

## 基于参数激励的 MEMS 环式陀螺驱动方法与实现

钱磊, 赵鹤鸣, 张晓峰, 徐大诚

(苏州大学 微纳传感技术研究中心, 江苏 苏州 215006)

**摘要:** MEMS 环式陀螺仪是一种基于哥氏力效应设计出的测量角速度的惯性传感器, 其性能与驱动模式直接相关; 因此, 在传统 PLL-AGC 驱动控制方法中引入参数激励信号, 按照参数激励法驱动陀螺仪, 陀螺仪的刚度产生周期性变化, 降低驱动信号从而抑制因电馈通导致的驱动端对敏感端产生的误差信号, 提高陀螺仪灵敏度; 对参数激励的效果进行研究, 经实验表明, 通过改变参数激励信号的参数, 可在驱动响应稳定的前提下对驱动信号进行抑制, 在实际测试中驱动信号的幅值下降 22.75%。

**关键词:** MEMS 环式陀螺; 驱动方法; 参数激励; 电馈通

Improvement of MEMS Gyroscope Driving Method  
Based on Parametric Excitation

Qian Lei, Zhao Heming, Zhang Xiaofeng, Xu Dacheng

(Research Center of Micro-nano Sensor Technology, Suzhou University, Suzhou 215006, China)

**Abstract:** MEMS ring gyroscope is an inertial sensor designed to measure angular velocity based on the Coriolis force effect. Its performance is directly related to the driving mode. Hence, according to an innovative method called parameter excitation, the parameter excitation signal is introduced in the PLL-AGC drive control method. The stiffness of the gyroscope changes periodically to suppress the quadrature error signal caused by electrical feed-through and to improve the sensitivity of gyroscope. Research on the effect of parameter excitation, experiments show that the driving signal can be adjusted under the premise of stable response, by changing the parameter excitation signal, and fall by 22.75% in the actual test.

**Keywords:** MEMS ring gyroscope; driving method; parametric excitation; electrical feed-through

## 0 引言

陀螺仪是一种测量物体绕固定坐标轴旋转角速度的惯性传感器, 驱动模式的稳定性是实现敏感模态角速度检测的前提。目前, 常用 PLL-AGC 控制陀螺驱动模式。但是, 由驱动电极和检测电极之间的寄生电容引起的电馈通信号频率与检测端的有用信号频率相同, 会引起敏感检测时的误差, 且此误差无法用纠偏法<sup>[1]</sup>、结构解耦法或调整电路结构减小<sup>[2]</sup>。

故本文在考虑到电极间馈通信号产生原因的基础上, 通过对 PLL-AGC 控制中引入参数激励, 实现对与敏感模态同频的驱动信号的抑制, 降低驱动信号的幅值。最终提高陀螺仪敏感模态的检测精度。

本文使用参数激励法对 MEMS 环式振动陀螺进行实物测试, 通过测试, 验证了该驱动方法的效果。

## 1 MEMS 环式陀螺原理

陀螺仪可分为转子陀螺仪、光学陀螺仪以及振动陀螺仪三类。各类陀螺仪本质上都是以角动量守恒原理、萨格

奈克 (Sagnac) 效应和哥氏力 (Coriolis) 效应为原理。本文中使用的 MEMS 环式陀螺属于振动陀螺仪, 所有的振动陀螺仪的工作原理均基于振动质量的哥氏力效应。由于内部结构的高对称性, 这类陀螺仪普遍具有优良的性能。MEMS 环式陀螺仪有驱动和敏感两个振动模态, 驱动模态的稳定性是实现敏感模态角速度检测的前提。

进行直线运动的质点在旋转体会因惯性而产生偏转。相对于旋转体, 质点留下的运动轨迹成为了曲线。在旋转体下, 可认为有一个力存在, 影响了质点运动。这个使质点的运动轨迹发生了改变的假想力称为哥氏力。

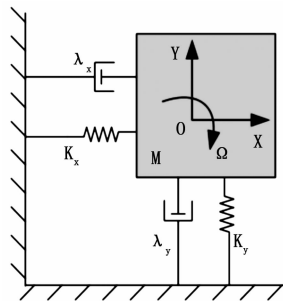


图 1 振动陀螺仪力学模型

哥氏力是一种虚拟力, 与质量块质量, 旋转角速度, 质量块在旋转系中的速度有关, 可由下式计算得出:

$$\vec{F} = 2m(\vec{v} \times \vec{\Omega}) \quad (1)$$

收稿日期: 2018-04-09; 修回日期: 2018-05-10。

作者简介: 钱磊 (1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事 MEMS 传感器驱动方法的研究。

通讯作者: 赵鹤鸣 (1957-), 男, 教授, 博导, 主要从事信号检测与处理方向的研究。

式中,  $m$  为质量块质量,  $\vec{v}$  为质量块的速度,  $\vec{\Omega}$  为参考系的旋转角速度。图 1 中, 质量块所受的哥氏力可以从动力学方程推出。在 MEMS 环式陀螺中, 质量块即为振动环。

图 1 所示的振动陀螺仪力学模型可以看作一个二自由度弹簧—质量—阻尼系统。设沿  $X$  轴方向为驱动模态, 沿  $Y$  轴方向为敏感模态。 $X$  轴的振荡由该方向上的静电力  $F_x$  提供。 $Y$  轴方向的振动则由系统绕  $Z$  轴的转动引起。此时的运动方程如下:

$$\begin{cases} m \frac{d^2x}{dt^2} + \lambda_x \frac{dx}{dt} + k_x x - 2\Omega m \frac{dy}{dt} = F_x \\ m \frac{d^2y}{dt^2} + \lambda_y \frac{dy}{dt} + k_y y + 2\Omega m \frac{dx}{dt} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\Omega$  是质量块转动角速度的模;  $\lambda_x$  和  $\lambda_y$  分别为  $X$  轴和  $Y$  轴的阻尼系数;  $k_x$  和  $k_y$  为  $X$  轴和  $Y$  轴的刚度系数。

驱动模态的振动由静电力  $F_x$  产生, 设其振幅为  $a_x$ , 当驱动模态的振动角频率  $\omega_d$  接近其谐振频率  $\omega_x = \sqrt{k_x/m}$  时,  $a_x$  达到最大值。因此,  $x(t)$  可以由以下形式写出:

$$x(t) = a_x \sin(\omega_d t) \cong a_x \sin(\omega_x t) \quad (3)$$

同时,  $y(t)$  的通式可写作:

$$y(t) = a_y \cos(\omega_x t + \varphi_y) \quad (4)$$

式中,  $a_y$  和  $\varphi_y$  分别为敏感模态的振幅和相位。将式 (3) 和式 (4) 代入式 (2), 整理可得:

$$\begin{cases} [-a_y \omega_x^2 \cos(\varphi_y) + a_y \omega_y^2 \cos(\varphi_y) - \frac{a_x \omega_x \omega_y}{Q_y} \sin(\varphi_y)] = -2a_x \Omega \omega_x \\ [a_y \omega_x^2 \sin(\varphi_y) - a_y \omega_y^2 \sin(\varphi_y) - \frac{a_x \omega_x \omega_y}{Q_y} \cos(\varphi_y)] = 0 \end{cases} \quad (5)$$

可解得:

$$a_y = - \frac{2a_x \Omega \omega_x}{\sqrt{(\omega_x^2 - \omega_y^2)^2 + \omega_x^2 \omega_y^2 / Q_y^2}} \quad (6)$$

$$y(t) = - \frac{2a_x \Omega \omega_x}{\sqrt{(\omega_x^2 - \omega_y^2)^2 + \omega_x^2 \omega_y^2 / Q_y^2}} \cos(\omega_x t + \varphi_y) \quad (7)$$

由上式表明, 敏感模态的振幅与旋转角速度的模线性相关。故, MEMS 环式陀螺通过测量敏感模态的振荡幅值, 可以计算出施加在陀螺仪上的角速度。

## 2 MEMS 陀螺模型

本文中使用的陀螺为 MEMS 环式振动陀螺仪, 具体参数见表 1, 陀螺的等效模型如图 2 所示。

施加参数激励时, 驱动模态驱动端信号表达式如下:

$$V_d(t) = V_f \sin(\omega_f t) + V_p \sin(\omega_f t + \varphi) \quad (8)$$

式中,  $V_f \sin(\omega_f t)$  为驱动信号,  $V_p \sin(\omega_f t + \varphi)$  为参数激励信号,  $\varphi$  为参数激励信号与驱动信号的初始相差, 本文中控制初始相差为 0。

参数激励信号频率  $\omega_p$  需满足以下条件:

$$\omega_p \approx \frac{2\omega_f}{l} \text{ 其中 } l = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

本文中, 参数激励信号的频率为驱动模态频率的两倍, 故式 (9) 中  $l = 1$ 。

表 1 环式陀螺仪参数

参数	值
振动环半径 $a$ ( )	1000
振动环厚度 $d$ ( )	75
振动环宽度 $b$ ( )	5.8
电极与振动环间隙 $h_0$ ( )	5.8
Q 值	250225
驱动模态频率 $F$ ( )	12111
振动环质量 $m$ ( )	$1.46e-7$
电极弧度 $2$ ( )	$/4$

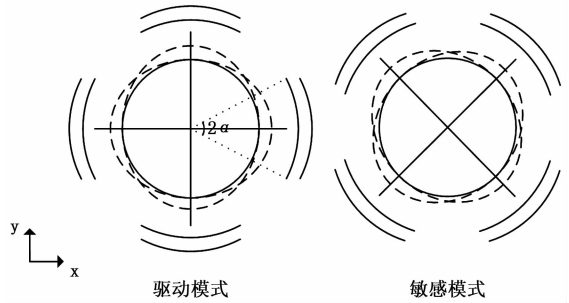


图 2 陀螺振动模型

## 3 参数激励

虽然从理论上, MEMS 环式陀螺仪的对称性使其具有相同的驱动和敏感的振动频率, 但由于材料和工艺等方面的原因, 陀螺仪难免会有对称性及电极电容参数偏差。因此, 学界一直在研究提高陀螺仪驱动模态的稳定性, 降低驱动信号的幅度, 减小模态间电馈, 增强陀螺仪性能的方法, 如本文的参数激励法。

参数激励法<sup>[3]</sup>是一种使齐次系统中的某个参数发生周期性振荡, 并将谐振系统达到谐振状态的激励方法。当这种驱动方式被运用到 MEMS 环式陀螺中时, 被改变发生周期性变化的参数是陀螺的刚度。

陀螺产生振动时, 能量储存在各电极与振动环之间, 可按照式 (10) 计算。由陀螺电极与振动环间的能量可以得出加入参数激励后对驱动力和刚度的影响<sup>[4]</sup>。

$$E = \frac{\epsilon ad}{2} \sum_{i=1}^p V_i \int_{\delta_i^-}^{\delta_i^+} \frac{1}{h_0 - u} du \quad (10)$$

式中,  $\epsilon$  是真空介电常数,  $\delta$  是电极中心的角位置,  $u$  是环式陀螺仪振动时振动环相对于电极的中心点的径向位移<sup>[5]</sup>,  $p$  表示陀螺仪共  $p$  个电极。当陀螺仪在驱动模态产生振动, 振动环上任意一点  $\theta$  的径向位移可表示为  $u = q \cos 2\theta$ ,  $q$  为驱动模态振幅。将式 (10) 泰勒展开得:

$$E = \frac{\epsilon ad}{2h_0} \sum_{i=1}^p V_i^2 \int_{\delta_i^-}^{\delta_i^+} [1 + \frac{u}{h_0} + (\frac{u}{h_0})^2 + (\frac{u}{h_0})^3 + \dots] du \quad (11)$$

上式中,  $\frac{u}{h_0}$  的指数  $\geq 3$  时, 可以忽略。

同时, 陀螺仪的能量又可由每块电极板上的总静电力

$K(t)q(t) + F(t)$  计算得出<sup>[6]</sup>, 所以由式 (11) 可求的静电刚度  $K(t)$  和驱动力  $F(t)$ :

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dq} &= F(t) + K(t)q \\ F(t) &= \frac{\epsilon ad}{h_0^2} \sum_{i=1}^p V_i^2 \left( \frac{\cos(n\delta_i) \sin(n\alpha)}{n} \right) \\ K(t) &= \frac{\epsilon ad}{h_0^3} \sum_{i=1}^p V_i^2 \left( \alpha + \frac{\cos(2n\delta_i) \sin(2n\alpha)}{2n} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

将式 (12) 中的静电刚度  $K(t)$  和驱动力  $F(t)$  代入 Mathieu-Hill 方程:

$$m\ddot{q}(t) + c\dot{q}(t) + [k - K(t)]q(t) = F(t) \quad (13)$$

其中:  $m$  是陀螺振动环质量,  $k$  是刚度,  $c$  是阻尼系数。可得 MEMS 环式陀螺在参数激励法下的驱动模态振动方程<sup>[7]</sup> 及相关参数  $\eta_0, \eta_1, \bar{\eta}_0$ :

$$\begin{aligned} \ddot{q} + \frac{\omega_a}{Q}\dot{q} + (\omega_a^2 - \eta_0 + \eta_1 \sin(\omega_f t + \bar{\omega}))q &= -\bar{\eta}_0 \sin(\omega_f t) \\ \eta_0 &= \frac{\epsilon ad}{2h_0^3} \left( \alpha + \frac{\sin(4\alpha)}{4} \right) (V_p^2 + V_f^2) + 32\alpha \frac{\epsilon ad}{2h_0^3} V_{dc}^2 \\ \eta_1 &= 4 \frac{\epsilon ad}{2h_0^3} \left( \alpha + \frac{\sin(4\alpha)}{4} \right) V_p V_{dc} \\ \bar{\eta}_0 &= 2 \frac{\epsilon ad}{2h_0^2} \sin 2\alpha V_{dc} V_f \end{aligned} \quad (14)$$

式中,  $V_{dc}$  表示陀螺振动环上的衬底电压。如上式所示, 陀螺的刚度受参数激励信号的影响, 产生周期性变化, 参数激励法对环式陀螺仪振动状态的作用, 从根本上是刚度量发生改变造成的。式 (14) 的稳态解可写为:

$$q(t) = A \sin(\omega_f t + \psi) \quad (15)$$

式中, 响应振幅  $A$  和相位  $\psi$ , 及所需参数如下:

$$\begin{aligned} A(V_p, \bar{\omega}, \varphi) &= \bar{\eta}_0 \sqrt{\frac{\zeta^2 + \eta_1 \cos(\varphi) + \bar{\omega}^4 + \eta_1 \bar{\omega}^2 \sin(\varphi) + \frac{1}{4} \eta_1^2}{\bar{\omega}^4 + \zeta^2 - \frac{1}{4} \eta_1^2}} \\ \psi(V_p, \bar{\omega}, \varphi) &= \tan^{-1} \left[ -\frac{\zeta + \frac{1}{2} \eta_1 \cos(\varphi)}{\bar{\omega}^2 + \frac{1}{2} \eta_1 \sin(\varphi)} \right] \\ \bar{\omega}^2 &= \omega_a^2 - \omega_f^2 \\ \bar{\omega}_s^2 &= \omega_a^2 - \eta_0 \\ \zeta &= \frac{\omega_a \omega_f}{Q} \end{aligned} \quad (16)$$

$\omega_a$  为陀螺的驱动模态谐振频率, 由于软化作用, 发生改变。 $\bar{\omega}_s$  为受软化作用影响后的谐振频率, 与驱动信号频率存在微小差值。从式 (16) 可以看出, 参数激励法中, 驱动模态响应信号的振幅受到参数激励信号  $V_p$  的影响, 参数激励对驱动信号有增益效果。故响应稳定的前提下, 调整参数激励信号可实现驱动信号的降低。

由于驱动信号和检测信号的能量都集中在陀螺仪的振动频率附近, 而参数激励信号的频率是驱动信号的两倍, 所以参数激励信号对敏感电极产生的电馈可在检测时通过滤波方式去除, 不会影响敏感检测。而驱动信号产生的电馈与因陀螺阻尼不对称、刚度不对称引起的正交误差不同,

无法用纠偏法、结构解耦法或调整电路结构减小, 同时为频率相近, 无法在检测敏感输出时通过滤波去除, 最终会影响检测敏感输出精度、零偏。故而, 参数激励法驱动 MEMS 环式陀螺能有效提高陀螺仪敏感模态的检测精度。

## 4 参数激励控制方法的实现

### 4.1 控制系统框架

本文参数激励控制系统由 PLL-AGC 控制方法改进而来。图 3 为参数激励法闭环驱动原理框图。

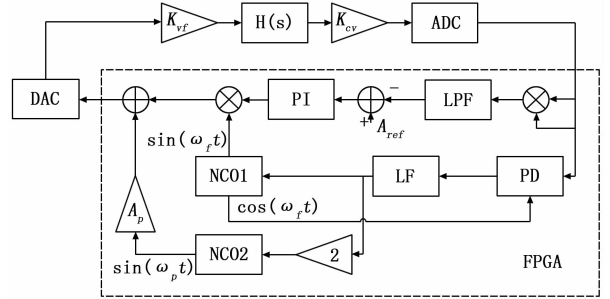


图 3 参数激励法原理框图

图 3 中,  $K_{vf}$  是驱动电压到陀螺驱动力的转换系数,  $K_{cv}$  是陀螺 C/V 电路转换系数, 表示陀螺电容变化与电压的关系, 由陀螺结构和电路确定。PLL-AGC 控制驱动信号  $V_f \sin(\omega_f t)$ , 加入参数激励信号后, 实现在陀螺仪响应稳定情况下, 对驱动信号幅频的调整<sup>[8]</sup>。锁相环 (PLL) 是闭环负反馈相位控制系统, 用以跟踪信号的频率和相位信息, 保证驱动模态激励信号频率与谐振频率相等, 使驱动模态工作在谐振状态。自动增益控制 (AGC) 对驱动信号的幅度调节<sup>[9]</sup>, 控制驱动响应信号幅度在 800 mV, 最终响应信号稳幅。驱动信号由数控振荡器 NCO1 生成, 中心频率设置为 12 111 Hz, 参数激励信号的频率是驱动信号的 2 倍, 由 NCO2 生成。为确保两信号相位差为 0, NCO2 的频率控制字由 NCO1 的控制字得到。最后将得到的倍频信号乘以控制参数  $A_p$ , 得到所需的参数激励信号。本文中, 通过改变  $A_p$ , 观察参数激励法的效果。

### 4.2 硬件实现

整个系统的硬件电路由陀螺接口电路、数模信号转换电路和 FPGA 控制电路<sup>[10]</sup> 组成。陀螺接口电路为模拟电路, 用于实现电容检测和信号放大, 把陀螺仪中的电容信号转化为电压信号, 实际电路中 C/V 放大系数为 7.5 V/pf; FPGA 控制系统为数字电路, 包括 FPGA 芯片、串口数据输出电路和外围配置电路, 实现参数激励驱动 MEMS 环式陀螺的闭环谐振控制; 数模信号转换部分包括 AD 转换电路和 DA 转换电路。硬件电路完成对陀螺前端信号的处理并作为 FPGA 系统控制系统的载体, 实现参数激励法驱动 MEMS 环式陀螺。

在实现参数激励法对 MEMS 环式陀螺的驱动后, FPGA 将实验数据上传 PC, 由 PC 机使用 Labview 参数监控程序, 采集信息, 将陀螺仪关键输出信号、控制系统关键参数实时监控, 数据采集的速度可以设定。

本文硬件模块设计如图 4。

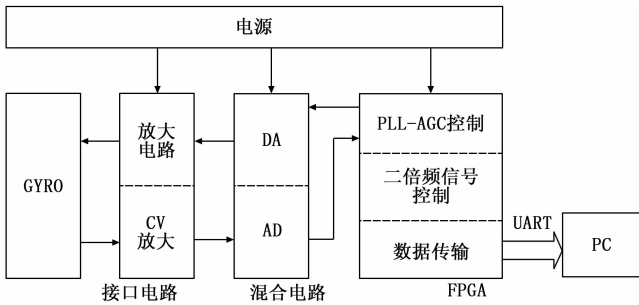


图 4 电路设计模块图

### 5 实验与数据分析

为检验本文改进的控制方法的性能优化效果，进行实物验证，陀螺仪的接口电路原理图如 5 所示。为抑制噪声，驱动信号经差分电路，生成一组差分信号，输入到陀螺仪驱动电极。响应信号在滤波，整流，放大之后，输入到模数转化电路，实现响应信号的检测。

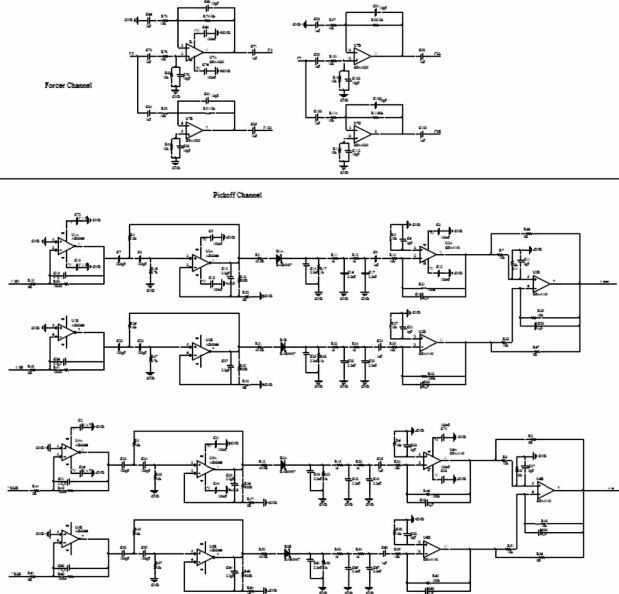


图 5 接口电路原理图

如图 6 所示，对用参数激励法驱动的陀螺进行扫频，画出参数激励状态下陀螺的幅频特性曲线，与 PLL-AGC 驱动的陀螺幅频特性曲线对比，观察参数激励对陀螺响应增益情况。

扫频时，施加的衬底电压为 2.5 V，驱动信号为 0.25 V。由于加入参数激励的 MEMS 环式陀螺受到软化作用，响应频率较无参数激励信号时稍小，故图中  $V_p=0.25$  V 的响应峰值向左偏移。同时由于参数激励信号对驱动信号的增益效果，加入参数激励信号后的 MEMS 环式陀螺谐振峰值上升。

由于 ADC、DAC 及数字信号处理中的延时可能导致相位偏差，在控制系统中通过相位延时的方法对其进行补偿

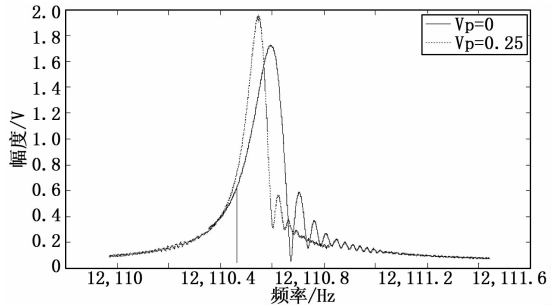


图 6 幅频特性曲线

后，完成参数激励法的数字闭环驱动控制测试。陀螺仪谐振时，驱动信号和响应信号如图 7 所示。

图 7 中，上方信号为 MEMS 环式陀螺的驱动响应信号，下方信号为驱动模式激励信号。MEMS 环式振动陀螺的驱动模式激励信号由驱动信号和参数激励信号叠加而成，参数激励信号幅值高于驱动信号。陀螺的驱动响应信号与驱动信号相差为  $90^\circ$  且保持响应振荡幅度最大时，判断陀螺驱动模式处于谐振状态。

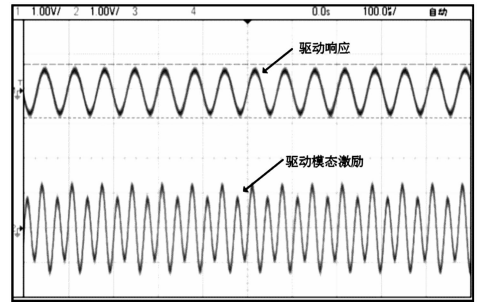


图 7 谐振状态

图 8 记录在衬底电压为 2 V，施加的参数激励信号  $V_p$  为 0 V、1 V 和 2 V 且陀螺仪谐振时，驱动信号  $V_f$  幅值的变化情况。从图中可以发现，随着参数激励信号的升高，驱动信号振幅从均值 3.5 V 逐渐降低，最后降至 2.75 V 左右。显然，在参数激励法中，加入的参数激励信号对驱动信号有显著增益效果，在闭环控制系统中，能有效降低驱动信号幅值。

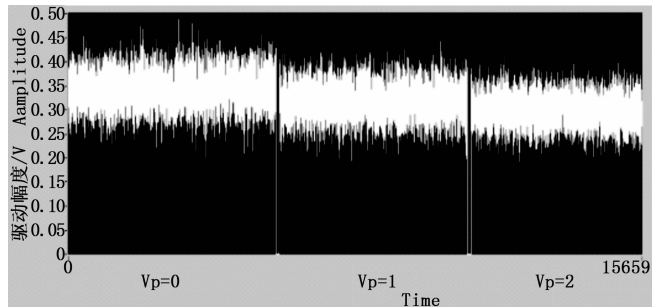


图 8 驱动振幅变化

由式 (16) 可知，参数激励法驱动 MEMS 环式陀螺时，陀螺的驱动响应受到衬底电压  $V_{dc}$  和参数激励信号  $V_p$