

文章编号 1004-924X(2013)06-1561-07

## 微隧道式加速度计的最优控制

刘益芳<sup>1\*</sup>, 吴德志<sup>2</sup>, 郑高峰<sup>1</sup>, 杜晓辉<sup>1</sup>, 孙道恒<sup>1</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:** 为了扩大隧道式加速度计(MTA)的动态测量范围并通过降低系统中的主要噪声来提高器件的性能, 本文为隧道式加速度计(MTA)设计了线性二次高斯(LQG)控制器。推导了微隧道式加速度计的线性化状态-空间方程; 依据分离定理, 设计了卡尔曼滤波器和最优状态反馈控制器; 最后, 在 Matlab/Simulink 中构建了由卡尔曼滤波器和最优状态控制器串联的 LQG 仿真系统并进行了动态和静态测试。仿真结果表明, LQG 最优控制系统能够将微隧道式加速度计的带宽从  $2 \times 10^3$  rad/s 扩大到  $3 \times 10^6$  rad/s。通过 LQG 最优控制, 静态测试结果显示其静态隧道电流的波动从 1 nA~2.95 nA 降到 0.73 nA~1.14 nA; 动态实验数据表明其在方波加速度信号的作用下能够将隧道间隙维持在 1 nm。

**关键词:** 闭环微系统; 隧道式加速度计; 控制器设计; LQG 控制器

**中图分类号:** TH824.4; U666.16 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132106.1561

## Optimal control for microchined tunneling accelerators

LIU Yi-fang<sup>1\*</sup>, WU De-zhi<sup>2</sup>, ZHENG Gao-feng<sup>1</sup>, DU Xiao-hui<sup>1</sup>, Sun Dao-heng<sup>1</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: yfliu@xmu.edu.cn

**Abstract:** To enlarge the dynamic measurement range of a Micromachined Tunneling Accelerator (MTA) and to improve its performance by reducing the influence of main noise operated in a closed-loop mode, a Linear Quadratic Gaussian (LQG) optimal controller was designed for our MTA to maintain a constant tunneling gap. The linear state space equation for the MTA was deduced, and an Kalman filter and an optimized state feedback controller were designed. Finally, a simulation system was constructed by combining the Kalman filter and the optimized state feedback controller in series, and simulation tests were performed. Obtained results show that the bandwidth of the MTA has been increased from  $2 \times 10^3$  rad/s to  $3 \times 10^6$  rad/s by the optimal control system. Moreover, the fluctuation of the static tunneling current is decreased from 1—2.95 nA to 0.73—1.14 nA from a static test and the distance from the proof mass to the tunneling electrode is effectively regulated to its nominal value of 1 nm under the dynamic square-wave accelerator.

**Key words:** closed-loop microsystems; tunneling accelerator; controller design; Linear Quadratic Gaussian(LQG) controller

收稿日期: 2013-01-08; 修订日期: 2013-02-22.

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)

## 1 引言

与传统的已经产业化的电容式微加速度计<sup>[1]</sup>相比,微隧道式加速度计器件尺寸更小、灵敏度更高,带宽更大。但是,微隧道式加速度计系统中存在 2 个亟待解决的问题。第一,隧道效应器件系统中存在严重的低频噪声(包括热机械噪声、 $1/f$ 机械和隧道噪声、shot 噪声和 Johnson 噪声)<sup>[1-2]</sup>;第二,隧道电流和隧道间隙之间存在剧烈的非线性指数衰减关系。所以,必须设计反馈控制系统来抑制各种低频噪声,另外,还需将隧道间隙及其波动量分别控制在 1 nm 和 0.1 nm,以将非线性关系通过微小量法转化为线性。诸多数学模型和控制策略被用于不同种类的微机械式加速度计的控制系<sup>[3-4]</sup>,但对于基于隧道效应的微隧道式加速度计(MTA)的控制的相关文献却不多。

应用极为广泛的 PID 控制过程无法处理微隧道式加速度计系统中的各种低频噪声引发的不稳定性。现代  $\mu$  集成控制方法会使得控制器变得极其复杂<sup>[5]</sup>从而无法搭建高精度的实际有效的控制器。在对线性化微隧道式加速度计模型进行控制的过程中,在保证隧道间距恒定的性能指标要求的同时,要对输入加速度信号进行有效测量,也要抑制系统内部各种噪声的影响。而且隧道加速度计本身结构组成部件繁多,在对其引入控制技术之后,整个系统将变得更加复杂,在这种情况下,最优控制将在隧道式加速度计的发展过程中扮演重要的角色。最优控制理论是一种严格的数学解析方法,通过寻求最优控制规律,用最小的能量让受控系统最优地达到预期目标,而且结构简单,易于实现。LQG 控制器是由卡尔曼滤波器和最优状态控制器串联而成<sup>[6]</sup>,其中,卡尔曼滤波器用来从噪声系统中估计出隧道间距和隧尖速度的最优状态,最优状态控制器用于计算最优状态信号并得出控制下拉电压信号。

文中考察了 LQG 控制前后微隧道式加速度计的带宽变化的定性和定量分析;对控制前后的静态隧道电流进行了对比;测量了动态方波加速度信号激励下的动态隧道电流并推算了隧道间距的波动。

## 2 微隧道式加速度计状态-空间方程的建立

微隧道式加速度计的侧视图和反馈控制模块如图 1 所示<sup>[7-9]</sup>。由于微加工工艺的限制,器件加工完毕后,隧道间距无法达到 1 nm 数量级。所以,器件工作时,首先在偏转下拉电极上加载逐渐增大的下拉电压直至产生隧道效应,此时的隧道电流称为静态隧道电流,其对应的隧道间隙称为工作点或者平衡点。此时,整个器件若感受到输入加速度,则由此在质量块上产生的惯性力将使得隧道间距偏离工作点,控制系统输出的下拉控制电压将发生变化,其产生的静电力的变化量用以抵消惯性力,从而将隧道间隙恒定在工作点附近,并且从控制下拉电压的变化可以推导出输入加速度的大小。

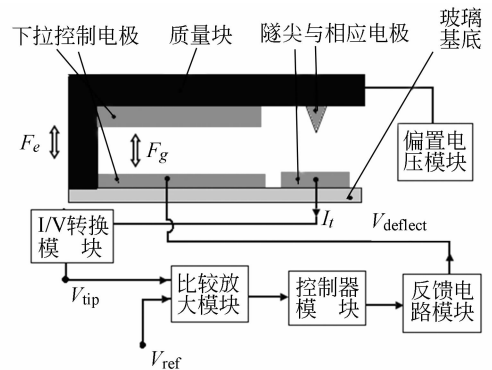


图 1 MTA 的侧视图以及反馈控制模块

Fig. 1 Side view of MTA and feedback control module

控制模块中的 I/V 转换模块用来测试取样隧道电压  $V_{tip}$ ,隧道电压  $V_{tip}$ 和系统设定的隧道间距为 1 nm 相应的参考电压  $V_{ref}$ 之间的差值通过精密放大电路(这里选用高精度放大器 OPA128)进行放大,放大后的误差信号送入控制器通过最优控制算法计算出偏转下拉电压,控制信号静电力用来抵消加速度引起的惯性力,实现将实际隧道间隙稳定在工作点附近的目的。

通过微小量法在工作点附近对隧道效应的指数非线性关系线性化, $d$ 表示在平衡点左右的微小波动量<sup>[8-10]</sup>,由此建立了如图 2 所示的微隧道式加速度计的近似线性化结构模型框图。其中,

$K_{\text{resp}}$  表示从下拉偏转电压到下拉偏转静电力的增益,  $G_z$  是可动敏感质量块的动态特性,  $G_{\text{disp}}$  为可动敏感质量块在隧尖处的运动位移到质量块质心位移的增益;  $m_z$  为可动敏感质量块的质量;  $d_z$  为系统阻尼系数;  $\omega_z$  是系统固有频率。  $n_1$  是隧道电子  $1/f$  噪声,  $H_t$  是在工作点附近的从隧道间隙变化到隧道电压变化的隧道传感增益。  $K$  为控制器的传递函数。

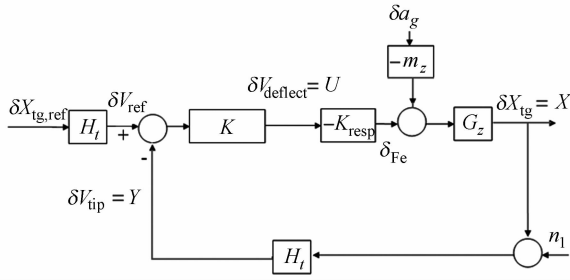


图 2 微隧道加速度计的线性化结构模型框图

Fig. 2 Block diagram of linearized model for MTA

首先定性分析微隧道式加速度计控制系统的性能要求。定义系统的回路增益函数  $L$ 、灵敏度函数  $S$ 、灵敏度函数的补函数  $T$  分别为:

$$L = -H_t \cdot G_z \cdot K_{\text{resp}} \cdot K, \quad (1)$$

$$S = \frac{1}{1+L}, \quad (2)$$

$$T = \frac{L}{1+L}. \quad (3)$$

为了保证隧道式加速度计具有良好的线性度从而具备一定的动态范围,需要合理设计控制器  $K$  使得在抑制或减弱噪声信号的同时保证隧道间距恒等于参考值,即需要设计控制器来实现  $\delta z_{\text{tg}} = \delta z_{\text{tg,ref}} = 0$ 。另一方面,从加速度信号测量的目标来说,控制器的输出控制电压  $\delta V_{\text{deflect}}$  要跟随加速度信号  $a_g$  发生变化,但也要抑制其它噪声信号。

图 2 中,隧道间距和控制下拉电压的微小变化量分别为:

$$\delta z_{\text{tg}} = T \cdot \delta z_{\text{tg,ref}} - S \cdot G_z m_z \cdot \delta a_g - T \cdot n_1, \quad (4)$$

$$\delta V_{\text{deflect}} = -\frac{T \cdot \delta z_{\text{tg,ref}}}{K_{\text{resp}} \cdot G_z} - \frac{T \cdot m_z}{K_{\text{resp}}} \cdot \delta a_g + \frac{T}{K_{\text{resp}} \cdot G_z} \cdot n_1, \quad (5)$$

必须合理设计控制器  $K$  的增益来同时调节式(4)和式(5)中的各个组成部分从而最优地达到指令跟踪和噪声抑制。当  $K$  的增益很大时,系统的回路增益  $L$  的取值也很大,这样灵敏度函数  $S$  将接近于零,或等价地,  $T$  将接近于 1。相反地,

如果控制器增益很小  $K \approx 0$ ,则意味着  $S \approx 1$  和  $T \approx 0$ 。

要获得良好的线性度,希望隧道间距的微小变化量  $\delta z_{\text{tg}} = 0$ 。此时,从式(4)可知,灵敏度  $S$  必须很小,则  $K$  的增益必须很大以及  $T$  也很大,这样,式(4)的最后一项噪声  $n_1$  将导致较大的隧道间距变化量从而使传感性能变差。要使控制电压  $\delta V_{\text{deflect}}$  能够跟踪加速度信号  $a_g$ ,从式(5)可知,此时要求控制器增益大,即  $T \approx 1$ 。但是,若要有效地抑制噪声,从式(5)可知,要求  $T \approx 0$ ,这和良好的测量性能要求相互冲突。由于直流信号的变化量  $\delta z_{\text{tg,ref}} \approx 0$ ,所以这项的影响可以忽略。

接着,建立微隧道式加速度计控制对象的状态-空间数学模型。 $z$  表示可动敏感质量块的位移。依据牛顿第一定律,而且力、电压、时间和位移的单位分别为  $\text{nN}$ 、 $\text{mV}$ 、 $\text{s}$  和  $\text{nm}$  时,可动敏感质量块在隧尖处的位移方程为:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{d_z}{m_z} \frac{dz}{dt} + \omega_z^2 z = -G_{\text{disp}} \times \left( \frac{100 \times K_{\text{resp}} \times \delta V_{\text{deflect}}}{m_z} - a_g \right), \quad (6)$$

状态变量选为隧尖处的隧道间隙的波动量和隧尖速度,即  $\mathbf{X} = [x_1 \ x_2] = [z \ \dot{z}]$ ,输出变量  $y$  为隧道电压的波动量,控制变量  $u$  为下拉控制电压,过程噪声为要测量的输入加速度  $a_g$ ,输出噪声为隧道电子  $1/f$  噪声  $v = H_t \cdot n_1$ ,由此建立的带有噪声的微隧道式加速度计的状态-空间方程为:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}u + \mathbf{G}a_g \\ y &= \mathbf{C}\mathbf{X} + v \end{aligned}, \quad (7)$$

其中

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

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

而且各个参量的取值如表 1 所示。

表 1 各个参量的取值

Tab. 1 Various parameter values

参量名称	参量取值
$m_z/\text{kg}$	$9.2205 \times 10^{-4}$
$d_z/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	0.1953
$\omega_z/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$2.89 \times 10^4$
$K_{\text{resp}}/(\text{nN} \cdot \text{mV}^{-1})$	8.45
$H_t/(\text{mV} \cdot \text{nN}^{-1})$	-140
$G_{\text{disp}}$	1.8617

### 3 LQG 最优控制器的设计及仿真

微隧道式加速度计的 LQG 最优控制系统<sup>[8,9,11]</sup>是由卡尔曼滤波器和最优状态控制器串联而成,由分离定理可知,卡尔曼滤波器和最优状态控制器可以独立设计。

若直接使用式(7)中的各个矩阵设计控制器,由于从隧道间距的变化量到隧道电压的变化量之间的增益高达  $10^{10}$  V/m,则会出现控制器的输出电压高于电源电压的情况,在现实中无法实现。所以为了得到可用的控制器,需要对状态变量和控制变量进行线性变换,线性变换的依据是通过仿真得出的控制器输出在  $-15 \sim +15$  V 范围内:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_s &= \mathbf{A}_n \mathbf{X}_s + \mathbf{B}_n u_s + \mathbf{G}_n a_g, \\ y_s &= \mathbf{C}_n \mathbf{X}_s + T_y^{-1} v \end{aligned} \quad (8)$$

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

$$K(s) = \frac{U(s)}{Y(s)} = -K(sI - \mathbf{A}_n + L_s \mathbf{C}_n + \mathbf{B}_n K_s)^{-1} L = \frac{-9.556 \times 10^8 \times (s + 2.393 \times 10^6)}{s^2 + 6.742 \times 10^6 s + 2.029 \times 10^{13}}, \quad (11)$$

则从参考隧道间距输入到实际隧道间距输出的传递函数为:

$$T_1(s) = \frac{K'(s) \times G(s)}{1 + K'(s) \times G(s)} = \frac{-K(s) \times G(s)}{1 + [-K(s) \times G(s)]} = \frac{2.284 \times 10^{19} \times (s + 2.393 \times 10^6)}{s^4 + 8.86 \times 10^6 \times s^3 + 3.457 \times 10^{13} \times s^2 + 6.582 \times 10^{19} \times s + 5.46 \times 10^{25}}, \quad (12)$$

图 3 为从参考隧道间距到实际输出隧道间距的原系统和 LQG 闭环系统的 Bode 图,由图 3 可知,未进行 LQG 控制之前,微隧道式加速度计的带宽为  $2 \times 10^3$  rad/s,加入 LQG 控制之后,当动态输入信号的角频率不超过  $2 \times 10^6$  rad/s 时,输出信号的幅值与输入信号的幅值相等,体现出很强的跟随性能,此时隧道式加速度计的带宽为  $3 \times 10^6$  rad/s,系统的带宽得到大大提高。而且, LQG 控制之前,只有当输入信号的角频率小于 30 rad/s 时,输出信号和输入参考信号之间才没有相位差;而 LQG 控制之后,输入信号的角频率在较为宽广的频率范围内( $10^5$  rad/s),都能保证输出实际隧道间距和输入参考间距二者同相,从而使系统的输出对正弦输入信号具有良好跟踪特性。

$$\mathbf{G}_n = \mathbf{T}_x^{-1} \mathbf{G}; \mathbf{T}_x = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 \\ 0 & 4000 \end{bmatrix}; T_u = 500; T_y = 500; \mathbf{X}_s = [x_s; \dot{x}_s] = \mathbf{T}_x^{-1} \mathbf{X}; u_s = \frac{u}{T_u}; y_s = \frac{y}{T_y}.$$

选择实际状态与被估计状态之间的误差协方差矩阵作为二次性能函数,即

$$J_{\text{kal}} = E\{(\mathbf{X}_s - \hat{\mathbf{X}}_s)(\mathbf{X}_s - \hat{\mathbf{X}}_s)^T\}, \quad (9)$$

要让误差协方差矩阵取最小值,通过 Matlab 求解卡尔曼滤波器的增益矩阵:

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

同样的,在设计状态控制器时,为了平衡实际隧尖间距和控制量,选择式(10)为二次性能函数:

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{X}_s^T \mathbf{Q} \mathbf{X}_s + r u_s^2) dt, \quad (10)$$

通过 Matlab 求解得到:

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

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

由此理论推导得到 LQG 控制器的传递函数为:

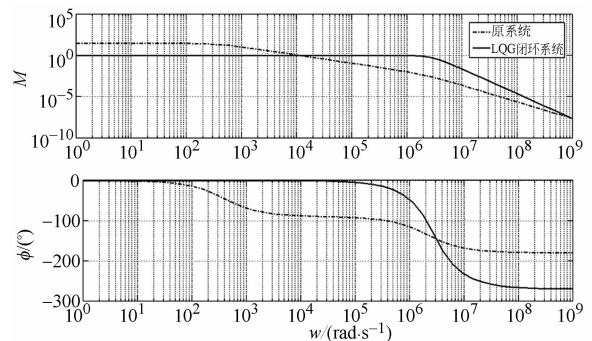


图 3 LQG 控制前后系统的 Bode 图

Fig. 3 Bode diagram of system before and after LQG controls

## 4 实验结果

### 4.1 静态测量

MTA 的测试平台如图 4 所示,静态测量时,激振器(exciter)保持静止不动。由于现有实验设

备无法直接测量纳米级的隧道间隙,所以通过观察下拉控制电压与隧道电流的关系来确认是否产生隧道效应。从静态实验结果得出隧道电流的自然对数  $\ln I_t$  与下拉电压的平方  $V_{\text{deflect}}^2$  之间的关系曲线如图 5 所示,由图 5 可知,二者呈线性关系,这表明器件在平衡位置产生了隧道效应,实验中所测到的信号确实是隧道电流信号。而且当偏压在 62.5~67.7 V 之间变化时,测得的隧道电流在 0.4~4.8 nA 之间波动。

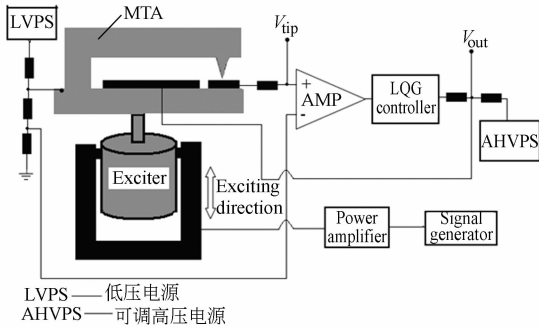


图 4 MTA 的静态和动态测试平台

Fig. 4 Static and dynamic testing platform of MTA

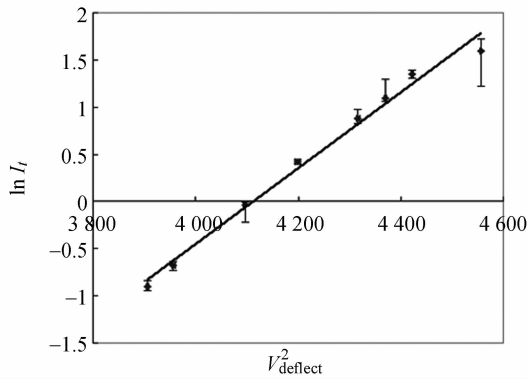
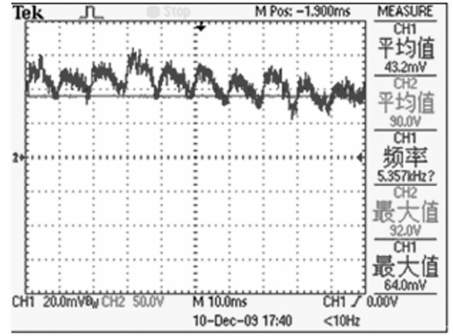


图 5  $\ln I_t$  与  $V_{\text{deflect}}^2$  之间的关系

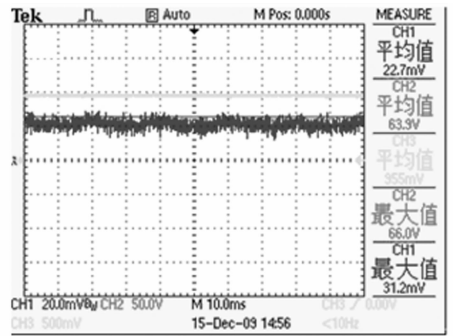
Fig. 5 Relationship between  $\ln I_t$  and  $V_{\text{deflect}}^2$

未加控制时,某个器件的下拉控制电压增大到 90 V 时,产生了隧道效应,得到的静态隧道电压波形如图 6(a) 所示,由图可知,隧道电压的平均值为 43.2 mV,波动范围约为 22~65 mV,与此对应的隧道电流的平均值为 1.96 nA,波动范围为 1~2.95 nA。图 6(b) 为加上 LQG 控制后的静态隧道电压,可以看出,LQG 控制后,隧道电压的波动范围为 16~25 mV,相应地,隧道电流的波动范围为 0.73~1.14 nA,隧道电流比较稳定,这说明 LQG 控制降低了噪声对隧道电流的

影响。



(a) 未加控制时的静态隧道电压  
(a) Before LQG control



(b) 加上 LQG 控制时的隧道电压  
(b) After LQG control

图 6 LQG 控制前后的隧道电压

Fig. 6 Static tunneling voltages of MTA

### 4.2 动态测量

MTA 的动态测试原理如图 7 所示,动态测试时,通过激振器给闭环控制的隧道式加速度计

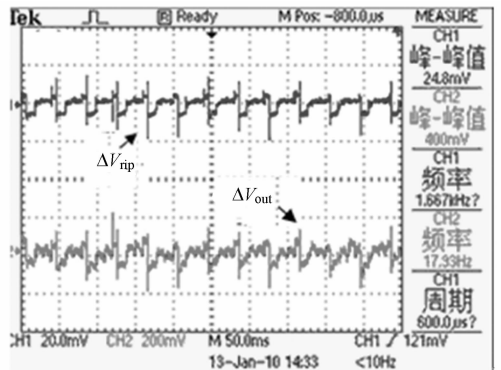


图 7 激励加速度信号为方波时的  $\Delta V_{\text{tip}}$  和  $\Delta V_{\text{out}}$  的波形 (Amp=1 V,  $f=25$  Hz)

Fig. 7 AC components of tunneling voltage and control voltage under square-wave exciting voltage signals (Amp=1V,  $f=25$  Hz).

加载方波加速度信号,其有效值为 1 V,频率为 25 Hz,得到隧道电压和控制电压的交流分量  $\Delta V_{\text{tip}}$  和  $\Delta V_{\text{out}}$  波形如图 7 所示,可知,控制输出电压可以跟踪输入加速度信号,而且,  $\Delta V_{\text{tip}}$  的峰峰值为 16.0 mV,由此推算出隧道间隙的变化量为 0.052 nm,满足控制要求。

## 5 结 论

本文为微隧道式加速度计设计了 LQG 最优

控制系统。利用微小量法推导了微隧道式加速度计的线性化状态-空间方程,依据分离定理实现了卡尔曼滤波器和最优状态反馈控制器的设计,实验分析了控制系统的性能。仿真结果表明 LQG 最优控制将系统的带宽从  $2 \times 10^3$  rad/s 扩展到了  $3 \times 10^6$  rad/s,另外,LQG 最优控制降低了静态隧道电流的波动范围。在动态方波加速度信号的作用下,最优控制能够将隧道间距稳定在工作点附近。

## 参考文献:

- [1] CHINGWEN Y, KHALIL N. A Low-voltage tunneling-based silicon microaccelerometer [C]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1997, (44), 1875-1881.
- [2] JOHN G, AARON B, REYNOLDS K, et al.. Low frequency drift in tunnel sensors[C]. *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, 1997, (2):871-874.
- [3] LELAND R. Adaptive mode tuning for vibrational gyroscopes [C]. *IEEE Trans. on Control System Technology*, 2003, (11):242-247.
- [4] ZHENG Q, DONG L L, GAO ZH Q. Control and rotation rate estimation of vibrational MEMS gyroscopes[C]. *16th IEEE International Conference on Control Applications*, 2007, (10):118-123.
- [5] AJAKAIYE O, GRADE J, SHIN C, et al.. Wafer-scale fabrication of infrared detectors based on tunneling displacement transducers [J]. *Sensors and Actuators A*, 2007 (134):575-581.
- [6] BAY J S. *Fundamentals of Linear State Space Systems* [D]. Singapore: McGraw-Hill, 1999, 50-67.
- [7] KHAMMASH M, OROPEZA-RAMOS L, TURNER K L.. Robust feedback control design of an ultra-sensitive, high bandwidth tunneling accelerometer [C]. *American Control Conference*, 2005 (7): 4176-4180.
- [8] 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)
- [9] 刘益芳,王凌云,孙道恒,等. 微隧道式陀螺仪检测模态的线性二次高斯控制 [J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(10):2214-2221.
- LIU Y F, WANG L Y, SUN D H, et al.. LQG control for sensing mode of micro tunneling gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20 (10): 2214-2221. (in Chinese)
- [10] CHENG H L. *Design, Microfabrication, and Control of High-Performance Micromachined Tunneling Accelerometers* [D]. California: Stanford Univ. Ph. D dissertation, 1999.
- [11] KORDLAR H J, REZAZADEH G. Modeling open-loop MEMS tunneling accelerometer based on circular plate [J]. *Sensors & Transducers Journal*, 2007 (78):1083-1092.

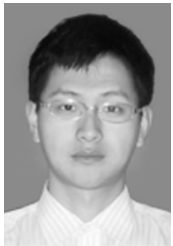
## 作者简介:



**刘益芳**(1976—),女,福建莆田人,讲师,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



**吴德志**(1977—),男,福建莆田人,副教授,2003年于武汉理工大学获得硕士学位,2009年于厦门大学获得博士学位,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



**郑高峰**(1984—),男,福建泉州人,博士,讲师,2006年于武汉科技大学获得学士学位;2011年于厦门大学获得博士学位。主要研究领域包括电液耦合喷印、微纳系统集成制造。E-mail: zheng\_gf@xmu.edu.cn



**杜晓辉**(1987—),男,山东青岛人,硕士研究生,2011年于厦门大学获得工学学士学位。主要研究领域包括 MEMS 器件设计、制备及测试。E-mail: fengpiaotaxiang@163.com



**孙道恒**(1964—),男,安徽合肥人,教授,1987、1990、1997年分别于东北大学获得学士、硕士、博士学位,1997~1999年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

(版权所有 未经许可 不得转载)