

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2018.01.015

金属圆柱壳谐振陀螺的静电激励方法研究

王鑫, 潘瑶, 曲天良, 樊振方, 许光明

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要:重点对静止状态谐振子的静电激励方法进行研究。理论上分析了采用单频激励和半频激励时由外加电压产生的静电驱动力之间的差别,根据理论分析结果,设计了不同的激励方法进行实验验证,并对实验结果进行了详细分析。

关键词:圆柱壳谐振陀螺;谐振子;静电激励

中图分类号:TP212.1 **文献标志码:**A

文章编号:2095-8110(2018)01-0088-05

Study on Electrostatic Excitation Method of Metal Cylindrical Vibratory Gyroscope

WANG Xin, PAN Yao, QU Tian-liang, FAN Zhen-fang, XU Guang-ming

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Focusing on the study of excitation method of resonator in static state, the differences between the electrostatic force generated by the applied voltage when using single frequency to excite and half frequency to excite are analyzed theoretically. Based on the analysis results, different excitation methods are designed and experiments are carried out as well, the results of which are analyzed in detail.

Key words: Cylindrical vibratory gyroscope; Resonator; Electrostatic excitation

0 引言

圆柱壳谐振陀螺是哥式振动陀螺的一种,它利用谐振子振动产生的驻波相对于谐振子本身的滞后效应,且滞后的角度与转速成正比的原理进行工作^[1]。它的稳定性好、寿命长、可靠性高且抗辐射,极具发展潜力。圆柱壳谐振陀螺的工作振型是有4个波腹点和4个波节点的二阶振型。为了使圆柱壳谐振子产生这样的振型,必须对谐振子施加激励电场。对静止状态下的谐振子进行激励是整个陀螺工作系统中最初始的任务,激励方式的选择会影响谐振子的振动状态,进而影响后续信号采集系统的

精度。本文对圆柱壳谐振子的激励方式进行了理论和实验两方面的研究,研究结果对提高陀螺输出信号的检测精度,构建完整的陀螺系统具有指导意义。

1 静电激励原理的理论分析

工作在角速率传感器模式下的陀螺是采用离散电极在固定位置对谐振子进行激励的^[2-3]。对谐振子的激励和对振动的检测如图1所示。

图1中,选定一个参考轴及对称安装的一对激励电极,依据参考轴的位置标记这对激励电极的位置角为 Φ 。这样激励出来的振型波腹点恰好位于电

收稿日期:2017-07-20;修订日期:2017-09-06

基金项目:国家自然科学基金(61575220)

作者简介:王鑫(1994-),女,在读研究生,主要研究方向为谐振陀螺的静电激励与检测。

E-mail: xinwang9401@163.com

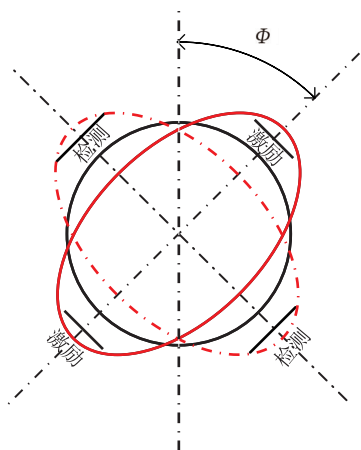


图 1 圆柱壳谐振子的激励与检测电极方位示意图

Fig. 1 The azimuth diagram of excitation and detection electrodes of the cylindrical shell resonator

极正中心,是一个四波腹振动模态^[4]。当输入角速度为 0 时,振动驻波的方位是固定的,并由位置激励电极的方位 Φ 决定。检测谐振子振动幅度的对称安装的一对电极位于与激励电极成 90° 的位置。基于圆柱壳谐振陀螺的激励与检测方式,首先需要实现静态时谐振子的起振,得到四波腹振动模态。

圆柱壳谐振陀螺的驱动模态方程可以简化表示为如下的二阶微分方程^[5]

$$\ddot{x} + 2 \frac{1}{\tau} \dot{x} + \omega_x^2 x = F_x \quad (1)$$

其中, x 为振动位移, $\frac{1}{\tau}$ 为阻尼衰减系数, ω_x 为谐振频率, F_x 为静电驱动力。

静电驱动力与输出位移之间的传递函数可以表示为

$$H(j\omega) = \frac{x}{F_x} = \frac{1}{(j\omega)^2 + \frac{2}{\tau}j\omega + \omega_x^2} \quad (2)$$

分析该传递函数的幅频特性和相频特性可知,在谐振频率点,静电驱动力的相位比振动位移的相位超前 90° ,意味着当所施加的静电驱动力为 $F_x = F \cos \omega_x t$ 时,得到的振动位移为

$$x = A \cos(\omega_x t - 90^\circ) = A \sin \omega_x t \quad (3)$$

本文的圆柱壳谐振陀螺采用电容式驱动方式。圆柱壳谐振子与底面电极之间的结构如图 2 与图 3 所示。

谐振子和底面基座由螺钉连接,之间留有一定间隙。谐振子由谐振环和导振环两部分组成,材质是金属铜;底面电极镀有一层薄铜膜。因此在谐振子底面与电极之间构成了若干个微小的电容,这些

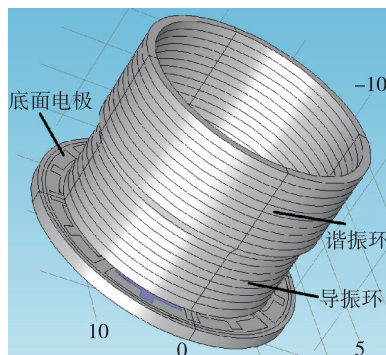


图 2 谐振子结构图

Fig. 2 The structure of resonator

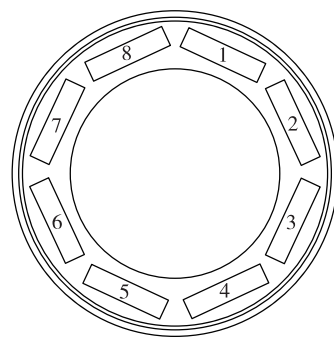


图 3 底面电极结构图

Fig. 3 The structure of bottom electrodes

电容可近似看做平面电容器^[6]。

图 3 中标注数字 1 ~ 8 的方框代表着用于对谐振子进行激励和检测的 8 个离散电极,对这些电极进行合理地分配和使用可以使谐振子维持稳定的四波腹振动^[7-8]。将这样的底面电极与谐振子组装在一起,构成的微小电容经测量为 10pF 量级。由谐振子振动带来的电容变化量很小,由此要求陀螺的信号处理电路中电容检测部分有较高的灵敏度^[9-10]。若能选择合适的激励方式,令谐振子产生较大的振动幅度从而产生较大的电容变化量,将有利于后续电容检测实现高精度。

平板电容极板的运动方向总是趋于使电容器的总能量最小,因此电容极板的位移与电容存储的能量之间满足如下关系

$$F = - \frac{\partial E}{\partial x} \quad (4)$$

式中, E 为电容存储的总能量, x 为电容极板的位移。假设电容器的极板面积为 S ,则平板电容器的大小可以表示为

$$C = \epsilon \frac{S}{d} = \epsilon \frac{S}{x_0 + x} \quad (5)$$

式中, ϵ 为介电常数, x_0 为初始极板间隙, x 为

振动位移,当电容上的偏置电压为 V 时,其存储的能量为

$$E = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{S\epsilon V^2}{2(x_0 + x)} \quad (6)$$

代入式(4)中,可得静电力的表达式

$$F = \frac{S\epsilon V^2}{2(x_0 + x)^2} \quad (7)$$

激励电压一般采用直流和交流叠加的模式,如下

$$V_{\text{exc}}(t) = V_D + V_A \sin(\omega_{\text{exc}} t) \quad (8)$$

式中, V_D 和 V_A 分别为驱动电压中的直流成分和交流幅值, ω_{exc} 为激励电压频率。将式(8)代入式(7)中,可得

$$F = \frac{1}{2} \frac{\epsilon S}{(x_0 + x)^2} \left[V_D^2 + \frac{1}{2} V_A^2 + 2V_D V_A \sin(\omega_{\text{exc}} t) - \frac{1}{2} V_A^2 \cos(2\omega_{\text{exc}} t) \right] \quad (9)$$

其中,直流部分 $V_D^2 + \frac{1}{2} V_A^2$ 使得谐振子产生一个静态位移,剩余的交流部分提供谐振子振动所需能量。

若使 $\omega_{\text{exc}} = \omega_x$,即激励频率等于谐振子的谐振频率,产生的静电力为

$$F = \frac{1}{2} \frac{\epsilon S}{(x_0 + x)^2} \cdot \left[V_D^2 + \frac{1}{2} V_A^2 + 2V_D V_A \sin(\omega_x t) \right] \quad (10)$$

若使 $\omega_{\text{exc}} = \frac{\omega_x}{2}$,即激励频率等于谐振子谐振频率的一半,产生的静电力为

$$F = \frac{1}{2} \frac{\epsilon S}{(x_0 + x)^2} \cdot \left[V_D^2 + \frac{1}{2} V_A^2 - \frac{1}{2} V_A^2 \cos(\omega_x t) \right] \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可以看出,对谐振子施加不同频率、不同幅值、不同直流分量的激励电压会产生大小不同的驱动力。下面将对谐振子进行激励实验,验证这部分的理论内容。

2 实验结果

根据现有的谐振子组装结构,选取位置正对的一对电极作为激励电极,由信号源产生小信号,经电压放大电路将电压放大,为谐振子提供激励电压。用多普勒激光测振仪测量谐振子的振动参数。

根据式(10)及式(11),实验分为单频激励(ω_{exc}

$= \omega_x$)和半频激励($\omega_{\text{exc}} = \frac{\omega_x}{2}$)两种方式进行,在每一种方式下,又分 $V_D = V_A$ 和 $V_D = 0$ 两种情况。

(1)单频激励, $\omega_{\text{exc}} = \omega_x$:

1)当施加的直流偏置量与交流电压的振幅相等(即 $V_D = V_A$)时,施加在谐振子激励电极上的信号是全为正值的交流信号,此时静电驱动力可表示为

$$F = \frac{1}{2} \frac{\epsilon S}{(x_0 + x)^2} \left[\frac{3}{2} V_A^2 + 2V_A^2 \sin(\omega_x t) \right] = - \frac{\epsilon S}{(x_0 + x)^2} \left[\frac{3}{4} + \sin(\omega_x t) \right] V_A^2 \quad (12)$$

以 10V 为步长,令 $V_D = V_A = 40 \sim 180\text{V}$,测得谐振子的振动幅度随激励电压的变化曲线如图 4 所示。

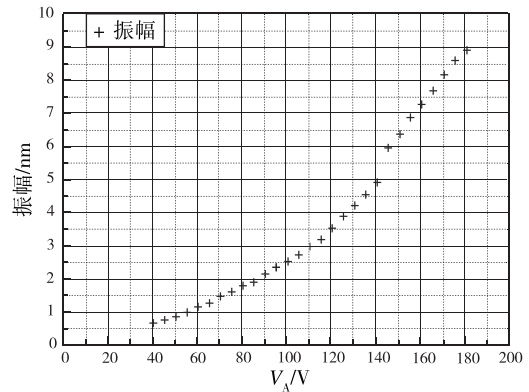


图 4 $\omega_{\text{exc}} = \omega_x$, $V_D = V_A$ 时振幅随交流电压幅值的变化

Fig. 4 The amplitude varies with AC voltage amplitude when $\omega_{\text{exc}} = \omega_x$, $V_D = V_A$

从图 4 中可以看出,谐振子的振动幅度随施加电压的增大而增大,且变化规律大致为二次曲线,这与静电驱动力随电压变化的趋势相同。当 $V_A = 180\text{V}$ 时,振幅为 8.86nm。

用激光测振仪记录的谐振子的振动模式图如图 5 所示。从图 5 中可以看出,在谐振环的边沿有 4 个基本对称的弧形,代表着谐振环边沿各点的振动幅度。颜色偏红的点具有较大的振动幅度,颜色偏绿的点具有较小的振动幅度。这便是谐振子振动模式图像^[11]。波腹点与波节点的位置已在图中标出。

2)当不加直流偏量(即 $V_D = 0$)时,施加在谐振子上的交流信号是正负幅值相等的交流信号。这种情况下,施加激励电场并不能使谐振子起振。这与理论上相吻合,从式(10)中可以看出,当 $V_D = 0$

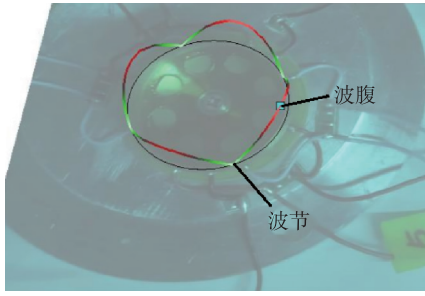


图 5 静止状态下谐振子的振动模态图像

Fig. 5 The vibration mode image of resonator in static state

时,静电力 $F = -\frac{1}{4} \frac{\epsilon S}{(x_0 + x)^2} V_A^2$, 只能使谐振子产生一个静态位移而无法为谐振子的振动提供能量。

(2) 半频激励, $\omega_{exc} = \frac{\omega_x}{2}$:

1) 当 $V_D = V_A$ 时, 静电驱动力的表达式为

$$F = \frac{1}{2} \frac{\epsilon S}{(x_0 + x)^2} \left[\frac{3}{2} V_A^2 - \frac{1}{2} V_A^2 \cos(\omega_x t) \right]$$

$$= -\frac{1}{4} \frac{\epsilon S}{(x_0 + x)^2} [3 - \cos(\omega_x t)] V_A^2 \quad (13)$$

以 10V 为步长, 令 $V_D = V_A = 80 \sim 180V$, 测得谐振子的振动幅度随激励电压的变化趋势如图 6 所示。

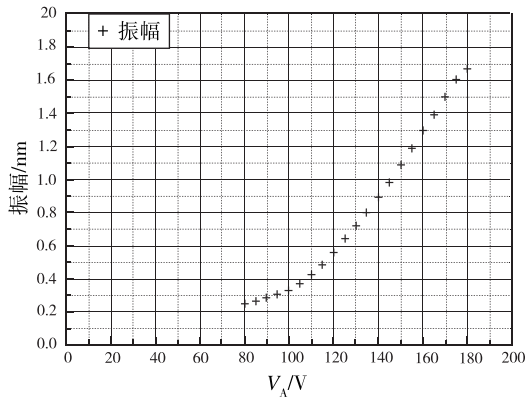


图 6 $\omega_{exc} = \frac{\omega_x}{2}$, $V_D = V_A$ 时振幅随

交流电压幅值的变化

Fig. 6 The amplitude varies with AC voltage

amplitude when $\omega_{exc} = \frac{\omega_x}{2}$, $V_D = V_A$

从图 6 中可以看出, 在这种激励方式下, 谐振子的振幅随交流电压幅值的增大而增大, 变化规律也大致符合二次曲线的规律, 振动幅度同样较小, 在 0.2575~1.675nm 的范围内。当 $V_A = 180V$ 时, 振幅为 1.675nm。

2) 当 $V_D = 0$ 时, 静电驱动力的表达式为

$$F = \frac{1}{2} \frac{\epsilon S}{(x_0 + x)^2} \left[\frac{1}{2} V_A^2 - \frac{1}{2} V_A^2 \cos(\omega_x t) \right]$$

$$= -\frac{1}{4} \frac{\epsilon S}{(x_0 + x)^2} [1 - \cos(\omega_x t)] V_A^2 \quad (14)$$

以 10V 为步长, 令 $V_D = V_A = 50 \sim 140V$, 测得谐振子的振动幅度随激励电压的变化趋势如图 7 所示。

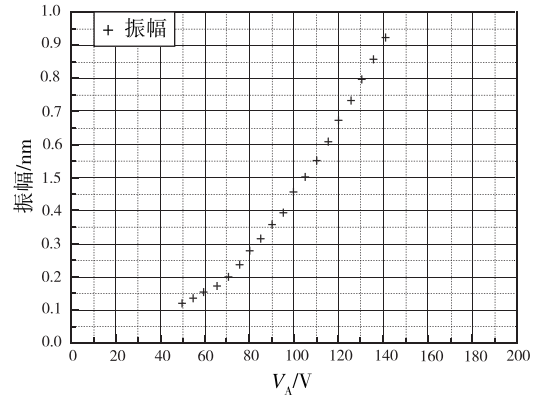


图 7 $\omega_{exc} = \frac{\omega_x}{2}$, $V_D = 0$ 时振幅随

交流电压幅值的变化

Fig. 7 The amplitude varies with AC voltage

amplitude when $\omega_{exc} = \frac{\omega_x}{2}$, $V_D = 0$

从图 7 中可以看出, 谐振子的振幅随交流电压幅值的变化规律依然大致符合二次曲线的规律, 只是相较于同种激励电压下的单频激励方式, 振动幅度较小, 在 0.1194~0.92nm 的范围内。当 $V_A = 140V$ 时, 振幅为 0.92nm。

由于实验中所有电压都需要经过电压放大电路进行放大, 受制于所选元件的最大耐压值, 实验中 $V_D = V_A$ 这种激励方式下所加交流电压幅值最高为 180V, $V_D = 0$ 这种激励方式下所加交流电压幅值最高只有 140V。为了比较不同激励方式所产生的振幅大小, 选取 140V 这一电压点的振幅值进行比较, 汇总如表 1 所示。

表 1 不同激励方式下的振幅测量结果

Tab. 1 Amplitude measurement results by different excitation methods

$V_A = 140V$	单频激励: $\omega_{exc} = \omega_x$		半频激励: $\omega_{exc} = \frac{\omega_x}{2}$	
	$V_D = V_A$	$V_D = 0$	$V_D = V_A$	$V_D = 0$
振幅/nm	4.881	未起振	0.9	0.92

从表 1 中可以看出, 令激励频率等于谐振频率,

并且令所加直流偏置量与交流信号振幅相等,可以得到远大于其他激励方式的振动幅度。理论上,这种激励方式下的静电驱动力最大,所带来的振动幅度也最大。实验结果与理论相符。

3 结束语

本文通过对静电激励圆柱壳谐振陀螺的驱动原理进行分析,详细推算了静电驱动力与施加电压之间的关系,并据此分析了当施加的激励频率等于谐振子的谐振频率(即 $\omega_{exc} = \omega_x$),以及激励频率等于谐振频率一半(即 $\omega_{exc} = \frac{\omega_x}{2}$)时静电力的理论值。

实验中,针对这两种激励方式,分 $V_D = V_A$ 和 $V_D = 0$ 两种情况对理论进行验证,所测实验数据很好地印证了理论分析的结果。

本文的圆柱壳谐振陀螺采用电容式驱动、电容式检测的方法。根据本文结论,采用能够使谐振子振动幅度较大的驱动方式可以带来较大的电容变化量,进而电容变化量占初始电容比例变大,信噪比得到提高,检测信号的难度下降。本文的实验结果对希望获得较大振幅的静电激励方式选择有一定的指导意义。

参考文献

[1] 高胜利. 半球谐振陀螺的分析与研究[D]. 哈尔滨:

哈尔滨工程大学, 2008.

- [2] 雷霆. 半球谐振陀螺控制技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [3] Lynch D D. Coriolis vibratory gyros [C]//Symposium Gyro Technology, Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation. Stuttgart, 1998: 1-1.
- [4] 席翔. 杯形波动陀螺零偏漂移机理及其抑制技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [5] 王旭. 半球谐振陀螺误差建模补偿与力平衡控制方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- [6] Zhuravlev V F, Lynch D D. Electric model of a hemispherical resonator gyro [J]. *Mechanics of Solids*, 1995, 30(5): 10-21.
- [7] Wang X, Wu W, Luo B, et al. Force to rebalance control of HRG and suppression of its errors on the basis of FPGA [J]. *Sensors*, 2011, 11(12): 11761-11773.
- [8] Renault A. Method for implementing a resonator under electrostatic forces; U. S. Patent 7127947 [P]. 2006-10-31.
- [9] 李锦明. 高信噪比电容式微机械陀螺的研究[D]. 太原: 中北大学, 2005.
- [10] 苏剑彬. 蝶翼式硅微陀螺静电力控制关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [10] 赵洪波. 半球谐振陀螺仪误差机理分析与误差抑制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.