陀螺全温零偏稳定性和极差都较大，比多点温度误差补偿模型都高一个数量级。图 5 是多点温度误差补偿模型随温度点数增加的零偏稳定性和极差变化情况，可以发现零偏稳定性和极差都随着温度点数的增加趋于收敛平缓，而在两点温度补偿时较单点有较大幅度的降低，之后趋于平缓，这充分说明了多点温度误差补偿较单点温度补偿的优势。

实际应用中考虑到光纤环贴附传感器的难度以及空间体积占用情况，一般两点或三点温度误差补偿模型便可以满足要求，也不会增加陀螺负荷量，还能大大提高光纤陀螺精度。

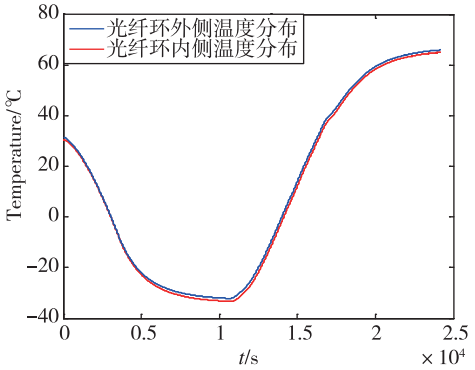


图 2 光纤环内外侧温度分布

Fig. 2 The temperature distribution on the interior and exterior of fiber ring

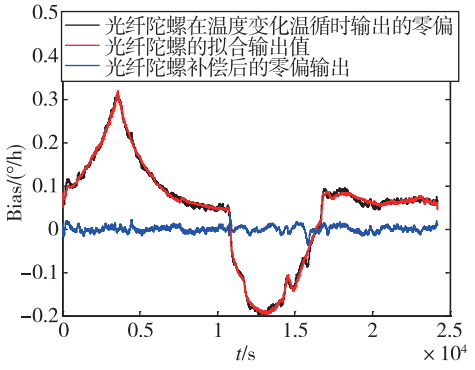


图 3 零偏补偿前后对比图

Fig. 3 Comparison picture of bias between before compensation and after compensation

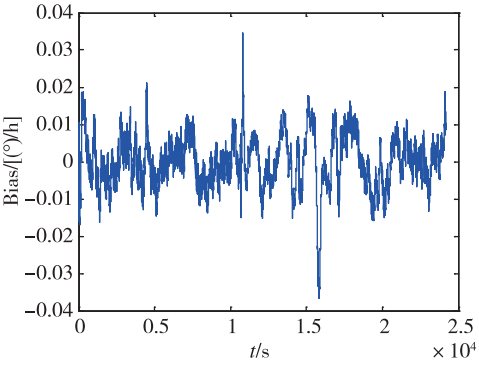


图 4 光纤陀螺补偿后零偏分布图

Fig. 4 Bias distribution picture after compensation in the FOG

表 1　补偿前后零偏稳定性和极差对比

Tab. 1　Comparison of bias stability and range between before compensation and after compensation

	零偏稳定性/[（°）/h]（100s 平均）	全温极差/[（°）/h]
补偿前	0.114857	0.5082
补偿后	0.006947	0.07131

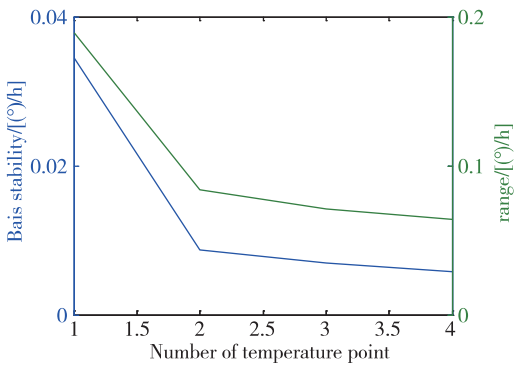


图 5　多点温度误差补偿模型随温度点数增加的零偏稳定性和极差变化情况

Fig. 5　Variation of bias stability and range when temperature point numbers of multiple points temperature error compensation model increase

表 2　多点温度误差补偿模型的零偏稳定性和极差对比

Tab. 2　Comparison of bias stability and range of multiple points temperature error compensation model

模型温度点数	零偏稳定性/[（°）/h]（100s 平均）	全温极差/[（°）/h]
1	0.0344557	0.18924306
2	0.0087575	0.08417432
3	0.0069472	0.0713152
4	0.0058415	0.0638561

4　与普通温度误差补偿模型的对比分析

传统的温度误差补偿模型有很多种形式，基本包括：只有温度因子的情况，温度和温度变化率的情况，温度、温度变化率和光纤环内外温度差的情况，温度差和温度差变化率的情况等。其温度误差补偿模型分别如式（3）～（6）所示。

为了与上述多点温度误差补偿模型进行对比，各补偿模型的温度自变量因子的阶数都是 5 阶，温度变化率和温差以及温差变化率都是 3 阶，各模型补偿后全温零偏稳定性和极差对比如表 3 所示。

表 3　各模型补偿后全温零偏稳定性和极差对比

Fig. 3　Comparison of bias stability and range for several compensation models above

	零偏稳定性/[（°）/h]（100s 平均）	全温极差/[（°）/h]
未补偿时	0.1148572	0.5082123
式（3）补偿模型	0.1041110	0.4899192
式（4）补偿模型	0.0344557	0.1892430
式（5）补偿模型	0.0187308	0.1298451
式（6）补偿模型	0.0402742	0.1979645
多点温度补偿模型（三点温度）	0.0069472	0.0713152

$$M_1 = a_n T^n + a_{n-1} T^{n-1} + \cdots \tag{3}$$

$$M_2 = a_n T^n + a_{n-1} T^{n-1} + \cdots + b_i (\mathrm{d}T/\mathrm{d}t)^i + b_{i-1} (\mathrm{d}T/\mathrm{d}t)^{i-1} + \cdots \tag{4}$$

$$M_3 = a_n T^n + a_{n-1} T^{n-1} + \cdots + b_i (\mathrm{d}T/\mathrm{d}t)^i + b_{i-1} (\mathrm{d}T/\mathrm{d}t)^{i-1} + \cdots + c_j (T_{\mathrm{in}} - T_{\mathrm{out}})^j + c_{j-1} (T_{\mathrm{in}} - T_{\mathrm{out}})^{j-1} + \cdots \tag{5}$$

$$M_4 = a_n (T_{\mathrm{in}} - T_{\mathrm{out}})^n + a_{n-1} (T_{\mathrm{in}} - T_{\mathrm{out}})^{n-1} + \cdots + b_i (\mathrm{d}(T_{\mathrm{in}} - T_{\mathrm{out}})/\mathrm{d}t)^i + b_{i-1} (\mathrm{d}(T_{\mathrm{in}} - T_{\mathrm{out}})/\mathrm{d}t)^{i-1} + \cdots \tag{6}$$

从表 3 中可以看出，无论是哪种补偿模型，不管补偿因子包括多少项，发生怎样的变化，其补偿效果基本都是只能将零偏稳定性降低一个数量级，全温极差仅降低 60%左右，而对于多点温度补偿模型，能将全温零偏稳定性降低两个数量级，全温极差降低一个数量级，可见多点温度补偿方案相比较其他应用方案具有极大的优势。而对比一些神经网络、小波变换等一些学术上的智能算法，多点温度补偿方案的工程应用价值更高，而不是停留在学术研究的层面。综上所述，根据光纤环自身温度分布变化情况而设计的多点温度补偿方案具有较高的温度误差补偿效果，且有更高的工程应用价值。

另外光纤陀螺的常温启动时间较长，经试验验证基于多点温度误差补偿方案依然适用于补偿常温启动时间带来的零偏漂移，且补偿效果优于基于单点温度补偿方案，这里就不再详细叙述。

5　结　　论

通过分析温度对光纤陀螺光纤环的影响，确

定了由于光纤环上温度分布不均使单点温度误差补偿方法根本不能反映出整个光纤环的温度变化趋势，所以提出了一种基于多点温度的误差补偿方案。并建立了多点温度误差补偿模型，通过全温温度试验对多点温度误差补偿模型进行了验证。结果表明基于两点以上温度的补偿模型能将全温零偏稳定性降低 2 个数量级，全温极差降低 1 个数量级，而基于单点的温度补偿方案仅能将全温零偏稳定性降低 1 个数量级，全温极差仅能降低 60%左右。且随着补偿模型的温度点数增加，补偿效果越好，且趋于收敛平稳态势，所以一般实际工程应用两点或三点温度补偿模型即可满足。最后通过与其它多种补偿模型进行对比分析，发现多点温度补偿方法既能大大减小温度误差的影响，又能满足工程应用需要，将有更好的应用前景。

最后，由于本次研究只贴附了 4 个温度传感器，下一步将就 4 个以上传感器是否能达到更佳效果进行进一步的探究分析。

参考文献 (References)

[1] LI X Y, HE Z, ZHANG C, et al. Research on modulation stability and compensation method of y waveguide in fiber optic gyroscope [C] // 2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Beijing, China: IEEE, 2009.

[2] CELIKEL O. Construction and characterization of interferometric fiber optic gyroscope (IFOG) with erbium doped fiber amplifier (EDFA) [J]. Optical and Quantum Electronics, 2007, 39 (2): 147-156.

[3] LI X Y, LING W W, WEI Y H, et al. Three-dimensional model of thermal-induced optical phase shifts in rotation sensing [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13 (9): 603-607.

[4] LING W W, LI X Y, XU Z L, et al. Thermal effects of fiber sensing coils in different winding pattern considering both thermal gradient and thermal stress [J]. Optics Communications, 2015, 356: 290-295.

[5] 李绪友，张春梅，刘华兵，等. 光纤环十六极对称绕法温度性能的仿真与分析 [J]. 中国惯性技术学报，2016，24 (6)：780-785.
LI X Y, ZHANG C M, LIU H B, et al. Analysis and simulation of temperature performance for fiber ring by sixteen polar symmetrical winding method [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24 (6): 780-785 (in Chinese).

[6] WANG Y Z, CHEN X D, ZHANG G C, et al. Effect of octupole winding on temperature performance of fiber optic gyroscope [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2012, 20 (5): 112-115.

[7] 李战，冀邦杰，国琳娜，等. 光纤陀螺温度误差建模及补偿方法 [J]. 水下无人系统学报，2008，16 (4)：15-18.
LI Z, JI B J, GUO L N, et al. Modeling and compensating method of temperature error for fiber-optic gyroscope [J]. Torpedo Technology, 2008, 16 (4): 15-18 (in Chinese).

[8] 冯卡力，李安，覃方君. 基于多模型分段拟合的光纤陀螺温度误差补偿方法 [J]. 中国惯性技术学报，2014，22 (6)：825-828.
FENG K L, LI A, QIN F J. Temperature error compensation method for FOG based on multi-model piecewise fitting [J], Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22 (6): 825-828 (in Chinese).

[9] 赵冰，陈军波. 光纤陀螺温度建模与补偿方法分析 [J]. 海军航空工程学院学报，2016，31 (1)：12-16.
ZHAO B, CHEN J B. Analysis on temperature modeling and compensation method of FOG [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2016, 31 (1): 12-16 (in Chinese).

[10] 刘颖，徐金涛，王敏娟. 光纤环内部温度场的分析和补偿 [J]. 西安邮电大学学报，2015，20 (5)：76-78.
LIU Y, XU J T, WANG M J. Analysis and compensation of the temperature field inside fiber optic coil [J], Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2015, 20 (5): 76-78 (in Chinese).

[11] 杨智杰，陈国光，朱宜家，等. 干涉式光纤陀螺光纤环互易性温变漂移补偿方法 [J]. 导航与控制，2017，16 (6)：39-44. .
YANG Z J, CHEN G G, ZHU Y J, et al. Reciprocal temperature bias drift compensation method for fiber coil of interferometry fiber optical gyroscope [J]. Navigation and Control, 2017, 16 (6): 39-44 (in Chinese).

[12] JUN F U, JIANG S, QIN F J, et al. Novel piecewise compensation method for FOG temperature error [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24 (2): 242-244.