

石英挠性加速度计温度补偿方法研究

俞茂超¹,王新宇²,阳洪²,宋军²

(1. 西安黄河机电有限公司设计研究所,陕西西安710043;2. 中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆400060)

摘要:石英挠性加速度计的输出受温度影响,其温度特性具有复杂的函数特征。该文对加速度计零偏提出了一种温度补偿法,建立了基于温度和温度梯度的联合多项式补偿模型,设计出相应的试验方法计算补偿参数。通过试验验证,此方法简明有效,可补偿因温度变化引起的石英挠性加速度计的零偏影响,达到提高系统温度环境适应性的目的。

关键词:石英挠性加速度计;温度梯度;温度误差模型

中图分类号:V241.62

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.02.017

Study on Temperature Compensation Method of Quartz Flexible Accelerometer

YU Maochao¹, WANG Xinyu², YANG Hong², SONG Jun²

(1. Design & Research Institute, Xi'an Huang-he Electromechanical Co., Ltd., Xi'an 710043, China;

2. 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: The output of a quartz flexible accelerometer is influenced by temperature, and its temperature characteristics have complex functional characteristics. In this paper, a temperature compensation method for accelerometer zero bias is presented. A joint polynomial compensation model based on temperature and temperature gradient is established, and the corresponding test method is designed to calculate the compensation parameters. The experimental results show that this method is simple and effective, and it can compensate for the bias effect of quartz flexible accelerometer caused by temperature change, so as to achieve the purpose of improving the temperature and environmental adaptability of the system.

Key words: quartz flexible accelerometer; temperature gradient; temperature error model.

0 引言

石英挠性加速度计用于测量载体的运动加速度,具有灵敏度高,稳定性好,结构简单等特点,在航陆空及各种武器装备的导航、制导与控制系统中都有广泛的应用。加速度计输出误差会影响导航系统中初始水平姿态对准、计算地理纬度值及位置速率的解算等。石英挠性加速度计的精度除受到制造工艺、内部结构自身的特点影响外,还与所处的环境有关^[1]。其中,环境温度对其影响尤为突出,当环境温度在温差100℃内变化时,其温度漂移较大,不能满足系统精度要求^[2]。在平台式惯导系统中常采用温控的方式,制造恒温环境抵消影响,但不适用于启动快,功耗低,体积及质量小的捷联式惯导系统。本文分析了石英挠性加速度计基本原理及温度误差特性,建立多参量联合多项式模型,通过试验测试计算

出相关参数,从软件上进行温度补偿。

石英挠性加速度计温度输出模型有多种,如神经网络模型、线性模型或多项式模型、受控马氏链模型、小波网络逼近及模糊逻辑^[3]。在实际过程中,由于系统样机对实时性要求较高,所以一般采用现场可编程门阵列(FPGA)作调制解调算法的芯片。因此,计算复杂的模型不利于工程化实践。从器件上补偿常受工艺生产技术等方面的制约,本文考虑从系统层面补偿,选用多项式模型来对加速度计输出进行建模,实验表明,-40~50℃变温环境下,补偿后加速度计输出随温度变化极差显著减小,有效补偿了温度对加速度计零偏的影响。

1 石英挠性加速度计基本原理

石英挠性加速度计主要由挠性质量摆组件(包括质量块和挠性杆)、差变电容信号传感器、上、下磁

力矩器及壳体结构等部分组成,其原理如图1所示。石英挠性加速度计是基于挠性支撑技术,简化了干式加速度计的结构和工艺,提供加速度信息,已广泛应用于各类惯性系统中。当摆片的敏感轴感应到加速度时,质量摆绕挠性梁偏转产生电容差,加速度计中差动电容信号传感器敏感出电容变化量,经过伺服放大电路检测,其输出电流信号。由I/V转换电路转换为电压信号,经信号处理后输出,再反馈回恒定磁场中的力矩线圈上,使质量摆恢复到原来的平衡位置^[4]。

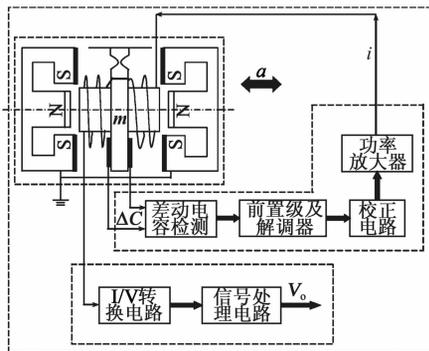


图1 石英挠性加速度计结构原理图

反馈电流与输入加速度的关系为

$$i = K_0 + \frac{m}{Bl}a = K_0 + Ka \quad (1)$$

式中: K_0 为零偏; m 为石英摆组件质量; B 为工作气隙磁感应强度; l 为力矩线圈长度; a 为输入加速度; K 为标度因数。

2 石英挠性加速度计误差分析

通过对加速度计实际零偏的分析发现,零偏包含常值零偏、异位零偏、重复启动零偏、温度偏移、周期性偏移以及随机漂移等多种因数。石英摆片是影响石英挠性加速度计偏值的关键器件。在变温环境中,外壳结构的微变形将会引起摆片的微位移,从而带来偏值。另外,石英挠性加速度计装配过程中的胶粘工艺在高、低温环境中也会引入偏值。其他因素还包括伺服电路的温度性能等。现只考虑加速度计偏值温度特性模型是与时间 t 、温度 T 和温度变化 ΔT 参数相关的函数,即可表示为

$$K_0 = \varphi(t, T, \Delta T) \quad (2)$$

在加速度计静态模型方程中,忽略加速度计非线性系数及交叉耦合系数,则加速度计输出为

$$E = K_0 + A_1 K_1 \quad (3)$$

式中: E 为加速度计输出; K_1 为标度因数; A_1 为输

入加速度。

研究石英挠性加速度计零偏温度模型,需建立合理的关于时间、温度、温度变化参数相关的函数,即确定 $\varphi(t, T, \Delta T)$ 具体表达式。

3 零偏温度补偿模型

温度对加速度计的影响可用当前时刻的温度数值及温度变化相关参数表示。温度补偿模型的研究主要分为线性和非线性模型两种。线性模型复杂性低,易实现,适合工程实践使用。常将石英挠性加速度计的输出随温度的变化近似为线性关系,建立输出的多项式模型。实际上,石英挠性加速度计输出的温度特性具有复杂的函数特征。单纯建立某一时刻输出与此时温度的多项式关系模型的补偿效果不佳,现考虑引入温度梯度(温度的变化率)参变量,设计多参数变量联合的补偿模型。

设某时刻温度为 T_0 ,上一时刻的温度为 T_1 ,则温度梯度为 $dT = \frac{T_1 - T_0}{\Delta t}$ (其中 Δt 为 T_1 和 T_0 两个时刻的时间间隔)。考虑计算过程中矩阵的满秩,温度梯度参数需为大于1的参数,则修改温度梯度参数为 $dT' = \frac{T_1 - T_0}{\Delta t} + 1$ 。

加速度计零偏温度补偿模型为

$$\varphi(t, T) = M_1 T^3 + M_2 T^2 + M_3 T + M_4 dT'^3 + M_5 dT'^2 + M_6 dT' + M_7 \quad (4)$$

式中 $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6, M_7$ 为多项式拟合系数。

$$E' = E - \varphi(t, T) \quad (5)$$

式中 E, E' 分别为加速度计温度补偿前、后的输出。

最后通过最小二乘拟合可确定 $M_1 \sim M_7$ 7个参数的值。

4 实验验证和结果分析

4.1 实验数据处理方法

本次实验平台包括带温控转台、电源、数据采集处理器、温度传感器、上位机测试软件等。通过对石英挠性加速度计和温度传感器进行数据采集,将数据送到上位机exe测试程序中,拟合计算后得到温度补偿参数,建立起加速度计零偏温度补偿模型。然后通过温度补偿模块与加速度计的输出叠加,得到加速度计补偿后的输出^[5-6]。

将变温转台温度设置在 $-40 \sim 50$ °C间缓慢升、降,对加速度计进行高、低温环境试验,加速度计的

原始输出信号经平滑处理,在 Matlab 中最小二乘法拟合,得到温补参数值,将其固化写入到产品软件中完成温度补偿。在相同条件下,重新做高、低温试验,验证温度补偿的效果。

4.2 实验结果分析

图 2 为加速度计试验数据图。由图可看出,系统启动后,加速度计的输出受温度变化的影响,而升温 and 降温对其影响趋势也不同,加速度计输出为电压信号,输出为 $-8 \sim 1$ mV,极差约为 9 mV。通过最小二乘法拟合,Matlab 计算得到 7 个参数值,写入补偿模块。重做试验得到加速度计的输出极差约为 2 mV,相比补偿前随温度变化幅度减小。

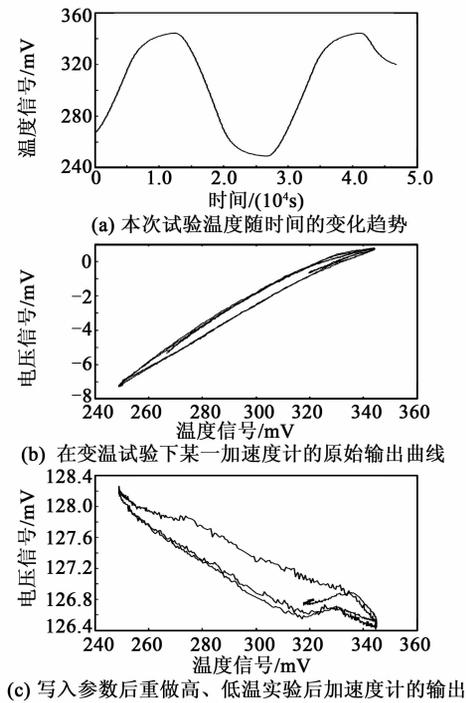


图 2 加速度计试验数据图

5 结束语

本文分析了石英挠性加速度计误差因素及其温度特性,建立了加速度计零偏的多项式温度补偿模型,用温度和温度梯度参数进行温补。在 $-40 \sim 50$ °C 变温环境中测试,通过试验验证可得:

石英挠性加速度计零偏与温度、温度变化率相

关,设计的联合多项式补偿模型采用四阶温度模型和三阶温度梯度组合的形式,可减小石英挠性加速度计受温度因素影响的误差,方法简明有效,对提高系统的环境温度适应性有一定的意义,具有良好的工程应用价值。

参考文献:

[1] 任春华,潘英俊,李俊峰,等. 基于神经网络的石英加速度计的二维时、温漂移补偿[J]. 中国惯性技术学报, 2007,15(3):366-369.
REN Chunhua, PAN Yingjun, LI Junfeng, et al. Two-dimensional compensation on time and temperature drift of quartzose flexible accelerometer based on neural networks[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(3), 366-369.

[2] TITTERTON D H, WESTON J L. Strapdown inertial navigation technology [M]. Second Edition, Lexington, Massachusetts, USA: Copublished by the American Institute of Aeronautics and Astronautics and the Institution of Electrical Engineers, 2004.

[3] 赵龙,胡少波,纪文涛. 光纤惯组温度补偿模型和测试技术研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2016:39-41.
ZHAO Long, HU Shaobo, JI Wentao. The study of temperature compensation model and test technology for optical fiber inertial Group [J]. Missile and Spaceflight Transport Technology, 2016:39-41.

[4] 张宇飞, 屈建龙, 宋超, 等. 石英挠性加速度计温度建模和补偿[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(3): 356-359.
ZHANG Yufei, QU Jianlong, SONG Chao, et al. Temperature modeling and compensation of quartzose flexible accelerometer[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2009, 17(3): 356-359.

[5] GAO J M, ZHANG K B, CHEN F B, et al. Temperature characteristics and error compensation for quartz flexible accelerometer[J]. International Journal of Automation and Computing, 2015, 12(5): 540-550.

[6] MU Senlin, CHEN Fubin. Research on temperature compensation method of quartz flexible accelerometer [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 423/426: 2308-2309.