

屈曲式微加速度开关设计与分析

赵剑¹, 贾建援¹, 王洪喜¹, 陈光炎²

(1. 西安电子科技大学机电工程学院, 710071, 西安; 2. 中国工程物理研究院
电子工程研究所, 621900, 绵阳)

摘要: 根据弹性梁的大挠度后屈曲理论, 建立了多力耦合作用下加速度开关系统的动力学模型, 由此设计了一种新型屈曲式微机械加速度开关. 该开关采用倾斜微梁支撑敏感质量块, 将两折叠梁固定于质量块的上下表面, 从而保证了开关动作的方向性. 利用弹性线方法计算了倾斜支撑梁结构大挠度后屈曲的非线性刚度, 分析了气膜阻尼力和触点接触力对系统性能的影响, 并运用数值方法对含有椭圆积分的强非线性系统进行了动态特性分析. 仿真结果表明, 所设计的开关响应时间低于 6 ms, 不稳定接触时间小于 0.02 ms, 在闭合状态下触点的接触力大于 50 mN, 与其他类型开关相比, 它具有良好的阈值特性和接触可靠性, 因此在惯性控制系统中具有广泛的应用前景.

关键词: 微加速度开关; 大挠度; 后屈曲; 非线性刚度; 可靠性

中图分类号: TM56 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)03-0358-05

Design and Analysis of Micro-Acceleration Switch with Buckled Beams

Zhao Jian¹, Jia Jianyuan¹, Wang Hongxi¹, Chen Guangyan²

(1. School of Mechanical-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. Institute of Electronic Engineering China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Based on the post-buckling theory of large deflection beams, the nonlinear stiffness of a post-buckling beam is analyzed, then a novel micro-machined acceleration switch is designed. The switch consists of two oblique micro-beams with a mass in the middle, and two other folding beams are fixed on the top and bottom surfaces of the mass to ensure its single moving direction. While the acceleration reaches the threshold, the beams buckle to close the switch immediately, when the acceleration gets below a certain value, the switch opens quickly under the effect of the elastic force developed by the post-buckling beams. Compared with the switches of other kinds, the influences of the film damping force and the contact force on the switch system performance are taken into full consideration. The dynamic equation of the switch under coupled forces is established. And the dynamical simulation shows that the response time is less than 6 ms, and the unstable contact time is 0.02 ms for the strong nonlinear system with elliptic integrals to indicate the good threshold characteristic and high contact reliability of the switch, furthermore the practical validity.

Keywords: micro-acceleration switch; large deflection; post-buckling; nonlinear stiffness; reliability

目前, 在惯性控制系统中作为控制装置使用的微加速度开关, 除了具有响应快、精度和可靠性高等

特点外, 还要能够抵抗电磁、冲击振动等各种形式的干扰, 这就增大了设计的难度, 从而成为微电子机械

系统(MEMS)设计中的难点之一,这就迫切需要有效的设计理论和方法对开关动态特性进行仿真分析,并用于开关的动态设计中,以降低研究开发的费用.文献[1-3]基于小挠度屈曲理论及一阶模态假设计算了屈曲梁跳转的临界力,而忽略了跳转过程中屈曲弹性力与横向位移的关系,因此其结果难以用于开关的动态特性分析中.文献[4]对双稳态屈曲理论进行了深入研究,但推导过程中假设过多,严重影响了公式的实用性.文献[5-7]利用屈曲梁的跳转特性试制了一些加速度开关,但却没有深入考虑气膜阻尼和微接触问题对开关动态性能的影响.为此,本文分析了倾斜支撑梁大挠度后屈曲过程中弹性力与横向位移之间的关系,设计了一种新型屈曲式微加速度开关.通过分析气膜阻尼力、触点接触力等因素对系统动态性能及开关可靠性的影响,建立了加速度开关的系统动力学模型.动态仿真分析表明,该开关设计可满足使用要求,性能稳定可靠,因此为微机械加速度开关的动态设计分析提供了理论参考.

1 加速度开关结构设计

加速度开关与继电器不同,是传感器与执行器的集成,需要根据加速度信号的大小来决定开关所要执行的动作.它满足以下设计功能.

(1)当外界加速度 a 大于或等于闭合门限值 a_c 时,开关由“断开”状态跳转到“闭合”状态,并且要满足触点接触压力的要求

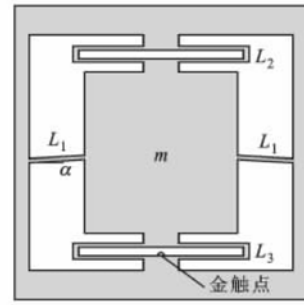
$$ma_c \geq k(x)x_c; F_d = ma_c - k(x)d \geq F_c$$

式中: $k(x)$ 为系统刚度; x_c 为开关触发临界位置; d 为开关行程; F_d 、 F_c 分别为开关接触压力和最小要求接触压力.

(2)当外界加速度低于截止门限 a_d 时,开关由“闭合”状态转换到“断开”状态 $kd \geq ma_d$.

由开关设计概念出发,以倾斜梁屈曲临界力作为开关触发的阈值,利用梁大挠度后屈曲时的非线性刚度,设计的加速度开关结构如图1所示.当加速度信号达到阈值时,支撑梁发生屈曲,质量块迅速移动到触点接触位置,开关闭合,触点接触力(惯性力减去屈曲梁弹性支撑力)满足开关稳定接触要求.当加速度信号低于某一阈值时,外界惯性力减小,屈曲梁弹性力使质量块恢复到断开状态,开关断开.结构中的 L_2 、 L_3 能够提高开关的侧向刚度,使质量块沿惯性力方向运动.开关可以采用X光刻、微电铸、微成型技术(LIGA)工艺进行加工,加工过程中可调整开关壳体与质量块之间的缝隙大小,以充分利用气

膜阻尼效应来提高开关动作的稳定性.

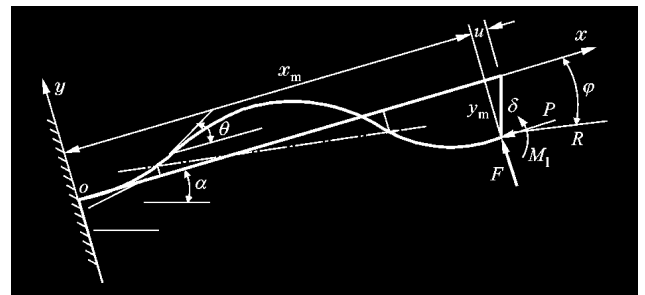


L_1 :倾斜支撑微梁; L_2 、 L_3 :折叠梁;
 m :惯性质量块; α :梁的支撑倾角

图1 加速度开关的结构示意图

2 开关梁非线性刚度分析

为了确定开关的静态结构参数,需要首先对结构刚度进行分析.根据结构的对称性,以左端梁为研究对象,以未变形状态建立的坐标系如图2所示.



δ 、 x_m 、 y_m :梁端点处的位移及坐标; u :轴向压缩量; θ :梁上任意截面处的转角; R :弹性合力; P 、 F 、 R 的轴向压力分量和剪力分量; M_1 :梁固定端处的弯矩; φ :方向角; u :梁右端的轴向位移

图2 载荷作用下的梁屈曲变形

当质量块沿铅垂方向位移 δ 时, δ 以垂直斜梁向下为正,此时

$$y_m = \delta \cos \alpha; x_m = L - u = L - \delta \sin \alpha \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= -R \cos \varphi (y + y_m) - R \sin \varphi (x_m - x) + M_1 \\ P &= R \cos \varphi; F = R \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: x 、 y 为梁上任意点的位移; L 为梁长. 由式(2)确定复合载荷作用下梁的大挠度后屈曲问题的控制方程

$$\left. \begin{aligned} d\theta/ds &= -\frac{R \cos \varphi (y + y_m) - R \sin \varphi (x_m - x) + M_1}{EI} \\ dy/ds &= \sin \theta \\ dx/ds &= \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: E 为弹性模量; I 为惯性矩. 利用边界条件

$$\left. \begin{aligned} s=L, \theta=0, y_L=-y_m, x_L=x_m \\ s=0, \theta=0, y_0=0, x_0=0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: x_0 、 y_0 、 x_L 、 y_L 为梁两固支点处的位移。

挠曲线拐点处有 $M_I=0$, 转角 $\theta=\theta^*$, 由式(2)得到

$$\tan\varphi = F/P = y_m/x_m \quad (5)$$

$$M_I = [2REI(\cos\varphi - \cos(\theta^* - \varphi))]^{1/2} \quad (6)$$

对式(3)沿杆长方向积分, 得到梁长不变的约束条件

$$L = (2EI/R)^{1/2} \int_{-\theta^*}^{\theta^*} [\cos(\theta - \varphi) - \cos(\theta^* - \varphi)]^{1/2} d\theta \quad (7)$$

任意梁截面上的位移为

$$\left. \begin{aligned} x &= \int_0^\theta \cos\theta ds = \pm (2EI/R)^{1/2} \int_0^\theta \cos\theta [\cos(\theta - \varphi) - \cos(\theta^* - \varphi)]^{1/2} d\theta \\ y &= \int_0^\theta \sin\theta ds = \pm (2EI/R)^{1/2} \int_0^\theta \sin\theta [\cos(\theta - \varphi) - \cos(\theta^* - \varphi)]^{1/2} d\theta \end{aligned} \right\}$$

对式(7)沿杆长方向积分, 并化简得到杆端位移的协调条件

$$(L-u)\cos\varphi - y_L\sin\varphi = \int_0^L (\cos\theta\cos\varphi - \sin\theta\sin\varphi) ds \quad (8)$$

由式(5)、式(7)、式(8)来确定 R 及其 φ , 并代入强非线性微分方程组式(3)中, 使其封闭可解。运用数值方法分析复合载荷作用下梁后屈曲的非线性横向刚度, 给定大挠度屈曲梁的参数为 $\alpha=10^\circ$, $L=1\text{ mm}$, 梁宽 $w=100\text{ mm}$, 梁厚 $h=30\text{ mm}$, $E=160\text{ GPa}$, 设定控制参数后进行数值仿真, 得到屈曲梁加速度开关的弹性力-位移曲线(见图3)。

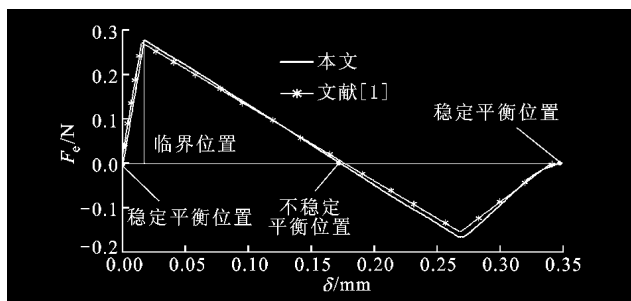


图3 弹性力-位移曲线

由图3可以看出, 当惯性力大于倾斜支撑梁临界屈曲力时, 弹性力随着质量块位移的增大而减小, 直到质量块越过不稳定平衡位置以后, 弹性力出现负值(反向)时, 屈曲梁不需要外力作用就能够发生

状态跳转达到另一稳定平衡位置, 与文献[1]的结果一致。本文主要利用倾斜支撑梁大挠度后屈曲的负刚度特性, 以临界屈曲压力作为加速度开关的阈值, 在不同位置处设定触点, 从而得到不同接触力大小的加速度开关。

根据以上刚度分析, 在保证开关稳定接触压力^[8-11]为50 mN的基础上, 给定 $a_c=196\text{ m/s}^2$, $a_d=49\text{ m/s}^2$, 采用线性搜索法求解开关的静态设计约束关系, 进而确定开关的结构参数。

3 开关系统的动力学模型

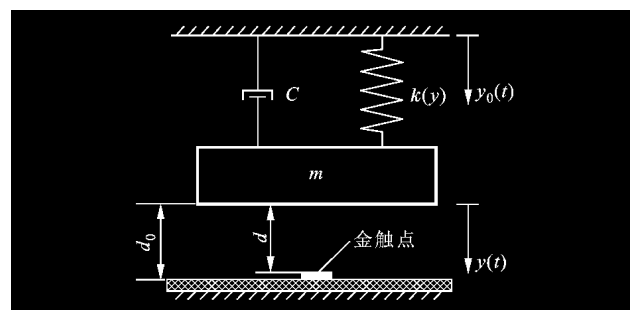
在微加速度开关中, 敏感质量块经弹簧和阻尼器与壳体连接, 敏感质量块的运动决定着整个开关的动态特性, 根据加速度开关的结构及工作原理, 建立的动力学模型如图4所示。根据开关动力学模型及力学基本原理建立了屈曲式微加速度开关的动力学方程

$$m\ddot{y}(t) = -k[y(t) - y_0(t)] - C[\dot{y}(t) - \dot{y}_0(t)] - F_d$$

将质量块与壳体之间的相对运动 $\delta(t) = y(t) - y_0(t)$ 代入上式得到

$$m\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + k\delta + F_d = -ma_0 \quad (9)$$

式中: a_0 为开关阈值加速度。



$y_0(t)$: 开关的基础位移; $y(t)$: 开关的相对位移;

C : 气膜阻尼系数; d : 开关行程; d_0 : 质量块

下表面与壳体的距离

图4 开关运动原理图

若梁的尺寸为 $L \times w \times h$, 敏感质量块尺寸为 $a_m \times b_m \times e_m$, 敏感质量块压膜面积为 $a_m \times b_m$, 触点高度为 $d_0 - d$, 则通过推导得到系统的气膜阻尼系数主要由质量块与壳体下表面之间的气膜间隙决定^[12-13]

$$C = \mu v a_m b_m^3 / d_0^3; v = 1 - (0.6 a_m / b_m) \quad (10)$$

式中: μ 为空气动力黏度; v 为修正系数

根据弹性 Hertz 理论^[14-15], 计算得到接触压力与接触位移之间的关系为

$$F_d = \begin{cases} \frac{2E(r(\delta(t) - d_0 + d))^3)^{1/2}}{3(1-\nu^2)} & \delta > d_0 - d \\ 0 & \delta \leq d_0 - d \end{cases} \quad (11)$$

式中: ν 为泊松比; r 为触点接触半径.将梁的非线性刚度以及式(10)、式(11)代入系统控制方程式(9)中,即可求解开关的系统响应.

4 开关动态仿真分析

由于二阶微分方程式(9)是强非线性的,且关系复杂,难以用解析方法求解,因此采用 Runge-Kutta 法来数值模拟加速度开关的系统控制方程.输入矩形波信号(见图 5)对开关进行动态仿真,得到了系统的响应曲线(见图 6)和触点接触力随时间变化的曲线(见图 7).

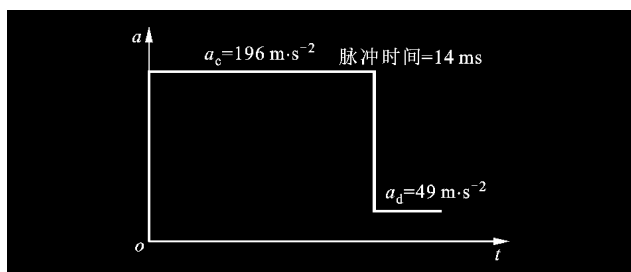


图5 加速度开关信号

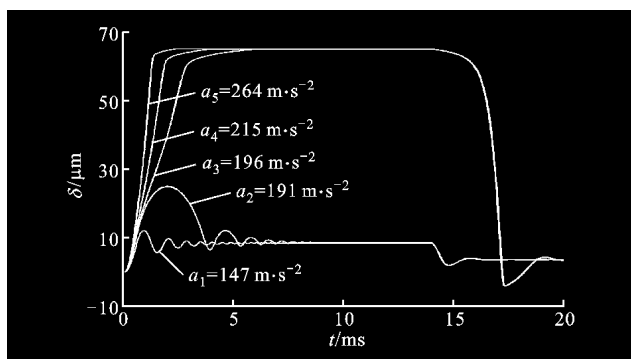


图6 加速度开关时间的响应曲线

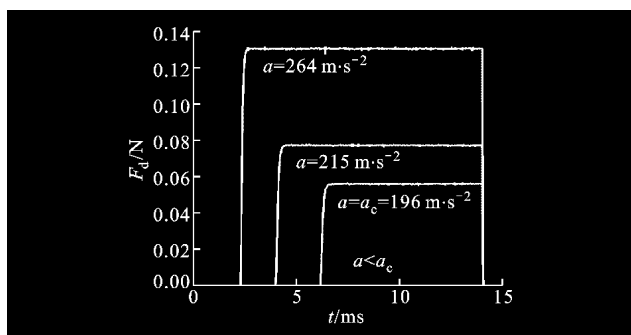


图7 接触力变化曲线

从图6、图7中看出,当加速度 $a=191 \text{ m/s}^2$ 时,开关保持断开状态;当 $a=a_c=196 \text{ m/s}^2$ 时,开关迅速闭合,说明开关具有良好的阈值特性,且从触发到

实现闭合只用了6 ms,所以开关能够实现快速响应,而触点不稳定接触时间(从开始接触到稳定接触)仅需0.05 ms,因此降低了触点发热和电弧的影响.当加速度信号低于截止门限 a_d 时,屈曲梁弹性支撑力使开关迅速断开.如图7所示,在加速度的作用下,触点接触力大于50 mN,从而满足了开关稳定接触的设计要求.随着加速度幅值的增大,开关响应时间不断缩短,触点接触压力增大,在闭合阶段没有出现超调,处于过阻尼状态,因而提高了开关接触的可靠性.在实际工作状态下,可以通过调整开关触点高度来达到调整气膜阻尼的目的,进而调节系统的响应时间,但同时也会影响系统的抗干扰能力.

5 结 论

本文设计了具有倾斜支撑梁结构的新型屈曲式微加速度开关,并基于大挠度屈曲理论推导了梁后屈曲弹性支撑力与位移之间的关系.在开关设计中,考虑了质量块受到的气膜阻尼力以及触点接触力对系统性能的影响,并建立了开系统动力学分析模型.系统数值仿真结果表明,开关响应时间低于6 ms,不稳定接触时间小于0.02 ms.开关具有良好的阈值特性和快速响应能力,同时大挠度后屈曲梁结构的负刚度特性,能够使开关在闭合状态下的触点接触力大于50 mN,不仅满足了开关接触可靠性的要求,而且对于其他类型加速度开关的设计分析也具有一定的参考价值.

参考文献:

- [1] Qiu Jin, Lang J H, Slocum A H. A centrally-clamped parallel-beam bistable MEMS mechanism[C] // Proceedings of the IEEE Micro Mechanical Systmes (MEMS). Interlachen, Switzerland: IEEE, 2001:353-356.
- [2] Fang Wang, Wickert J A. Post buckling of micromachined beams[J]. J Micromech Microeng, 1994, 4 (3):116-122.
- [3] Vangbo M, Backlund Y. An analytical analysis of a compressed bistable buckled beam[J]. Sensors and Actuators: A, 1998, 69(3): 212-216.
- [4] Taher S A. On a tunable bistable MEMS—theory and experiment[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2000, 9(2):157-170.
- [5] Freudenreich M, Mescheder U, Somogyi G. Simulation and realization of a novel micromechanical bi-stable switch [J]. Sensors and Actuators: A, 2004, 114(2):

- 451-459.
- [6] Sang G J, Cho Y H, Kwak B M, et al. Snapping microswitches with adjustable acceleration threshold[J]. *Sensors and Actuators; A*, 1996, 54(1):579-583.
- [7] Matsunaga T, Masayoshi E. Acceleration switch with extended holding time using squeeze film effect for side airbag systems[J]. *Sensors and Actuators; A*, 2002, 100(1):10-17.
- [8] Beth L P, Park W T. Measurement system for low force and small displacement contacts[J]. *Journal of Microelectromechanical System*, 2004, 13(2): 220-229.
- [9] Hannoe S, Hosaka H. Electrical characteristics of micro mechanical contacts[J]. *Microsystem Technologies*, 1996, 3(1):31-35.
- [10] Hyman D, Mehregany M. Contact physics of gold microcontacts for MEMS switches[J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 1999, 22(3): 357-362.
- [11] Aukland N, Harry C, Hessefort S, et al. Contact resistance changes of silver, silver alloys, and gold plated silver coupons exposed to ozone[J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2000, 23(2): 317-322.
- [12] Bao Minghong. *Micromechanical transducers — pressure sensors, accelerometers and gyroscopes* [M]. New York: Elsevier, 2000:307-311.
- [13] Mohamed G E. *The MEMS handbook* [M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 2001: 142-162.
- [14] 铁摩辛柯, 古地尔. 弹性理论[M]. 徐芝纶, 译. 北京: 高等教育出版社, 1990: 489-495.
- [15] 王洪喜. 微结构的静电驱动特性研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学机电工程学院, 2006.
- (编辑 管咏梅)

顺序注射水质自动监测仪研制成功

一种能够对生活污水、江河湖泊水和工业污水中的化学需氧量、氨氮和 pH 进行自动监测、监控的集成监测仪器——顺序注射水质自动监测仪,由西安交通大学梁恒教授主持研制成功,并于近日通过由陕西省科技厅主持的技术成果鉴定。

随着我国工业化进程的加快,环境污染尤其是水质污染日益严重,而目前我国的环保监测仪器基本上还采用的是实验室分析仪器,工作量大,取样率低,无法满足污染物总量控制的要求。西安交大生命科学与技术学院分离科学研究所承担了顺序注射自动监测水质化学需氧量、氨氮和 pH 集成仪器项目,研制成功了先进的水质自动监测仪样机。

这种集成仪器选用工控机系统,在软件上采用先进的数据处理技术,使仪器具有自动化程度高、抗干扰能力强、显示内容丰富等特点,同时具有自检、自校正、温度补偿、数据储存和信息传输等智能化功能。此项目采用化学分析领域新近发展的顺序注射分析方法,实现了在线同时监测水中化学需氧量、氨氮和 pH 三个指标,设计方案具有创新性。

鉴定委员会专家认为,这种集成仪器具有良好的应用前景和推广价值,建议在进一步完善工艺设计的基础上,尽快在生产实践中检验并经过国家有关部门认定后实现产业化。

(西安交大科技在线 <http://www.xjtust.com>)