

热场作用下预紧结构与压电传感器输出的研究

张 军,田 丰,钱 敏,齐亚州

(大连理工大学 机械工程学院,辽宁 大连 116024)

摘 要:压电石英三向力传感器受热影响会导致输出信号产生偏差。基于温度均匀分布假设分析了压电传感器预紧结构在温度影响下的热变形规律,得出施加在压电石英上的热应力是传感器输出信号偏差的主要原因的结论。利用有限元软件对预紧结构加热过程中压电石英所承载荷变化过程进行分析,结果表明,随着热量的流入,压电石英在预紧力施加的方向上的应力变化为 $-3\ 315\ \text{kPa}$ 。最后,基于信号偏差的分析结论改进传感器的预紧结构,并设计对比实验进行验证。在 $240\ \text{s}$ 的加热过程中,改进后测力仪的预紧方向输出信号变化不大于 $4\ \text{mV}$,能够抑制由温度变化引起的输出信号偏差,提高测试准确性。

关键词:压电传感器;预紧结构;热应力;信号偏差

中图分类号:TN384;TH823 **文献标识码:**A

Study on Pre-tightening Structure and the Output of Piezoelectric Sensor under Thermal Field

ZHANG Jun, TIAN Feng, QIAN Min, QI Yazhou

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Signal of piezoelectric quartz force sensor has an offset in the influence of thermal. The thermal deformation of pre-tightening structure is analyzed under the hypothesis of uniform temperature, indicating that the thermal stress is the main reason of the offset. The change of thermal stress is analyzed by FEA software. The result shows that thermal stress of the piezoelectric quartz changes $-3\ 315\ \text{kPa}$ on the pre-tightening exerted direction. Finally the preload structure is improved and a contrast experiment is designed. During $240\ \text{s}$ process of heating, the output of improved dynamometer on the pre-tightening exerted direction changes less than $4\ \text{mV}$, which indicates that the improved dynamometer can restrain the offset in the influence of thermal and improve the accuracy of measurement.

Key words: piezoelectric sensor; preload structure; thermal stress; signal offset

0 引言

石英压电材料以其本身高刚度、高灵敏度等良好的物理特性,在推力矢量、机械加工、动态力及冲击力测量领域有着广泛应用^[1-3]。压电传感器需要施加预紧力,用以改善测试系统的静态性能,获得足够的摩擦以传递切向力。预紧力的方式主要为弹性力预紧,常见的预紧结构有螺栓预紧、螺栓盖板预紧和弹性结构预紧等。螺栓作为预紧元件在受到热影响时,预紧力的大小会发生变化^[4-5]。在对金属切削等明显发热的过程进行测试时,热量作用于测力仪内的预紧螺栓,改变预紧力。预紧力变化引发的误差信号叠加在传感器输出信号中,导致测试信号产生偏差^[6-8]。随着热量的持续传入,偏差趋于明显,

影响测试精度。针对不同原理的力学传感器受温度变化影响,目前有许多补偿算法修正偏差的信号^[9-12],但由于热应力变化导致信号偏差的过程较复杂,均有一定的局限性。本文通过理论分析及有限元法对通过螺栓预紧的压电石英传感器进行热应力分析,改进预紧结构,通过对比实验,验证该改进的合理性。

1 预紧结构热应力分析

1.1 热应力分析

图1为测力仪结构示意图。图1(a)中,压电三向力传感器夹于上、下两压块中间,通过螺栓施加预紧力。假设传感器未受到任何外力作用,则理想的输出信号 $v=k\Delta F=0$ 。其中 k 为测试系统的力/电

收稿日期:2015-12-09

作者简介:张军(1969-),男,吉林长春人,副教授,主要从事传感测控领域的研究。

转化系数且 $k \neq 0$ 。另外,假设整个结构各部位温度均匀且一同变化,不考虑各金属结构间的材料差异,施加预紧力后压电传感器的高为 L_0 ,温度变化为 ΔT 。

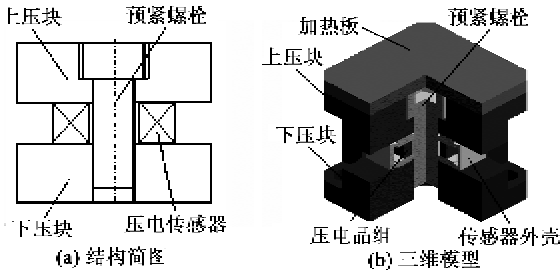


图1 测力仪结构示意图

在没有任何约束的情况下,传感器的长度变化 $\Delta L_1 = \alpha_1 \Delta T \Delta L_0$,螺栓的长度变化 $\Delta L_2 = \alpha_2 \Delta T \Delta L_0$ 。根据螺栓与传感器之间的作用力有

$$A_1 E_1 \frac{\Delta L - \alpha_1 \Delta T L_0}{(1 + \alpha_1 \Delta T) L_0} = -A_2 E_2 \frac{\Delta L - \alpha_2 \Delta T L_0}{(1 + \alpha_2 \Delta T) L_0} \quad (1)$$

式中: A_1 为石英传感器的等效截面积; E_1 为传感器的弹性模量; A_2 为预紧螺栓的等效截面积; E_2 为螺栓的弹性模量; ΔL 为传感器的高度变化量。则传感器受到的热应力变化量

$$\Delta F_T = A_1 E_1 \frac{\Delta L - \alpha_1 \Delta T L_0}{(1 + \alpha_1 \Delta T) L_0} = \frac{A_1 A_2 E_2 (\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T}{A_2 E_2 (1 + \alpha_1 \Delta T) + A_1 E_1 (1 + \alpha_2 \Delta T)} \quad (2)$$

综上所述可知,由于石英和金属材料的热胀率不一,即 $\alpha_1 \neq \alpha_2$,则温度的变化,会导致传感器的受力状态产生相应的变化,且 $\Delta F_T \neq 0$,对应测试在测试过程中,这一变化同样产生的测试信号为

$$v_{zT} = k \Delta F_T \neq 0 \quad (3)$$

该信号与正常测量的输出不同,属于热应力变化引起的误差信号,在测试过程中,该信号将叠加入有用的被测信号中导致信号产生偏差。

1.2 螺栓预紧结构有限元分析

采用有限元法对螺栓预紧的测力仪进行分析,对恒功率热源加热下传感器晶组所受到的热应力变化的过程进行仿真。所使用的测力仪三维模型如图1(b)所示,在测力仪的模型上建立加热板模型作为热源,在仿真分析中由该结构按照设定的功率产生热量。另外,为了更贴近压电晶组实际工作的情况,传感器的模型分为压电晶组和传感器外壳两部分,晶组的截面积为 180.42 mm^2 。

在 Ansys-workbench 软件中对各个结构设置相应的材料及材料的物理、机械特性参数,其中,加热板、上压块、预紧螺栓、下压块使用设定的材料为

45#碳素钢,传感器外壳设定的材料为不锈钢,传感器内部晶组的材料设定为石英。各材料的热物理特性如表1所示^[13]。

表1 各材料物理性能及所用结构

材料	45#	不锈钢	石英
比热/[J/(g·°C)]	0.469	0.502	0.670
导热系数/[J/(cm·s·°C)]	0.481 0	0.163 0	0.007 1
线胀系数/(10 ⁻⁶ /°C)	11.59	16.60	9.30

仿真中设定传热过程时间长度为 240 s,设置不同的加热功率对加热升温过程进行多次仿真,求解热应力变化的差异。仿真时间为 240 s 时晶组三向应力变化如表 2 所示。

表2 晶组三向应力有限元仿真结果

加热功率/W	τ_x /kPa	τ_y /kPa	σ_z /kPa
50	-1.769	0.491 3	-662.6
100	-3.536	0.984 0	1 325.0
150	-5.303	1.478 0	-1 989.0
200	-7.069	1.974 0	-2 652.0
250	-8.834	2.471 0	-3 315.0

结果表明,晶组所受三向应力都发生了变化,加热功率越高,应力变化越明显。相较于 x 、 y 两向, z 向的应力发生了明显的变化,具体的变化过程如图 2 所示。

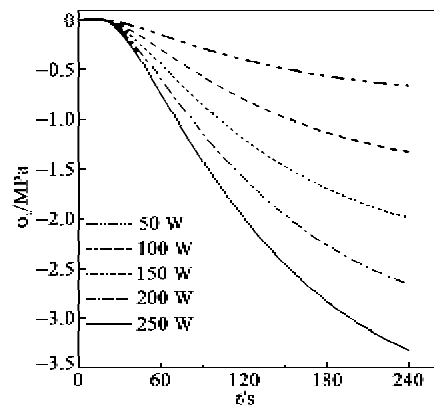


图2 不同功率热载荷下晶组 z 向应力变化

在加热开始的前 30 s 内, z 向应力变化缓慢,30 s 后随着热量继续传入, z 向应力开始发生明显变化,且变化速率加快。随后,结构中的温度场开始趋于稳定,在仿真时间进行到约 120 s 时,应力变化速率开始放缓。在 240 s 时,50 W 加热功率条件下的仿真结果趋于稳定。通过晶组模型的截面积进行力值估算,在 50 W 和 250 W 加热功率下,240 s 时晶组在 z 向上受到的挤压力分别为 119.1 N 和 598.9 N。

结合三维模型及仿真的结果可知,在受热过程中,测力仪结构各个部位吸收的热量不同,且各种材料的热胀率不一致,使螺栓的预紧力发生变化,导致晶组的应力变化主要发生在预紧力施加的方向上;

2 预紧结构的改进

改进原有的预紧结构,设计了如图 3 所示的测力仪。施加预紧力的方法是使用一个长螺栓同时对两个传感器进行预紧。两个传感器在空间中安装的朝向一致。传感器之间夹着承力结构,承力结构感受被测量的外力,并将外力传递给两个传感器。螺栓与承力结构不接触,从而避免了承力结构将外力直接传递给压块等其他结构而不经传感器的情况。由两个传感器安装的方向、位置可知,承力结构所受外力 ΔF 与传感器受力 ΔF_1 、 ΔF_2 及传感器的输出信号 v 的关系为

$$\begin{cases} v = v_1 + v_2 = k_1 \Delta F_1 + k_2 \Delta F_2 \\ \Delta F = \Delta F_1 - \Delta F_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: k_1 、 k_2 为传感器 1、2 的力/电转化系数; v_1 、 v_2 为两个传感器的输出信号。调节两个传感器的转化系数,使 $k_1 = -k_2 = k$, 则

$$v = k(\Delta F_1 - \Delta F_2) = k\Delta F \quad (5)$$

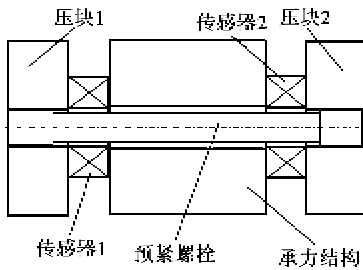
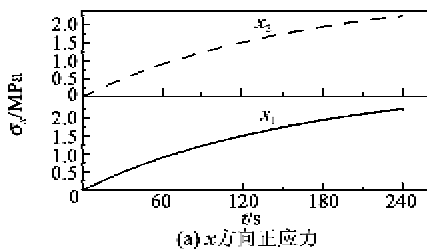
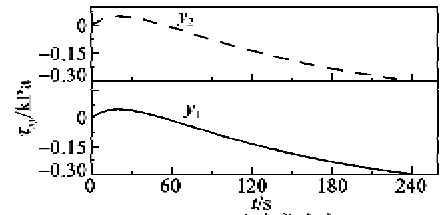


图 3 改进的预紧结构示意图

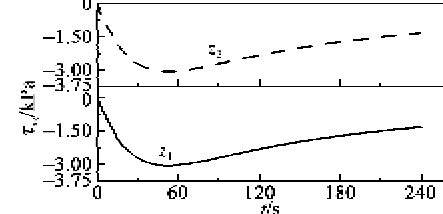
在有限元软件 Ansys-workbench 中对改进的预紧结构进行热应力分析,其中,晶组材料设定为石英,传感器外壳材料为不锈钢,其余结构材料设定为 45# 碳素钢。通过加热板的模型作为热源直接对承力结构进行加热。加热状态下测力仪中两个传感器晶组所受到的热应力变化的过程如图 4 所示。



(a) x 方向正应力



(b) xy 方向剪应力



(c) xz 方向剪应力

图 4 改进后的测力仪晶组三向热应力变化

结果表明,相较于另外两向,两个传感器在预紧力施加的方向即 x 方向上应力发生明显的变化,在最后时刻应力变化为 2.26 MPa。但由于二者之间对于预紧力是刚性串联关系,因此二者的大小和方向始终是相同的, y 、 z 向同样也存在应力变化,变化的大小、方向也相同。因此在热影响下,两个传感器受力变化 $\Delta F'_1$ 和 $\Delta F'_2$ 是相同的,即 $\Delta F'_1 = \Delta F'_2$ 。则两个传感器的偏差的信号 v'_1 和 v'_2 的关系为 $v'_1 = -v'_2$ 。于是在热应力干扰下测力仪输出

$$v' = v_1 + v_2 + v'_1 + v'_2 = v_1 + v_2 = v \quad (6)$$

由式(6)可知,在信号的解算过程中,两个传感器的偏差信号能够通过加和计算互相抵消,使得最终的传感器输出能更准确地表达出所需要测量的外力。

3 预紧结构加热实验

为了验证改进的预紧结构对于热影响的输出特性,设计了一组对比实验,实验方法如图 5 所示,测力仪放置于平面上,顶部压上加热板,传感器的输出信号通过电荷放大器、数据采集卡的转换、放大采集后由计算机进行处理、显示。

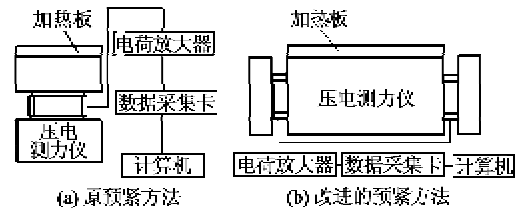


图 5 加热对比实验示意图

实验前,调试各传感器的三向输出,使得输出对输入的转化系数为 1 mV/N,各静态参数均满足三向力测试的要求。0 时刻时接通加热板电源,加热

板的额定电压为 100 V 额定电流 2 A,持续加热时间为 240 s。加热过程中,不对测力仪施加任何外部载荷。比对两组测力仪的输出随时间的变化,评价测力仪对热影响的输出特性。结果如表 3 所示。

表 3 测力仪输出随时间变化

		时间/s			
		0	60	120	240
		输出/mV			
原结构	x	0	-1.82	-3.13	-4.53
	y	0	2.15	2.68	2.35
	z	0	-23.18	-101.93	-282.83
改进结构	x_1	0	-38.88	-147.93	-393.75
	x_2	0	36.17	144.20	394.11
	x	0	-2.71	-3.73	0.36
	y_1	0	-1.21	-4.29	-9.61
	y_2	0	0.01	-0.16	-1.19
	y	0	-1.20	-4.45	-10.80
	z_1	0	0.24	-0.79	-2.72
	z_2	0	-0.68	-1.91	-4.52
	z	0	-0.44	-2.53	-6.24

由表 3 可知,两组测力仪在热影响下内部都发生了热应力变化,且随着时间的增加变化趋于明显。加热时间为 240 s 时采用原预紧法的测力仪在 z 向输出为 -282.83 mV,采用改进预紧方法的测力仪在 x 向两个传感器输出分别为 -393.75 mV 和 394.11 mV。产生明显输出的方向均为预紧力施加的方向。而与预紧力施加方向正交的两向输出均有较微弱的变化,在允许的范围内。

测力仪在预紧方向上的输出-时间曲线如图 6 所示。测力仪的输出在实验刚开始的阶段没有明显的输出,30 s 后输出变化明显且逐渐加快并最终趋于一条斜线。采用原预紧结构的测力仪在 z 向上的输出为传感器自身的输出,并不符合实验中没有外力输入的工作情况,并且实验结果基本符合有限元分析中晶组受热应力变化的结果,说明该偏差是由预紧结构热变形造成的。改进的测力仪的两个传感器在预紧力方向同样产生了较大输出,但两者的大小基本相等,输出信号的符号相反。测力仪的输出为两路信号的加和,始终靠近 0 的水平线,且实验过程中最大的输出信号变化不大于 4 mV,输出结果与实验中无外力输入的实际情况相符。说明测力仪的输出能消除预紧结构热变形对测力仪输出的影响,还原有用的测试信号。

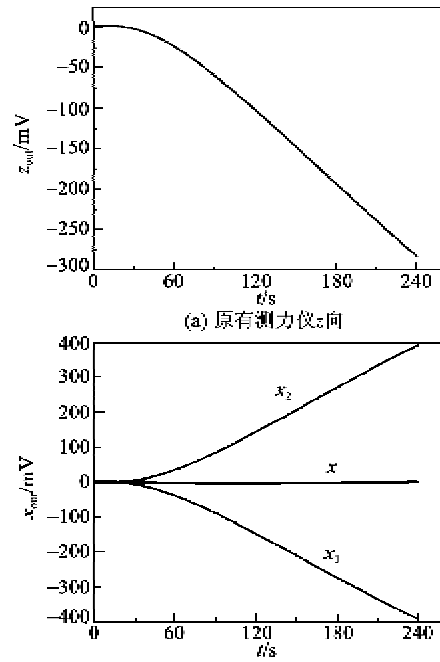


图 6 预紧方向测力仪输出-时间曲线

4 结束语

对压电石英三向力传感器受热影响导致输出信号偏差问题进行研究。预紧结构受热变形引起的晶组受力变化是传感器输出偏差的主要原因。

基于原预紧方法及信号偏差原因分析,提出压电石英传感器预紧结构的改进方法,使被测的外力完全地作用于传感器上,通过传感器输出信号与力矢量数学关系的解算,消除温度变化对压电测力仪输出的影响。设计相应的对比实验进行验证,结果表明,改进后的预紧结构能够符合设计预想,消除温度变化对压电测力仪输出结果的影响。

参考文献:

[1] 任宗金,贾振元,王浩然,等.基于压电式传感器的力矢量测量模型研究[J].压电与声光,2012,34(3):380-383.
REN Zongjin, JIA Zhenyuan, WANG Haoran, et al. Research on the force vector measurement model based on the piezoelectric sensor[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2012, 34(3): 380-383.

[2] 韩丽丽,孙宝元,钱敏.新型压电三向钻削测力仪的设计与实验研究[J].压电与声光,2007,29(3):283-285.
HAN Lili, SUN Baoyuan, QIAN Min. The design and experiment of new piezoelectric three-direction drilling dynamometer [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2007, 29(3): 283-285.

(下转第 1002 页)