

文章编号 1004-924X(2012)10-2214-08

# 微隧穿式陀螺仪检测模态的线性二次高斯控制

刘益芳<sup>1</sup>, 王凌云<sup>1</sup>, 孙道恒<sup>1</sup>, 吴德志<sup>2\*</sup>

(1. 厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学 航空系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 为了将微隧穿式陀螺仪(MTG)的隧尖与检测电极之间的隧道间隙及其变动量分别维持在 1 nm 和 0.1 nm 并降低系统噪声和扩大带宽, 本文为其检测模态设计了线性二次高斯(LQG)闭环反馈系统。在利用微小量法对呈指数规律的隧道效应进行线性化的基础上, 建立了 MTG 检测模态的线性化模型, 并将哥氏加速度和电子隧道  $1/f$  噪声分别当作主要的过程噪声和输出噪声, 设计了由最优状态估计器和线性二次(LQ)状态调节器组成的 LQG 控制器。搭建了仿真系统和实际的 LQG 控制电路并进行动态测试。仿真结果显示, LQG 控制在将系统的信噪比提高 24 dB 的同时, 能够将两个隧道电极之间的间隙的变动量控制在  $10^{-4}$  nm。实验曲线表明, 隧道电流噪声的峰峰值为 0.4 nA, LQG 反馈控制系统在动态加速度信号的激励下可维持恒定隧道间隙为 1 nm。

**关键词:** 隧道检测; 陀螺仪; 检测模态; 线性二次高斯控制

**中图分类号:** U666.163 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122010.2214

## LQG control for sensing mode of micro tunneling gyroscope

LIU Yi-fang<sup>1</sup>, WANG Ling-yun<sup>1</sup>, SUN Dao-heng<sup>1</sup>, WU De-zhi<sup>2\*</sup>

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Department of Aeronautics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

\* Corresponding author, E-mail: wdz@xmu.edu.cn

**Abstract:** In order to maintain the tunneling gap and its fluctuation between a tunneling tip and a detecting electrode at the operation points of 1 nm and 0.1 nm respectively, a Linear Quadratic Gauss (LQG) closed-loop feedback control system was designed to reduce the system noise and to expand the bandwidth of the Micro Tunneling Gyroscope (MTG). Based on the linearization of the exponential tunneling effect using the minification method, the linearized model of the sensing mode of the MTG was deduced. By taking the Coriolis acceleration and electronic tunneling  $1/f$  noise as the process noise and output noise of the sensing mode of the MTG, respectively, the LQG controller composed of an optimal state estimator and a Linear Quadratic (LQ) regulator was designed. The simulated system and the real LQG control circuit were established for the dynamic test. The simulation results show that the signal-to-noise ratio can be increased by 24 dB and the deviation of the tunneling gap between the two electrodes can be maintained at the value of  $10^{-4}$  nm by the proposed LQG feedback controller. Furthermore, the testing curve indicates that the peak-to-peak amplitude of the tunneling current

收稿日期: 2012-04-25; 修订日期: 2012-06-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51035002); 青年科学基金资助项目(No. 51105320); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2010121039)

noise is 0.4 nA and the tunneling gap can be controlled to be 1 nm under the excitation of dynamic acceleration.

**Key words:** tunneling detection; gyroscope; sensing mode; Linear Quadratic Gauss(LQG) control.

## 1 引言

最近十几年来,很多研究机构对隧道效应在加速度计<sup>[1]</sup>、磁强计<sup>[2]</sup>和红外探测器<sup>[3]</sup>上的运用做了大量研究。隧道效应中,隧道尖与相对检测电极之间的间隙发生变化时,隧道电流呈指数规律变化,这种指数关系使得隧穿式传感器具有 $10^{-3} \text{ Hz}^{-1/2}$ 的位置分辨率<sup>[4]</sup>,而且,隧道电流只和隧尖与相应电极之间的间隙有关,不受传感器尺寸微小化的影响,所以,与电容式微速率传感器<sup>[5]</sup>相比,在检测模态上运用隧道效应作为位移转换机理的微机械隧穿式陀螺仪(MTG)具有更小的体积、更高的灵敏度和更大的带宽。但是,只有将隧道间隙控制在 1 nm 时,才会产生典型值在 1.35 nA 的隧道电流,若隧道间隙变化 0.1 nm,隧道电流将减小或增大约 1 倍<sup>[6]</sup>,这个特征使得有效的控制技术成为隧穿式陀螺仪正常工作的必要条件。第一,MEMS 工艺无法直接加工一对间隙只有 1 nm 的干净的隧道电极,必须通过控制下拉电压产生的静电吸力来维持此工作间隙。第二,隧道间隙与隧道电流之间指数关系存在很强的非线性,使得隧穿式器件的带宽很窄,必须利用控制技术维持隧道间隙恒定来实现线性化,并降低隧尖与相应电极碰撞的可能性从而扩大隧穿式陀螺仪的带宽<sup>[7]</sup>。第三,nA 级甚至更小的隧道电流很微弱,而系统中固有的电子隧道 $1/f$ 噪声、布朗噪声和约翰逊噪声等必须通过闭环控制系统加以抑制,从而测得精确的隧道电流。

由于隧穿式陀螺仪包括驱动模态和检测模态,驱动模态通过哥氏效应给检测模态加载哥氏力,器件结构复杂。为了研究隧道效应特性,本文首先研究隧穿式陀螺仪的检测模态的反馈控制系统。检测模态在输入输出通道上存在的噪声使得系统存在不确定性,从而要求隧穿式传感器所选择的控制策略具有较强的鲁棒性。成熟的 PID 控制技术无法使带有随机扰动的隧穿式陀螺仪系统产生稳定的输出<sup>[8]</sup>,从而不能使隧道效应维持稳定状态。现代先进控制理论的强鲁棒性大大降

低了双框架角振动 MEMS 陀螺仪敏感轴固有频率的摄动敏感性<sup>[9]</sup>。线性二次高斯(LQG)控制是现代控制理论中强鲁棒性的最优控制策略,只需根据系统的响应曲线找出合适的状态变量和控制变量的加权矩阵,对系统的阻尼和带宽的设置没有限制,且电路简单,有望保证隧道电流的稳定性和扩大隧穿式陀螺仪的带宽。

## 2 隧穿式陀螺仪检测模态模型的建立

隧穿式陀螺仪如图 1 所示,主要包括基座、驱动梁和检测梁、梳状谐振器、驱动梳齿、隧尖、玻璃衬底(其上淀积了电极和引线)等单元。工作时,首先通过偏转电压产生的静电吸力将梳状谐振器下拉使得隧道间隙逐渐减小直至产生初始隧道电流,然后梳状谐振器在驱动电压的作用下沿 Y 方向(驱动方向)做简谐振动,此时若通过转动台等装置使得整个结构围绕 X 轴转动,则陀螺效应产生的哥氏力使梳状谐振器在 Z 方向(检测方向)上振动,这样,梳状谐振器顶端的隧尖与其正下方的相应电极之间的间隙会发生变化。为了维持检测方向上的隧道间隙恒定在工作点位置附近,控制器的输出偏转电压将随着哥氏力的变化而变化。其中,Y 方向的振动称为陀螺仪的驱动模态,Z 方向的振动称为陀螺仪的检测模态。

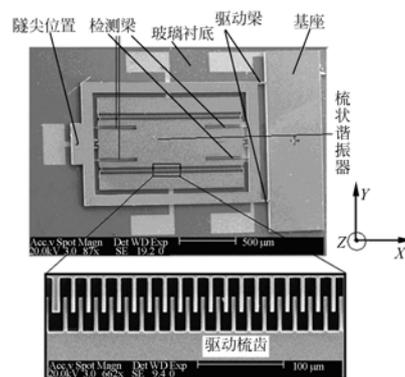


图 1 隧穿式陀螺仪的 SEM 图  
Fig. 1 SEM of tunneling gyroscope

伺服反馈控制方案如图 2 所示<sup>[10-11]</sup>。通过 I/V 变换电路(这里取样电阻  $R_t = 22 \text{ M}\Omega$ )将隧道电流转变成隧道电压  $V_{\text{tip}}$ ,  $V_{\text{tip}}$  和设定电压  $V_{\text{ref}}$  之间的误差通过高精度的运算放大器(本文选用 OPA128)放大并作为控制器的输入信号,然后通过本文设计的 LQG 算法计算输出偏转电压,并在偏转电极之间产生静电吸力来抵消哥氏力以及各种扰动,将隧道间隙稳定在 1 nm。基于隧道效应的 MEMS 传感器大多使用该结构作为基本控制电路<sup>[12]</sup>,所不同的是,根据传感器工作特性采用不同的控制算法将隧道间距维持恒定。例如 M. Khammash<sup>[13]</sup> 等用  $H_\infty$  算法以及 Cheng-Hsien Liu<sup>[14]</sup> 通过  $\mu$  合成算法将隧道效应加速度计的隧道间距恒定在 1 nm,但控制结构较复杂。

利用微小量法完成了隧道电流与隧道间隙之间的非线性指数关系的线性化,用  $\delta$  表示在工作点附近的微小变动量,得到了隧穿式陀螺仪检测模式的线性化模型如图 3 所示。其中,  $K_{\text{resp}}$  为静电执行器的增益,  $m_z$  为可动梳状谐振器的质量,  $G_z$  为梳状谐振器的动态特性,  $n_1$  为电子隧道 1/f 噪声,  $H_1$  为在工作点附近从隧道间隙变化到隧道电压变化的隧道传感增益。

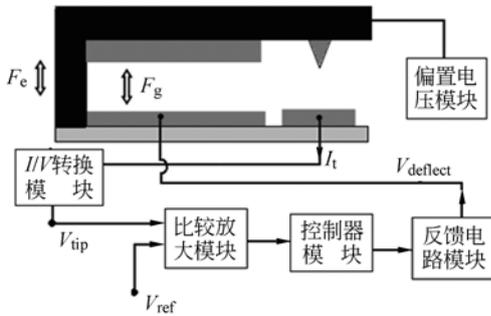


图 2 伺服反馈控制方案

Fig. 2 Servo feedback control scheme

接着,建立陀螺仪检测模式的数学模型。 $z$  表示梳状谐振器的位移。根据牛顿定律,梳状谐振器在检测方向的运动方程为:

$$m_z \frac{d^2(\frac{z}{G_{\text{disp}}})}{dt^2} + d_z \frac{d(\frac{z}{G_{\text{disp}}})}{dt} + k_z (\frac{z}{G_{\text{disp}}}) = F_e + F_g. \quad (1)$$

若位移、时间、电压和力的单位分别为 nm, s,

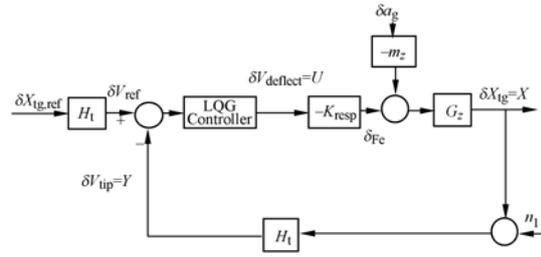


图 3 检测模式的线性化模型框图

Fig. 3 Block diagram for linearized model of the sensing mode of MTG

mV 和 nN 时,得到:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{d_z}{m_z} \frac{dz}{dt} + \omega_z^2 z = -G_{\text{disp}} \times \left( \frac{100 \times K_{\text{resp}} \times \delta V_{\text{deflect}}}{m_z} - a_g \right), \quad (2)$$

其中:根据结构的相应尺寸和硅的材料属性,得出梳齿谐振器的质量  $m_z = 9.2205 \times 10^{-8} \text{ kg}$ ;通过仿真得出检测模式的固有频率  $\omega_z = 2.890 \times 10^4 \text{ rad/s}$ ;隧尖位移与谐振器质心位移之间的增益  $G_{\text{disp}} = 1.8617$ ;压膜阻尼系数  $d_z = \frac{96}{\pi^4} \mu_{\text{air}} \cdot$

$\frac{l_e^3 \omega_e^3}{l_e^2 + \omega_e^2 z_{\text{pi}}^3} = 0.1953 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ,其中,  $\mu_{\text{air}}$  是空气的黏度系数,  $l_e$  为可动谐振器的等效长度,  $\omega_e$  为等效宽度,  $z_{\text{pi}}$  为气隙厚度;从下拉电压到静电力的静电执行器的增益  $K_{\text{resp}} = \frac{\partial F_e}{\partial V} |_{V_{e,0}=60 \text{ V}} =$

$\frac{\epsilon_0 \epsilon A}{(h_{\text{tip}} + z_{\text{ig}})^2} (V_{e,0} + \delta V) = 8.45 \text{ nN/mV}$ ;静电吸力  $F_e = -K_{\text{resp}} \times V_{\text{deflect}}$ ;哥氏力  $F_g = -m_z a_g$ 。选择隧尖处的隧道间隙的变化量和隧尖速度为状态变量,即  $\mathbf{X} = [x_1 \ x_2] = [z \ \dot{z}]$ ,将隧道电压的变化量作为输出变量  $y$ ,下拉输出电压作为控制变量  $u$ ,欲测量的哥氏加速度  $a_g$  为输入通道上的噪声,电子隧道 1/f 噪声  $v = H_1 \cdot n_1$  存在于输出通道上,  $H_1 = -140 \text{ mV/nm}$ ,这样,建立了带有噪声的检测模式的状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}u + \mathbf{G}a_g \\ y = \mathbf{C}\mathbf{X} + v \end{cases}, \quad (3)$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_z^2 & -\frac{d_z}{m_z} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{K_{\text{resp}} G_{\text{disp}} \times 100}{m_z} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G} = [0 \ -G_{\text{disp}}]^T; \mathbf{C} = [H_1 \ 0].$$

### 3 LQG 控制器的设计

微机械隧穿式陀螺仪检测模式的 LQG 闭环控制框图如图 4 所示<sup>[15]</sup>,它是由最优状态估计器和 LQ 状态调节器串联而成,分离定理<sup>[16]</sup>允许独立地设计最优状态估计器和 LQ 状态调节器。

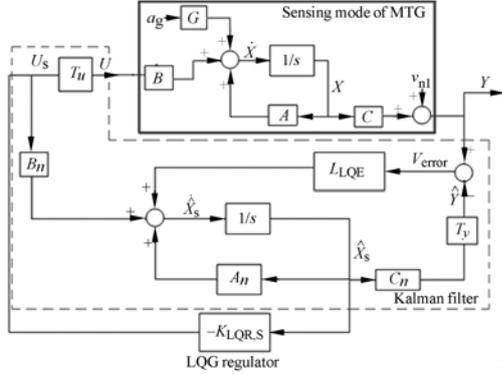


图 4 隧道陀螺仪检测模式的 LQG 反馈闭环控制框图  
Fig. 4 Block diagram of LQG feedback closed-loop control of the sensing mode of MTG

为了避免由于太高的位移—电压灵敏度产生一个无用的控制器,即为了使得控制器的输出能够在可实现的幅值范围内,有必要对初始状态空间中的各个矩阵进行线性变换:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}_s = \mathbf{A}_n \mathbf{X}_s + \mathbf{B}_n u_s + \mathbf{G}_n a_g \\ \mathbf{y}_s = \mathbf{C}_n \mathbf{X}_s + \mathbf{T}_y^{-1} v \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $\mathbf{A}_n = \mathbf{T}_x^{-1} \mathbf{A} \mathbf{T}_x$ ;  $\mathbf{B}_n = \mathbf{T}_x^{-1} \mathbf{B} \mathbf{T}_u$ ;  $\mathbf{C}_n = \mathbf{T}_y^{-1} \mathbf{C} \mathbf{T}_x$ ;  $\mathbf{G}_n = \mathbf{T}_x^{-1} \mathbf{G}$

$$\mathbf{T}_x = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 \\ 0 & 4000 \end{bmatrix}; \mathbf{T}_u = 500; \mathbf{T}_y = 500; \mathbf{X}_s =$$

$$[x_s; \dot{x}_s] = \mathbf{T}_x^{-1} \mathbf{X}; u_s = \frac{u}{\mathbf{T}_u}; y_s = \frac{y}{\mathbf{T}_y};$$

系统噪声即输入通道上的哥氏加速度信号和输出通道上的电子隧道  $1/f$  噪声都是零均值的高斯噪声,且:

$$\mathbf{E}\{a_g(t) \times a_g(t)\} = \mathbf{\Xi}, \quad (5)$$

$$\mathbf{E}\{\mathbf{T}_y^{-1} v(t) \times \mathbf{T}_y^{-1} v(t)\} = \mathbf{\Theta}. \quad (6)$$

选择实际状态与被估计状态之间的误差的协方差矩阵作为二次性能函数。

$$\mathbf{J}_{\text{Kal}} = \mathbf{E}\{(\mathbf{X}_s - \hat{\mathbf{X}}_s)(\mathbf{X}_s - \hat{\mathbf{X}}_s)^T\}. \quad (7)$$

要让误差协方差矩阵取最小值,可以通过求解 Riccati 方程(8),其正定解为  $\mathbf{P}$ 。

$$0 = \mathbf{A}_n \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_n^T + \mathbf{\Xi} - \mathbf{P} \mathbf{C}_n^T \mathbf{\Theta}^{-1} \mathbf{C}_n \mathbf{P}. \quad (8)$$

则最优状态估计器的输出为:

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}}_s = (\mathbf{A}_n - \mathbf{L}_{\text{LQE},s} \mathbf{C}_n) \hat{\mathbf{X}}_s + \mathbf{B}_n u_s + \mathbf{L}_{\text{LQE}} y, \quad (9)$$

其中最优化状态估计器增益为:

$$\mathbf{L}_{\text{LQE},s} = \mathbf{P} \mathbf{C}_n^T \mathbf{\Theta}^{-1}, \quad (10)$$

$$\mathbf{L}_{\text{LQE}} = \mathbf{L}_{\text{LQE},s} \mathbf{T}_y^{-1}. \quad (11)$$

通过 Matlab 进行求解:

$$\mathbf{\Xi} = 4.914 \times 10^{16}; \mathbf{\Theta} = 1.693 \times 10^{-12};$$

$$\mathbf{L}_{\text{LQE}} = [-2.744 \times 10^6 \quad -1.317 \times 10^6]^T.$$

同样的,在设计 LQ 状态调节器时,实际隧道间隙偏离设定参考值最小这个性能要求与恰当的控制量之间找到一个合适的平衡点,则二次性能函数选为:

$$\mathbf{J} = \int_0^{\infty} (\mathbf{X}_s^T \mathbf{Q} \mathbf{X}_s + r u_s^2) dt. \quad (12)$$

最小二次性能函数  $\mathbf{J}$  可以通过求解 Riccati 方程(13):

$$0 = \mathbf{A}_n^T \mathbf{P}_{\text{rc}} + \mathbf{P}_{\text{rc}} \mathbf{A}_n - \mathbf{P}_{\text{rc}} \mathbf{B}_n r^{-1} \mathbf{B}_n^T \mathbf{P}_{\text{rc}} + \mathbf{Q}. \quad (13)$$

$\mathbf{P}_{\text{rc}}$  是方程(13)的正定解。那么

最优反馈控制量:

$$u_s = -\mathbf{K}_{\text{LQR},s} \hat{\mathbf{X}}_s, \quad (14)$$

LQ 状态调节器增益:

$$\mathbf{K}_{\text{LQR},s} = r^{-1} \mathbf{B}_n^T \mathbf{P}_{\text{rc}}. \quad (15)$$

通过 Matlab 进行求解:

$$r = 1; \mathbf{Q} = \text{diag}(5.201 \times 10^{-3}, 9.038 \times 10^{-6});$$

$$\mathbf{K}_{\text{LQR},s} = [-0.072 \quad 1 \quad -0.009 \quad 5].$$

### 4 仿真结果及讨论

在 Matlab/Simulink 中搭建了如图 5 所示的 LQG 伺服反馈控制系统,得到了带有噪声干扰的系统的阶跃响应,如图 6 所示,未加入 LQG 反馈控制器的开环系统的阶跃响应幅值为 26.07~30.15,加入 LQG 反馈控制之后,闭环系统的阶跃响应振荡为 0.84~1.08,所以,LQG 将系统的抗干扰能力提高了 24 dB。

输入哥氏加速度噪声如图 7(a)所示,则闭环系统的响应如图 7(b)、(c)和(d)所示。从图 7(c)可以看出偏转下拉电压在工作点附近的变化量 ( $\delta V_{\text{deflect}}$ ),其表现了对输入哥氏加速度的测量能力,隧道电压在工作点附近的变化 ( $\delta V_{\text{tip}}$ ) 趋势如图 7(b)所示,几乎维持在 0 mV。图 7(d)表明隧道间隙在期望值附近的变化量几乎为零,最大为  $10^{-4}$  nm,控制性能良好。

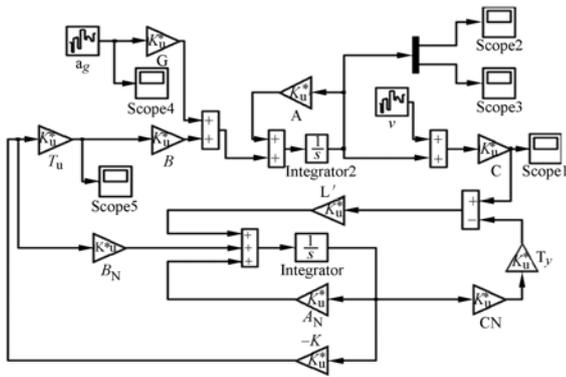
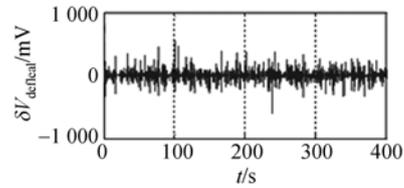
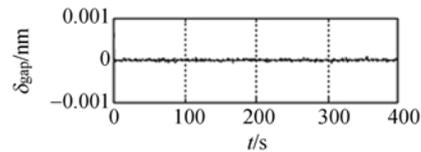


图 5 LQG 闭环控制系统的 Simulink 仿真模块图  
Fig. 5 Simulink simulation diagram of closed-loop LQG control system



(c) 隧道电压的变动  
(c) Deviation of tunneling voltage



(d) 隧道间隙的变动  
(d) Fluctuation of tunneling gap

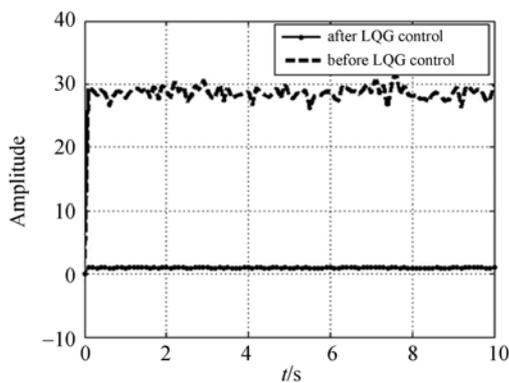
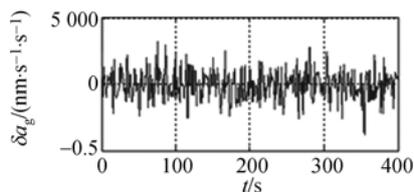
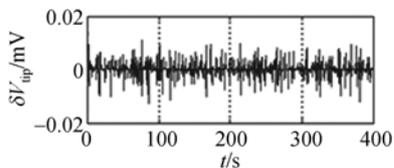


图 6 带有噪声的系统在 LQG 控制前后的阶跃响应  
Fig. 6 Step responses with white noise disturbance after and before LQG control



(a) 欲测量的哥氏加速度  
(a) Deviation of input acceleration to be measured



(b) 下拉控制电压的变动图 2  
(b) Deviation of the deflective controlling voltage

图 7 输入哥氏加速度以及陀螺响应  
Fig. 7 Input acceleration and MTG response gained from Simulink simulation

### 5 实验结果

为了避免放大之后的强信号对微弱隧道电流的影响,陀螺仪模块和信号放大控制模块分开铺地,同时为了避免环境噪声的影响,整个器件必须安装在屏蔽盒内,如图 8 所示实际焊接电路。动态测量系统如图 9 所示,带有 LQG 控制电路的微机械隧道陀螺仪闭环系统与激振器刚性连接,信号发生器的输出通过功率放大器来驱动激振器振动,由此给微机械隧道陀螺仪的检测模态输入交变加速度信号。通过观察隧尖电压以及 LQG 控制电路的输出电压在工作点位置附近的

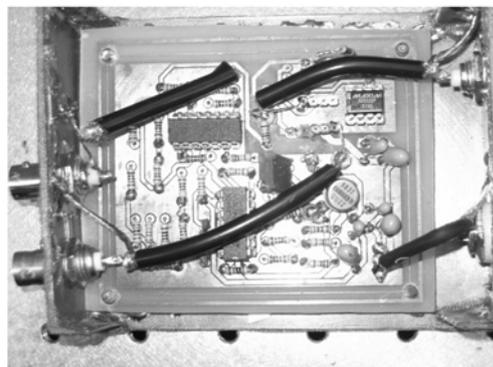


图 8 实际搭建的 LQG 控制电路  
Fig. 8 LQG control circuit

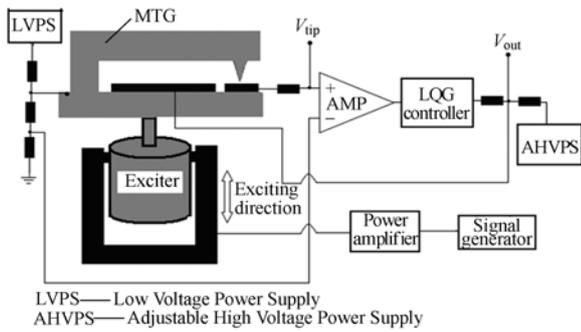
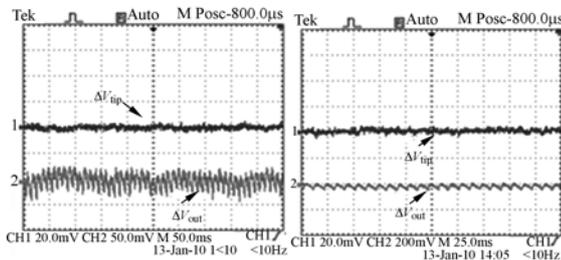


图 9 动态测试原理框图

Fig. 9 Schematic diagram of dynamic testing

变化量即  $\Delta V_{tip}$  和  $\Delta V_{out}$  ( $= \Delta V_{deflect}$ ) 来考察控制系统对输入信号的跟踪及测量能力。

首先进行噪声的测量,在未输入动态振动加速度信号时,给陀螺仪的检测模态加载下拉偏转电压直至发生隧道效应,并观察隧尖电压  $V_{tip}$  和控制电路输出信号  $V_{out}$  的交流分量,即理论上为  $V_{tip}$  和  $V_{out}$  在平衡位置上的变化量  $\Delta V_{tip}$  和  $\Delta V_{out}$  的峰峰值波形和平均值波形,如图 10。可以看出,它们的峰峰值分别为 8.8 和 68.0 mV,平均值分别为  $3.36 \mu A$  和 1.60 mV,其等效隧道电流噪声峰峰值为 0.4 nA。



(a) 峰峰值波形 (b) 平均值波形  
(a) Peak-to-peak amplitude of noise (b) Average amplitude of noise

图 10 噪声电压

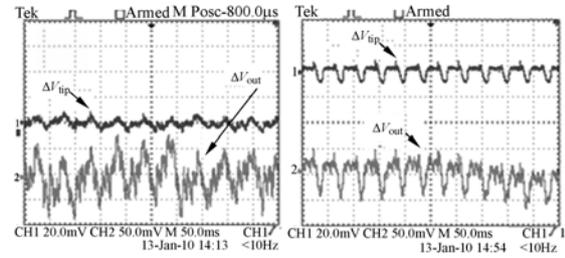
Fig. 10 Noise voltage signals

接着进行动态测试,给隧穿式陀螺仪的检测模态加载三角波和正弦波加速度信号,二者的有

参考文献:

[1] 龙志峰,薛实福,李庆祥. 电子隧道传感器的原理、现状与发展[J]. 光学精密工程,1998,6(2):1-6.

效值都是 1 V,频率分别为 18.9 和 24.8 Hz,得到隧道电压和控制电压的交流分量  $\Delta V_{tip}$  和  $\Delta V_{out}$  波形如图 11 所示,可知,控制输出电压可以跟踪输入加速度信号,而且,  $\Delta V_{tip}$  的峰峰值分别为 19.2 和 18.4 mV,由此推算出隧道间隙的变化量为 0.073 和 0.069 nm,满足控制要求。



(a)三角波激励(Amp=1 V, f=18.9 Hz) (b)正弦波激励(Amp=1 V, f=24.8 Hz)

(a) Triangular wave (Amp=1 V, f=18.9 Hz) (b) Sine wave(Amp=1 V, f=24.8 Hz)

图 11 不同激励信号下的隧道电压和控制电压的交流分量

Fig. 11 AC components of tunneling voltage and control voltage under different exciting voltage signals

6 结 论

为微机械隧穿式陀螺仪的检测模态设计了 LQG 控制器。通过微量法建立了陀螺仪检测模态的线性化数学模型,推导了其状态空间方程。根据分离定理设计了最优状态估计器和 LQ 状态调节器,仿真和实验结果表明,微隧穿式陀螺仪检测模态的 LQG 闭环控制系统将信噪比提高了 24 dB,并可以将隧道间隙维持在参考值 1 nm。通过实验测得等效隧道电流噪声的峰峰值为 0.4 nA,在输入动态加速度的作用下隧道间隙的变化量控制在 0.1 nm 之内。

LONG ZH F, XUE SH F, LI Q X. Electron tunnel sensor principles, present situation and prospect [J]. Opt. Precision Eng., 1998,6(2):1-6. (in Chinese)

- [2] MILLER L M, PODOSEK J A, KRUGLICK E, *et al.*. A  $\mu$ -magnetometer based on electron tunneling [C]. *The Ninth Annual International Workshop on Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems*, 1996;467-472.
- [3] OLALEYE, AYODELE, AJAKAIYE. *Wafer-Scale Production and Performance Characterization of Micromachined Tunneling infrared Detections*[P]. Ph. D. Dissertation, Stanford ;Univ. of Stanford, 2002.
- [4] KENNY T W, WALTMAN S B, REYNOLDS J K. A novel infrared detector based on tunneling displacement transducer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991,(59):1820-1822.
- [5] WANG L Y, WANG L W, ZHUANG G H, *et al.*. Design and fabrication of bulk micromachined tunneling gyroscope with fan-shaped comb drivers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17 (6): 1415-1420.
- [6] 孟军, 茅盘松. 微硅加速度传感器的发展[J]. *电子器件*, 1999, 22(4):296-299.
- MENG J, MAO P S. The development of silicon micro accelerometer[J]. *Journal of Electron Devices*, 1999, 22(4):296-299. (in Chinese)
- [7] XUE W, WANG J, CUI T H. Highly sensitive micromachined tunneling sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(5):491-501.
- [8] 郝晓弘, 刘树博. 直流无刷电机 LQG 控制系统研究 [J]. *电力电子技术*, 2006, 40(2):103-105.
- HAO X H, LIU SH B. Research of LQG control of brushless direct current motor[J]. *Power Electronics*, 2006, 40(2):103-105. (in Chinese)
- [9] 方玉明, 李普, 茅盘松. 双框架硅微型机械振动陀螺仪鲁棒控制研究[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(6): 591-596.
- FANG Y M, LI P, MAO P S. Robust control for double-gimbal vibratory MEMS gyroscope[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26 (6):591-596. (in Chinese)
- [10] CHANG D T, KIBEMA R L, STRATTON F P, *et al.*. Wafer-bonded, high dynamic range, single-crystalline silicon tunneling accelerometer [C]. *First IEEE International Conference on Sensors Piscataway, USA*, 2002,(2):860-863.
- [11] KUBENA R L, STRATTON F P, VICKERS-KIRBY D J, *et al.*. Low-cost tunneling accelerometer technology for high dynamic range applications[C]. *Position Location and Navigation Symposium*, 2000: 522-526.
- [12] 吴伟民. 微加速度计强韧控制之探讨[D]. 中山大学机械工程研究所硕士论文, 1989.
- WU W M. *Research on Robust Control of Micromachined Accelerometers*[D]. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Sun Yat-sen University, 1989. (in Chinese)
- [13] KHAMMASH M, LAURA O R, KIMBERLY L T. Robust feedback control design of an ultra-sensitive, high bandwidth tunneling accelerometer [C]. *American Control Conference USA*; 2005, 4176-4180.
- [14] LIU CH H, HOWARD K, ROCKSTAD. Robust controller design via  $y$ -synthesis for high-performance micromachined tunneling accelerometers [C]. *Proceedings of the American Control Conference San Diego, California*; 1999, 247-252.
- [15] 刘益芳, 王凌云, 孙道恒. 微机械隧道陀螺仪的时变线性二次高斯预测控制 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19 (1):2657-2663.
- LIU Y F, WANG L Y, SUN D H. Time-varying predictive-LQG control for micromechanical tunneling gyroscope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19 (1):2657-2663. (in Chinese)
- [16] 宋晓娜, 刘晓莉. 电视导引头 LQG 控制器设计及仿真[J]. *弹箭与制导学报*, 2005, 26(2):517-526.
- SONG X N, LIU X L. A design and simulation of LQG controller on TV seeker[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 26 (2):517-526. (in Chinese)

## 作者简介:



刘益芳(1976—),女,福建莆田人,博士,助教,1999年、2002年于东南大学分别获得学士、硕士学位,2010年于厦门大学获得博士学位,主要从事MEMS传感器、微硅电子隧道陀螺仪的控制与测试和微弱信号检测等方面的研究。E-mail: yfliu@xmu.edu.cn



孙道恒(1964—),男,安徽合肥人,教授,1987年、1990年、1997年于东北大学分别获学士、硕士、博士学位;1997~1999年为西南交通大学力学博士后流动站研究人员,主要研究领域包括MEMS/NEMS、柔性电子、静电纺丝及其应用。E-mail: sundh@xmu.edu.cn



王凌云(1978—),男,四川达州人,博士,助教,2000年、2009年于厦门大学分别获得学士、博士学位,主要从事MEMS和惯性传感器的设计、制作和控制的研究。E-mail: wangly@xmu.edu.cn



吴德志(1977—),男,福建莆田人,博士,副教授,2003年、2009年分别获硕士、博士学位,主要从事微惯性器件制作和微纳米制造技术的研究。E-mail: wdz@xmu.edu.cn

## ● 下期预告

## 聚变反应速率测量光学系统设计

闫亚东,何俊华

(中国科学院 西安光学精密机械研究所,陕西 西安 710119)

基于塑料闪烁体和条纹相机设计了聚变反应速率测量系统,详细论述了测量光学系统的设计方法。通过设置防辐射石英玻璃窗,防止了光学元件受强X射线辐射而变暗;采用晶体等紫外透过率高的光学材料,满足了光学系统的透过率要求;光学系统像面与条纹相机的阴极面直接对接,解决了条纹相机孔径不匹配的问题;在一次像面设置场镜,大幅缩小了光学元件的口径。光学系统总长2 660 mm,放大倍率1/3,像方F/#数达到0.667,系统透过率达到67%,时间弥散小于7.3 ps。