

◀ 专家论坛 ▶

# 机械故障信息监测 MEMS 高频加速度传感器\*

赵玉龙, 刘岩, 孙禄

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安, 710049)

**摘要** 结合机械故障信息监测的需求,将微机电系统(micro electro-mechanical system,简称MEMS)传感器技术引入到机械装备的振动测量中,介绍了压阻式 MEMS 加速度传感器的检测原理、结构设计、微加工工艺及其关键技术。以“小变形-大应力”为敏感结构设计思路,研制了梁膜结构、孔缝双桥结构以及复合多梁结构3种高频加速度传感器,以满足高速制造装备的振动信号监测对传感器的需求。通过静态、动态性能测试实验可以看出,3种结构均在一定程度上提升了传感器的测量性能,实际测振实验也说明所研制的MEMS 加速度传感器具备了装备振动信号检测所需的功能。具有微型化、低成本以及可大规模生产潜力的MEMS 传感器的发展为高端机械制造装备的发展提供了新的器件支持,推动主轴部件等的智能化、一体化发展。

**关键词** 故障监测; 微机电系统; 加速度传感器; 敏感结构; 微加工

**中图分类号** TP212.1; TH16

## 引言

传感器作为故障信息监测与诊断的数据来源,其对工程装备工作参数的拾取精度直接决定了后续故障诊断的准确度,是机械故障信息监测的关键器件。随着无线监测系统进入工业应用以及制造装备智能化发展的趋势,当前所用的压电式加速度传感器由于成本、体积等方面的原因逐渐不能满足工业实际需求<sup>[1-2]</sup>;因此,将具有微型化与可大规模生产等潜力的MEMS 传感器应用于机械故障信息监测中,可为制造装备集成化、智能化发展提供必要的器件支持。

MEMS 微加工技术继承了IC 工业中的半导体材料加工技术,具有小型化、集成化和可大规模生产的特点,微传感器已广泛应用于包括加速度、压力、微力等诸多机械量的测量中<sup>[3-4]</sup>。加速度传感器具有高灵敏度、高可靠性以及可大规模生产等特点。目前,常见的MEMS 微型加速度传感器包括电容式、热对流式、谐振式以及压阻式等。

电容式加速度计利用敏感结构将加速度信号转化为电容变化量,再通过外围信号调理电路处理,实现加速度的线性输出,具有分辨率高、温度特性好等优点,多用于测量稳态或低频的低加速度值振动,在

地震监测、空间微重力测量、生物医疗、惯性导航等领域有广泛的应用。由于电容式加速度计动态测量的带宽相对较小,不能很好地满足装备监测中高频振动的测量要求。同时,为了消除轴间交叉耦合,电容式加速度计越来越多地采用高度对称结构,如梳状叉指结构,明显增加了芯片结构的复杂性,提高了对加工工艺的要求,降低了传感器的产量和合格率<sup>[5]</sup>。目前,国内外对电容式加速度计的研究多侧重于灵敏度或者分辨率的提高。

Dauderstadt 等<sup>[6]</sup>提出了热对流式加速度计,基于单片CMOS 集成电路的制造工艺,以可移动的热对流气团作为重力块,通过加速度引起的内部腔体内的气团的位置变化来测量加速度。相比于传统MEMS 加速度计,热对流式加速度计具有高可靠性、高性能和低成本的优势<sup>[7]</sup>,使其在手机、数码相机、PDA 及MP3 等必须具备一定的抗冲击能力的电子产品上获得广泛应用。热对流式加速度计已经成为加速度计发展的研究热点之一,但频率响应的不足限制了其应用范围。

谐振式传感器通过检测敏感结构谐振频率变化的方式来表征所拾取的加速度。传感器直接输出频率信号,避免了幅度测量的误差,测量结果不易受到环境噪声的干扰。但谐振式传感器工作时需要起振器件使敏感元件处于谐振状态,增加了传感器器件

\* 国家自然科学基金资助项目(编号:51275402);国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(编号:2009CB724405);长江学者和创新团队发展计划资助项目(编号:IRT1033)

收稿日期:2012-09-14

的复杂性,且加速度的量值通过频率信号变化来表征,与现有信号处理方法兼容性不好,提取信号频率能力不足,不适用于故障信息检测中连续加速度的提取。

压阻式加速度计的基本原理是:当待测加速度作用于传感器时,梁结构在惯性力的作用下产生弹性变形和应力,压敏电阻因材料压阻效应阻值发生变化,惠斯通电桥将电阻的变化转化为电压输出,通过测量电压变化得到待测加速度。作为最早开发的硅微加速度传感器,压阻式加速度计具有体积小、易集成、功耗小、可靠性高、精度高以及易于利用标准的IC技术实现集成化等优点,是一种应用范围较广的MEMS加速度传感器。

综合各类传感器的优缺点以及机械制造装备故障检测对测振传感器的性能需求,笔者以3种不同结构的压阻式MEMS加速度传感器为对象,介绍了微型测振加速度传感器的工作原理、结构设计方法以及微加工工艺。针对传感器固有频率与测量灵敏度之间的制约关系,提出“小变形-大应力”的敏感结构设计方法,并根据所设计结构特点与微加工工艺能力制定传感器芯片制作流程,最后给出传感器的性能测试结果,并将其应用在实际测振实验中。

## 1 传感器敏感原理

### 1.1 压阻效应与硅材料

压阻式传感器利用材料的压阻效应将物理量转换为电学量的方式来实现信号测量。所谓压阻效应是指材料受到应力作用时,其电阻发生明显变化的现象。对于长度为 $L$ 、横截面积为 $S$ 、电阻率为 $\rho$ 的材料,当受到应力作用时,其电阻阻值的相对变化可以表示为

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S} = \pi\sigma + \frac{dL}{L} + 2\mu \frac{dL}{L} = (1 + 2\mu + \pi E)\epsilon \quad (1)$$

其中: $\pi$ 为材料的压阻系数; $\mu$ 为泊松比; $\epsilon$ 为应变; $\sigma$ 为所受应力; $E$ 为弹性模量。

$G = 1 + 2\mu + \pi E$ 称为材料的应变系数或灵敏系数,其物理意义为材料发生单位应变时电阻的变化率。由 $G$ 的表达式可知,材料的应变系数是由两方面因素决定的<sup>[8]</sup>:一是 $1 + 2\mu$ ,它由材料的几何尺寸的变化引起;二是 $\pi E$ ,它由材料受应力作用时电阻率发生变化引起。一般的金属材料,其电阻率基本上与应力无关, $\pi E$ 值很小,可以忽略,其压阻效应主要决

定于几何尺寸的变化。一般金属材料的应变系数很小,在弹性变形范围内,应变系数 $G$ 在1.5~2之间。半导体材料的应变系数 $G$ 值主要由电阻率的变化决定, $G \approx \pi E$ 。半导体的应变系数 $G$ 大约在70~170之间,远远高于金属材料的应变系数。可见,半导体材料具有比其他材料更显著的压阻效应,非常适合传感器的信号敏感要求。

对于压阻式加速度传感器,仅靠压阻元件不能实现其功能,还需要对加速度敏感的弹性元件将被测加速度转换为能被压阻元件感应的结构应力。压阻元件和弹性元件共同构成压阻式加速度计的敏感结构,二者缺一不可。由于弹性元件的性能直接影响着加速度计的灵敏度、线性和固有频率等参数,所以需要合理设计弹性元件的结构以及合理选择弹性元件的材料。为了获得性能良好的弹性元件,其材料应具备以下要求:a. 高屈服强度、弹性极限和疲劳极限;b. 良好的线性和重复性;c. 弹性滞后小、蠕变小;d. 热膨胀系数小、温度系数小;e. 良好的加工工艺性;f. 良好的抗腐蚀性能,长期稳定性。单晶硅作为一种常见的半导体材料,具有优异的机械性能:其屈服强度是不锈钢的3.5倍,弹性模量与不锈钢相当,而密度仅为不锈钢的1/3,强度质量比超过了所有常用工程材料;具有很好的热导性,是不锈钢的5倍,而热膨胀系数则不到不锈钢的1/7;同时具有极小的弹性滞后、极佳的重复性和长期稳定性;制造工艺与IC工艺有很好的兼容性,便于加工。上述优异性能使单晶硅成为一种理想的弹性元件材料,被广泛用于微传感器和微结构的制造中。

单晶硅由于材料的各向异性,其压阻系数与压阻元件所处的晶向相关。正交坐标系中,当坐标轴与晶轴一致时,电阻的相对变化率与应力之间的关系<sup>[9]</sup>满足

$$dR/R = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (2)$$

其中: $\sigma_l, \sigma_t$ 为沿电阻纵向与横向的应力; $\pi_l, \pi_t$ 为沿纵向和横向的压阻系数; $l$ 表示应力作用方向与通过压阻元件的电流方向一致; $t$ 表示应力作用方向与通过压阻元件的电流方向垂直。

MEMS传感器利用上述硅压阻原理,在硅晶片上采用MEMS微细工艺沿单晶硅片的特定晶向注入参杂介质制成扩散型压敏电阻。作为压阻元件,同时利用硅材料的力学特性制成弹性元件,最终得到集被测信号检测与电信号转换于一体的硅质压阻传感器。

### 1.2 加速度传感器原理

目前,压阻式加速度传感器多采用如图1所示

的“梁-质量块”结构,主要包括质量块、支撑梁和压敏电阻3个基本元件。当传感器受到加速度作用时,质量块在惯性力的作用下发生与加速度成比例的位移,带动支撑梁发生弯曲变形,产生应力。由于硅的压阻效应,压敏电阻在应力作用下阻值变化,后经过惠斯通电桥输出与加速度成比例的电压,实现加速度信号到电信号的转换,如图2所示。

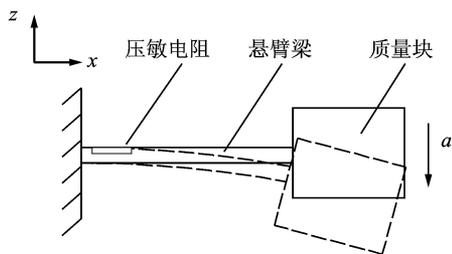


图1 梁-质量块结构图

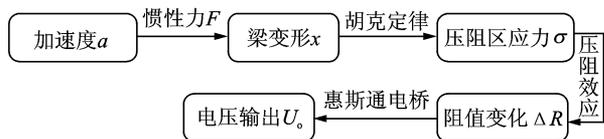


图2 压阻式传感器工作过程

在加工传感器芯片过程中,通常采用离子注入工艺在传感器应力最敏感区域制作4个等值的压敏电阻以提高传感器的测量灵敏度。然后由芯片上的金属引线将压敏电阻连接成惠斯通电桥,由外接恒压源或恒流源激励工作。当传感器工作时,压敏电阻中将有两个产生 $+\Delta R$ 的变化,另外两个产生 $-\Delta R$ 的变化,电桥失衡输出电压为

$$U_0 = \frac{R_2/R_1}{(1 + R_2/R_1)^2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) U_s \quad (3)$$

由式(3)可知,惠斯顿电桥的输出 $U_0$ 与各压敏电阻的变化成线性关系。惠斯通电桥能够有效地将压敏电阻的变化转换成电压信号,且压阻式传感器的电压输出与加速度输入成线性关系。

## 2 传感器的敏感结构

加速度传感器的主要性能指标包括测量灵敏度、固有频率、输出线性度以及可用量程等,其中测量灵敏度与固有频率是决定传感器应用范围的重要指标,高速制造装备的振动监测对这两个指标均有较高的要求。从理论分析可知,传感器灵敏度与固有频率为两个相互制约的参数。对于等效刚度为 $K$ 、等

效质量为 $M$ 的加速度敏感结构来说,其在加速度 $a$ 作用下质量块的静态位移 $^{[10]}x$ 有

$$x/a = M/K = 1/\omega_0^2 \quad (4)$$

单位加速度引起的质量块位移与传感器固有频率的平方成反比。对于某一结构的传感器来说,提升固有频率则必须增加结构刚度、减小质量块,而这必然会减小结构的静态变形,造成敏感结构上的应力减小,降低传感器灵敏度;反之,提升传感器测量灵敏度也会造成传感器固有频率的下降。因此,缓解固有频率与测量灵敏度之间的制约关系,设计具有高频响、高灵敏度的敏感结构成为机械故障信息监测用MEMS加速度传感器研制中的重点。

为了解决上述问题,笔者以“小变形-大应力”为设计思想,寻求合适的传感器敏感结构,使传感器具有较大结构刚度的同时,压敏电阻所处位置仍有较大的敏感应力,以提高传感器灵敏度,并据此设计了具有梁膜结构、孔缝双桥结构以及复合多梁结构的3种压阻式加速度传感器。梁膜结构是对传统悬臂梁结构的改进,提升了传感器的固有频率,降低了传感器的横向交叉干扰,同时较小的膜结构厚度可以减小固有频率上升对传感器灵敏度的影响。孔缝双桥结构和复合多梁结构均以传统双桥结构为基础,前者通过引入应力集中孔缝,在提升传感器灵敏度的同时减小敏感结构的刚度流失;后者引入短小敏感梁,在提升传感器固有频率的同时,利用结构的应变放大作用为传感器提供较高测量灵敏度。以下对这3种结构进行详细说明。

梁膜结构针对传统悬臂梁结构灵敏度高的优点及固有频率低、横向交叉干扰大的缺点,通过添加支撑膜结构的方式来提升传感器的性能 $^{[11]}$ 。梁膜结构加速度传感器芯片结构如图3所示。芯片由梁膜敏感结构、质量块、布置于梁区域上的压敏电阻(图中未表示)和键合的Pyrex玻璃组成。梁膜敏感结构包括悬臂梁和两块完全相同的膜。厚度为悬臂梁一半的膜结构与悬臂梁相连接组成一个整体,共同支撑质量块。悬臂梁上沿着 $[110]$ 与 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 晶向布置了4根压敏

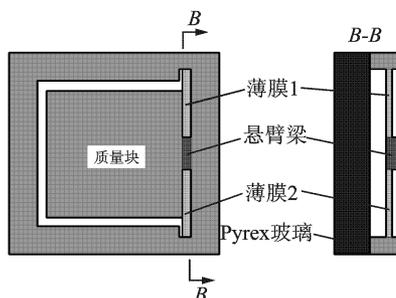


图3 梁膜结构示意图

电阻,通过金属引线连接形成惠斯通电桥。梁膜结构的特点如下:a.两块膜结构的宽度较大,使质量块支撑结构的宽度增加,提高了结构整体的固有频率;b.加速度作用下产生的应力集中于悬臂梁上,而膜结构的厚度小于悬臂梁,减小了其对于悬臂梁上有效应力的影响;c.膜结构与硅基有较长的连接线,使传感器芯片在横向加速度作用下产生的弯曲变形减小,降低了传感器的横向交叉干扰。在硅质芯片的背面通过阳极键合粘一块与单晶硅热特性相近的硼玻璃以便于对传感器芯片的后续封装,防止芯片在封装过程中遭到破坏。相对于普通悬臂梁结构,梁膜结构的固有频率上升约30%,梁上最大应力下降34%,在一定程度上缓和了固有频率与测量灵敏度之间的制约关系,同时梁膜结构两个交叉轴的干扰灵敏度分别下降了47%和21%。

孔缝双桥结构传感器芯片如图4所示,该结构在传统的双桥梁结构的基础上引入了应力集中孔,在提升传感器测量灵敏度的同时尽可能降低对传感器固有频率的影响<sup>[12]</sup>。该结构中的普通双桥梁结构具有较大的结构刚度,能够保证传感器最终具有足够的固有频率。同时应力集中孔的引入提高了敏感梁上的有效应力,使传感器的测量灵敏度有了较大的提升。4根梁上的压敏电阻布置于孔缝的两边,位置由梁上应力分布规律以及惠斯通电桥的组桥方式来决定。通过敏感梁和应力集中孔尺寸的合理选择,可以有效保证设计结构满足高频响高灵敏度的要求。由理论分析结果可知,孔缝双桥结构的梁上最大应力上升了35%,而固有频率仅下降了13.4%。

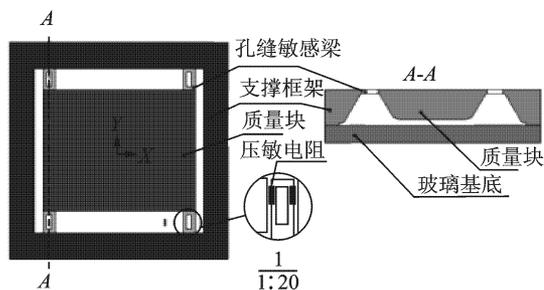


图4 孔缝双桥结构示意图

图5所示为研制的复合多梁结构加速度传感器示意图。复合多梁结构通过将短小敏感梁引入双桥结构的方式,大幅度提升了传感器的固有频率。同时由于敏感梁结构尺寸小于其余4根支撑梁,在变形相同的情况下,敏感梁上产生更大的应力,提升了传感器的测量灵敏度。通过理论分析可得复合多梁结构的固有频率为双桥结构的1.73倍,而敏感梁上的



图5 复合多梁结构示意图

最大应力达到了双桥结构梁上最大应力的88%。该结构在大幅提升传感器固有频率的同时,保证了传感器的测量灵敏度维持在可观的水平。

综合以上3种结构可以看出,尽管对于传感器的某一结构来说,提升其固有频率必然会带来测量灵敏度的大幅下降,这一制约关系仍可以通过合理的传感器敏感结构设计来缓和,以得到高性能的测振加速度传感器。

### 3 传感器的微加工与封装

#### 3.1 传感器芯片的微加工

MEMS 加工工艺源于IC制造,大量继承了包括光刻、薄膜淀积、注入扩散、干法和湿法刻蚀等在内的IC制造技术。除此以外,MEMS也有一些特有的工艺,例如牺牲层技术、各向异性刻蚀、反应离子深刻蚀、光刻模铸造电镀成型、双面光刻、键合等技术。MEMS器件一般较脆弱,而且很多工艺相互影响,这就要求MEMS工艺设计中后续的工艺不能影响前面已经成形的工艺结果。如高温工艺应先于低温工艺进行,带有杂质离子的湿法腐蚀应在金属化工序之后进行,结构释放工艺应在硅工艺流程的最后进行等。在传感器的微加工工艺中有以下关键技术需要注意。

1) 湿法腐蚀与凸角补偿。MEMS器件通常包含一些梁、质量块、腔体等三维结构,这些结构都是在硅片上进行选择性的刻蚀完成的。常用的刻蚀工艺包括湿法刻蚀和干法刻蚀。压阻式加速度传感器通常采用各向异性湿法腐蚀来制作质量块-梁的背腔结构,常用的腐蚀液包括KOH水溶液与四甲基氢氧化铵(TMAH)水溶液<sup>[13]</sup>。湿法刻蚀利用掩模层和基底在刻蚀液中刻蚀速率相差很大的特点,在基底上得到需要的腐蚀图形;因此,掩模层的制作是实现湿法腐蚀的重要工艺环节。一般采用 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 复合膜作为湿法刻蚀的掩模层,在 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 之下再沉积一层 $\text{SiO}_2$ 作为缓冲层,以减小薄膜应力的影响,保证

掩模层的可靠性。此外,湿法刻蚀的各向异性在刻蚀硅基形成不同的三维结构的同时,也在结构的凸角处引起削角现象。为保证加工所得的传感器质量块完整的凸角结构,在设计湿法刻蚀掩模版时需在质量块4个角处进行相应的凸角补偿<sup>[14]</sup>。图6为梁膜结构中的凸角补偿以及加工完成的芯片背面照片。



图6 凸角补偿技术

2) 离子注入。压阻式传感器的压敏电阻通过掺杂工艺进行制作。掺杂就是向指定区域的衬底或薄膜材料掺入杂质以取代原来位置上原子的过程,可以用来改变半导体材料的导电率。掺杂的方法有离子注入和扩散,前者利用高能杂质离子加速后轰击注入衬底实现掺杂,后者利用杂质不同浓度下扩散系数的差别实现掺杂。与扩散掺杂相比,离子注入掺杂能精确地控制掺杂的深度和浓度的分布,且掺杂的均匀性好,重复性高,有利于器件的大规模生产。对于单晶硅材料,主要有使用硼离子掺杂的p-Si型掺杂和使用磷离子掺杂的n-Si型掺杂,其中p-Si掺杂更为常用。图7为复合多梁结构传感器中的压敏电阻。



图7 压敏电阻版图及加工实物

3) ICP刻蚀。电感耦合等离子体(inductively coupled plasma,简称ICP),其原理为通过由低压放电产生的离子、电子和中子组成的部分电离气体及自由原子团,同固体表面产生物理和化学作用,去除被刻蚀材料,形成所需要的结构。ICP刻蚀具有精度高、易控制、侧壁垂直性好等优点,通常用来刻蚀引线孔、减薄质量块形成工作间隙,释放敏感结构等。

4) 硅-玻璃阳极键合。加速度传感器芯片一般由硅、Pyrex7740玻璃基底两部分组成。键合于硅芯

片背面的玻璃片一方面为传感器提供阻尼环境,另一方面保护硅质结构在封装、使用过程中的安全性与稳定性。玻璃与硅之间的粘接一般采用阳极键合技术来实现<sup>[15]</sup>。将硅片和玻璃温度加热到300~500℃,同时将300~1000V的高电压施加到硅片和玻璃两面,硅片接正极,玻璃接负极,如图8所示。在外加电场的作用下,玻璃中的Na<sup>+</sup>离子向负极方向飘移,并在负极被中和,在紧邻硅片的玻璃表面形成宽度几微米的耗尽层。硅片与玻璃之间存在较大的静电力,将两者紧密接触,并发生化学反应,形成牢固的Si-O化学键。它的形成使得硅-玻璃界面形成了良好的封接,键合强度要比硅或玻璃本身更加牢固。

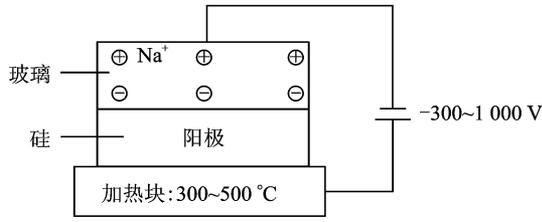
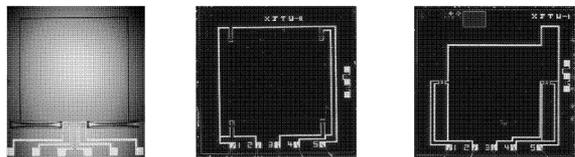


图8 硅玻阳极键合示意图

由于3种结构加速度传感器的工艺流程类似,笔者以复合多梁结构为例,简要介绍加速度传感器主要的加工流程。加速度传感器的加工材料包括厚为400 μm、直径为100 mm的n型(100)晶面双抛单晶硅片与厚度为500 μm的Pyrex7740玻璃片。整个加工流程需要8块掩模板,其中7块用于加工传感器的硅质结构以及压敏电阻、金属引线等,剩余1块用于沉积玻璃片上的防吸附金属电极。传感器工艺流程如下:a.清洗硅片,双面热氧化得到SiO<sub>2</sub>层;b.硅片的压敏电阻P-区硼掺杂至需求浓度;c.在金属接触区硼离子注入,形成P+区域;d.溅射金属,正面光刻,形成铝引线;e.正面保护,背面ICP刻蚀形成质量块活动阻尼间隙;f.使用低压化学气相沉积沉积Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>层,同时沉积SiO<sub>2</sub>层以减小薄膜应力,形成KOH腐蚀的掩模层;g.背面光刻,刻蚀背面SiO<sub>2</sub>和Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>,形成KOH腐蚀的掩模层,掩模版同时提供活动质量块的凸角补偿图形,背面KOH各向异性腐蚀,形成活动质量块,正面ICP释放形成复合多梁结构;h.硅片通过阳极键合技术粘结具有防吸附电极的玻璃片,之后划片,完成工艺过程,得到传感器芯片。加工完成后的芯片CCD照片如图9所示。

### 3.2 传感器芯片的封装

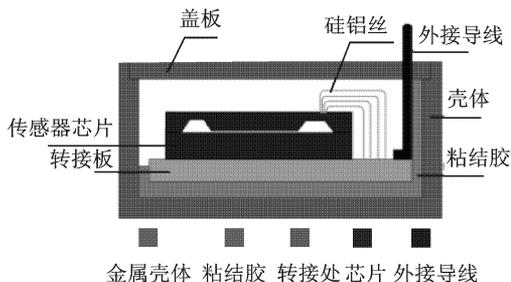
由于传感器芯片的材料特殊性,如不加以必要的封装保护则不能进入实际应用中。因为传感器芯片具有可动结构,需要与外接物质相互作用以产生



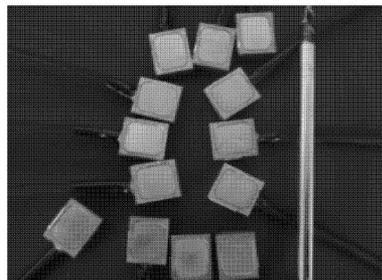
(a) 梁膜结构芯片 (b) 孔缝双桥结构芯片 (c) 复合多梁结构芯片

图9 加工所得传感器芯片

运动,其封装要求相对于微电子器件来说更高。大多数MEMS器件实现从实验室阶段向产业化的过渡必须克服众多技术和设备上的困难,而在技术上最主要的障碍之一就是MEMS器件的封装。对于测振加速度传感器的封装,主要有以下要求:a.保护传感器芯片可动结构不受破坏,可靠性高,稳定性好;b.能够为传感器芯片与外部提供可靠的电气连接;c.尽量减小因封装过程而引入的传感器系统误差,减小温度变化引起的热应力对传感器性能的影响;d.安装简易,便于后续性能测试实验与实际振动测试实验的进行。针对以上封装要求,笔者采用PCB转接板与不锈钢壳体结合的方式对传感器进行了简单的封装。传感器芯片通过键合硅铝丝将其上焊盘连接于PCB焊盘上,再通过接于PCB上的屏蔽线与外部电气设备连接,从而实现芯片与外部环境可靠的电气连接。不锈钢壳体为传感器提供封闭的钝化环境,即保护脆质传感器芯片。传感器芯片、转接板与壳体之间采用DG-3S胶涂覆使它们成为自持的一体结构,这样既可以有效隔离弹性敏感元件,使整体结构能够承受冲击,又能真实地反映外界振动。图10为所采用的传感器封装方案示意图及所得传感器。



(a) 传感器封装方案示意图



(b) 封装所得传感器

图10 传感器封装示意图

## 4 性能测试与应用

### 4.1 传感器的性能测试

传感器的性能测试主要包括静态性能测试和固有频率测试,静态性能测试包括测量灵敏度、输出线性度和总体精度。

静态性能测试采用离心机产生的向心加速度作为加载加速度的来源。实验系统包括离心机、自制加速度计夹具、离心机控制台、直流稳压电源、数字式万用表及必要的连接电缆等。实验时,传感器通过夹具固定于离心机转盘上,传感器导线接于离心机内部接线柱,再通过导电滑环接入到离心机背后的固定接线柱,最后通过导线接出。固定时应保证传感器的敏感轴方向与离心机的径向一致,并将传感器和各处导线充分固定,以防止离心机高速旋转时被较大离心力甩出。传感器在离心机转盘上的固定方式如图11所示,夹具通过两个T型螺栓卡在转盘凹槽内,其中一个T型螺栓完全固定以确定实验中传感器与转盘中心的径向距离,方便设定离心机工作参数。为了使离心机转盘配重平衡,笔者制作了两个相同的夹具,且其位置相对于转盘中心对称。图12为梁膜结构、孔缝双桥结构以及复合多梁结构在3V激励电压下的输入输出曲线。可见,3种结构传感器均具有很好的线性度和可重复性。在3V电压下梁膜结构的灵敏度为0.56 mV/g,孔缝双桥结构灵敏度为0.424 mV/g,复合多梁结构灵敏度为0.544 mV/g。表1为3种结构传感器的静态性能参数。

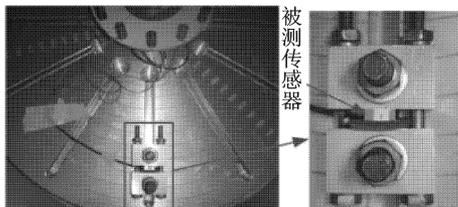


图11 固定于离心机转盘的被测传感器

表1 传感器静态性能参数

| 性能参数                                      | 梁膜结构 | 孔缝双桥结构 | 复合多梁结构 |
|---|------|--------|--------|
| 主轴灵敏度/( $\text{mV} \cdot \text{g}^{-1}$ ) | 0.56 | 0.424  | 0.544  |
| 最大交叉干扰/%                                  | 9.1  | 3.5    | 6.88   |
| 最大非线性度/%FS                                | 0.38 | 0.51   | 0.54   |
| 重复性/%FS                                   | 0.22 | 2.04   | 1.6    |
| 迟滞/%FS                                    | 0.39 | 0.21   | 0.5    |
| 总精度/%FS                                   | 0.59 | 2.11   | 1.76   |

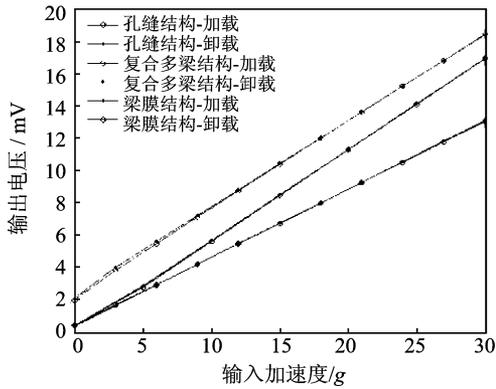


图12 3种传感器的输入输出曲线

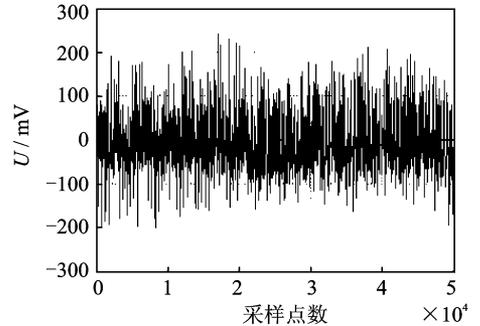
传感器的固有频率测试采用传感器动态测试系统来实现。系统由激振器、功率放大器、标定控制仪、信号处理器以及计算机组成。实验时,通过计算机向标定控制仪发出一个扫频正弦信号命令,控制仪产生相应的扫频信号,经过功率放大器放大后驱动激振器工作。参考传感器与被测传感器固定于激振器上端,受到扫频正弦加速度信号作用。当加速度信号的频率与传感器的固有频率相等时,结构会出现共振,传感器的输出剧烈增大。笔者所使用的参考传感器为普通压电式加速度计,其固有频率约为40 kHz,能够用于本次试验的传感器标定。实验将被测传感器与标准传感器的输出的比值作为考量传感器固有频率的参数。当被测传感器出现共振情况时,这一比值将发生剧烈变化。由实验结果可以得到梁膜结构的固有频率约为2.46 kHz,孔缝双桥结构的固有频率约为12.46 kHz,复合多梁结构的固有频率约为13.61 kHz。

3种结构的传感器均可以缓和灵敏度与固有频率之间的制约关系,尤其是孔缝双桥结构与复合多梁结构。通过性能对比实验,孔缝双桥结构将传感器灵敏度与固有频率乘积提升了约55%,而复合多梁结构将这一指标提升达到了84.8%。在传感器静态变形与固有频率的平方成反比的制约关系下,“小变形-大应力”的敏感结构方案在灵敏度与固有频率两者之间以某一性能参数的最小牺牲换取了另一参数的显著提升,是机械故障信息监测中可行的高频、高灵敏度测振传感器设计研究方案。

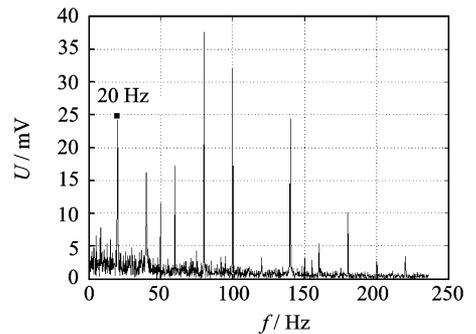
#### 4.2 传感器的测振应用

机床主轴振动可以通过加速度传感器进行检测,振动测试系统包括加速度传感器、信号放大模块、数据采集模块以及直流电源,3种结构传感器均可以识别主轴的动不平衡转频。图13为复合多梁结

构所采集的1 200 r/min下的振动信号以及傅里叶变换结果。其中20 Hz的频率分量对应于主轴的转频,同时传感器配套信号处理电路因受到实验所用电源中交流信号频率的影响,频谱图中出现了50 Hz及其整数倍的频率分量,见图13(b)。



(a) 原始数据



(b) 傅里叶变化结果

图13 测振实验结果

## 5 结论

1) MEMS加速度传感器采用可与IC工艺集成的加工技术,其低成本、微型化以及可大规模生产的潜力可使MEMS传感器在未来智能化机械装备故障信息无线监测中得到大量应用,替代目前常用的较昂贵的压电式加速度传感器。

2) 通过对传感器测量灵敏度与固有频率之间的制约关系的分析可知,对于某一结构传感器来说,提高其固有频率则会降低其测量灵敏度;反之提升测量灵敏度,传感器的固有频率则下降。针对高频测振传感器对测量灵敏度与固有频率的要求,需要通过合理的敏感结构设计来提升传感器这一性能,同时减小对另一性能的影响。

3) “小变形-大应力”是高频响、高灵敏度加速度传感器设计中行之有效的设计思路。梁膜结构引入的小厚度膜结构、孔缝双桥传感器引入的应力集中孔缝以及复合多梁结构引入的短小敏感梁均在一定程度上提升了传感器的性能。

4) 通过性能测试与实际测振实验可以看出, MEMS 加速度传感器已经具备机械故障信息监测所需的功能。

### 参 考 文 献

- [1] Albarbar A, Mekid S, Starr A, et al. Suitability of MEMS accelerometers for condition monitoring: an experimental study[J]. *Sensors*, 2008, 8(2): 784-799.
- [2] 田新启, 高鑫. 基于 PSD 的旋转机械振动传感器[J]. *振动、测试与诊断*, 2010, 30(6): 638-641.  
Tain Xinqi, Gao Wei. Rotating machinery vibration sensor based on position sensitive detector[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2010, 30(6): 638-641. (in Chinese)
- [3] Zhao Yulong, Zhao Libo, Jiang Zhuangde. High temperature and frequency pressure sensor based on silicon-on-insulator layers[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(3): 519-523.
- [4] Vogl A, Wang D T, Stor S P, et al. Design, process and characterisation of a high-performance vibration sensor for wireless condition monitoring[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 153(2): 155-161.
- [5] Mohd-Yasin F, Nagel D J, Ong D S, et al. Low frequency noise measurement and analysis of capacitive micro-accelerometers[C]// *Digest of Microprocesses and Nanotechnology*. Tokyo, Japan: Japan Society of Applied Physics, 2007: 376-377.
- [6] Dauderstadt U A, de Vries P H S, Hiratsuka R, et al. Silicon accelerometer based on thermopiles[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1995, 46(1-3): 201-204.
- [7] 王俊云. 热对流式加速度传感器原理及应用[J]. *世界电子元器件*, 2006(3): 58-62.  
Wang Junyun. Thermal accelerometer principle and applications in portable devices[J]. *Global Electronics China*, 2006(3): 58-62. (in Chinese)
- [8] Bao Minhang. Micro-mechanical transducers, pressure sensors, accelerometers and gyroscopes [M]. Amsterdam; Elsevier, 2000: 119-239.
- [9] 赵立波, 赵玉龙, 蒋庄德. 特中加速度传感器[J]. *西安交通大学学报*, 2006, 40(9): 1049-1052.  
Zhao Libo, Zhao Yulong, Jiang Zhuangde. Research on special piezoresistive acceleration sensor [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(9): 1049-

1052. (in Chinese)

- [10] Yazdi N, Ayazi F, Najafi K. Micromachined inertial sensors [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86(8): 1640-1659.
- [11] Liu Yan, Zhao Yulong, Lu Sun. An improved structural design for accelerometers based on cantilever beam-mass structure [J]. *Sensor Review*, 2012, 32(3): 222-229.
- [12] Zhao Yulong, Sun Lu, Liu Yan, et al. Incorporation of the stress concentration slots into the flexures for a high-performance microaccelerometer [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(7): 075002.
- [13] 张建辉, 李伟东, 万红, 等. TMAH 腐蚀液制作硅微结构的研究[J]. *传感器技术学报*, 2006, 19(6): 593-596.  
Zhang Jianhui, Li Weidong, Wan Hong, et al. Research in manufacturing silicon microstructure with TMAH solution [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(6): 593-596. (in Chinese)
- [14] 郭涛, 范波, 郭虎岗, 等. (100)面硅片各向异性腐蚀中的凸角补偿方式[J]. *纳米技术与精密工程*, 2008, 6(1): 68-71.  
Guo Tao, Fan Bo, Guo Hugang, et al. Convex corner compensation in anisotropy etching on silicon (100) [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2008, 6(1): 68-71. (in Chinese)
- [15] 黄庆安. 硅微机械加工技术[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 207-228.



**第一作者简介:** 赵玉龙, 男, 1968年3月生, 长江学者特聘教授、博士生导师。主要研究方向为MEMS技术、传感器技术及微纳制造等领域的基础理论和工程应用。获得1项国家技术发明二等奖、4项省部级科技进步一等奖以及30余项国家授权发明专利。其带领的“微纳传感器与测试技术”研究团队获得教育部长江学者创新团队发展支持计划。曾发表《Design and characterization of an integrated multifunction micro sensor》(《Microsystem Technology》2012, No. 18)等论文。

E-mail: zhaoyulong@mail.xjtu.edu.cn