

Analyzing and Modeling of the Thermal Characteristics about MEMS Gyroscope^{*}

CHEN Wanwan^{1,2}, CHEN Zhigang^{1*}, MA Lin², FU Jianping¹

(1. National defense Key Laboratory of Underground Damage Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: For MEMS gyroscopes, biases characteristics always vary with temperature fluctuations. Through establishing error model between the temperature and the MEMS gyroscope biases, the biases outputs of the MEMS gyroscope are studied within a temperature range of $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Via using the error model after removing outliers, results show that MEMS gyroscope biases caused by temperature have changed from approximately $100\text{ }^{\circ}/\text{h}$ to approximately $10\text{ }^{\circ}/\text{h}$ after compensations. Also biases in the whole temperature range have been improved to some extent, which would lay a foundation for improving the navigation accuracy.

Key words: MEMS gyroscopes; thermal characteristics; biases; error compensations

EEACC: 2575; 7220; 7630

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2014.02.009

MEMS 微机械陀螺温度特性分析与建模^{*}

陈湾湾^{1,2}, 陈智刚^{1*}, 马林², 付建平¹

(1. 中北大学地下目标毁伤技术国防重点学科实验室, 太原 030051; 2. 清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 针对 MEMS 微机械陀螺的零偏随温度变化波动较大的特性, 通过建立 MEMS 陀螺零偏随温度变化之间的误差模型, 在温度范围为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温箱试验下, 分析 MEMS 陀螺的零偏输出变化, 经去除野值后使用建立的误差模型对零偏进行补偿, 结果表明, MEMS 陀螺仪因温度引起的零偏从最大约为 $160\text{ }^{\circ}/\text{h}$, 经补偿后降至约为 $10\text{ }^{\circ}/\text{h}$ 。该温度误差模型使 MEMS 陀螺的全温区零偏特性得到了一定程度的提升, 为提高之后的导航精度打下基础, 具有一定的工程价值。

关键词: MEMS 陀螺; 温度特性; 零偏; 误差补偿

中图分类号: U666.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2014)02-0194-04

MEMS 陀螺仪具有体积小、重量轻的突出优点, 随着科技的发展, 微机械陀螺仪的性能不断提高, 成为微型惯性系统的核心和推动导航系统小型化发展的关键元件, 也是当前国际研究的热点之一^[1]。然而, 微机械陀螺的主要构成材料为硅, 该材料对温度特性非常敏感^[2], 同时, 其他电路元件特性也会随环境温度的变化对 MEMS 陀螺的零偏产生的影响。在惯性导航中, 随着时间的增加, 温度变化造成的误差量也将随之累积不断增加。

对于 MEMS 陀螺的温度特性的研究, 众多研究者已经进行大量、深入的研究: 文献[3] Abdel-Hamid 通过对不同温度点下 MEMS IMU 的零偏特性的研究, 从而验证了 MEMS IMU 零偏输出特性的决定误差因素是环境温度的变化; 文献[4]中, Aggarwal 等人使用简单线性拟合的方法得到温度与 MEMS 惯性器件零偏之间的关系, 经过补偿前后的导航验证, 大大

提高了导惯性导航的精度; 文献[5]中, 使用混合线性回归的方法, 对 MEMS 陀螺的输出进行补偿, 使得补偿后的均值可以减小 1~2 个数量级; 文献[6]中, 提出一种互相关分析快速温度标定的方法, 与传统方法相比, 节省大量时间, 并且保证了模型的准确性。文献[7]为了使得 MEMS 陀螺在全温区间进行分段拟合达到较好的补偿效果, 采用多项式分段拟合方法。

本文通过在陀螺仪经过彻底老化试验以后, 在实验室条件下, 研究 MEMS 陀螺仪在温度区间为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下, 环境温度对陀螺仪零偏输出的影响, 分别对 MEMS 陀螺仪三轴建立误差模型, 并对陀螺仪输出进行补偿。

1 MEMS 陀螺仪温度特性影响因素

MEMS 陀螺仪以硅为主要材料, 当环境温度发生变化时, 热敏材料硅不仅会发生尺寸的变化, 同时

发生变化的还有材料的弹性模量、热膨胀系数、内应力等;其中主要影响因子为材料弹性模量和尺寸的改变^[8-9]。尺寸大小发生的变化对 MEMS 陀螺仪输出影响很小,忽略不计,重点研究材料弹性模量的变化对 MEMS 陀螺仪性能的影响。系统刚度随着材料弹性模量的变化而发生变化,进一步改变陀螺仪的谐振频率,陀螺仪输出产生漂移。材料弹性模量随温度变化近似成线性关系,如式(1)所示^[9]:

$$E(T) = E_0 - E_0 \kappa_{ET}(T - T_0) \quad (1)$$

式中 $E(T)$, E_0 分别是硅材料在温度为 T , T_0 时的弹性模量,单位为 MPa; $T_0 = 300$ K; κ_{ET} 为硅材料弹性模量温度变化系数,其值在 $25 \times 10^{-6} \sim 75 \times 10^{-6}$ 之间,一般可取均值即 50×10^{-6} ,由此得到陀螺谐振频率与温度的关系。

分析 MEMS 陀螺仪的工作机理,在温度 T_0 附近的小范围内时,陀螺谐振频率与温度的关系可以线性近似的用式(2)表述:

$$\omega_n(T) = \omega_n(T_0) [1 - 1/2 \kappa_{ET}(T - T_0)] \quad (2)$$

式中, $\omega_n(T)$ 是温度为 T 时的陀螺谐振频率,单位为 Hz。

由于温度影响陀螺谐振频率导致的漂移,对陀螺驱动以及检测模态均有影响,进一步影响 MEMS 陀螺信号的输出,降低陀螺仪的零偏稳定性和导航精度。因此,在实验数据基础上,分析陀螺仪输出,建立正确的温度误差模型并对陀螺仪输出进行补偿显得尤为重要。

2 MEMS 陀螺仪温度实验分析

MEMS 陀螺仪经过老化实验以后,在温度区间为 -20 °C ~ 60 °C 的条件范围内,对 MEMS 陀螺仪进行全温区和温度系数实验。实验装置如图 1 所示。

将 MEMS 陀螺仪固定在温箱内,在温度范围 -20 °C ~ 60 °C,按照需要,设置温箱温度变化率,对 MEMS 陀螺仪进行全温区(本文全温区均是指 -20 °C ~ 60 °C 范围)测试;在连续采集陀螺仪输出的同时,在全温区范围内,MEMS 陀螺仪输出稳定后,每隔 5 °C 即环境温度点分别为 -20 °C, -15 °C,



图1 MEMS 陀螺仪温度实验现场图

-10 °C, \dots , 55 °C, 60 °C。按照 $1\ 000$ Hz 采样率,定点采集陀螺仪输出数据。

MEMS 陀螺仪在静态采集工作过程中,器件可能会受到随机的冲击、震动、摆动等因素的影响,因此造成工作不稳定产生异常数据点,对随后的数据解算精度产生一定的影响,所以在对数据进行分析之前,经过野值处理,去除异常点,在这里使用传统的拉依达准则,也叫 3σ ^[11-12] 法则。具体过程如下:

(1) 对数据序列 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ 求均值,

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i;$$

(2) 计算数据序列取均差值 $r_i = a_i - \bar{a}$;

(3) 求出标准差 $\sigma, \sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n r_i^2 / n - 1}$;

(4) 当 $r_i > 3\sigma$ 时,剔除 a_i ;

不同温度点下采集到的 2 min 静态数据进行异常点数据处理后对陀螺仪各轴输出均值化处理,得到随温度变化如图 2 所示。

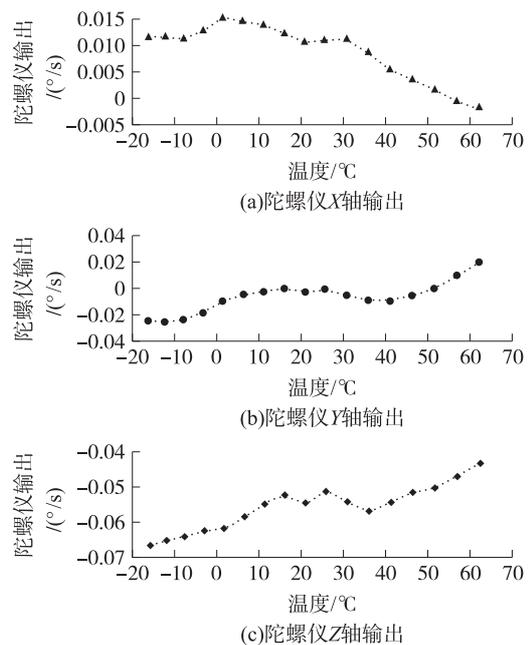


图2 不同温度点下陀螺 X、Y、Z 轴静态输出均值

分析 MEMS 陀螺的输出随温度变化的曲线,不难发现,整体趋势来看,在全温区范围内,陀螺仪 X 轴输出随着温度的增加,陀螺仪零偏误差随着温度的增加而增加,最高点与最低点存在 $63.288^\circ/\text{h}$ 的差距;对陀螺仪 Y、Z 轴输出随温度的增加而降低,其中 Y 轴输出随温度变化最大误差 $161.352^\circ/\text{h}$, Z 轴输出随温度变化最大差值为 $85.896^\circ/\text{h}$ 。这些由于环境温度变化造成的误差,在后续精确导航是非常致命的。因此,需要对陀螺仪的输出建立误差模型,对陀螺仪的输出进行补偿,从而提高惯性导航精度。

3 MEMS 陀螺仪温度特性模型的建立与补偿分析

根据陀螺仪静态输出数据,建立正确的温度特性误差模型;并应用该模型进行数据补偿,提高陀螺仪的输出精度。

3.1 MEMS 陀螺仪温度特性模型分析

结合 MEMS 陀螺仪随温度变化曲线,使用最小二乘估计方法确定对陀螺仪输出均值建立进行数据拟合。

分别对陀螺仪三轴建立多项式拟合,设 X、Y、Z 轴拟合方程分别为:

$$\text{Gyrox}(T) = g_{bxn}T^n + \dots + g_{bx1}T + g_{bx0} \quad (3)$$

$$\text{Gyroy}(T) = g_{byn}T^n + \dots + g_{by1}T + g_{by0} \quad (4)$$

$$\text{Gyroz}(T) = g_{bzn}T^n + \dots + g_{bz1}T + g_{bz0} \quad (5)$$

式中, Gyrox(T)、Gyroy(T)、Gyroz(T) 分别为 MEMS 陀螺仪三轴在不同温度点下的输出均值,单位为 $^{\circ}/s$; T 为陀螺内部温度,单位为 $^{\circ}C$; 等式右侧 g_{bx0} 、 $g_{bx1} \dots g_{bxn}$ 、 g_{by0} 、 $g_{by1} \dots g_{byn}$ 、 g_{bz0} 、 $g_{bz1} \dots g_{bzn}$ 分别为各轴误差拟合系数。

经多次拟合验证尝试, MEMS 陀螺仪随温度变化拟合曲线如图 3 所示。

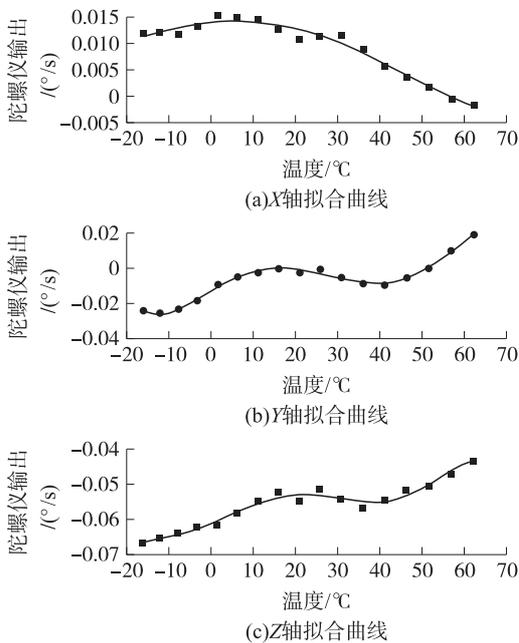


图3 陀螺 X、Y、Z 轴拟合曲线

拟合曲线,综合各轴残差数据,残差值范围在 $\pm 0.002^{\circ}/s$ 范围内,图 4 为 MEMS 陀螺仪各轴输出残差值。

3.2 MEMS 陀螺仪静态输出温度补偿分析

采用上述模型分别对陀螺仪在温箱温度分别为 $-20^{\circ}C$ 、 $0^{\circ}C$ 、 $25^{\circ}C$ 、 $60^{\circ}C$ 温度点下数据输出进行补偿,补偿前后结果如表 1 所示。

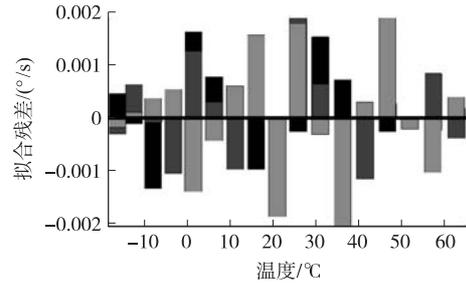


图4 陀螺仪输出数据残差值

表1 全温区范围内不同温度点补偿前后 MEMS 陀螺仪静态输出均值

温箱温度点/ $^{\circ}C$	状态	X 轴陀螺仪输出均值/ $(^{\circ}/h)$	Y 轴陀螺仪输出均值/ $(^{\circ}/h)$	Z 轴陀螺仪输出均值/ $(^{\circ}/h)$
-20 $^{\circ}C$	补偿前	42.661	-86.832	-241.183
	补偿后	1.677	-0.967	-0.605
0 $^{\circ}C$	补偿前	56.614	-33.977	-223.313
	补偿后	5.898	4.587	-5.077
25 $^{\circ}C$	补偿前	42.181	-18.076	-201.229
	补偿后	0.834	-6.943	-10.069
60 $^{\circ}C$	补偿前	-6.665	69.842	-155.301
	补偿后	0.673	-1.887	1.444

图 5 为温度为 $25^{\circ}C$ 时候,陀螺仪三轴补偿前后零偏输出。

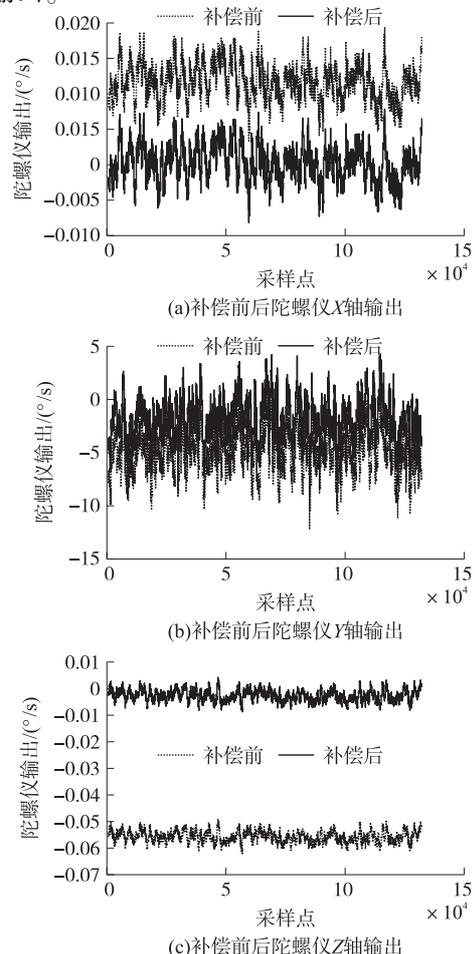


图5 补偿前后陀螺仪输出

分析补偿前后陀螺仪输出,温度补偿前,全温区范围内陀螺仪各轴最大零偏输出 $236.1228^{\circ}/\text{h}$,补偿后该陀螺仪零偏输出量级降为 $5.7348^{\circ}/\text{h}$,提升了95%;尤其对陀螺仪Z轴输出,补偿效果明显。总体而言,补偿前后MEMS陀螺仪零偏输出零偏提高2~3个数量级,对提高后续导航精度有很大的作用。

4 结论

通过大量实验,并结合MEMS陀螺仪零偏输出与温度之间关系,分析陀螺仪各轴零偏输出,使用最小二乘法,在全温区范围内,分别对各轴建立MEMS陀螺仪温度误差模型;使用该模型对陀螺仪全温区输出进行补偿,减小了温度对MEMS陀螺仪静态输出数据的影响,验证该模型的正确性与实用性;补偿后的输出可以应用于陀螺其他项目如安装误差的标定,有效的缩短总体标定时间。当然本文尚存以下不足:①没有考虑建立三轴统一误差模型;②缺乏安装误差的影响的分析;③可以进一步探讨动态环境中与温度相关的零偏对陀螺仪输出的影响。

参考文献:

[1] 李士心,王晓亮,翁海娜,等. 基于灰色模型和RBF神经网络的

MEMS陀螺温度补偿[J]. 中国惯性技术学报,2010,18(6):742-746.

- [2] 温祖强,钱峰. 微机械陀螺温度特性及其补偿算法研究[J]. 电子测量技术,2011,34(4):51-55.
- [3] Abdel-Hamid W. Accuracy Enhancement of Integrate MEMS-IMU/GPS Systems for Land Vehicular Navigation Applications[D]. PhD Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, AB, Canada,2005.
- [4] Aggarwal P, Syed Z, El-Sheimy N. Thermal Calibration of Low Cost MEMS Sensors for Land Vehicle Navigation System [C]// Proceedings of the Vehicular Technology Conference. VTC Spring, IEEE 2008:2859-2863.
- [5] 陈维娜,曾庆化,李荣冰,等. 微机械陀螺温度混合线性回归补偿方法[J]. 中国惯性技术学报,2012,20(1):99-103.
- [6] 罗兵,吴美平,尹文,等. 微机械陀螺温度系数的快速标定方法[J]. 传感技术学报,2011,23(10):1445-1448.
- [7] 程龙,王寿荣,叶甫. 硅微机械振动陀螺零偏温度补偿研究[J]. 传感技术学报,2008,21(03):483-485.
- [8] 吴学忠,刘宗林,李圣怡. 微硅陀螺性能影响因素及其对策研究[J]. 微纳电子技术,2003,40(7):274-276.
- [9] 赵旭,苏中,马晓飞,等. 大温差应用环境下的MEMS陀螺零偏补偿研究[J]. 传感技术学报,2012,25(8):1079-1083.
- [10] 陈怀,张嵘,周斌,等. 微机械陀螺仪温度特性及补偿算法研究[J]. 传感器技术,2004,23(10):24-26.
- [11] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 机械工业出版社,2000.
- [12] 何平. 剔除测量数据中异常值的若干方法[J]. 航空计测技术,1995,15(1):19-22.



陈湾湾(1992-),女,中北大学硕士研究生,研究方向为MEMS惯性传感器信号处理、弹箭控制,hurrypipi@163.com;



陈智刚(1963-),男,中北大学国防重点学科实验室副主任,主要研究方向为弹箭远程与高威力技术、MEMS武器系统结构设计与威力分析,cyc@nuc.edu.cn。