

文章编号 1004-924X(2006)03-0439-04

微型压电陶瓷棒角速率陀螺设计

刘武发^{1,2}, 龚振邦², 蒋 蓁²

(1. 郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 上海大学 机电与自动化学院, 上海 200072)

摘要:研制了基于微型压电陶瓷棒结构代替双敏感梁结构及压电陶瓷片的微型角速率陀螺,并设计了相敏检波电路。首先采用易于加工成高精度的微型陶瓷棒作为敏感体,在其上印刷成六个带状电极并予以极化构成三副电极对,然后设计了封装及相敏检波电路,从而有效地减小了敏感结构的尺寸,提高了其加工精度,实现了角速率陀螺微型化。标定结果表明,该角速率陀螺线性度好,相关系数为 0.9996;精度高,标准误差为 0.0036。

关键词:微型压电陶瓷棒;角速率陀螺;相敏检波电路;标定

中图分类号:U666.123 **文献标识码:**A

Design of micro piezoelectric ceramic rod angular rate gyro

LIU Wu-fa^{1,2}, GONG Zhen-bang², JIANG Zhen²

(1. College of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

2. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: This paper developed a micro angular rate gyro based on micro piezoelectric ceramic rod structure instead of the sensitive double-deck structure as well as piezoelectric ceramic strain foils, and designed a phase-sensitive detection circuit. By taking the miniature ceramic rod which is easily to machine high accuracy as sensitive structure, and by printing and polarizing six belt-shaped electrodes above it to constitute three pairs of electrodes, this paper designed package and the phase-sensitive detection circuit in the system so that it effectively reduced the sensitive structure size and improved its processing precision to realize the angular rate gyro microminiaturization. Calibration results indicate that this angular rate gyro has good linearity with correlation coefficient of 0.9996, and high precision with standard error of 0.0036.

Key words: micro piezoelectric ceramic rod; angular rate gyro; phase-sensitive detection circuit; calibration

1 引言

微型陀螺因制作材料不同有压电微型陀螺、

硅微陀螺、微型静电陀螺等。压电陶瓷材料的压电效应^[1]日益受到重视^[2-3],而微型压电陶瓷陀螺也因结构简单,体积小,响应速度高,成本低等特点应用越来越广泛。本文根据双敏感梁压电陶瓷

陀螺的基本原理及其存在的问题,设计了一种微型压电陶瓷棒角速率陀螺。

2 双梁压电陶瓷陀螺的原理^[4-5]

传统的压电陶瓷角速率陀螺由两根力学性能完全对称的矩形振梁组成,振梁为恒弹性合金钢。两端自由梁的一节频率的节点在梁全长的 0.224 和 0.776 位置处,节点处悬挂支撑。在振梁中部位置的四个面上帖有两对压电陶瓷片,在 x 轴上的一对是驱动片和反馈片, x 轴称为驱动轴;在 y 轴上的一对陶瓷片是读出片和阻尼片, y 轴称为读出轴;梁的轴向即 z 轴称为输入轴,如图 1 所示。

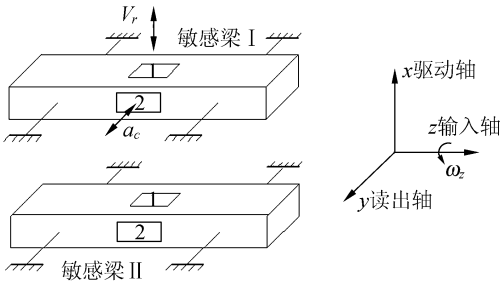


图 1 双梁结构压电陶瓷角速率陀螺模型

Fig. 1 Model of double-deck piezoelectric ceramic angular gyro

在 x 轴上对敏感梁 I、II 进行同频等幅的反向驱动,根据压电效应,梁上的压电陶瓷片将产生形变。由于敏感梁 I、II 的力学性能完全对称,因此,两个敏感梁上的对应质点将在轴向产生等幅反向振动,振动包络图如图 2 所示。

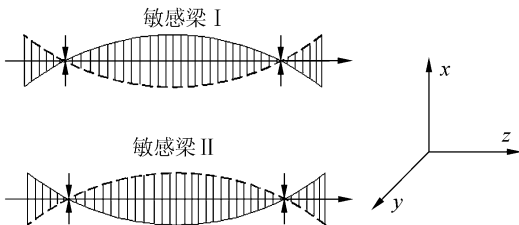


图 2 双敏感梁 x 轴向振动包络图

Fig. 2 X axis vibration amplitude of a double-deck

当敏感梁绕 z 轴的角速度 ω_z 为零时(即不绕 z 轴转动),在 y 轴方向上科氏加速度为零,在

y 轴方向上的科氏力(Coriolis force)也为零,敏感梁在 y 轴方向不产生形变,从而在 y 轴方向上的压电陶瓷片也不产生形变,根据逆压电效应,在 y 轴方向上的压电陶瓷片也就没有电势产生;反之,当敏感梁绕 z 轴的角速度 ω_z 不为零时(即绕 z 轴转动),在 y 轴方向上产生交变的科氏加速度为 $a_c = 2V_r \times \omega_z$,在 y 轴方向上产生交变的科氏力,敏感梁在 y 轴方向产生交变的形变,从而在 y 轴方向上的压电陶瓷片产生交变的形变,根据逆压电效应,在 y 轴方向上的压电陶瓷片产生交变的电势,电势的高低与压电陶瓷片的形变大小成比例。

当两只梁组合在一起后,其振动方程为:

$$y(t) + \frac{\omega_y}{Q_y} y(t) + \omega_y^2 y(t) = 4\omega_z \omega_x \omega_y \cos \omega_x t, \quad (1)$$

其中 Q_y :机械品质因数;

ω_x : x 轴驱动电压频率;

ω_z : z 轴输入角速度,即待测的角速度;

ω_y : y 轴方向梁的基波固有频率。

方程(1)的静态解为:

$$y(t) = \frac{4x_0 \omega_z}{\omega_x \sqrt{\left(\frac{\omega_y^2}{\omega_x^2} - 1\right) + \left(\frac{\omega_y}{\omega_x Q_y}\right)^2}} \cos(\omega_x t - \varphi_x), \quad (2)$$

$$\varphi_x = \arctan \left[\frac{\omega_x \omega_y}{Q_y (\omega_y^2 - \omega_x^2)} \right], \quad (3)$$

其中 x_0 是梁质点在驱动轴方向上的最大振幅。

由式(2)可知,当 x_0 、 ω_x 、 ω_y 为常值时, $y(t)$ 仅与 ω_z 成正比,而与横向线振动无关。对于 x 轴和 z 轴有相同的结论。这样就可以从机理上消除由于线振动带来的影响。

通过对 y 轴方向产生的与旋转角速度成比例的交变电势进行解调,就可以得到与旋转角速度成比例的直流电压,从而测出旋转的角速率。

3 双梁陀螺存在的问题及改进

然而,对于双梁压电陶瓷角速率陀螺,因结构而存在一些问题需要改进。

首先是其矩形敏感梁三维尺寸精密加工很困难,各梁的尺寸存在不一致性,因此导致各陀螺性能存在差异;其次是双矩形敏感梁使得陀螺的结构复杂,体积相对较大。

为了提高敏感梁的加工精度和减小陀螺的尺寸,可以把双敏感梁改为单个压电陶瓷棒,如此,不但可以有效地缩小元器件尺寸,而且高精度的陶瓷棒很容易加工。

4 微型压电陶瓷棒角速率陀螺

4.1 微型压电陶瓷棒结构

如图 3 所示为所设计的微型压电陶瓷棒结构,用于代替双矩形梁和压电陶瓷片。

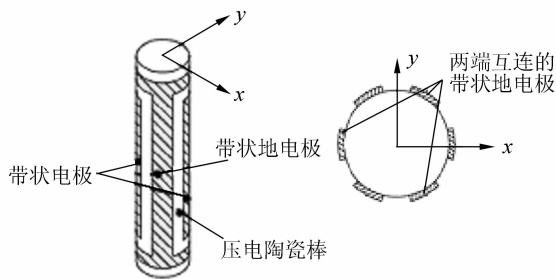


图 3 微型压电陶瓷棒结构

Fig. 3 Structure of micro piezoelectric ceramic rod

压电陶瓷棒结构是在一个高精度的圆柱形陶瓷棒上印刷有六个带状电极并予以极化,其中三个间隔的带状电极在两端互连构成带状地电极,另外三个带状电极互相独立,并和地电极构成三副电极对。这样的结构就等效于在一个圆柱棒上贴有三副压电陶瓷片。

圆柱形压电陶瓷振荡棒最大的优点是圆柱形压电陶瓷棒可用旋转加工的方法加工成很高的精度,并且可以有效地减小敏感元件(在此为压电陶瓷棒)的尺寸。

4.2 微型压电陶瓷棒角速率陀螺原理

图 4 所示为压电陶瓷角速率陀螺的原理图。它和双梁压电陶瓷角速率陀螺一样,其基本原理都是利用旋转物体产生科氏力,从而使压电陶瓷元件(在此为压电陶瓷棒)产生形变,进而产生电势,但因结构不同而又有所区别。

如图 4 所示,在激励轴 x 方向上的一对电极①上加入等幅、等频的正弦激励信号,因压电形变使陶瓷棒在 x 方向产生等频的正弦振荡。当输入轴 z 以角速度 ω_z 旋转时,在输出轴 y 上将产生交变的科氏力,从而在 y 上产生的形变会由于压

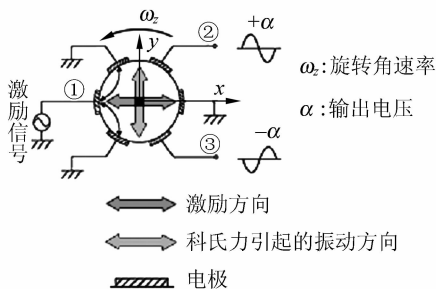


图 4 压电陶瓷角速率陀螺原理

Fig. 4 Principle of the piezoelectric gyro

电效应进而在 y 上产生交变的电压分别从电极②和电极③上输出。

4.3 微型压电陶瓷棒角速率陀螺封装

角速率陀螺的封装展开如图 5 所示,压电陶瓷棒的定位及引线如图 6 所示,整个角速率陀螺的外形尺寸如图 7 所示。陀螺由上封装基板、下封装基板、外封装、封装定位销及引脚等组成。上下封装基板用 IC 陶瓷环氧树脂基板做成,上面各有一对 90° 的“V”定位槽,且定位槽的定位刃很窄但又有合适的宽度,封装时保证激励信号电极对在垂直方向上,这样就能保证定位刃和压电陶瓷棒的非电极部分接触,并且定位刃位于陶瓷棒的一节频率的节点上,如此即可使定位刃处陶瓷棒的振动位移为零(或极小),引脚和电极之间的导线接点也位于陶瓷棒的一节频率的节点上;上下封装基板用定位销定位,然后在上下封装基板上加合适的压力,并在适当的位置和定位销上用环氧树脂固定封装,固化后去除压力;最后用外封装密封封装。

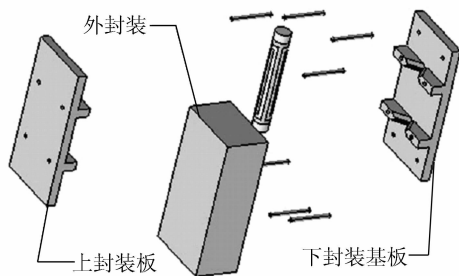


图 5 陀螺装配展开图

Fig. 5 Exploded view of the gyro assemble

图 6 表示陀螺共有四个引脚,分别为地、输入信号、“+”输出信号和“-”输出信号。

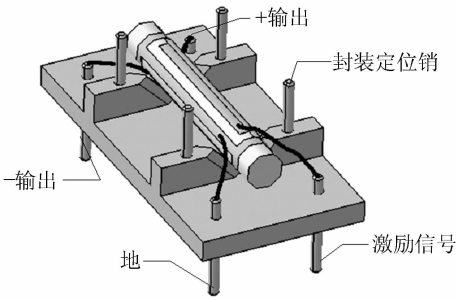


图 6 压电陶瓷棒的定位及引线

Fig. 6 Fix of piezoelectric rod and its pins

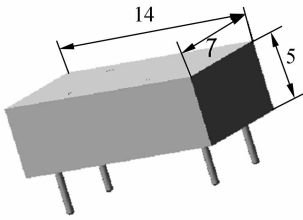


图 7 外形尺寸

Fig. 7 Outline dimension

5 相敏检波测量电路^[6]

5.1 电路功能和要求

陶瓷压电棒角速率陀螺的激励信号是等幅正弦波,其输出也为等幅正弦波,但两输出电极的正弦信号相位差为 180° 。如图 4 所示,在如图中旋转方向时,电极②输出相位超前于输出电极③ 180° ,而相反旋转方向时,电极②输出相位落后于输出电极③ 180° 。因此,所用检波测量电路不但要能够测出旋转角速率的大小,而且要能够测出旋转角速率的方向,故需要采用相敏检波测量电路。

5.2 相敏检波电路

如图 8 所示为相敏检波框图,图 9 为相敏检波电路图,它们主要由四部分组成:移相正弦波发生器,用以产生驱动和参考正弦波;减法放大电路,对陶瓷压电棒角速率陀螺两输出电极的信号予以相减并放大;相敏检波器,根据参考信号对传感器输出的放大信号予以检波,并因角速率陀螺旋转的方向不同而输出的电压极性不同;Butterworth 四阶低通滤波器。

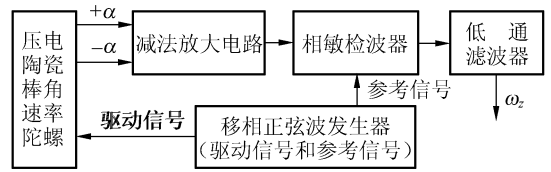


图 8 相敏检波框图

Fig. 8 Block diagram of phase sensitive detection

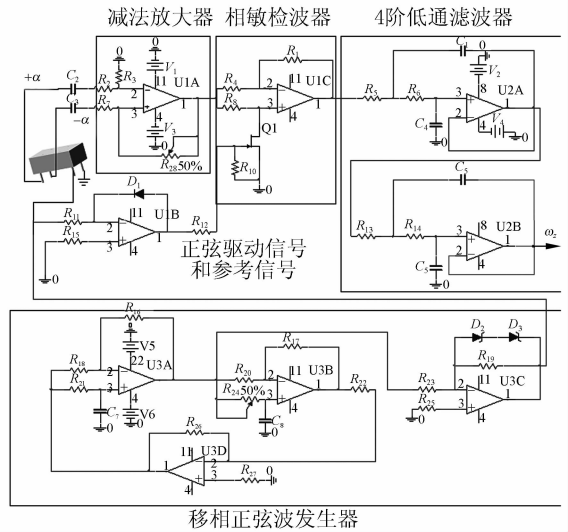


图 9 相敏检波电路

Fig. 9 Phase sensitive detection circuit

如图 9 所示,三运放 U3A, U3B, U3D 组成的移相正弦波发生器产生的正弦波再由运放 U3C 稳幅和限幅,产生峰峰值为 3.3 V 的驱动和参考用正弦波,然后给压电陶瓷棒角速率陀螺的激励信号引脚和相敏检波器的运放 U1B,如图 10,图 11 的通道 1 分别为驱动信号和参考信号的波形。

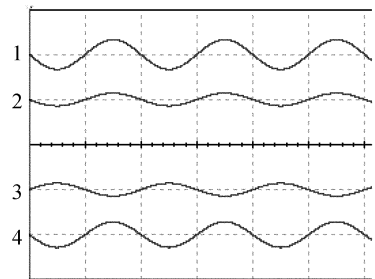


图 10 驱动,输出和放大信号

Fig. 10 Driving, output and amplified signals

陀螺的输出信号 $+α$ 和 $-α$ 经隔直电容分别