

文章编号:1000-582X(2010)12-060-05

光纤陀螺漂移误差的 T-S 模糊建模补偿算法

刘宇¹,路永乐¹,曾燎燎¹,李东福¹,黎蕾蕾²,潘英俊²

(1. 重庆邮电大学 光纤通信技术重点实验室,重庆 400065;

2. 重庆大学 光电技术及系统教育部开放实验室,重庆 400044)

摘要:基于 G-K 聚类算法辨识 T-S 模糊模型前件参数理论,并采用最小二乘法辨识 T-S 模糊模型后件参数的误差模型,研究了一种光纤陀螺温度漂移误差的非线性补偿算法。在建立该模型的基础上对光纤陀螺零位输出进行了补偿,计算结果表明采用该方法能够在不完全了解陀螺误差机理的情况下对其进行有效的补偿。其绝对误差与未补偿相比较降低了 99%,同线性拟合补偿相比降低了 96%和神经网络补偿比较降低了 10%,其误差方差分别减少 99%,98%,20%。

关键词:光纤陀螺(FOG);零位漂移;T-S 模糊模型;误差补偿;

中图分类号:V241.5

文献标志码:A

Drift error compensation algorithm for fiber optic gyro based on T-S fuzzy modeling

LIU Yu¹, LU Yong-le¹, ZENG Liao-Liao¹, LI Dong-fu¹, LI Lei-lei², PAN Ying-jun²

(1. Optical Communication Technology Institute of Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, P. R. China 2. Key Laboratory for Opto-Electronic Technology & System of MOE, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: A drift error nonlinear compensation algorithm for Fiber Optic Gyro (FOG) is presented based on T-S fuzzy model with the antecedent parameters identified by G-K clustering algorithm and the error model of T-S fuzzy model with the consequent parameters identified by least square algorithm. The computed results show that this model can compensate the original data effectively, while the error principles of FOG do not need to be understood well. Comparing with the original data, compensation with linear fitting and compensation with neural network, the absolute error of the proposed model reduces by 99%, 96% and 10%, respectively. The error variance reduces by 99%, 98% and 20%, respectively. The results indicate that this proposed algorithm can be simply operated with high precision and easy to realize in engineering.

Key words: FOG; zero drift; T-S fuzzy model; error compensation;

光纤陀螺仪采用固态结构设计,具有可靠性高、寿命长、能够耐冲击和振动、可瞬间启动、功耗低和不受电磁干扰等优点^[1]。但是光纤陀螺仪的核心器

件对温度较为敏感,其性能容易受到环境温度的影响^[2],其输出误差值随温度的变化呈非线性关系^[3],这种非线性结果中包含有零位漂移和刻度因子随温

收稿日期:2010-07-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10926072);重庆市科委自然科学基金资助项目(CSTG2007BB2448)

作者简介:刘宇(1972-),男,重庆邮电大学副教授,博士,研究方向为惯性传感及信号处理,(Tel)023-62460380;
(E-mail)liuyu_cqupt@yahoo.com.cn。

潘英俊(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)mefengye@scut.edu.cn。

度的变化,这些变化是由内部器件的温度效应共同影响所致^[4]。因此,研究光纤陀螺的温度误差机理,建立光纤陀螺的温度模型并对其实施补偿,对扩大陀螺的应用范围,提高光纤陀螺测量精度具有重大意义。受到技术和成本等方面的制约^[5],目前常用的补偿方法有最小二乘法支持向量机^[6]、BP 神经网络^[7]、加权平均值^[8]、五点三次平滑^[8]、小波变换^[8]、线性补偿^[5]等软件补偿方法。线性补偿方法简单,运算速度快,基本能够满足低精度光纤陀螺实际需要^[5]。BP 神经网络模型补偿试验结果^[7]表明该方法能够有效改善零偏稳定性,方法可行,但存在局部最优问题,且训练速度慢、效率低等问题^[5]。

随着非线性系统建模理论的发展,为陀螺温度误差补偿提供了新的误差补偿理念。Takagi-Sugeno 于 1985 年提出的 T-S 模糊模型,能够以任意精度逼近任何连续函数^[9],近年来 T-S 模糊模型在非线性建模补偿方面备受关注^[10-11],基于模糊聚类算法和最小二乘法理论的 T-S 模糊建模算法在时间序列预测问题中具有广泛的应用。笔者在进行了大量光纤陀螺温度试验的基础之上,采用 G-K 聚类算法辨识 T-S 模糊模型前件参数^[12],最小二乘法辨识 T-S 模糊模型后件参数的建模方法建立光纤陀螺的温度特性模型,对陀螺仪输出信号进行直接补偿,该补偿方法简单,通用性好,精度高,是一种新颖实用和适应性广泛的光纤陀螺误差非线性补偿方法。

1 光纤陀螺温度误差机理

光纤陀螺所处的温度场发生变化时,由于光纤的温度效应,引起光纤长度的变化进而直接影响到光纤陀螺转动速率检测的标度因数,引起标度因数的不稳定性^[13-14]。另一方面温度效应的热辐射造成光纤线圈局部温度梯度,引起左右 2 个旋光路光程的不等,产生附加相位引起温漂。除此之外,光源噪声、探测器噪声、背景噪声、热噪声、振荡复合噪声、线路噪声、暗电流噪声、电子噪声、环境噪声、声频扰动、机械振动及其他扰动(如磁场突变)同样是干扰光纤陀螺输出的因素。上述因素致使光纤陀螺的温度特性呈现非常复杂的非线性特点^[14],难以采用具体的解析表达式。基于 T-S 的模糊模型具有良好的逼近非线性函数能力,使用 T-S 模糊方法来建立光纤陀螺温度特性模型,无需对上述噪声逐一考虑,可以简化补偿过程,减少补偿次数,提高补偿精度。而

且通过对 T-S 模型的训练一旦达到设定的精度,就能够得出误差同温度转速之间的函数关系。因此 T-S 模型可以对光纤陀螺的温度误差起到很好的补偿作用。

2 试验设计与建模

2.1 T-S 模糊系统结构建模方法

一个多输入单输出(MISO)的 T-S 模糊系统可以用 n 条模糊规则表示,其中第 j 条模糊规则的形式为

$$R^j: \text{if } x_1 \text{ is } A_{j1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{j2} \\ \text{then } g_i = a_{j0} + a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2, \quad (1)$$

式中: $X = (x_1, x_2)$ 为输入变量; x_1 为光纤陀螺工作温度; x_2 为光纤陀螺输出角速度; A_{jk} 为变量 x_k 定义域上的模糊集,其逻辑前件 if 部分为模糊运算,逻辑后件 then 部分为输入变量的线性函数。

模糊规则数的确定和模糊输入空间的划分在前件参数辨识中起重要作用,模糊规则可归纳为输入输出变量乘积空间的划分。模糊聚类方法已被证明是最适宜的模糊划分方法^[15],即把输入-输出数据对分成组,一组采用一条模糊规则,模糊规则的数目等于组的数量,对输入变量 x_1 可以模糊划分为常温上和常温下 2 个区间, x_2 可划分为大角速率和小角速率 2 个区间,因此可将输入-输出对分成 4 组,规则数(聚类数目)为 4。关键是要进行聚类指标的合理设定,根据指标确定聚类中心进而使温度、陀螺仪输出数据空间得以最优划分。

对每一个模糊集 A_{jk} 采用隶属函数

$$A_{jk}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x_k - v_{kk})^2}{\sigma_{jk}^2}\right), \quad (2)$$

在这里利用 G-K 聚类算法辨识 T-S 模型的前件参数, G-K 聚类算法的目标函数为

$$J(Z, \mathbf{A}, \mathbf{V}) = \sum_{k=1}^c \sum_{i=1}^N (\mu_{ji})^N D_{ji}^2, \quad (3)$$

其中: $Z = [z_1, z_2, \dots, z_n]$ 为训练数据集; $\mathbf{A} = [\mu_{ji}]_{c \times n}$ 为数据集的模糊划分矩阵,在满足 μ_{ji} 满足约束条件

$$\mu_{ji} \in [0, 1], \quad 0 < \sum_{i=1}^N \mu_{ji} < N, \quad \sum_{i=1}^c \mu_{ji} = 1$$

首次随机产生, $\mathbf{V} = [v_1, v_2, L, v_n]$ 为聚类中心, c 为聚类数目, N 为样本数目, m 为模糊指数, D_{ji} 为第 j 个聚类中心与第 i 个数据间的距离范数, μ_{ji} 为第 i 个数据相对于第 j 个聚类中心的隶属度。

$$D_{ji}^2 = z_i - v_{jA_j} = (z_i - v_j)^T A_j (z_i - v_j), \quad (4)$$

其中, $A_j = (\rho \det(F_j)) / (nF_j - 1)$, $\rho = \det(A_j)$

$$F_j = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu_{ji})^m (z_i - v_j) (z_i - v_j)^T}{\sum_{i=1}^N (\mu_{ji})^m}. \quad (5)$$

通过拉格朗日乘法可求得使目标函数最小的必要条件为

$$\mu_{ji} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{D_{ji}}{D_{ki}} \right)^{\frac{2}{m-1}}}, \quad (6)$$

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu_{ji})^m z_i}{\sum_{i=1}^N (\mu_{ji})^m}, \quad (7)$$

即
$$\sigma_{jk}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_{ji} (x_{ki} - v_{ki})^2}{\sum_{i=1}^N \mu_{ji}}. \quad (8)$$

因此式(1)中描述的推理规则确定了输入空间的一个区域 $A_{j1} \times A_{j2} \times \dots \times A_{jn}$, 且 $X = (x_1, \dots, x_n)$ 属于这个区域的隶属度为

$$w_j(X) = A_{j1}(x_1)A_{j2}(x_2)\dots A_{jn}(x_n), \quad (9)$$

设模糊规则个数为 c , 则最终模糊系统的输出为

$$y = \sum_{j=1}^c \sigma_j(X)g_j(X), \quad (10)$$

$$\sigma_j(X) = w_j(X) / \sum_{j=1}^c w_j(X). \quad (11)$$

当形如式(9)的隶属函数 $w_j(X)$ 确定后, 式(10)中的线性函数 $g_j(X)$ 部分可通过最小二乘算法确定, 见式(12)~(14)。因此, 建立 T-S 模糊系统模型的关键是确定推理规则式(1)相对应的函数集合 $\{w_j(X)\}$ 。对未知参数向量 θ 的最小二乘估计 θ 的递推算法公式为

$$\theta(d+1) = \theta(d) + K(d+1)(y(d+1) - \varphi^T(d+1)\theta(d)), \quad (12)$$

$$K(d+1) = \frac{p(d)\varphi(d+1)}{1 + \varphi^T(d+1)p(d)\varphi(d+1)}, \quad (13)$$

$$p(d+1) = [I - K(d+1)\varphi^T(d+1)]p(d). \quad (14)$$

式中, $d = 1, \dots, N$ 。初始值 $\theta(0) = 0$ 和 $p(0) = aI$, 其中, I 是单位阵, a 是足够大的正数, 通常大于 300。

$\varphi^T(d) = [\sigma_1(x)x_1, \dots, \sigma_1(x)x_n, \dots, \sigma_c(x)x_1, \dots, \sigma_c(x)x_n]$ 为第 d 个样本的输入-输出观测向量, 迭代最后得到的 $\theta(N) = [a_{11}, \dots, a_{1n}, \dots, a_{c1}, \dots, a_{cn}]^T$, 即得逻辑后件的参数。

2.2 试验设计

光纤陀螺温度试验的系统是由某型光纤陀螺, 带高低温试验箱的速率转台和数据采集计算机组成。高低温试验箱的温度范围为 $-60 \sim +90$ °C, 速率转台的主轴速率范围为 $0.001 \sim 400$ (°)/s, 该光纤陀螺在静态条件下其精度为 $0.3 \sim 1$ (°)/hr, 最大敏感角速率为 ± 200 (°)/s。将光纤陀螺放于高低温试验箱中并设置温度为 -30 °C; 接通陀螺电源待光纤陀螺温度稳定后并保温 2 h 使得光纤陀螺各个部分温度绝对相等。规定转台逆时针旋转时的转速为正, 反之为负, 在该温度下, 以 10 (°)/s 为间隔单位在 $-180 \sim 180$ (°)/s 的转速范围内依次调整角速率值, 测得在该温度下对应不同转速的光纤陀螺输出值。然后每升高 5 °C 重复一次上述操作, 到 60 °C。可以得到 648 组不同温度不同速率下光纤陀螺输出数据。在数据采集时采用多次测量求平均的方法来降低测量误差, 每组数据采样 10 min, 每隔 0.6 s 进行一次采样, 每组包含 1 000 个数据, 通过对 1 000 个数据求平均得出光纤陀螺对应不同温度不同转速的输出值。

3 数据处理

将光纤陀螺的试验数据 648 个分为 2 组, 一组 448 个作为训练样本, 另一组 200 个作为检验样本。将训练样本按照如下步骤进行系统训练。

- 1) 设定模糊加权指数 $m > 1$ (此处取 $m = 2$) 和中止标准 $\epsilon = 0.000 1$;
- 2) 随机产生模糊划分矩阵 \mathbf{A} ;
- 3) 利用式(7)计算聚类中心;
- 4) 利用式(4)计算距离范数;
- 5) 利用式(6)更新模糊划分矩阵 \mathbf{A} ;
- 6) 如果满足条件 $\|\mathbf{A}^i - \mathbf{A}^{i-1}\| < \epsilon$ 则停止, 否则重复 3);
- 7) 利用式(8)计算隶属函数的方差;
- 8) 利用式(12)~(14)辨识后件参数。

3.1 结果分析

利用所建立的 T-S 模糊模型, 对陀螺仪的输出误差进行仿真, 仿真结果如图 1 所示。从图 1 可以看出在温度偏离常温时, 陀螺仪的输出误差随着偏离程度和转速的增大而增大, 增量和输入变化量之间为非线性关系。利用训练后的 T-S 模糊模型对陀螺仪的输出进行补偿即可得出补偿后的结果, 与转

台的转速相比较,误差图形如图 2 所示。

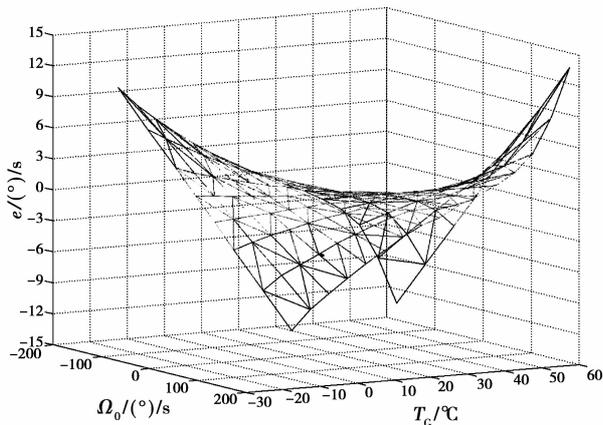


图 1 补偿前的误差分布图

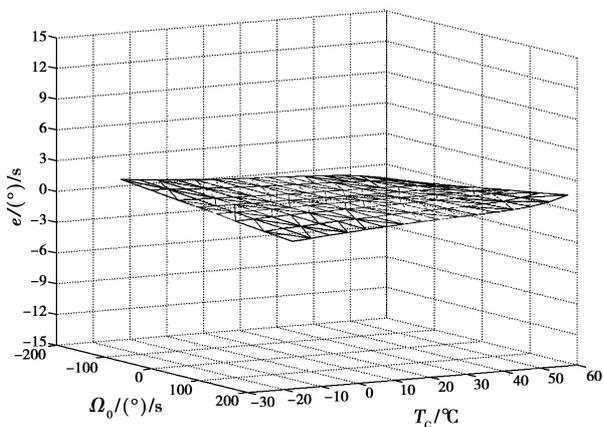


图 2 补偿后的误差分布图

为了验证该模型的可行性,将另一组 200 个数据带入训练好的模型,经过 T-S 模糊系统的补偿,得出验证样本补偿后的输出。将输出值同转台转速进行比较,其对应的误差范围和误差方差具有好的一致性,具体数据如表 1。

表 1 T-S 模糊模型补偿效果比较 (°)/s

数组	T-S 模糊模型的误差范围	T-S 模糊模型的误差方差
训练组	0.000 21~0.120 55	0.025 95
验证组	0.000 21~0.146 84	0.028 56

由表 1 中数据可以看出经过训练后的 T-S 模糊模型对陀螺仪的输出补偿是完全可行的。

3.2 补偿精度比较

为了得出 T-S 模糊模型对陀螺仪补偿精度提高的程度,分别与传统的线性拟合补偿,最小二乘法支

持向量机补偿和 BP 神经网络模型补偿的结果进行比较。具体结果如表 2 所示^[6-7]。

可知,未经补偿的绝对误差为 11.600 8 (°)/s,经线性拟合补偿的绝对误差为 3.500 6 (°)/s,经最小二乘法支持向量机补偿的绝对误差为 0.930 1 (°)/s,经 BP 神经网络补偿的绝对误差为 0.176 4 (°)/s,T-S 模糊模型补偿后的绝对误差为 0.146 84 (°)/s;未经补偿,线性拟合补偿,最小二乘法支持向量机补偿和 BP 神经网络补偿的绝对误差分别是经 T-S 模糊模型补偿的 79 倍,24 倍,6.4 倍,1.2 倍,对应的误差方差分别是 162 倍,60 倍,6.7 倍,1.2 倍。说明 T-S 模型补偿精度相对于其他的补偿算法有了很大的提高。该模型不需要对陀螺仪内部误差完全了解,同时还具备扩大考虑范围的潜能,通用性强,具有很大的应用空间。

表 2 T-S 模糊模型补偿输出与其他算法补偿的陀螺输出比较 (°)/s

	数组	训练组	验证组
未经补偿	绝对误差	11.576 4	11.600 8
	误差方差	4.619 36	4.6268 9
线性拟合补偿	绝对误差	3.473 2	3.500 6
	误差方差	1.731 6	1.730 6
最小二乘法支持向量机补偿	绝对误差	0.928 7	0.930 1
	误差方差	0.192 4	0.192 3
BP 神经网络补偿	绝对误差	0.133 5	0.176 4
	误差方差	0.031 21	0.035 65
T-S 模糊模型补偿	绝对误差	0.120 55	0.146 84
	误差方差	0.025 95	0.028 56

4 结 论

在 T-S 模型的基础上通过 G-K 聚类,得出模糊模型的基本框架,再利用最小二乘法对后件参数进行辨识。利用该模型对光纤陀螺的随温度变化的误差进行建模处理,实验数据表明了该方法的可行性。同传统的补偿方法相比,采用一次建模补偿,补偿的次数少,补偿时间短,逼近精度高,通用性好,因此具有很高的使用价值。

参考文献:

[1] LEFEVRE H C. The fiber-optic gyroscope [M].

- London: Artech House, 1993.
- [2] 张红线, 吴衍记, 王玉辉, 等. 基于模糊逻辑的光纤陀螺温度补偿技术[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(3): 343-346.
ZHANG HONG-XIAN, WU YAN-JI, WANG YU-HUI, et al. Compensation for FOG based on fuzzy logic [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(3): 343-346.
- [3] 于海成, 王巍, 黄磊. 改善闭环光纤陀螺标度因数线性度的方法[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(4): 449-451.
YU HAI-CHENG, WANG WEI, HUANG LEI. Improved performance of scale factor linearity in closed-loop IFOG [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(4): 449-451.
- [4] BLIN, S, KIM H K, DIGONNET M J F, et al. Reduced thermal sensitivity of a fiber-optic gyroscope using an air-core photonic-band gap fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(3): 861-865.
- [5] 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.
HAN BING, LIN YU-RONG, DENG ZHENG-LONG. Overview on modeling and compensation of FOG temperature drift [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2009, 17(2): 218-224.
- [6] 周战馨, 余志勇, 张延顺, 等. 基于LS-SVM的开环光纤陀螺误差补偿方法[J]. 数据采集与处理, 2008, 23(S): 158-162.
ZHOU ZHAN-XIN, YU ZHI-YONG, ZHANG YAN-SHUN, et al. Error compensation method based on LS-SVM for open-loop FOG [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2008, 23(S): 158-162.
- [7] 周海波, 刘建业, 熊智, 等. 基于BP神经网络的光纤陀螺仪温度建模研究[J]. 光电工程, 2006, 33(6): 135-138.
ZHOU HAI-BO, LIU JIAN-YE, XIONG ZHI, et al. Temperature modeling study for FOG based on back-propagation neural network [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(6): 135-138.
- [8] 赵玉新, 李绪友, 刘承香, 等. 光纤陀螺信号处理方法的比较研究[J]. 中国惯性技术学报, 2003, 11(2): 52-56.
ZHAO YU-XIN, LI XU-YOU, LIU CHENG-XIANG, et al. Comparative research in signal processing of FOG [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2003, 11(2): 52-56.
- [9] TAKAGI T, SUGENO M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1985, 15(1): 116-132.
- [10] CASTRO J L. Fuzzy logic controllers are universal approximator [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1995, 25(4): 629-635.
- [11] XIE W. Improved L2 gain performance controller synthesis for takagi-sugeno fuzzy system [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2008, 16(5): 1142-1150.
- [12] 罗秋滨, 谢元贞. 非线性系统的模糊建模方法研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2006, 11(6): 16-18.
LUO QIU-BIN, XIE YUAN-ZHEN. Study on fuzzy modeling for nonlinear system [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2006, 11(6): 16-18.
- [13] FRIEBELE E J, WASSERMAN L R. Development of radiation hard fiber for IFOGs [R]. Mexico: 18th International Conference on Optical Fiber Sensors, 2006.
- [14] OJEDA L, CHUNG H, BORENSTEIN J. Precision-calibration of fiber-optics gyroscopes for mobile robot navigation [C/OL] // IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, USA, April 24-28, 2000 [2002-08-06]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=846333&tag=1.
- [15] BRANDT M E, KHARAS Y F. An error convergence simulation study of hard vs. fuzzy c-means clustering [C/OL] // Proceedings of the Third IEEE Conference on Fuzzy Systems, Orlando, FL, USA, Jun 26-29, 1994 [2002-08-06]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=343580.

(编辑 陈移峰)