集装箱用电容式加速度传感器的热变形分析

吕海峰[1]，彭小明[2]，刘 静[3]
(1. 中北大学，太原 030051；2. 总装备部驻江津地区军代室，重庆 402264；3. 中国兵器工业第五九研究所，重庆 400039)

摘要：热变形是导致加速度传感器输出特性随温度变化的主要原因。在分析电容式加速度传感器工作原理的基础上，采用有限元方法对加速度传感器的热变形进行了仿真分析。仿真结果表明：当传感器结构完全对称时，差分方式将结构的热变形相互抵消，传感器的输出不会发生变化；加工误差导致的结构不对称使变热形向刚度较小的一侧发展，从而使传感器的输出产生漂移。温漂试验表明，当环境温度升高 40 ℃时，传感器的输出下降了 76 mV。加工中应严格控制工艺流程，确保传感器结构对称，减小热变形。

关键词：加速度传感器；热变形；有限元方法；试验
中图分类号：TB487　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-3563(2013)01-0133-04

Thermal Deformation Analysis of Capacitive Accelerometer for Container

LYU Hai-feng[1]，*PENG Xiao-ming*[2]，*LIU Jing*[3]
(1. North University of China，Taiyuan 030051，China；2. The Military Representative Office of GAD in Jiangjin，Chongqing 402264，China；3. No. 59 Research Institute of China Ordnance Industry，Chongqing 400039，China)

Abstract：Thermal deformation is the main reason for the change of accelerometer output with the temperature. Based on analysis of the working principle of capacitive accelerometer，finite element method was applied in the simulation of thermal deformation. Calculation results indicated that when the sensor structure is symmetrical completely，the differential configuration can cancel the thermal deformation and there is no drift for the output of accelerometer；when non-symmetry occurs by machine error，the thermal deformation will develops towards the direction of less strength，and the temperature drift occurs. The temperature drift experiment indicated that when temperature increasing 40 ℃，the output of accelerometer decreases 76 mV. It was suggested that capacitive accelerometer should be manufactured accurately to reduce thermal deformation of sensor structure.

Key words：accelerometer；thermal deformation；FEM；experiment

集装箱在不同的车船、港口、堆场之间的频繁转移会经历多次装载和卸载。在此过程中集装箱箱体不可避免地会同地表、车体、船体或其他的集装箱发生碰撞。通过在集装箱内安装加速度传感器，可以精确地记录集装箱在碰撞过程中冲击加速度的变化，为判断箱内货物的状态提供参考[1-2]。随着 MEMS 技术的发展，使得敏感元件和调理电路集成化成为了可能，并由此产生了 MEMS 硅微电容式加速度传感器[3]。MEMS 传感器具有体积小、质量轻、功耗低等特点，将其安装于集装箱内时不占用箱内的有效体积，因此该传感器在集装箱的碰撞监测中得到了广泛应用。集装箱在不同地域间进行运输时，会受到温度变化的影响。温度变化以及电子元器件长时间工作产生的高温，会引起加速度传感器的结构发生热胀冷缩现象，继而会引起加速度传感器的参数发生变化，从而影响测量精度，因此需要对集装箱内的加速度传感器随温度变化的特性进行研究。

1　加速度传感器的工作原理

电容型加速度传感器的结构形式一般采用弹簧-

收稿日期：2012-10-08
基金项目：中北大学自然科学基金；高等学校博士学科点专项科研基金(20111420120005)
作者简介：吕海峰(1981-)，男，河南信阳人，中北大学讲师，主要研究方向为微传感器设计制作与测试技术。

质量-阻尼系统。当质量块受加速度作用,改变了质量块与固定电极之间的间隙,进而使电容值发生变化[4]。电容式加速度传感器的结构见图1。

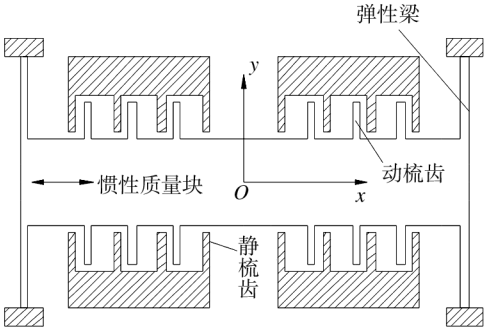

图1 加速度传感器示意图

Fig. 1 Schematic structure of accelerometer

以惯性质量块的纵向对称轴(y 轴)为界,左右两侧结构对称。上下相对的定齿是电连通的,左侧定齿的电极性与右侧定齿的电极性相反。惯性质量元件的每一个动齿与相临的2个定齿的每个梳齿交错配置,整个结构以质量块为中点上下对称,总体形成差动电容。电容式加速度传感器具有结构简单、灵敏度高、动态响应特性好、抗过载能力大等优点。分析的加速度传感器主要结构参数见表1。

表1 加速度传感器主要参数

Tab. 1 Parameters of accelerometer μm

名称	质量块		弹性梁		梳齿		整体	
	长度	宽度	长度	宽度	长度	宽度	长度	宽度
数值	1 000	1 037	800	7	100	5	3400	2500

2 热应力理论分析

电容传感器极板间隙很小,所以对结构尺寸的变化特别敏感。在传感器各零件材料膨胀系数不匹配的情况下,温度变化将导致极板间隙产生较大的变化,从而产生温度误差。在设计结构时,应减少热膨胀尺寸链的组成环节,同时要尽量选用膨胀系数小、尺寸稳定的材料[5-6]。为了研究环境温度变化对电容式传感器结构的影响,采用有限单元法,对其热变形进行仿真分析。

2.1 结构热变形的有限元仿真

为了分析加速度传感器结构在温度变化下的变形情况,首先要进行热分析,求得结构的温度场后,将热分析中得到的节点温度作为“体载荷”,施加到随后的结构分析中去[7-9],从而得到结构的变形情况以及应力分布情况。下面分别对加速度传感器的质量块均匀受热与不均匀受热2种情况进行仿真。

2.1.1 质量块均匀受热分析

采用ANSYS进行热-结构耦合分析时,加速度传感器质量块相关物理参数的取值如下:热导率为 1.51×10^{-4} W/(μm·℃),热膨胀系数为 2.33×10^{-6} ℃$^{-1}$,单元类型选取为SOLID87。仿真得到的质量块在均匀受热(由0 ℃变化至20 ℃)后膨胀变形的情况见图2。

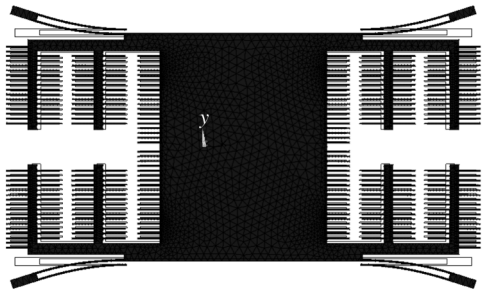

图2 传感器均匀受热变形情况

Fig. 2 Thermal deformation of sensor under uniform heating

由图2可知,质量块受热膨胀,导致整个结构向外扩展,弹性梁向外侧伸展。浮动单元以及梳齿沿 x 方向和 y 方向都存在不同程度的温漂位移。梳齿沿 x 方向和 y 方向的位移均随着远离质量块中心距离的增大而增大。最大热应力发生在弹性梁与锚点连接处,最大应力值为9.617 MPa。质量块的热膨胀位移会引起梳齿之间的电容发生变化,但由于对称结构以及采用差动电容检测方式,最终的差动电容变化量为0,因此结构整体均匀受热时,虽然发生膨胀变形,但传感器的输出不发生变化。

2.1.2 质量块不均匀受热分析

质量块上下表面存在20 ℃的温差时的变形情况见图3。质量块上表面的温度为40 ℃,下表面的温度为20 ℃,由于结构上下两面存在温差,结构的上表面变形大于下表面变形,导致质量块上拱。由于热变形所产生的热应力最大值为14.407 MPa,发生在弹性梁与锚点的连接处。质量块发生上拱会导致动、静梳齿之间的正对面积减小,导致传感器的初始电容减小。由于采用差动方式检测电容的变化量,而在理想状态下形成差动电容的两2组梳齿同时发生变化,最终差值为0,即电容变化量为0。即结构完全对称时,当上下表面存在温差时,传感器虽然发生拱形变形,

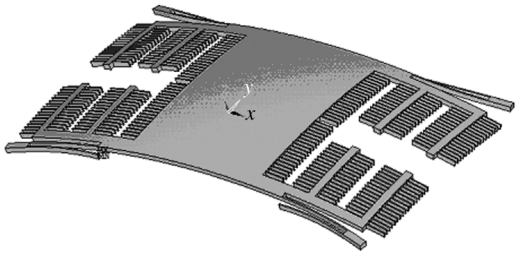

图 3　传感器不均匀受热变形情况

Fig. 3 Thermal deformation of sensor under non-uniform heating

传感器的输出不发生变化。

2.2　非对称结构热变形分析

由于传感器结构设计过程中采用了对称结构，无论是结构均匀受热还是非均匀受热，通过差动方式均可以消除热胀冷缩对传感器输出的影响。实际加工过程中，所设计的结构不可能做到完全对称，弹性梁尺寸的差异以及梳齿的折断会导致质量块不对称，当存在温度变化时，形成差动电容的梳齿的变化不再相同，因此检测电容的变化量不再为 0，传感器的输出会随温度的变化发生相应的改变。

在分析过程中，为了研究不对称结构在温度变化时的变形，将部分弹性梁的尺寸由 7 μm 变化成 5 μm，见图 4，其他参数的设置不变。

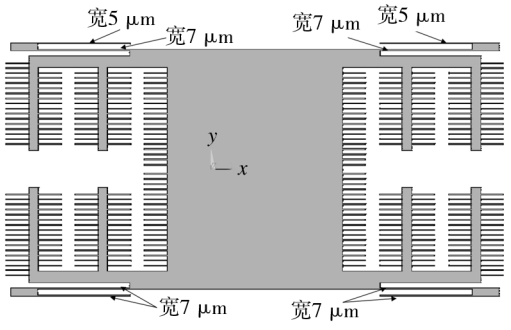

图 4　不对称结构仿真模型

Fig. 4 Unsymmetrical structure sinulation model

当质量块整体升温 20 ℃时，结构膨胀变形，梳齿在 y 方向发生不同程度的位移，见图 5。

图 5 中，位于 y 轴正方向上的梳齿沿这一方向上的位移，大于 y 轴负方向上的梳齿在负方向上的位移。说明弹性梁的宽度发生部分变化后，结构不再对称。结构受热变形时，在刚度较小的一侧发生的位移大于另一侧的位移。

当质量块的上下表面存在 20 ℃的温差时，结构

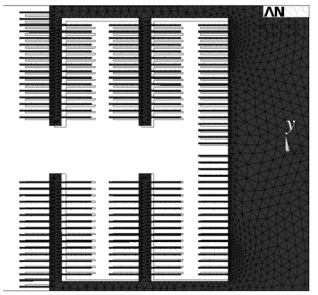

图 5　不对称结构均匀受热变形情况

Fig. 5 Unsymmetrical model under uniform heating

整体发生上拱变形，同时梳齿在 y 方向发生不同程度的位移，见图 6。

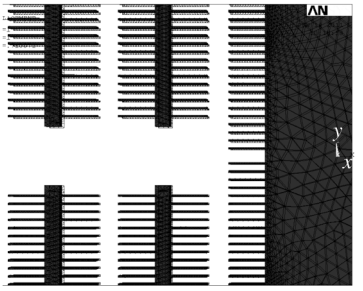

图 6　不对称结构非均匀受热变形情况

Fig. 6 Unsymmetrical model under non-uniform heating

仿真结果表明，由于结构的不对称，弹性梁变窄的一侧的刚度减小，即结构在 y 轴正方向上的刚度低于 y 轴负方向上的刚度，因此结构膨胀变形时，y 轴正方向上的位移大于 y 轴负方向上的位移，形成差动电容的梳齿的位移不再相同，电容的变化量不再为 0，因此传感器的输出会发生变化。

下面通过试验测试温度的变化对传感器的输出造成的影响。

3　温漂试验

温漂试验在恒温箱中进行，试验过程中，将传感器水平放置在温箱中，设定所需要的温度值，在每个温度点下记录传感器的输出。

恒温箱从 20 ℃上升至 27 ℃时，传感器的输出时域曲线见图 7，测试过程中每分钟采样一次，连续采样 3 h。由于恒温箱具有热惯性，当温度增加至设定值后，温度仍会继续上升一定数值，随后再降至设定温度，因此在测试刚刚开始的 15 min 内，温箱内的温

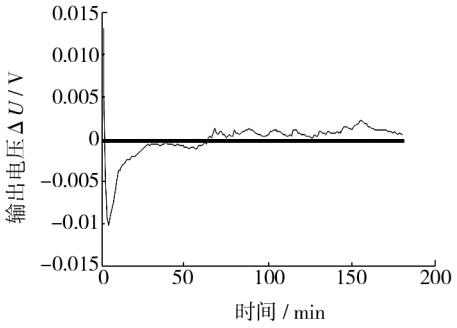

图 7 传感器温漂测试过程

Fig. 7 Temperature test of the accelerometer

度上升过程不稳定,传感器的输出也表现出较大的变化趋势。当温箱温度稳定后,传感器的输出波动范围明显减小,在 15 ~ 180 min 的范围内,传感器的输出波动小于 3 mV。因此温漂试验过程中,每达到一个温度点后应让系统稳定 15 min,然后再进行数据记录。将加速度传感器平放在恒温箱内,将温度从室温 20 ℃逐渐上升至 60 ℃,每上升 10 ℃记录一次数据,得到的曲线见图 8。

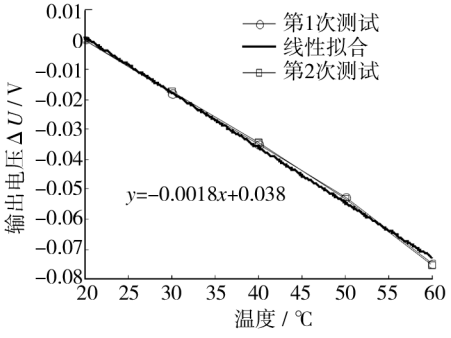

图 8 温漂拟合曲线

Fig. 8 Linear fitting curves of temperature shift test

由图 8 可知,加速度传感器的输出随温度的变化很大,当温度上升 40 ℃时,传感器的输出呈现明显的下降趋势,减小了 75.6 mV。2 次温度试验结果表明,传感器的输出与温度变化近似成线性关系,拟合直线的表达式为 $U = 0.038 - 0.0018t$,重复性误差为 0.66%。因此加工中应严格控制工艺流程,确保传感器结构对称,减小热变形。

4 结论

用于集装箱运输状态监测的电容式加速度传感器,在结构设计过程中采用对称结构,有限元分析表明:无论是均匀受热还是非均匀受热,通过差动方式均可以消除热胀冷缩对传感器输出的影响。加工误差导致结构不可能完全对称,当存在温度变化时,形成差动电容的梳齿的变化不再相同,传感器的输出会随温度的变化发生相应的改变。温漂试验结果表明:当温度上升 40 ℃时,该加速度传感器的输出降低 76 mV。加工中应严格控制工艺流程,确保传感器结构对称,减小热变形。

参考文献:

[1] 孙勇,张明辉. 集装箱的远程监控与实现[J]. 包装工程,2005,26(4):97-98.
SUN Yong,ZHANG Ming-hui. A Remote Monitoring System of Containers[J]. Packaging Engineering,2005,26(4):97-98.

[2] 周伟,刘民,姜伟,等. 两维碰撞加速度传感器及其实用化[J]. 仪表技术与传感器,2009,增刊:287-290.
ZHOU Wei,LIU Min,JIANG Wei,et al. Two-axis Acceleration Sensor for Crash Testing and Its Application[J]. Instrument Technique and Sensor,2009,Supplement:287-290.

[3] ZURCHER M A,SEMAAN M,MEGERIAN C A,et al. A MEMS Capacitive Accelerometer Design as Middle Ear Microphone Based on Ossicular Chain Micromechanic Characterization at Umbo for Fully Implantable Cochlear Prosthesis[J]. Sensor and Materials,2010,22(6):297-312.

[4] 董景新,微惯性仪表—微机械加速度计[M]. 北京:清华大学出版社,2002:100-102.
DONG Jing-xin. Micro Inertial Instrument-Micro Machined Accelerometer[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2002:100-102.

[5] 王涛. 三轴硅微加速度计的集成设计与实现[D]. 西安:西北工业大学,2006.
WANG Tao. Integrated Design and Manufacture of Three Axis Micro Machined Accelerometer[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnique University,2006.

[6] 胡雪梅. 微机械电容式加速度计的系统分析[D]. 西安:西安电子科技大学,2006.
HU Xue-mei. Systematic Analysis On Variable-Capacitance Micromechanical Accelerometer[D]. Xi'an:Xidian University,2006.

(下转第 141 页)

必须适应战场部署要求，因此对包装设计要求最高，试验也最严酷，其他各类包装设计要求及试验考核依次降低。

参考文献：

[1] MIL-STD-1904A, Design and Test Requirements for Level A Ammunition Packaging[S].

[2] GJB 4239—2001，装备环境工程通用要求[S].
GJB 4239－2001, Enviromental Enginer General Requirements for Materiel[S].

[3] MIL-STD-1660, Design Criteria for Ammunition Unit Loads [S].

[4] MIL-DTL-6060E, Envelope, Packaging, Water－Vaporproof, Flexible[S].

[5] MIL-STD-648D, Specialized Shipping Containers[S].

[6] MIL-DTL-27166E, Valve, Pressure Equalizing, Gaseous Products[S].

[7] MIL-STD-2073-IE, Standard Practice for Military Packaging [S].

[8] MIL-STD-1905A, Design and Test Requirements for Level B and Level C Ammunition Packaging[S].

[9] 王玲，杨万均，张世艳，等. 热带海洋大气环境下电连接器环境适应性分析[J]. 装备环境工程，2012，10(6)：5－9.
WANG Ling, YANG Wan-jun, ZHANG Shi-yan, et al. Environmental Worthiness Analyses of Electrical Connectors in Tropic Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 10(6): 5－9.

[10] 易平，何建新，杨秀清，等. 3 种高分子材料自然环境多角度暴露对比试验[J]. 表面技术，2011，36(2)：18－20.
YI Ping, HE Jian-xin, YANG Xiu-qing, et al. Naturl Environment Multi-angle Exposure Contrast Test about Three Kinds Polymer Materials[J]. Surface Technology, 2011, 36 (2): 18－20.

[11] 陈秦，魏薇，肖冰，等. 国外武器装备 RCS 测试外场研究现状[J]. 表面技术，2012，37(5)：129－132.
Research Status of Outdoor RCS Measurement Range for Weapon and Equipment Abroad[J]. Surface Technology, 2012, 37(5): 129－132.

[12] 刘海燕，王红斌，张亚娟. 搭接结构件腐蚀疲劳试验技术装备环境工程，2012，10(6)：13－16.
LIU Hai-yan, WANG Hong-bin, ZHANG Ya-juan. The Corrosion Fatigue Test Technique of Lap Jointed Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 10(6): 13－16.

(上接第 136 页)

[7] 凌灵，陈文元，李凯，等. 微机械电容式加速度计的结构及检测技术研究[J]. 仪表技术与传感器，2008(8)：3－4.
LING Ling, CHEN Wen-yuan, LI Kai, et al. Study on Structure and Detecting Technique of Micro-accelerometer[J]. Instrument Technique and Sensor, 2008(8): 3－4.

[8] 王俊杰，罗裴. 高灵敏度差分电容检测电路的研究[J]. 武汉理工大学学报，2004，26(9)：10－16.
WANG Jun-jie, LUO Pei. High Precision Differential Capacitance Detecting Circuit for MEMS Acceleration Sensors [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 26 (9): 10－16.

[9] 潘文庚，晋耀，戴革林，等. 气动热效应对某红外导引头影响分析[J]. 装备环境工程，2011，8(1)：29－32.
PAN Wen-geng, JIN Yao, DAI Ge-lin, et al. Analysis of Aerodynamic Heating Effect on Infrared Seeker[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(1): 29－32.