

# 压电双晶片在眼压测量中的实验研究

田学隆, 向 逾

(重庆大学 生物工程学院, 重庆 400044)

**摘要:**介绍了一种利用压电双晶片的逆压电效应来测量眼压的方法及其装置。该方法建立了流过晶片的电流和眼球内部压强的关系,通过检测的电流值来测量眼压值。实验表明,该方法操作简便,可行性较好,有一定的临床应用前景。该文还给出了实验结果和误差分析。

**关键词:**压电双晶片;振动;眼压;曲线拟合

**中图分类号:**TN384;TH786 **文献标识码:**A

## The Experiment and Research for Piezoelectric Bimorphs in Measuring Intraocular Pressure

TIAN Xuelong, XIANG Yu

(College of Bioengineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** A method taking the effect of the anti-piezoelectricity of the piezoelectric bimorphs to measure intraocular pressure was proposed. This method established relationships between current washing through the bimorphs and intraocular pressure. Then the result of intraocular pressure was valued by the measured current. The experiment showed that it was practicable and simple for operation and with some application prospect in clinic. Experiment results and error analysis were also given in the paper.

**Key words:** piezoelectric bimorphs; libration; intraocular pressure; curve fitting

眼压是某些疾病(如青光眼、颅内压等)的重要诊断依据和观察病情、评价疗效、估测预后等几个方面的重要指标之一。常用接触式眼压计直接接触角膜,需要较高的专业水平及患者配合,同时还需使用辅助设备,测量结果受中央角膜厚度等因素影响,易感染,患者需坐姿;常用非接触式眼压计是通过气体脉冲力将气体喷射到角膜中央的表面,当形成一定圆形平面时直接得出眼压数值。此方法快速,不会发生交叉感染,但对高度散光、角膜混浊等不宜用,患者也需坐姿,且价格高。本文利用压电双晶片所具有的体积小,分辨率高,响应快,推力大,不产生噪声等优点<sup>[1]</sup>,应用压电双晶片作为传感器进行了接触角膜的眼压检测研究。期望能提供一种新的简便易行的眼压检测方法。

### 1 基于压电双晶片眼压测量原理

#### 1.1 压电陶瓷的谐振特性

根据逆压电效应,在压电晶片介质的极化方向上施加电场,这些电介质也会发生变形。对于一片经过极化处理的压电陶瓷,按图 1(a)电路连接,当

信号频率缓慢的从低频到高频变化时,通过压电陶瓷的电流随着输入信号的频率变化而变化。从图 1(b)可看出,当信号频率为某一频率  $f_m$  时,通过压电陶瓷振子的传输电流出现最大值  $I_{max}$ ;而当信号频率变为另一个频率  $f_n$ ,传输电流出现最小值  $I_{min}$ ,由此可看出,压电振子的等效阻抗  $Z$  随频率而变化。继续提高信号源频率,会有规律地出现一系列的电流次最大值和次最小值,其相应的频率分别为  $f_{m1}, f_{n1}$  和  $f_{m2}, f_{n2}$ <sup>[2]</sup>。

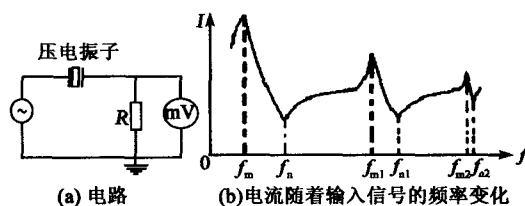


图 1 压电陶瓷的谐振特性

#### 1.2 基于逆压电效应的原理分析

##### 1.2.1 压电双晶片结构解析

压电双晶片大多使用两片极性方向相反,但在机械上以串联方式的压电陶瓷薄片胶黏在一起,在

收稿日期:2008-10-07

基金项目:重庆市“十一五”科技重大专项“新型医疗器械”基金资助项目(CSTC2008AA5010)

作者简介:田学隆(1957-)男,四川隆昌人,教授,硕士生导师,主要研究方向为生物医学电子工程。向逾(1982-)男,硕士生,主要研究方向为生物医学信息检测与处理,医疗器械开发。

一张磷铜片两侧各粘附上一片压电陶瓷片,其在谐振频率附近的空载等效电路如图2所示。图中 $R_1$ 为介质损耗电阻, $C_1$ 为两极间的静态电容, $R_0$ 为和振子机械损耗相应的等效电阻。 $C_1$ 和 $R_1$ 并联支路反映了压电振子材料的介电性质, $R_0$ 、 $C_0$ 、 $L_0$ 串联支路反映了压电振子的机械振动性质。这样的结构在电路上以并联方式连接用以改善其机械性能及机电特性。如此在电场激励下,当施加电压的方向与极化方向相同时,压电陶瓷换能器伸长,反之,收缩。这样,其中一片陶瓷薄片收缩变形,另一片则产生伸张变形,由于两片陶瓷薄片黏结成一体,在相互作用下则会衍生出双侧伸缩振动<sup>[3]</sup>。

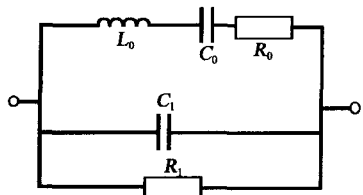


图2 压电双晶片的等效电路图

双晶片的电场分布均匀,且垂直于长度。此时在交变正弦波电压控制下,产生一个激振力按简谐运动规律做周期变化,其输入输出电压函数关系为

$$V_i = V_o \cdot \sin \omega t \quad (1)$$

式中  $V_o$  为压电双晶片的输出激振电压; $V_i$  为输入激励电压; $t$  为时间; $\omega$  为激振角频率<sup>[4]</sup>。

1.2.2 压电双晶片的连接

图3为压电双晶片的连接方式。中间的金属薄板为输出端,两侧的压电陶瓷为两路反相正弦信号输入端<sup>[5]</sup>。

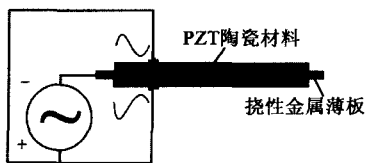


图3 压电双晶片连接方式示意图

1.2.3 压电双晶片眼压传感器结构和测量原理

图4为压电双晶片构成的传感器结构。压电双晶片和接触杆构成振动单元。其两侧的压电陶瓷分别连在驱动信号的2个输出端,两路驱动信号分别为相位相差180°的正弦信号,中间金属引出端通过1个采样电阻接地,并作为传感器的输出单元。压电双晶片两侧被2组弹性压块从两面压紧固定在基座内,同时在压电双晶片中间牢固地粘连了1个接触杆,该接触杆伸出基座直接和被测物体接触。在交流信号的作用下,压电双晶片产生垂直于其表面方向上的谐振,同时接触杆也发生同样的谐振。接触杆必须垂直于压电晶片表面牢固粘贴。为增大晶

片的振幅和带负载能力,提高精度,接触杆应尽量轻(实验中接触杆的质量为5.3g,底部接触面积为63.6mm<sup>2</sup>)。

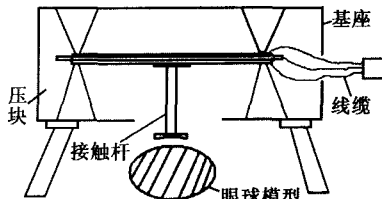


图4 压电双晶片传感器主体构造示意图

当接触杆接触被测物体时,被测物体也随着双晶片振动,接触时的等效电路和图2基本相同。当保持恒定交流电压时,流过的电流随其振动频率而变化。双晶片的输出信号为非线性<sup>[6]</sup>,已知被测物体的不同压强值,可测得在一定频率范围内流过压电双晶片的电流和输入信号频率关系的多组数据,分析各组的线性度后再对某一频率下的最优数据进行曲线拟合,可得出一个电流与压强的拟合关系式。将已知压强值设定为人眼可能具有的范围,如果检测出电流值,则可由此关系式得出相应的眼压值。

1.3 实验装置硬件系统设计

图5为眼压检测实验装置的组成原理框图。由于期望在已极化后的压电双晶片产生连续的双边位移振动,需要在压电双晶片两侧输入较大幅值和一定功率的2个反相的正弦信号。信号发生器输出一定电压幅值和频率的正弦信号作为压电双晶片的原始驱动信号<sup>[7]</sup>,该信号分别经电压跟随器和倒相器后,形成一对反相的交流信号并进入功率放大器。这对反相信号要做到任意时刻幅值的绝对值相同,相位相反,以便压电双晶片做等幅谐振。经功放放大后的信号要有足够的幅值和功率,能驱动后续的压电双晶片。由于压电双晶片属于电压驱动,该型号的驱动电压阈值为40~60V,故在功率放大器提供足够驱动功率下,要有足够的电压,否则晶片没有输出。所以,用一个脉冲升压变压器分别对这对反相正弦信号升压,升压后送入双晶片。

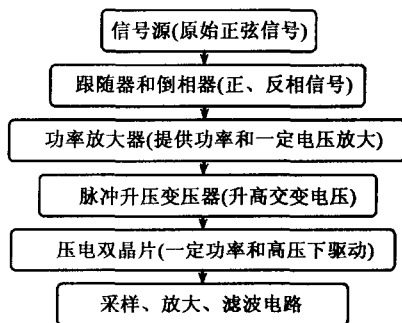


图5 测量装置组成框图

## 2 系统设计要点

在实验研究设计过程中,需要注意以下几点:

(1) 所选功率放大器属于 AB 类功放,尽管其内部有过压、过热保护,最好给功放加装大面积散热片以便良好散热,同时在输入端串联一个电阻限流,以及加大输出端并联支路的电容值以减小自激。压电陶瓷相当于容性负载,由于压电陶瓷(PZT)材料的介电常数较大,所以压电陶瓷的电容  $C$  较大,则双晶片与前面驱动电路的输出电阻  $R$  构成  $RC$  回路,这不但影响压电双晶片的动态特性<sup>[8-9]</sup>,同时可能让前面的功放产生自激,造成功放严重发热。

(2) 对功放输入一定幅值的正弦信号,必须确保功放工作在线性放大区,可结合硬件电路计算出功放最大输入电压的有效值。如果输入电压超过了此值,则功放发生波形失真。这对实验没有任何意义。所以应调整信号发生器的信号输出幅值,保证功放不发生饱和和失真。

(3) 降噪设计。实验可能出现的几种噪声:

a. 声噪声。压电传感器在强声中工作将受到声波振动激励而产生寄电信号输出,称为声噪声。

b. 电缆噪声。同轴电缆在振动或弯曲变形时电缆屏蔽层,绝缘层和芯线间将引起局部相对滑移摩擦和分离,而在分离层之间产生的静电感应电荷干扰,它将混入主信号中被放大。

减小电缆噪声的方法:

- ① 在使用中固定好传感器的引出电缆。
- ② 选用低噪声同轴电缆。

③ 接地回路噪声。传感器接入二次测量线路或仪表而构成测试系统后,由于不同电位处的多接地点,形成了接地回路和回路电流所致。克服途径:消除接地回路。可将传感器置入合适的外壳。

(4) 压电双晶片具有温度特性。随着晶片的振动,晶片本身温度有一定上升,不同幅值的输入信号引起的发热量不同,且流过本身的电流会随着温度的变化而变化,所以,必须采取措施消除温度漂移的影响。其方法是等到晶片温度饱和和稳定后再测量。

## 3 实验方法及结果分析

不同规格的压电双晶片的电流、机电耦合系数、位移、灵敏度等参数特性与压电材料参数、晶片几何尺寸有关系<sup>[10-11]</sup>。实验采用常州武进攀特公司的压电双晶片作为实验材料。其部分主要参数如表 1 所示。

表 1 实验样品参数表

PZT 材料(长×宽×厚)/mm	49.5×15×0.2
金属片(长×宽×厚)/mm	56×7.9×0.1
输入电压/V	≤200
PZT 材料	NI42
工作频率/Hz	≥15

在实验中,采用猪眼球作为实验对象。由于猪眼球生理参数和人眼基本一致,且其肌肉纤维在压强变化下体积基本不变,满足实验要求。固定猪眼球使其角膜面向上放置,将盛有 0.9% 标准生理盐水的容器通过一个注射针插入猪眼后端的视神经与玻璃体相通。正常人眼压为 1 466~2 799 Pa。改变容器的高度使其与猪眼球产生压差,在 0~6 864 Pa 压差内每隔 980 Pa 分别设置 8 组压差。将接触杆轻微接触猪眼角膜表面,保存放大器输入信号幅度恒定,改变输入信号频率,用泰克 1002 数字示波器记录采样电阻上电压的均方根值。图 6 为示波器所测压电晶片放大后的输出信号。

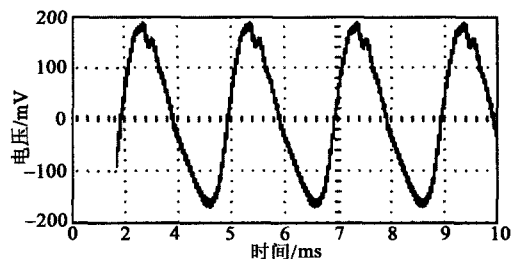


图 6 示波器上压电双晶片的输出信号

针对压电晶片输出较稳定的特点,本文选取特征和线性度最理想的 500~900 Hz 频率作为测量范围,采样电阻 40.6 Ω,每隔 10 Hz 做一次记录。图 7 为猪眼球分别在 8 种压差下的散点折线图,共 8 组每组 41 个数据。

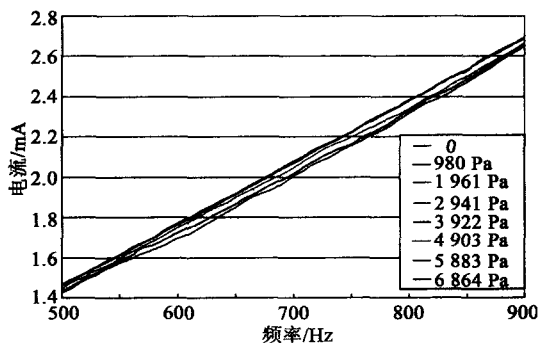


图 7 猪眼球所测电流和频率的关系曲线

根据图 7 可得出,每组数据的变化规律基本一致,各组数据没有交叉点;且在上述频率内,压强越大,电流值越大。用 Matlab 对各个频率下电流和电压进行关系曲线拟合,然后作每条曲线的线性度分析。结果表明,压差 > 3 922 Pa 时决定系数 ( $R^2$ ) 普

遍偏小,而压差 $\leq 2\ 942\ \text{Pa}$ 则有良好的决定系数,说明在 $0\sim 2\ 942\ \text{Pa}$ 内可做近似线性拟合处理;压差 $> 3\ 922\ \text{Pa}$ 的曲线几乎重合,说明该装置最大可测量值在 $3\ 922\ \text{Pa}$ 。统计结果显示,在 $670\ \text{Hz}$ 处的曲线具有最高的线性度( $R^2=0.998\ 2$ ),则可得出该频率下的拟合方程为

$$y=(-1.361\times 10^4+0.710\ 97\times 10^4\ x)\times 9.8 \quad (2)$$

式中  $y$  为压强; $x$  为电流。

表 2 为拟合直线的误差分析结果。

表 2 670 Hz 频率下拟合直线的误差分析结果

实际压强/Pa	计算压强/Pa	电流/mA	误差/%
980	1 058	1.928 57	1.835
1 961	2 029	1.943 35	3.459
2 942	2 887	1.955 66	1.844

#### 4 结论

本文针对临床眼压计的应用趋势,整合专利文献,阐述了一种利用压电双晶片作为传感器的眼压测量的原理和检测方法,并进行了基于压电双晶片的眼压测量实验,得出结论:

(1) 实验了一种新颖的运用压电陶瓷逆压电效应特性的眼压检测技术方案,并在此基础上作进一步接触眼睑实验。为人体眼压的检测和其他相关病症的检查提供了一种新的临床手段。

(2) 该眼压测量实验装置结构简单、操作方便,在某个频率范围内有较好的线性度,误差较小,表明该方法具有一定的实用性和可行性。

基于压电双晶片的眼压检测实验结果与电流检测精度、压电双晶片自身品质等因素密切相关。

#### 参考文献:

- [1] 赵丽,壮凌,张春林,等.压电陶瓷控制系统及其在激光器中的应用[J].压电与声光,2007,29(5):550-552.  
ZHAO Li, ZHUANG Ling, ZHANG Chunlin, et al. The piezoelectric ceramic controlling system and its application to laser[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2007,29(5):550-552.
- [2] 向毅,王亚军,任晓东,等.压电陶瓷的谐振特性研究[J].中国科技信息,2006(2):61.  
XIANG Yi, WANG Yajun, REN Xiaodong, et al. The characteristic of vibrating in piezoelectric research[J]. China Science and Technology Information, 2006(2):61.
- [3] 葛杨翔,王东生,李玉和,等.压电双晶片的静态特性分析与测量[J].压电与声光,2006,28(5):621-623.  
GE Yangxiang, WANG Dongsheng, LI Yuhe, et al. Analysis and measurement of the static and dynamic characteristics of piezoelectric bimorph[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2006,28(5):621-623.
- [4] 康东.压电双晶片双向大幅振动的探讨[J].矿物岩石,2003,23(3):114-116.  
KANG Dong. Approach of piezoelectric duplex crystal used in two-way vibrating[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2003,23(3):114-116.
- [5] 学校法人早稻田大学.压力测量方法、压力测量装置和眼压计[P].日本专利:A61B3/16(2006.01)I, CN101026 990A,2007-08-29.
- [6] 孙立宁,孙绍云,曲东升,等.基于PZT的微驱动定位系统及控制方法的研究[J].光学精密工程,2004,12(1):55-59.  
SUN Lining, SUN Shaoyun, QU Dongsheng, et al. Micro-drive positioning system based on PZT and its control[J]. Optics and Precision Engineering, 2004,12(1):55-59.
- [7] 冯晓光,赵万生,栗岩,等.压电陶瓷微位移驱动电源及减小其纹波的方法[J].压电与声光,1997,19(1):35-38.  
FENG Xiaoguang, ZHAO Wansheng, LI Yan, et al. Power supply for piezoelectric actuators and a method of abating ripple voltage[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 1997,19(1):35-38.
- [8] 唐英,崔咏琴,周友来,等.压电陶瓷动态驱动电源的设计与研究[J].电子技术应用,2007,(4):144-146.  
TANG Ying, CUI Yongqin, ZHOU Youlai, et al. The dynamic driving power of design and research of piezoelectric[J]. Electrical Technology and Its Application, 2007(4):144-146.
- [9] 尹德芹,颜国正,颜德田,等.压电陶瓷动态应用的新型驱动电源研究[J].压电与声光,2000,22(2):86-89.  
YIN Deqin, YAN Guozheng, YAN Detian, et al. A new driving power for dynamic application of piezoelectric ceramics[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2000,22(2):86-89.
- [10] 叶会英,禹延光,姬建伟,等.压电双晶片动态机电耦合特性分析[J].压电与声光,2002,24(5):411-414.  
YIE Huiying, YU Yanguang, JI Jianwei, et al. Analysis of characteristic of electromechanical coupling of piezoelectric bimorphs[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2002,24(5):411-414.
- [11] 叶会英,浦昭邦.压电双晶片参数及温度特性的动态测试方法[J].仪器仪表学报,2000,21(6):592-595.  
YIE Huiying, PU Zhaobang. The method of dynamic measurement for piezoelectric parameters and the dependence of temperature of piezoelectric bimorphs[J]. Chinese Journal of Scientific Instrumentation, 2002,24(5):411-414.