

## 压电薄膜传感器

## 技术手册

# 压电膜传感器技术手册

## 目录表

第一部分	引言
	背景
	压电薄膜特性
	典型压电薄膜元件工作特性
第二部分	引线装接技术
第三部分	频率响应
	压电薄膜低频响应
第四部分	温度效应
第五部分	压电膜电缆及其特性
第六部分	压电基础
第七部分	热电基础
第八部分	基本电路概念
	电缆
第九部分	制造
	开关
	冲击传感器
	体育运动记分传感器
	乐器
	交通传感器
第十部分	振动传感
	音乐拾音
	机器监控
	轴承磨损传感器
	风扇叶片气流传感器
	断纱传感器
	自动售货机用传感器
第十一部分	加速度计
第十二部分	超声应用
	医用成像
	NDT(无损探伤)
	液位传感器
第十三部分	声频
	扬声器
	话筒
第十四部分	声纳
第十五部分	将来的应用
	有源振动阻尼
	硅基传感器
	灵敏表皮
第十六部分	压电薄膜的应用
第十七部分	压电薄膜论文索引

# 压电膜传感器技术手册

## 第十八部分 引言

### 超声油墨位面感测的讨论

传感器材料是将一种形式的能量转换为另一种形式的能量，并被广泛地应用在传感探测方面。微处理器应用的巨大增长推动了传感器在多种应用方面的需求。今天，在 180 亿美元的全球传感器市场中压电聚合物传感器跻身在最快速发展的技术行列之中。像任何其他新技术一样，在很多应用中，“压电薄膜”已被考虑用作传感器的解决方案。自从压电膜聚合体被发现以来的 20 年中，这项技术已日趋成熟，实际应用层出不穷，技术的商业化进程正在加速。

本手册对压电聚合体技术、术语、特性以及传感器设计思考等提供了综述，同时还探索了近年来业已成功开发出来的诸多传感器的应用项目。

解决独特的传感方面问题是我们的应用工程师们特有的实力。我们很高兴有机会在您的设计中考虑压电膜传感器的应用时为您提供帮助。

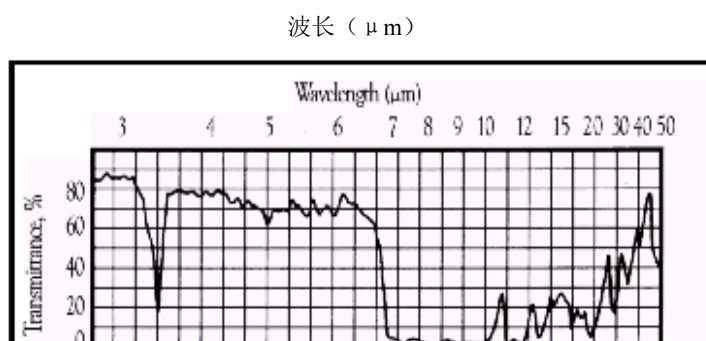
## 背景

“压电”，希腊语叫做“压力”电，是在 100 多年前由 Gurie 兄弟所发现的。他们发现，石英在电场的作用下会改变其外形尺寸，而相反，当受到机械变形时，则产生电荷来。这项技术的首次实际应用是由另一位法国人 Langevin 在 1920 年实现的，他研究出了一种用于水下声音的晶体发射器和接收器，即：第一部“声纳”。二次世界大战前，研究人员发现，有些陶瓷材料在高极化电压的作用下会产生压电特性，这一过程类似于铁性材料的磁化。

到 60 年代，研究人员就已发现，鲸鱼的骨和腱内部存在着微弱的压电效应。于是开始了对其他有可能具有压电效应的有机材料的认真探索。1969 年，Kawai 发现在极化的含氟聚合物、聚偏氟乙烯（PVDF）中有很高的压电能力。其他材料，如尼龙和 PVC，也都表现出压电效应，但没有一种能像 PVDF 及其共聚物一样呈现那么高的压电效应。

和其他铁电材料一样，PVDF 也具有很高的热电特性，在响应温度的变化时，可以产生电荷。PVDF 对 7~20  $\mu\text{m}$  波长的红外能具有很强的吸收性（见图 1），覆盖了人体热的相同波长频谱。因此，PVDF 可以制成很有用途的人体运动传感器以及热电传感器用于更为复杂的其他应用如夜视光导摄像管摄像

图 1. PVDF 薄膜的典型红外吸收频谱



# 压电膜传感器技术手册

机和激光束成像传感器。压电薄膜采用合适的菲涅尔透镜可

以探测到 50 英尺以外的人体运动，并已被应用在人造卫星的红外地平探测器上。

最近两年才研制出的 PVDF 新的共聚物，又进一步扩展了压电聚合物传感器的应用。这种共聚物可以在更高的温度下（135℃）使用，同时还能提供所期望的新形状：园柱形和半球形等。厚度极限也达到了利用 PVDF 无法达到的程度。这些成就包括超薄的（200A）离心浇成的覆层，从而开拓出新型硅基传感器应用和壁厚超过 1200  $\mu\text{m}$  的声纳用圆柱体传感器的可能性。

## 压电薄膜特性

压电薄膜是一种柔性，质轻，高韧度塑料膜并可制成多种厚度和较大面积。作为一种 传感器，它的主要特性参数如下：

- ◆ 宽频带 — 0.001 Hz~10<sup>9</sup>Hz
- ◆ 宽动态范围（10<sup>-8</sup>~10<sup>6</sup>Psi 或  $\mu\text{torr}$ ~Mbar）
- ◆ 低的声阻抗 — 与水、人体组织和粘胶体系接近
- ◆ 高弹性柔顺性
- ◆ 高电压输出 — 对同样受力条件，比压电陶瓷高 10 倍
- ◆ 高介电强度— 可耐受强电场作用（75V/ $\mu\text{m}$ ）大部分压电陶瓷退极化
- ◆ 高机械强度和抗冲击（10<sup>9</sup> ~10<sup>10</sup>Pascal 模数）
- ◆ 高稳定性—耐潮湿（吸湿性<0.02%）、多数化学品、氧化剂、 强紫外线和核辐射
- ◆ 可加工成特定形状
- ◆ 可以用市售胶粘合

压电膜的一个主要优点就是它有低的声阻抗，其声阻抗比压电陶瓷更接近水，人体组织和其他有机材料的声阻抗。例如，压电膜的声阻抗（ $Z_0 = \rho v$ ）只相当于水的 2.6 倍，而压电陶瓷的声阻抗通常是水的 11 倍多。一个接近的阻抗匹配便于更有效地在水和人体组织中传导声音信号。

但压电膜的确有某些应用上的限制，与压电陶瓷相比，电~机发送器就相对弱些，尤其是在谐振和低频应用上。共聚体薄膜的最高使用/储存温度可高达 135℃。而且，若把膜上的电极外露，它对电磁辐射也敏感。有良好的屏蔽技术用于电磁干扰和射频干扰的环境。

表 1 列出了压电膜的典型特性参数。表 2 对 PVDF 聚合体的压电特性和常用的二种压电陶瓷材料的特性进行了比较。

压电膜的光学传输特性请参照图 1，在 7~20  $\mu\text{m}$  波长上对红外能量有很强的吸收性，从而使其成为侵入检测和能量管理器件的理想选择。

# 压电膜传感器技术手册

PVDF 薄膜通常很薄、柔软、密度低、灵敏度极好，且机械韧性也好，压电膜的柔顺性比压电陶瓷高出 10 倍，当压电聚合物被挤成薄膜时，可以直接贴附在机件表面而不会影响机件的机械运动。压电膜非常适用于需要大带宽和高灵敏度的应变传感应用。作为一种执行器件，聚合物低的声阻抗，使其可以有效地用来向空气和其他气体中传递能量。

表 1，压电薄膜典型特性参数

表示符号	参 数		PVDF	共 聚 体	单 位
T	厚度		9, 28, 52, 110	各种	um (micron, $10^{-6}$ )
$d_{31}$	压电应变常数		23	11	
$d_{33}$			-33	-38	
$g_{31}$	压电应力常数		216	162	
$g_{33}$			-330	-542	
$k_{31}$	电-机耦合常数		12%	20%	
$K_t$			14%	25-29%	
C	电容		380 (28 $\mu\text{m}$ )	68 (100 $\mu\text{m}$ )	PF/cm <sup>2</sup> @1kHz
Y	Young 模量		2-4	3-5	$10^9\text{N/m}^2$
$V_0$	声速	拉伸	1.5	2.3	$10^3\text{m/s}$
		厚度	2.2	2.4	
P	热电系数		30	40	$10^{-6}\text{C/m}^2\text{ }^\circ\text{K}$
E	介电常数		106-113	65-75	$10^{-12}\text{F/m}$
$\epsilon / \epsilon_0$	相对介电常数		12-13	7-8	
$\rho_m$	质量密度		1.78	1.82	$10^3\text{kg/m}$
$\rho_e$	体电阻率		$>10^{13}$	$>10^{14}$	电阻计
$R_{\square}$	表面金属化电阻率		2.0	2.0	$\Omega/\text{平方}(\text{CuNi})$
$R_{\square}$			0.1	0.1	$\Omega/\text{平方}(\text{Ag 油墨})$
tan	损耗角正切		0.02	0.015	@1kHz
	屈服强度		45-55	20.30	$10^6\text{N/m}^2$ (拉伸轴)
	温度范围		-40 至 80	-40 至 115 ...145	$^\circ\text{C}$
	吸水性		$<0.02$	$<0.02$	%H <sub>2</sub> O
	最高工作电压		750 (30)	750 (30)	V/mil (V/ $\mu\text{m}$ ), DC, @25 $^\circ\text{C}$
	击穿电压		2000 (80)	2000 (80)	V/mil (V/ $\mu\text{m}$ ), DC, @25 $^\circ\text{C}$

表 2 压电材料比较表

特 性	单 位	PVDF 膜	PZT	BaTiO <sub>3</sub>
密度	$10^3\text{kg/m}^3$	1.78	7.5	5.7
相对介电常数	$\epsilon / \epsilon_0$	12	1,200	1,700
$d_{31}$ 常数	$(10^{-12})\text{C/N}$	23	110	78

# 压电膜传感器技术手册

$g_{31}$ 常数	$(10^{-3}) \text{Vm/N}$	216	10	5
$k_{31}$ 常数	% at 1kHz	12	30	21
声阻抗	$(10^6) \text{kg/m}^2\text{-sec.}$	2.7	30	30

## 典型压电膜元件的工作特性

DTI 元件是一个在压电聚合体基体上模切 15x40mm 并在 12x30mm 有效面积上两面印有银墨电极的标准 MSI 压电膜结构。

### 1、电 — 机变换

(1 方向)  $25 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ ,  $700 \times 10^{-6} \text{ N/V}$

(3 方向)  $33 \times 10^{-12} \text{ m/V}$

### 2、机 — 电变换

(1 方向)  $12 \times 10^{-3} \text{ V} \mu / \epsilon$ ,  $400 \times 10^{-3} \text{ V} / \mu \text{m}$  14.4V/N

(3 方向)  $13 \times 10^{-3} \text{ V/N}$

### 3、热 — 电变换

$8 \text{ V}/^\circ \text{K} (@25^\circ \text{C})$

### 4、电容

$1.36 \times 10^{-9} \text{ F}$ , 耗散系数 0.018@10kHz 阻抗@10kHz 12K  $\Omega$

### 5、最大工作电压

DC: 280V (1 方向上, 产生  $7 \mu \text{m}$  位移量)

AC: 840V (1 方向上, 产生  $21 \mu \text{m}$  位移量)

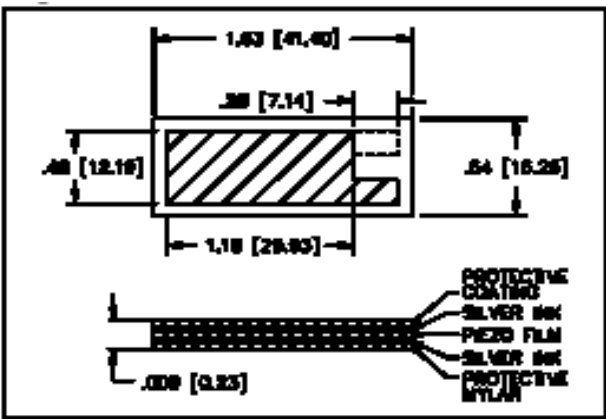
### 6、最大受力 (d31 方向上, 断裂)

$6 \sim 9 \text{ kgF}$  (电压输出 830~1275V)

### 电—机变换

图 4, DT1 元件

压电膜一般是不可能实现大的位移量和力的, 例如在设计扬声器时这一点是显而易见的, 因为其低频性能 (500Hz 以下) 是很有限的。甚至一块大面积的压电膜在



# 压电膜传感器技术手册

---

低频时也无法产生出高幅压力脉冲。正如我们从目前的超声波空间测距传感器（40~50KHz）的设计和医用超声波成像应用中所了解到的，它无法应用到太低频率和太高的超声频率上。

就超声测距而言，压电膜元件的高度控制垂直波瓣，而传感器的曲率和宽度则控制着水平波瓣，压电膜测距换能器可获得 360° 视野，测距目标从几厘米到几米并有很高分辨率。

双压电膜结构（类似双金属片），可以使二片反接元件微小的位移量转变为很明显的扰曲运动。依此原理可制成小型的风叶片和光学反射镜。这类元件仅消耗非常低的能源（因为是容性的）。由于其高电容，大型元件可能就较难驱动，尤其是用变压器提供驱动电压时更是这样。设计优良的放大器是十分重要的。

虽然所产生的力很小，但压电膜却可以用来在非常宽的频率范围上激励其他机械结构。如果再配合另外的压电膜器件来接受所产生的振动，整个系统可拥有很高的动态范围，尽管膜对一个结构的谐振点所产生的“插入损失”一般为 -66dB。如果在二个元件之间加上足够的增益，该结构件就会在其固有频率上产生自振荡，正像 MSI 公司在制造压力、负荷和液位传感器方面所开创的“振鸣”技术那样。这种谐振的机械系统，并不需要高电压驱动。放大器电路靠双轨运算放大器运行或者干脆用一单独的 9 伏电池。从分析角度来看，当压电膜也应用来监测结果时，要低些的电压，如：70mVrms 的频谱分析仪的噪声源，就足以将机械能引入到结构中。

## 机电变换

作为机械动作输入的接收器而言，压电膜的灵敏度是使人吃惊的。最简单形式的压电膜就可以起到一个动态应变计的作用，而且又不需要外部供给电源，且产生出来的信号甚至大于应变计经放大后的信号。因此，频率响应并不受任何为满足高增益而产生的限制影响，上限是给定传感器的波长。

这种极高灵敏度主要决定于压电膜材料的尺寸。小的厚度首先决定了非常小的横截面积。因此，相当小的纵向力就可以在材料内部产生很大的应力。很容易利用这个特性增大平行于机械轴线上的灵敏度。如果将这种片状的薄膜元件（如：LDT1~028K）置于二层柔性材料中间，那么，任意的压力都会转变为大得多的纵向力。实际上，由于大部分材料在一定程度上都是柔性的，所以在很多情况下，这种效应都起主要作用，1 和 3 方向上的有效灵敏度之比一般是 1000：1。

压电膜传感器较之于普通的应变计，常常可以覆盖大得多的面积，所以，为得到有意义的结果，应在相同应变场条件下进行直接对比。尽管非常小的面积的电容也需要加以考虑，但“点”型式的传感器还是可以应用到所需之处的。低频工作界限将决定于可达到的最大电阻性负载，或者说决定于使信号容易被检出的最大容性负载。采



# 压电膜传感器技术手册

用常规的电荷放大器，或者因信号电平相对高而采用简单的高阻抗场效应管缓冲电路，均可以满足低到几分之一赫兹时的工况。

## 热电变换

Kynar®压电薄膜，在  $7\sim 20\ \mu\text{m}$  区间具有极强的吸收性能，这相当于超出了膜的工作温度上限和下限。因此，它可以成为一个灵敏的热电检测器（比如说人体热辐射）。由于热敏度很强，因此，在设计低频（ $<0.01\sim 1\text{Hz}$ ）机械传感器时，要注意，防止因环境温度变化而使输出信号受热信号的影响。如果采用了非常长的时间常数，压电膜就会在接通时产生出一个与温度变化相关的电压来。由于输出信号有几伏/ $^{\circ}\text{C}$ ，可能观察到显著的漂移。

注：Kynar 是 Elf Atochem NA 公司的注册商标

一般来说，除非特别要求热电效应，大部分的应用均有几 Hz 以上的截止频率。将一个  $1\text{nF}$  电容的元件接到示波器的输入端，即使在  $10\text{M}\Omega$  阻抗时，在  $16\text{Hz}$  以下会产生衰减。只有在膜温急速变化时，才能产生出可检测到的信号。

可采用共模抑制将很低频率的机械应变与同时产生的热电效应隔离开，相反亦然。对 MSI 公司的应用工程师来说，这项技术是相当熟悉的，可以随时提供设计支持。

## 电气设计依据

除超声应用外，压电膜在大多数应用条件下的一个有用模式，就是与应变相关的电压源与电容相串联。任何电阻负载均会形成一个具有简单 RC 高通滤波器特性的分压网络。截止频率由下式给出

$f_c = 1/2\pi RC$  时间常数为  $\tau = RC$ 。在截止频率以下工作，将会产生出与输入参数变化率（微分电路）成正比的输出信号。施加不变的应力将产生初始电平，然后按  $\exp(-t/\tau)$  作指数衰减。

电容负载会扩展时间常数，但降低响应幅度。当电荷由一个电容器转移到另一个电容器上时，能量总是要损耗的。而大的电容性负荷，对于衰减强力冲击所产生的特大信号——常为几百伏是有用的。

当以高压和高频驱动压电膜时，薄膜的耗散因数可能导致以发热方式出现显著的能量损失。电极的表面电阻率也是十分重要的，尤其是对真空金属镀膜。很高的局部电流有时也出现。我们建议在本手册所提供的场强范围内进行工作，因为任何电弧都会导致器件损坏。



# 压电膜传感器技术手册

---

现已开发研究出采用银油墨在膜的两面作丝网漏印电极，可以耐受高电压和高局部电流。银墨金属化已成功应用在高音扬声器和有源振动阻尼应用。上述 DT1 的电极就采用了银油墨。非金属化边缘降低了在膜厚方向产生电弧的可能性。由于每个引线位置上的导体只出现在一面，采取错开的引线也同样可抑制高压击穿。

## 机械设计依据

输出能量与压电膜所受应力成正比。为获取最佳的电信号来选择合适的膜厚，也可从机械强度考虑来决定膜厚。较厚的膜产生较高的电压，但电容量较小，因而，选用较薄的膜再配上柔性的惰性材料（如：聚脂，参见 LDT1~028K）作成层压结构形式可能比单厚膜要好。任何不受应力的膜面积，都是有效工作面积上的容性负载，如果需要还是越小越好。

大部分的金属层均易于锈蚀，尤其是运输时，常用薄涂覆胶或层压来保持表面质量。在层压和装配中，经常使用丙烯酸胶，合成橡胶树脂、环氧树脂以及氰基丙烯酸盐。有的设计采用了外附金属层或导电衬底作为电极，此时未经金属化的压电膜就用到它自身的长处。这种外附金属层可以直接接触未金属化膜来收集电荷，或者，在交流信号应用中可以采用通过薄胶带或环氧树脂层的电容性耦合。电极的形状对于在整片连续的膜材上定出具体的有效工作面积是特别有用的，也便于在模切元件时在切割部分留出未丝印空边。将上、下电极引出片错开设计，可以防止因引线接点的影响而造成压电膜预料不到的问题出现。也便于采取低成本的穿透式的引线方法（压接端子或空心铆钉）

## 机电综合设计依据

压电膜的容性本质，决定了它对电磁干扰的脆弱性。并且随着输出信号电平的降低，这就越显得重要。但当输出信号很高，或者在不重要的环境下驱动压电膜时，电磁干扰可以不予考虑。交流电源的干扰对非屏蔽器件可能是个问题。另一个潜在的问题是，当一个电极正被驱动而另一个电极正接收振动信号时，必需注意避免“串扰”。

如果使用 MSI 公司所生产的附有同轴电缆的加屏蔽器件，那么上述多种问题就全解决了。不过，任何器件只要采取简单的措施，都可以避免干扰的。

不需要的频率可以加以滤除，如果传感器是安装在导电衬底上，这可形成半个接地包络，而外附电极则形成另一半包络，小型的屏蔽电缆已有市售，可用来取代双绞线。连接点本身也应给予注意，因为那点面积也易于受到 EMI 干扰。

MSI 现已开发出了经久耐用的引线连接技术，大部分产品均有预先接好的引线。如前所述，通常可以使用同轴电缆，但必须与非常薄的柔性材料相接口。若连接点有振动，就会给传感器导入一定的声音效应，因而引线连接点的加固是需要的。

# 压电膜传感器技术手册

采用薄铜箔加导电背胶可做成绝好的非永久性的连接。1cm<sup>2</sup> 面积的接触电阻约几毫欧(mΩ)。与挠性电路一样，压接端子也常用于错开电极形式，但薄的膜则需要作结构上的加固，以取得良好的效果。在引线连接部位用聚酯加固是一种通常采用的加固连接方法。在压接端子和电极之间的加强片使接触电阻有稍稍下降。一般为 150~500 毫欧。微型铆钉，空心铆钉甚至螺母、螺栓加垫圈的连接均有很高的强度和良好的接触电阻，一般均小于 100 毫欧。这些技术可用来与带焊片的电缆连接，也可以直接用在印制电路板上。

采用线夹的方法，即可直接夹在印制电路板的导电图形上或用导电胶，ZEBRA®接头，焊片和垫圈等均成功地得到应用。用加银的（导电）环氧树脂直接连接也很好，但需固化时间，为得到最好的效果，通常要提高固化温度。

如前所述，其他材料也可以作成电极，如：导电胶或发泡材料。在某些情况下，采用穿过胶层的容性偶合也是可行的，允许某些特殊传感器的设计方案没有任何引线接出。

## 压电膜传感器引线连接技术

### 引言

如何实现压电膜的可靠连接，这是客户们最经常提出的问题之一。为此，MSI 公司极为关注对压电膜简化连接技术的开发。今天，我们向客户提供的大部分传感器件，均加了引线。本文的目的就在于分析和讨论已有的接线方案。

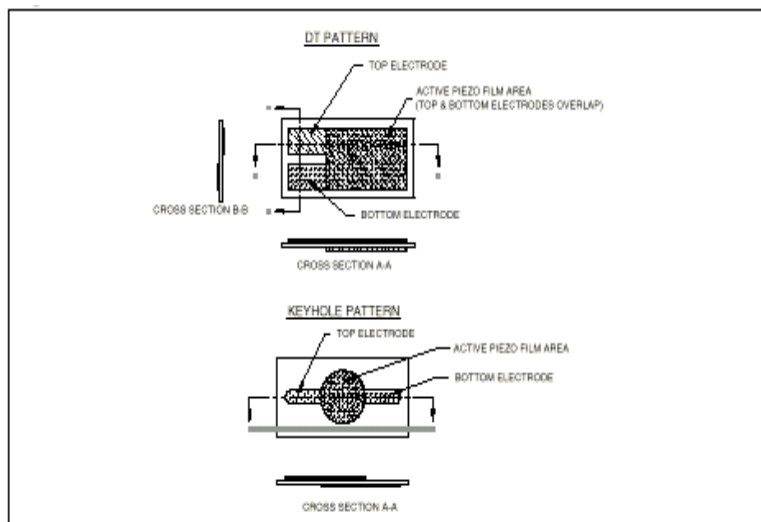
有些最方便的连接技术需

要 MSI 采用在压电膜的一

面或二面上印成一定图形的电极，在生产中为满足用户的要求，这总是可以做到的。在本文的末尾，还提供了一种可以达到同样效果的简单方法。概括地说，图形电极在压电膜传感器制

图 3 电极图形

DT 图形



# 压电膜传感器技术手册

作中可采用丝网印刷导电油墨、金属掩模喷镀沉积或照相制版技术进行化学蚀刻成形。

## 目标

这里所考虑的是针对引线连接方法所期望的设计目标。并非采用任何一种技术就可以实现一切目标的。设计者应明确最重要的目标，并相应地选定合适的连接方案。

- **高导电能力/低电阻** 意想不到的，对大部分压电应用而言，高的导电能力的连接，并非是特别重要的参数。压电传感器件往往是用在高阻抗电路之中，在该类电路中有几个欧姆的电阻通常并不影响性能。然而，比较重要的却是它的稳定性，就是说，在使用之中，电阻不应起伏变化，因为它会引入电噪声源。
- **低质量** 当压电膜固定在机械支持结构上时，这是特别重要的。在挠性结构上连接点质量的机械振动产生的声效应是惊人的。
- **小断面** 压电膜的不少应用都来自它的低厚度这一长处，采用大端子妨碍这一长处的发挥通常是被禁止的。如果压电膜包括连接件不能与接触表面贴紧，接触振动传感器就可能有不同的谐振。柔顺性~这也是一个必须与压电膜柔顺性相一致的特性。具有一定的柔顺性在很多应用场合有优势。
- **小面积** 好的压电器件很可能是作为“点”接受器使用的。对小压电有效工作面积（上、下导电电极完全重叠）可以制成偏位的或错开的引线连接焊片。上、下焊片相互错开并彼此相对（在厚度方向看）。这样就使精确定义的有效面积（重叠的电极）通过非压电导电图形（错开的引脚）引至远处的连接点，这便是对“小”器件常采用的技术。
- **机械强度** 传感器最常承受最大应力的地方就在连接点附近，有些是偶然的（插拔电缆），有些是设计造成的。总之，错开焊片处采用压接端子，空心铆钉或实心铆钉的穿过压电膜的连接方法均具有最好的抗应变能力。为改善穿透连接的强度，通常引线连接点都用聚酯片加强。
- **长期稳定性** 包括所有常用的环境参数。大部分连接件均具有极长的寿命（压接端子，空心铆钉及导电橡胶接头等）。其他的有比较有限的存储寿命（导电胶）。
- **使用简便** 当产品批量生产时，这一点尤为重要。很多连接技术都是由半自动设备实现的，便于批量生产（压接端子和空心铆钉），其他的多为劳动密集型（导电胶）。
- **电气强度** ~这是一个涉及电驱动（高压）元件的问题，如扬声器和执行器。

## 设计依据

有二个主要问题控制着引线连接的选择：

- 压电膜的固定可以在引线连接部位吗？这可能是一个主要优点。例如，直接连接到印制板的导电图形上。
- 压电膜可以做成特定形状并允许采用穿透技术吗？（通过 MSI 公司的传感器用户形状服务，这些问题几乎都可以答“是”）。采取简单的试验方法也可以取得同样的效

# 压电膜传感器技术手册

果。

有关“问题”部分就讨论到此，下面将给出“答案”。

## 方法

**穿透** 这里的技术是指对压电膜进行打孔（和附加增强层，以达到有效的厚度和强度），因此，压电膜应设计好图形，和错位的引线布置，以防止上、下电极因插入的接头而出现短路，这可以由制造商完成，也可以由用户自己完成。

- 可以用铆钉或空心铆钉固定在压电膜的错位导电图形上。在空心铆钉或铆钉间可以加有带引线的环状焊片接线端子。空心铆钉或铆钉是机械地将环形焊片压在错位的电极上而形成可靠的连接点。
- 如果要将压电膜直接固定在印制电路板上，可以使用小“POP”或实心铆钉或空心铆钉将压电膜图形电极和印制板导电图形相连，一次操作即可完成接线。用丝网印刷制作导电油墨电极时，可以在其中一个错位片上制成一小的“镀通孔”，这样，就使二个导电电极变成压电膜的同一面。这就大大方便了将压电膜电极引脚铆在相应的印制电路板导电图形上。如不采用这种“镀通孔”技术，也可以用铆钉使上电极与印制板下面的导线相连接，而下电极与印制板上面的相应导线的相连接，而保持电接触则是靠铆钉的压力。
- **螺母和螺栓** 采用垫圈，环形舌片及焊片的引线，均可用小螺母和累螺栓加以固定。
- **压接端子** 一般来说，被设计用于柔性电路板技术的压接端子用于压电膜元件时很好用。压接端子可以带焊片来固定导线或插装于印制板相应孔内，和焊在印制板的下面（最大焊接时间约几秒钟，以不使压电膜过热），与上述的空心铆钉相似，压接端子通常被设计用于特定厚度的基材，因而压电膜在其一面需要衬片（聚酯加强层）

图 4.

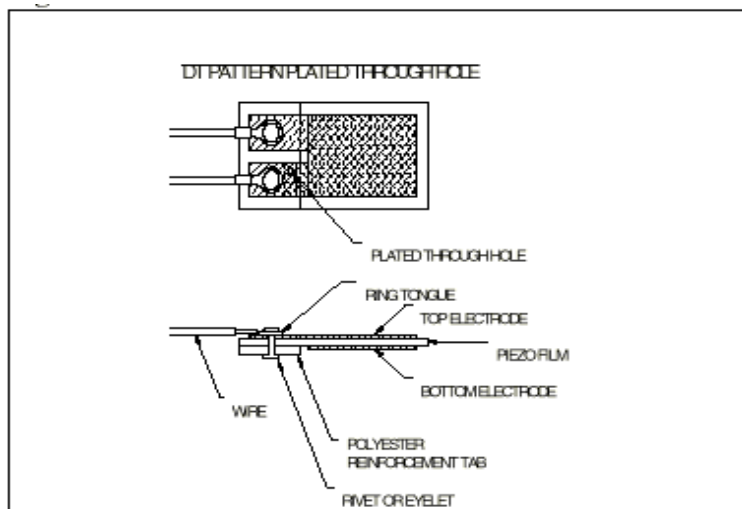


图 5. 镀通孔

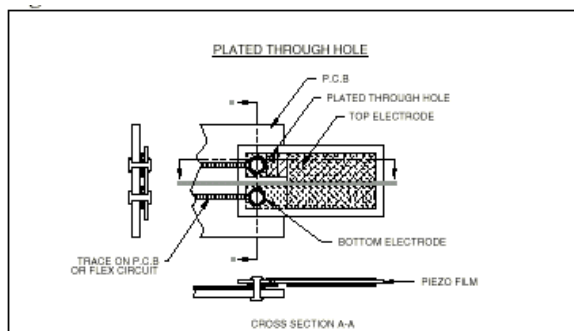
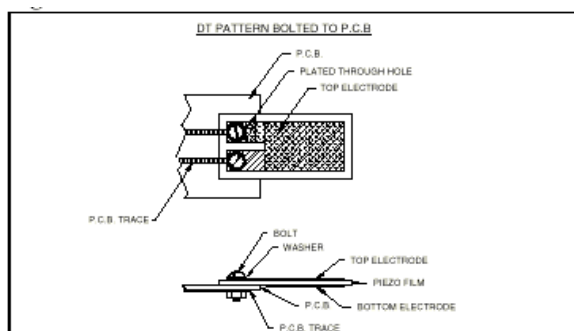


图 6. 电极镀通孔与印制电路板用螺栓固定





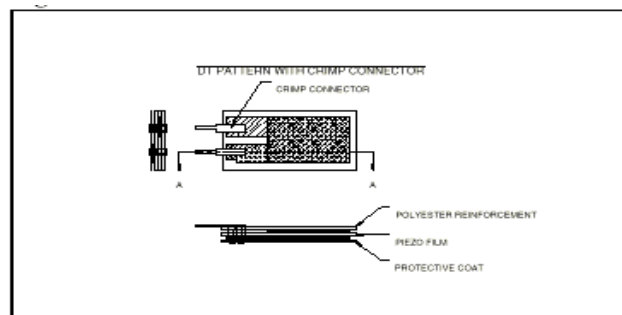
# 压电膜传感器技术手册

以便与压接端子相适应。另外，多路整体接头可以压合到更复杂的装置上，与其他接头形成直接插入互换式的接合。

- 不穿透 ~ 涂有铜箔带的导电胶(即 3M#1181)可买到, 宽度从 3mm 到 25mm.
- 采用合理的胶带面积(或许 1cm 或多一点). 小面积比较容易撕下.

- 先将导线焊在胶带上, 然后轻压薄膜分离衬片和胶层, 如果面积较小, 先焊接后将连接片切至所需尺寸, 将多余的面积做为散热片. 焊接在接头附近看上去降低了粘胶的性能. 注意: 3M 不推荐依靠这种导电胶并建议用同样胶带的凸起型版本. 这种胶带确实是设计用于大面积接触金属的, 但结果显示, 如果不担保, 这种方法是有效的技术. 可买到这种产品的铝版本(部件号 1170), 注意胶带是相似的但没有导电胶(尽管这种胶带可用于屏蔽等).

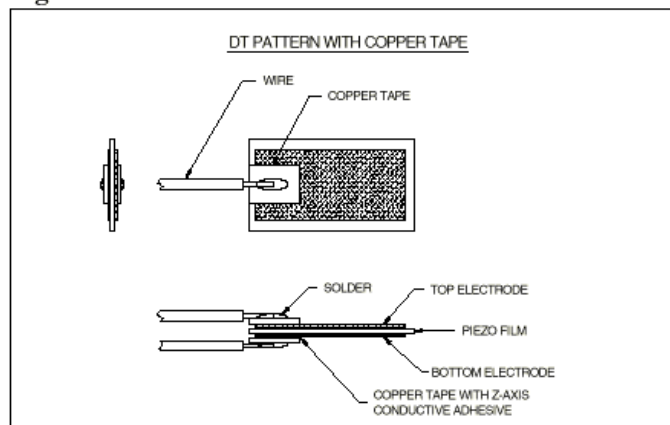
图 7.



- **导电传输胶带** ~即 3M#9702(早期产品). 一层有导电颗粒的丙烯酸胶层给出良好的”Z 轴”导电性(即通过胶带厚

度方向)并在 X 和 Y 轴有很高的阻抗. 这样单路或多路连接就可由一条胶带来完成. 这种材料较新. 初期的结果似乎很有希望. 显然可用这方法直接连接 PCB 板或条, 或有焊片的箔片.

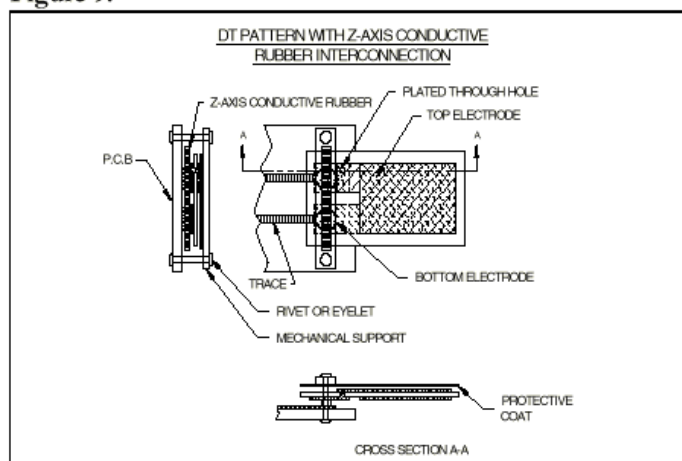
Figure 8.



- **不利的方面是** 1) 成本高, 2) 象所有传输胶带一样, 这种材料有一种倾向即将其衬片粘在边缘并在去除衬片时产生”卷边”. 注意: 这一产品已被采用易撕衬片的改进版(#9703)取代. 可能不太容易买到.

- **导电环氧胶**. 这通常可买到并是双组份(胶和固化剂). 通常所需要的少量的精确称量和混合是相当困难的. 现已有产品是单组份, 预混好的材料, 在低温存储并在室温使用和固化. 任何环氧胶混合物的固化通常都用高温来加速, 但由于压电

Figure 9.



# 压电膜传感器技术手册

薄膜有较温和的高温性能，固化通常是一个常过程(许多小时)。一般都在被粘接部件上用夹具夹紧。同样，有预焊片的箔片可被用来扩展合理的接触面积，对用“通常”的环氧胶的最终加强可以放心。

- **不利因素**：使用困难，固化时间长，较高的成本，存储时间短。
- **低熔点合金**~有些合金(如铟/锡/铋)与其说是焊剂不如说是易熔金属，在一定温度熔化可使其与合适的金属化层(如金，铜，银银墨)一起用于压电膜。通常需要腐蚀性很强的焊药，接头可能会很脆。机械强度受金属化层与薄膜表面粘接的限制，因而再强调，用环氧胶加强是有帮助的。对小且不需要很高机械强度的接头，这种技术是有用的。**不利因素**：只有某些金属化层是合适的，样品量很难提高。机械强度有限(铟合金)。
- **Zebra® 接头**~与制作 LCD 显示用触点一样用绝缘橡胶与导电橡胶拼接。可制成高密度多触点。触点的外部夹固是需要的。
- **机械紧固**~将薄膜夹在两个导电表面(可用一层导电薄橡胶)可得到很好的效果。两个环可为薄膜和扬声器等提供支撑。
- **容性藕合**~在某些应用中，在压电膜上不需要金属电极。薄且不导电胶可将未金属化薄膜固定在导电表面。导电表面在应用中实际上成为薄膜的电极。在对应所需要的有效传感面积一面有导电焊盘的 PCB 是这一概念的具体化。薄膜的另一面可用接地电极金属化。可用胶或不用胶将薄膜夹在两个导电表面之间形成电极。

## 用户蚀刻压电薄膜电极

从 MSI 即可买到银墨丝网印刷图形电极也可买到真空溅射镀膜图形电极，有时，客户采购完全金属化的片材用于实验，制做他们自己想要的电极。这对丝网印刷银墨是困难的，因为不容易腐蚀和机械编织。对真空溅射镀膜电极，标准的光刻技术非常好。

为在压电膜上制导电图形穿透而不短路上下电极，可采用真空沉积电极法(注意：不是为银墨推荐的)。

电源(9V 电池)的一端通过一个导电焊盘或机械压力连接到薄膜上。另一端连到导电点(针，导线端子等)需要隔离的部分拖在周围即可，通常有效电流通过并在接触点产生电弧，金属化层被蒸发。同心“保护环”用以曾加可靠性。

对薄真空溅射镀膜金属化更复杂的图形，用感光气溶胶(如果需要在两面)喷涂压电薄膜是可能的。固化的感光气溶胶可通过掩模由 UV(紫外)光曝光，象传统的 PCB 技术那样，然后浸入腐蚀剂。非常薄金属层的蚀刻过程仅需几秒即可完成。



# 压电膜传感器技术手册

用标准 PCB 腐蚀剂(三氯化铁)进行铜/镍金属化蚀刻是很好的。要得到较好的结果,其它金属需要特殊的腐蚀剂(对金用王水)。切记金属化层可能只有几百个埃(300~700Å),因而细图形极易造成划痕和裂纹。

## 高电压技术

将压电膜用于振动激励需考虑几点,由于电容变送器的阻抗随频率减小和在低频时接近无穷大,可能需要较高电压驱动(通常几百伏),例如,全声频范围扬声器。通常,用变压器提升电压以提供所需驱动信号。在这种情况下,在连接部位可能有较大的应力。首先考虑给一个有 2 欧姆全电路阻抗的 100nF 电容供 30V 电压。初始电流脉冲峰值 15 安培(假设供电能力可以达到此值)。这样一个电流“尖峰信号”可以暴露连接点上的缺陷。

接着考虑一个间隔 12V 信号直到 240V 的变压器。一个 200μA 在初级的直流(DC)电流(对应一个 0.5V 所施电压),当断路时,可能在次级电路造成 830V 的电压浪涌,大大超过所期望的 20 倍放大系数。即使带有很大的容性负载,还是可以看到高电压。更糟的是,如果次级电路断路,会产生超过 60A 历程 10 纳秒的电流脉冲。这种现象对良好的接头不会有问题。但是,如果某种引线连接法会造成任何气泡,所减小的压电常数效应会引起击穿。这种事件是灾难性的,熟悉的爆裂声和蓝色的电弧可以证明。

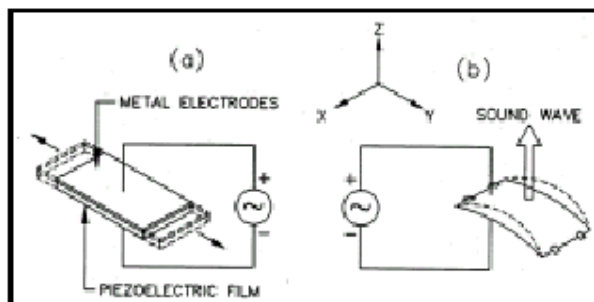
答案是:

- 1) 银墨电极是必需的——薄真空溅射电极不能承受高电压。
- 2) 大面积触点减小应力。我们将银墨涂在空心铆钉/铆钉周围以获得附加的薄膜电极传导路径。
- 3) (可能的)一个半导体触点以减小电流浪涌 ~ 相当于在电路中串联电阻。实际值达 1K 欧姆将仅产生小数位的输出损失,并减小电流尖峰值。

## 频率响应

与压电陶瓷传感器不同,压电膜传感器具有很宽动态范围,并是宽带的。这种宽带特性(接近 DC 到 2GHz)和低 Q 值部分地归因于聚酯材料的柔性。用做传声器时,将弯曲的压电膜器件两端固定,按长度( $d_{31}$ )模式振动,如图 10 所示。压电膜是一种保真度极高的高音喇叭,也可应用在玩具、充气物品和游戏具中做新颖扬

图 10,  $d_{31}$  方向模的压紧压电膜产生声



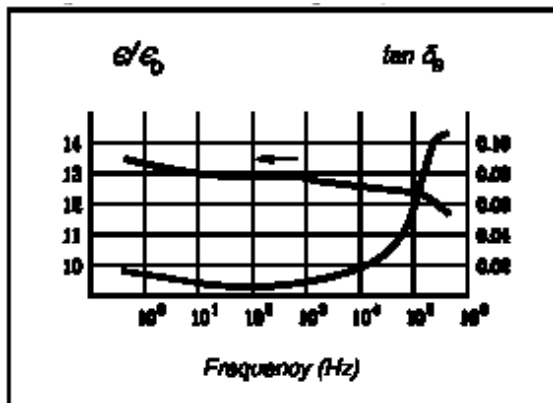
# 压电膜传感器技术手册

声器。d<sub>31</sub> 模式(图 10)，也可以用在空气中的超声测距，频率可达约 50kHz。

当用作高频超声发送器（一般>500KHz）时，压电膜通常是按厚度（d<sub>33</sub>）模式工作。最大传送量发生在厚度谐振时。28μm 的压电膜基本半波长谐振频率约为 40MHz：

$$f_r = \frac{v}{2t} = \frac{2.2 \times 10^3 \text{ m/sec}}{2 \times 28 \times 10^{-6} \text{ m}}$$

图 11，介电常数、损耗因数与频率的关系。



从以上可以看出，谐振值的大小决定于膜厚，其范围为：对厚膜为几 MHz（1000μm）到对非常薄的膜大于 100MHz 以上。

图 11 给出了在室温条件下频率对介电常数和耗散因数的影响。当介电常数 ε 非常低时(压电陶瓷的 1%)，压电膜的 g 常数(电压输出系数)要比压电陶瓷的大得多 (g = d/ε)。

## 压电膜在低频时的特性

### 引言

压电膜在低频时的特性应直接以电气术语来表述，但常常造成曲解。由于这一技术的任何实际应用都几乎涉及这个问题，本文想用一定的篇幅分析这个题目，并尽可能地以非数学型式处理，采用语言描述和实例表达概念，假设有些读者精通用 FFT 技术来变换时间域和频率域，但并不重要。

### 连接

通常，对压电膜的初步评价，是将一个压电器件用一个探头（示波器探头）连接到示波器上。一般来说，示波器探头可以视作“无穷大阻抗”，由于非常大，在测试中对电路的影响可以忽略不计。但在很多情况下，对压电膜并非如此，示波器探头的接入几乎是短路，典型的探头，当其接入示波器时，则有 1MΩ 的有效电阻，也有的是 10MΩ，而也有不少为了方便起见可在 1MΩ (x1) 和 10MΩ (x10) 之间转换，包括 1MΩ 阻抗的物理要素通常是示波器内的输入级，而不是指探头内的单独元件。一个“X1”探头实际上就是一段两端有相应触点的屏蔽电缆。

### 源电容

为分析接上探头之后将产生什么情况，我们需要考虑压电膜器件的特性。也许最

# 压电膜传感器技术手册

为重要的特性（当然是在压电特性之后）就是材料的电容。电容是任何一种元件的储存电荷能力的量度，并且总是在两块导电板相互靠近时存在。本文中所指的导电板就是压电膜每一面上所印刷或金属化出来的导电电极，该器件的电容主要受电极之间分离电极的绝缘体特性的影响，绝缘体储存电荷能力的度量由它的介电常数表述。

与大部分聚合物材料相比，PVDF 的介电常数很高，大约为 12（相对于自由空间介电常数）。

显然，一个元件的电容量是随其导体面积的加大而增加，所以，一大片压电膜的电容要大于小元件的电容。同时，电容量也随厚度的减少而增大。因此，相同的几何面积，薄压电膜的电容量要比厚膜的大。

上述关系可以写为： $C = \epsilon A / t$   
式中：

$C$  ~ 压电膜的电容量  
 $\epsilon$  ~ 介电常数（也可以表示为  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ ，  
 $\epsilon_r$  ~ 相对介电常数（对 PVDF 约为 12），  
 $\epsilon_0$  ~ 自由空间的介电常数  
          (8.  $854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ )  
 $A$  ~ 压电膜电极的有效面积（重叠部分）  
 $t$  ~ 膜厚

表 3，常用压电膜元件的电容值

名称	零件 No.	电容量
LDT0-028K/L	0-1002794-1	500pF
DT1-028K/L	1-1002908-0	1.3nF
DT1-052K/L	2-1002908-0	650pF
DT2-028K/L	1-1003744	2.6nF
DT4-028K/L	1-1002150-0	9nF
8"×11"28 $\mu\text{m}$	1-1003702-4	30nF
HYD-CYL-100	0-1001911-1	43pF

电容的单位为法拉（F），但通常碰到的是小得多的单位；微法（ $\mu\text{F}$  或  $10^{-6}\text{F}$ ），毫微法（ $\text{nF}$  或  $10^{-9}\text{F}$ ；皮法（ $\text{pF}$  或  $10^{-12}\text{F}$ ）。

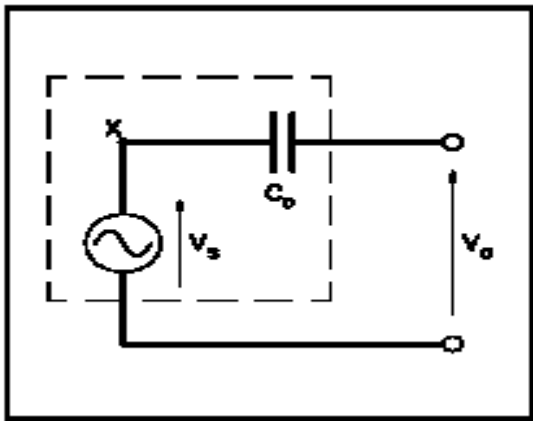
任何压电膜元件的电容都可以用公式来计算，也可以用手持电容表或仪表（如 LCR 桥）直接测量。

电容值应当是在给定的测量频率上（通常定为 1kHz）测得的，压电膜元件的电容值一般随测量频率的提高而下降。

## 压电膜等效电路

下面我们来画一个压电膜元件的等效电路。这里有二个同样有效的模型，一个是：一电压源与一个电容相串联；另一个是：一个电荷发生器与电容相并联，后者在电路分析上不常用。我们将集中对电压源分析（见图 12）。

图 12，压电膜元件等效为简单的电压发生器



虚线部分表示压电膜元件“内含的部分”，电压源（ $V_s$ ）本身就是个压电发生器。该电压源与所加的激励源（压力、应力等）成正比。本文的目的并非在相关的计算上

# 压电膜传感器技术手册

面，重要的是认识到这个电压将绝对地依赖于所加的激励，这是一个“理想”源。

然而，我们应该注意到，标有“X”的节点，是根本不可能接近的。当我们在电极上检测压电膜的“输出”时，膜电容  $C$ 。总是存在并接在电路中的。

## 加入电阻性负载

现在我们加进示波器接入时的效应，可以将示波器及其探头简化为一个纯电阻，尽管实际上有一个很小的与探头和电缆相关的电容（一般约 30~50pF）。若压电膜的电容非常高，那这个小电容就可以忽略不计。

在负载电阻  $R_L$  两端所测得的电压，不需要与“理想”源所产生的电压相同。

为看出为什么，用另外一种方式重新画这个电路是有帮助的。

## 分压器

将图 13 所示的电路重画成图 14 的形式，不难看出，全部的源电压并不总是出现在电阻负载的二端。

将电容和电阻串联起来就构成了一个分压器。由于电容有阻抗并随频率变化，所以，显现在  $R_L$  两端的全部源电压的一部分也随频率而变化。

显现在  $R_L$  两端的  $V_s$  电压的  $V_L$  部分按下式计算：

$$V_L = \frac{R_L}{R_L + Z_C} \quad Z_C = -jX_C = -\frac{j}{2\pi fC}$$

（ $j$  表示  $\sqrt{-1}$ ， $X_C$  为电容元件的电抗。为简化起见，我们忽略了压电膜的阻抗的电阻分量）。

可以将上述公式在激励频率为常数的简单情况下用来简单地计算期望观察到的电压电平，这样简单地变化  $f$  值即可。然而，在不少实际情况下，在频带范围内还可能存在一个信号能量的分布问题。这样，就有必要把网络的“频率响应”考虑进去。

图 13，接入示波器作为电阻负载

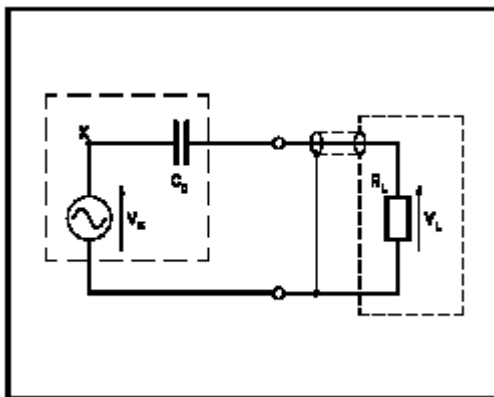
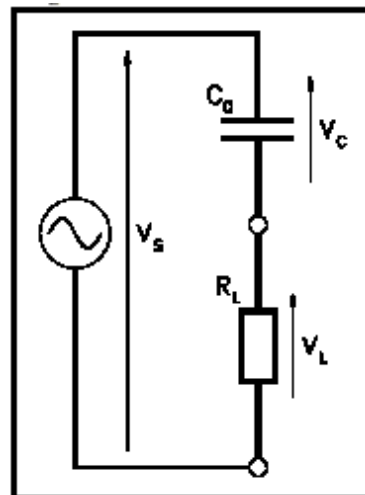


图 14，分压器



# 压电膜传感器技术手册

Figure 15. Magnitude response of R-C filter

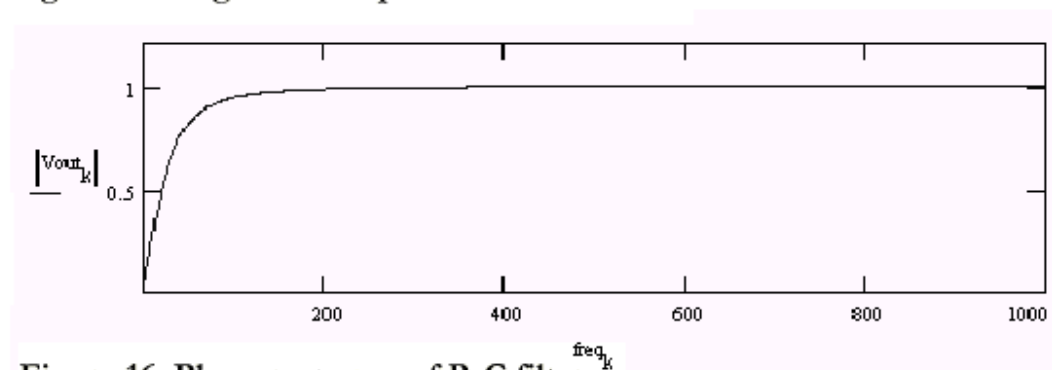
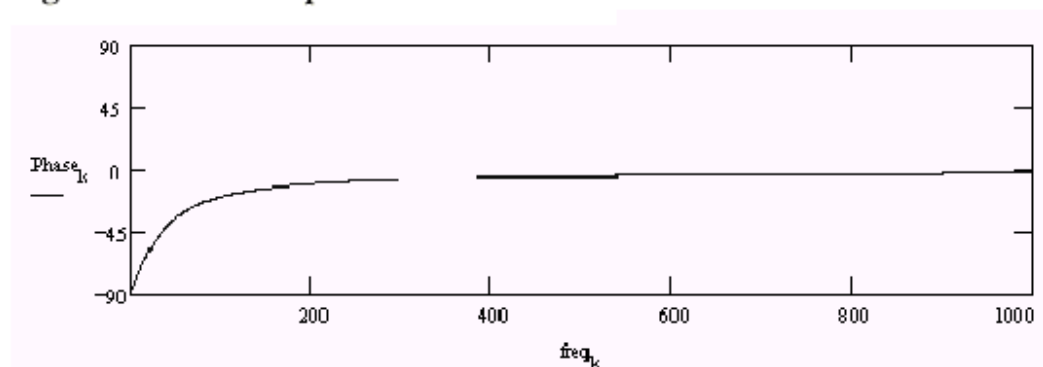


Figure 16. Phase response of R-C filter

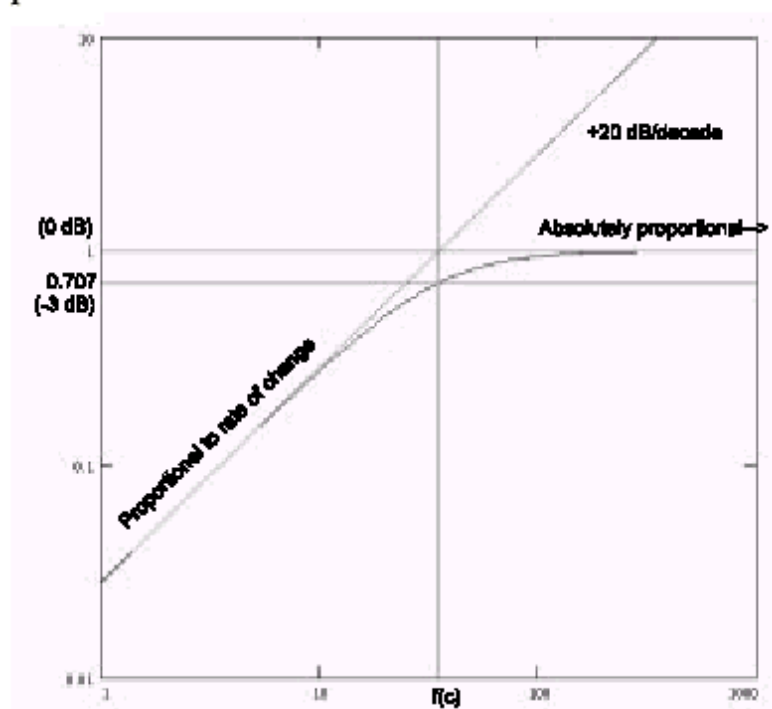


## 频率响应

频率响应用以下实例曲线图表示，先是一个线性/线性图表（图 15，线性 Y 量或幅度相对线性 X 量或频率）以及相应相位图（图 16）也是以线性/线性形式表示的。然后是对数/对数图（见图 17），这一部分将涉及一些细节。

请注意，相位曲线显示，在非常低的频率上，观察到的电压与源电压存在着显著的相移（限制在 $\sim 90^\circ$ 或者是在“DC”或零 Hz 时为 $\sim \pi/2$  弧度）。如果压电

Figure 17. Magnitude response shown as log/log plot



# 压电膜传感器技术手册

---

膜元件是被用作控制环节的一部分，那么这种效应的影响就很大。

## 对数/对数 R-C 频率响应曲线分析

几个关键特性：

- 该网络的完整特性视作高通滤波器。
- 增益下降到 0.707 或者-3dB 时的频率，称作高通滤波器的“截止”或“角”频率。
- 当电阻 R 和电容 C 为已知时，该频率可按  $f(c)=1/(2\pi RC)$  式计算。
- 在明显低于截止频率时，曲线呈直线下降，递减率为+20dB/十倍频程（换言之，频率加倍，信号幅度就加倍），这种特性与微分电路网络的特性是相同的，其输出与输入量的变化率成比例。
- 当频率高于截止频率时，曲线在“单位增益”上呈水平状，其输出与输入大小成正比。
- 滤波的特性曲线可以近似为二条相交叉的直线，但量值实际上是一条渐近曲线，在截止频率这里成直线交叉，量值为-3dB。
- 然后，将滤波器的传输特性乘上信号的频谱，可将此特性曲线应用于任何实际信号的频率域描述，并导出可变换回时间域信号的响应曲线（输出）。

稍后还将给出这种滤波器特性效应的一些实际举例。就每个信号而言，首先给出“理想源”（即滤波器特性不存在时可通过示波器观察波形）的时间域描述，接着是其频谱（可以利用分析软件所提供的 FFT（快速傅立叶变换）算法求得）。再下来是滤波特性（所有的例子均相同，但重点是看效应），再后来，将复杂的输入频谱通过复杂的滤波特性放大，再用逆 FFT 变换求得相应的时间域描述，这就形成了工程师们最终期望观察到的波形。

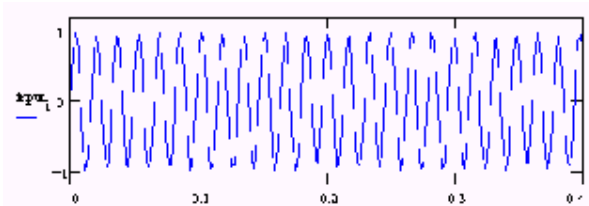
注：图 15、16、17 中，用来产生曲线的 R~C 数值分别是：R=1MΩ，C=4.5nF，在下列的图上，C 值降为 1.5nF，为了说明原理人为的确定了这些值，所以在曲线上并未标出比例。但时间波形是可以读出来的，在 X 轴上用秒表示，频率曲线在 X 轴上用 Hz 表示。当 R=1MΩ 和 C=1.5nF 时的截止频率约为 106Hz。



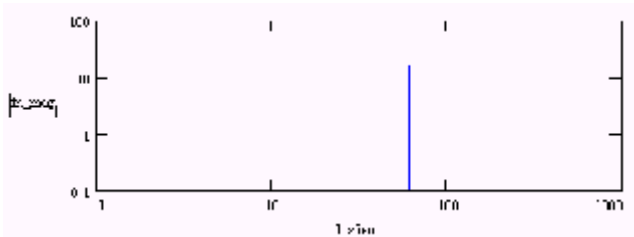
# 压电膜传感器技术手册

图 18 在高频正弦波输入波形上的 R-C 滤波器效应 表示了一个穿过网络的相对高频的正弦波。在输入频谱上，信号表示为一条适当频率的单谱线。频率刚好低于“截止”频率，所以稍稍被网络衰减。最后的输入波形幅度有所减少，相位也稍漂移。

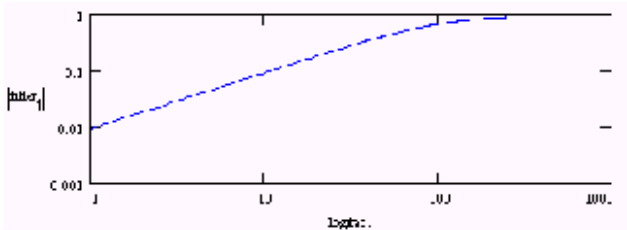
1.) 输入波形



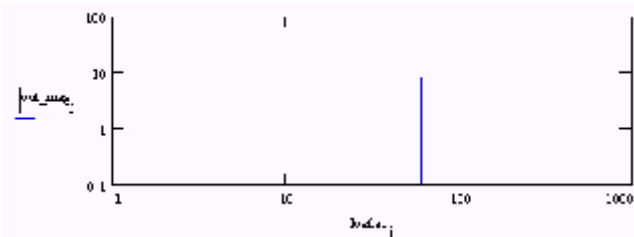
2) 输入频谱



3) 滤波器特性



4) 输出频谱



5) 输出波形

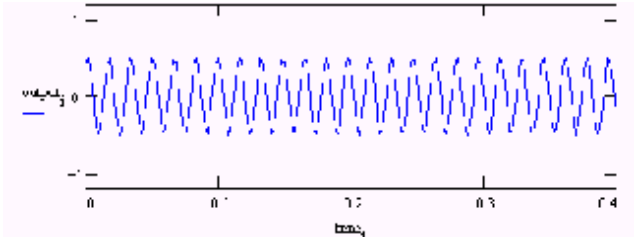
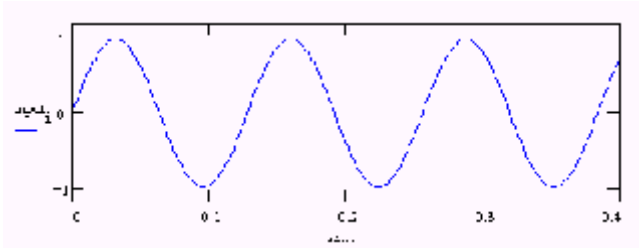


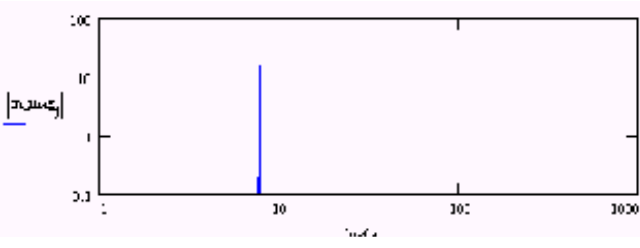
图 19 R-C 滤波器对低频正弦波输入波形的影响

与上图相同，但是一个较慢的正弦波。此时的衰减就大得多，相移也比较大。当试图采用压电传感器来监控“太慢”频率的稳定振动时，就出现这种情况。当用作控制环时，这种相位特性可能比较显著。

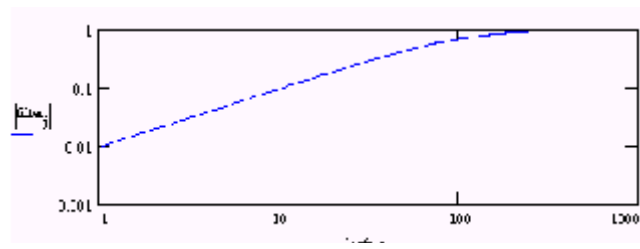
1) 输入波形



2) 输入频谱



3) 滤波器特性



4) 输出频谱



## 5) 输出波形

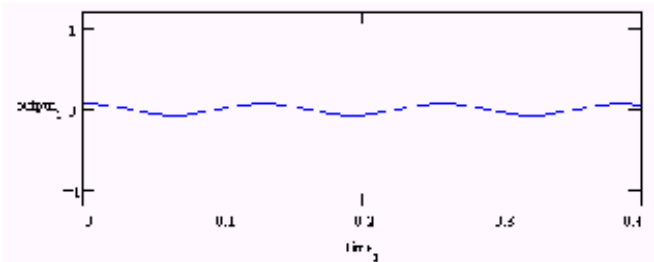
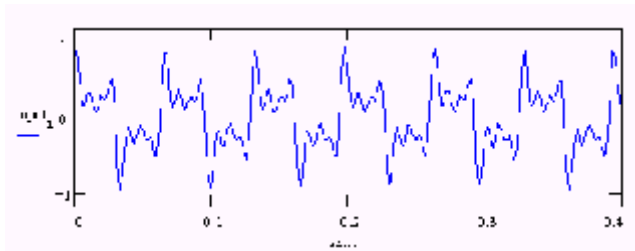
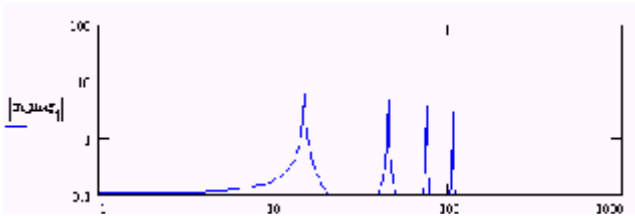


图 20. R-C 滤波器对谐波串输入波形的影响      表示了一个谐波串，数个离散谱线全在截止频率以下。每一个的衰减程度并不相同，所以，输出信号中的谐波“平衡”就是交变的。

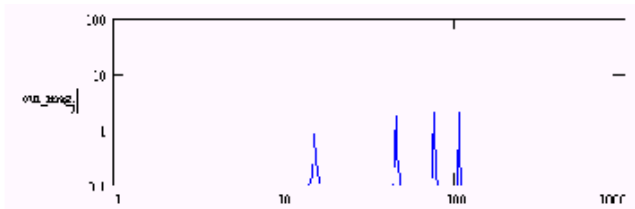
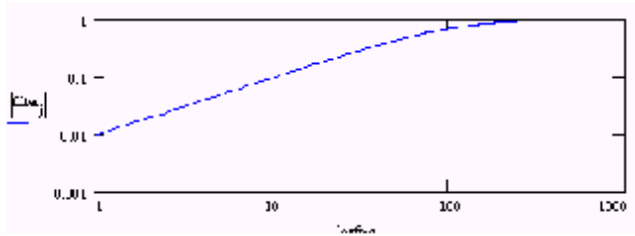
## 1) 输入波形



## 2) 输入频谱



## 3) 滤波器特性



## 4) 输出频谱

## 5) 输出波形

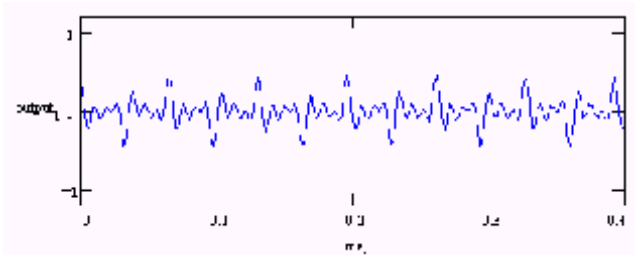
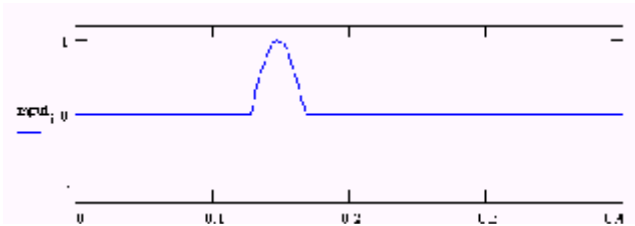
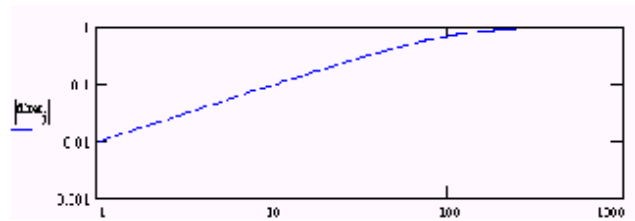
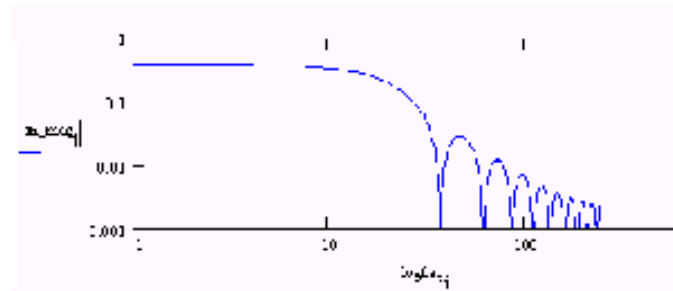


图 21. R-C 滤波器对慢半正弦波瞬态输入波形的影响 表示了一个慢半正弦输入脉冲（很多机械冲击信号的特征），尽管高频成分大部分没变，但其输出波形却严重失真，明显表示出正、负二种偏移，而输入波形却是单极性的。

## 1) 输入波形



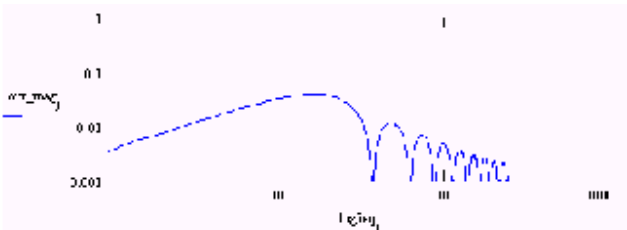
## 2) 输入频谱



# 压电膜传感器技术手册

### 3) 滤波器特性

### 4) 输出频谱



### 5) 输出波形

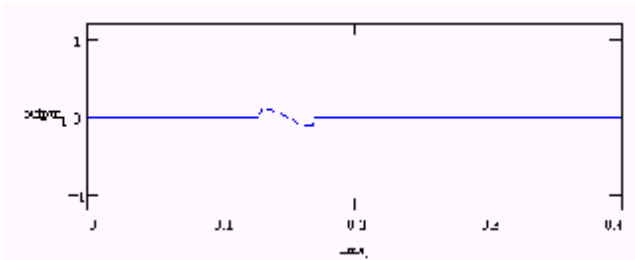
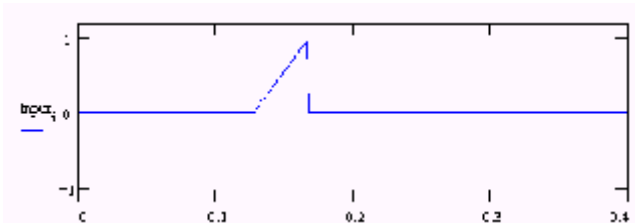
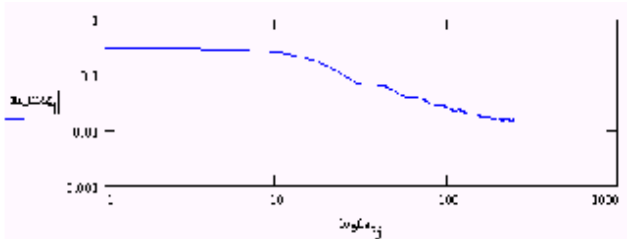


图 22. R-C 滤波器对慢锯齿波瞬态输入波形的影响      表示了一个锯齿波，有一个慢的“上升前沿”和一个突然跌落于零的后沿。很多压电膜开关被用来检测这种机械过程。从输出波形上看，“前沿”几乎不存在了，但“跌落”的后沿几乎保持原幅度，注意输出脉冲极性与输入波形相对极性。

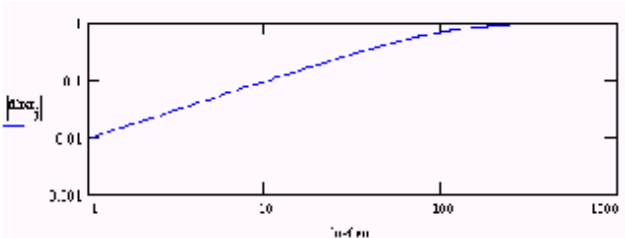
### 1) 输入波形



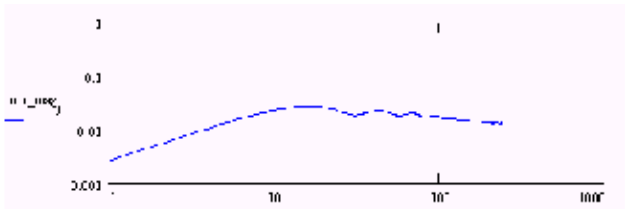
### 2) 输入频谱



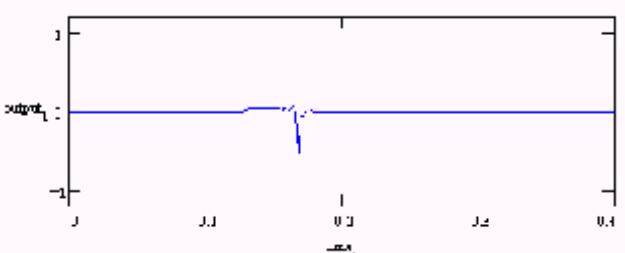
### 3) 滤波器特性



### 4) 输出频谱



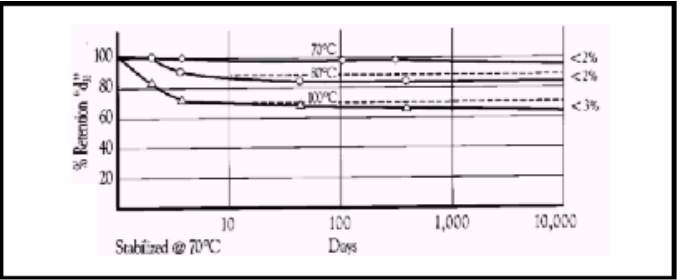
### 5) 输出波形



### 温度效应

压电膜的诸多特性都是随激励频率和温度而变化的。这种特性随频率或温度的变化是可逆的和可重复的。

图 23，PVDF  $d_{33}$  常数的热稳定性





# 压电膜传感器技术手册

此外，从图 23 可以看到在 70℃退火后，长时间曝露在升高的温度下时，PVDF 压电应变常数  $d_{33}$  的永久性衰变。

当达到稳定温度之后，材料特性就随时间保持恒定。可将压电膜退火至特定的工作（或最大存储）温度，以实现高温应用时的长期稳定性。图 24 给出了 PVDF 可逆温度对  $d_{31}$  和  $g_{31}$  系数的影响。

在图 25a 和 25b 中，给出了共聚体压电薄膜的温度对其介电常数（ $\epsilon / \epsilon_o$ ）和耗散因数（ $\tan \delta_e$ ）的影响。

在非常低（深冷）的温度下，压电膜已表现出极佳的传感器特性。

图 24, PVDF  $d_{33}$  和  $g_{33}$  常数的温度系数

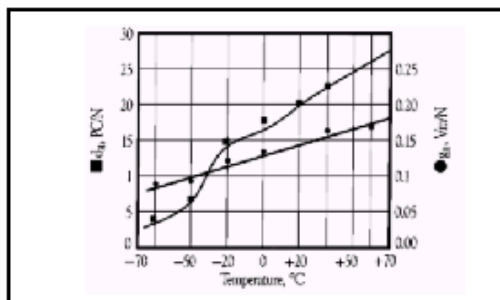


图 25a, 介电损耗角正切与温度的关系

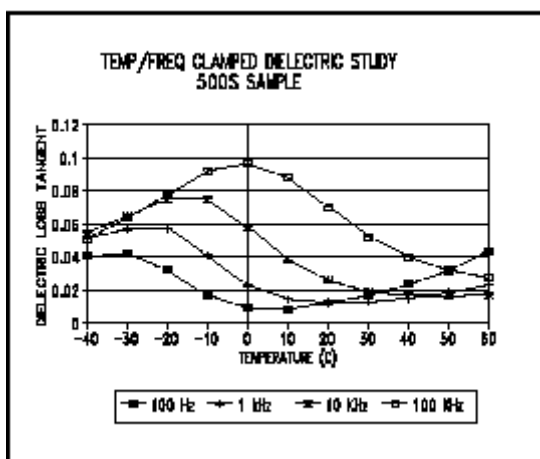
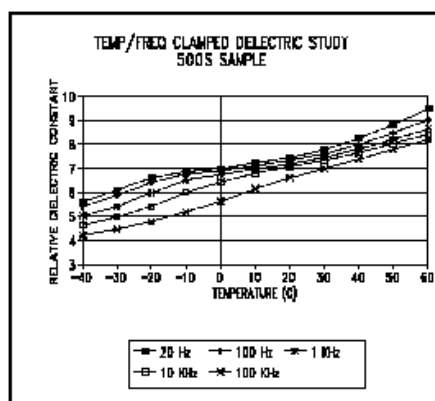


图 25b, 介电常数与温度的关系

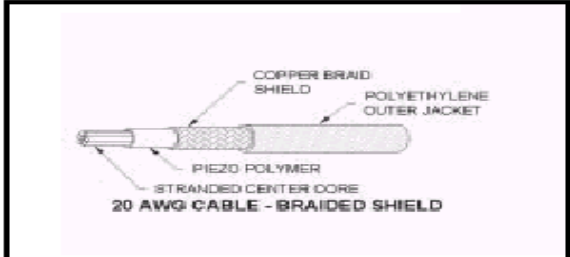


压电电缆及其特性

压电共聚物技术的最新研究成果之一就是压电电缆，压电电缆外形与标准同轴电缆相同（16~24 号线规）。但是在铜编织防护套和内蕊导线之间采用了压电共聚物作为绝缘体（图 26）。这种电缆外部还有聚乙烯护套，应用于埋入或电子篱笆保安系统，以及交通传感探测器包括车辆分类和行驶中重量称量系统和飞机分类、安全、保卫机场跑道等应用的飞机分类、安全、保卫传感探测器等。其他应用还有抗干扰、门安全监控、地垫、触模板，病床监控等用的各类传感探测器。这种新型电缆的特性与压电膜传感器特性相同。其输出与电缆所受的力成比例。长而薄的压电绝缘层可以产生相对低的输出阻抗（600nF/m），对压电器件来说是罕见的。电缆的动态范围是最主要的（>200dB），即可探测远距离由雨或冰雹引起的小幅振动，也可线性感应重型卡车的震动。电缆可承压 100Mpa 压力，标准工作温度为~40~+125℃。表 4 列出了电缆标准特性。

表 4，Kynar®压电电缆标准特性

Figure 26. Piezo cable construction



参 数	单 位	数 值
电容	PF/m	600
应变强度	MPa	60
Young 模数	GPa	2. 3
密度	Kg/m³	1890
声阻抗	MRay1	4. 0
相对介电常数	@1kHz	9
tan δ。	@1kHz	0. 017
静水压力、压电系数	pC/N	15
纵向压电系数	Vm/N	250×10 <sup>-3</sup>
静水压力压电系数	Vm/N	150×10 <sup>-3</sup>
机电耦合	%	20
能量输出	mJ/Strain(%)	10
电压输出	kV/Strain(%)	5

缆标准特性:压电电缆在冲击负荷增加时的输出灵敏度表示在图 27a，图 27b 所示为应力增加时的输出线性，这是所有规格压电电缆的标准情况。

图 27a. 灵敏度与负载的关系

Figure 27a. Sensitivity vs. load

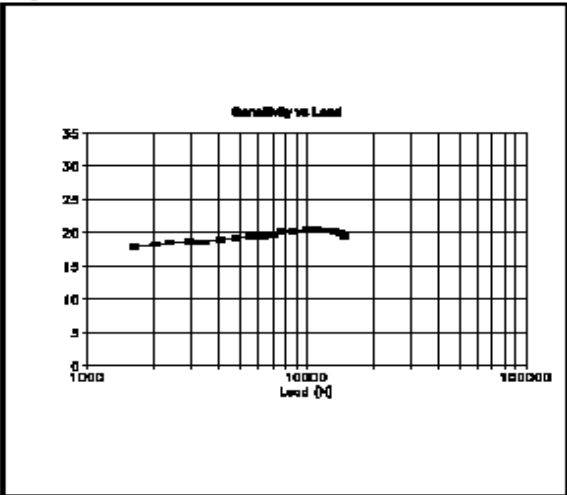
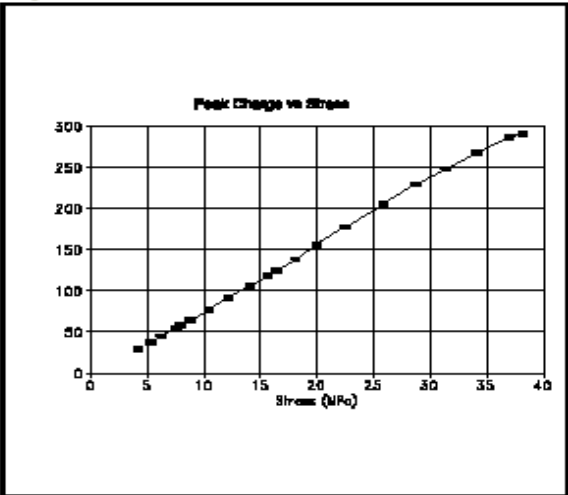


图 27b. 压电电缆的线性

Figure 27b. Piezo cable linearity



压电基础

## 机电变换

像海绵可以挤出水一样，当压电材料受压时产生电荷，其信号幅度和频率直接与压电材料的机械变形成正比。变形使材料表面电荷密度发生变化，于是就在加了电极的表面之间产生出电压。当所加的力反向时，输出电压的极性也同时反相。一个往复力会得到交变的输出电压。

压电薄膜，也像所有的压电材料一样，是一种动态材料，所产生的电荷与所加机械应力的变化成正比。由于材料的内部阻抗，不适用于静态测量（纯直流）。压电膜所产生的电荷的衰减时间常数，取决于膜本身的介电常数、内阻，以及压电膜所接接口电路的输入内阻。实际上，压电膜最低可测频率可达到 0.001Hz。有许多方法可实现纯直流响应，但要求压电膜既用作执行器，又作为传感器，监控着直流过程所产生的执行结果的变化。

对电荷或电压，固有的压电常数预告了对小应力(或应变)，压电共聚物所能产生的电荷密度（单位面积的电荷）或电压场（单位厚度的电压）。

### 电荷模式：

在近于短路的情况下，所产生的电荷密度可用下式表示：

$$D = Q/A = d_{3n}X_n \quad (n = 1, 2 \text{ 或 } 3)$$

所加应力(或应变)的机械轴（n），通常为：

- 1 = 长度（或拉伸）方向
- 2 = 宽度（或横向）方向
- 3 = 厚度方向

式中：

- D = 所产生的电荷密度
- Q = 所产生的电荷
- A = 导电极面积
- $D_{3n}$  = 与所加应力或应变轴所对应的压电系数
- n = 所加应力或应变轴
- $X_n$  = 相关方向上所加的应力

必须指出， $d_{3n}$  系数一般表示为每牛顿皮库仑（pC/N），但由于受力面积（m<sup>2</sup>）往往并不相同，而又不能“相消”，所以较确切的表达式应该是（pC/m<sup>2</sup>）/（N/m<sup>2</sup>）。

### 电压模式：

开路输出电压，可用下式表示：

$$V_o = g_{3n}X_n t \quad (n = 1, 2 \text{ 或 } 3, \text{ 与上述相同})$$

式中：

$g$  = 与所加应力或应变轴相应的压电系数

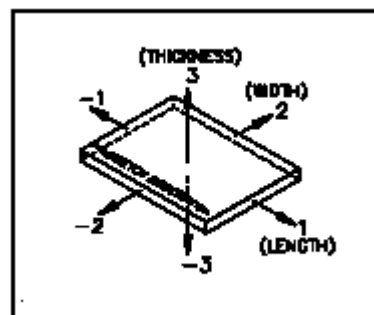
$X_n$  = 相关方向上所加应力

$t$  = 压电膜厚度

**压电常数：**

应用最广泛的压电常数  $d_{3n}$  和  $g_{3n}$ ，即电荷和电压，分别具有二个下角标。前者指电轴，后者指机械轴。由于压电膜很薄，所以电极只能在上、下表面。由于电荷或者电压总是通过膜的厚度（ $n=3$ ）来传输，因此，电轴便总是“3”。如图 28 所示，机械应力可以加在任何轴向，所以，机械轴可以是 1、2，或 3。

图 28. 轴向数码分类



通常，将压电膜的机械轴向 1 用于低频传感和驱动（<100kHz），而机械轴向 3 则用于高频超声传感和驱动（>100KHz）。

**方向特性：**

压电材料是各向异性的，也就是电和机械响应不同并取决于所加电场轴向或所加应力或应变轴向。在有关压电效应的计算中，必须要考虑到这种方向特性。

**例一：**

在一长 2.54cm，宽 2.54cm 和厚度为 110 $\mu$ m 的压电薄膜开关上，施加一个 1.45 磅/平方英寸 (10,000N/m<sup>2</sup>) 的负荷。该开关元件背后有刚性支撑。故力是作用在厚度方向上（即： $g_{33}$  模式）。本例中，负荷是作用在压电薄膜的长成宽的面积上。厚度方向所产生的开路电压为：

$$V_o = -g_{33} X t$$

$$g_{33} = -339 \times 10^{-3} \frac{V/m}{N/m^2}$$

式中：

$V/m$  = 压电膜厚度每米的电压输出

$N/m^2$  = 膜相关面积上施加的应力，由磅/英寸<sup>2</sup>变换为  $N/m^2$  约为 7,000。

$$V_o = - \left( -339 \times 10^{-3} \frac{\text{V/m}}{\text{N/m}^2} \right) (-10,000 \text{ N/m}^2)(110 \times 10^{-6} \text{ m})$$

$$V_o = -0.373 \text{ volts}$$

## 例二：

与例一中相同的压电膜开关元件，但所受的力为（ $10,000 \text{ N/m}^2 \times 0.0254 \text{ m}^2 = 6.45 \text{ 牛顿}$ ），而结构形式为柔性支撑的膜。力是作用在厚度横截面上（wt）。压电膜在负荷作用下被拉伸，故其为  $g^{31}$  模式。

$$V_o = -(3g_{31} \left( \frac{F}{wt} \right)) (t) = -(g_{31}) \left( \frac{F}{w} \right)$$

$$g_{31} = 216 \times 10^{-3} \frac{\text{V/m}}{\text{N/m}^2}$$

$$V_o = - \left( 216 \times 10^{-3} \frac{\text{V/m}}{\text{N/m}^2} \right) \left( \frac{6.45 \text{ N}}{2.54 \times 10^{-2} \text{ m}} \right)$$

$$V_o = -54.9 \text{ volts}$$

由于力加在小得多的横截面上，因而导致输出电压的急剧增大。小面积产生较高应力。

## 动态范围

压电膜有很大的动态范围，它已被用来感测空间一个质量为  $10^{-12}$  克的高速物体的冲击；而在其他极端条件下，它也可以测量在武器试验过程中所产生的 300,000 大气压力的冲击波。最近进行的一项研究得出了一个面积为  $155.5 \text{ mm} \times 18.5 \text{ mm}$ ，厚度为  $52 \mu\text{m}$  的厚膜的最大输出能量。该膜受力约为  $350 \text{ MPa}$ （在拉伸方向，或者“ $n=1$ ”方向上）而未失效。所产生的电荷线性很好，下面是最大应力条件下的测量结果：

最大测得电荷：20  $\mu\text{C}$ ，即 6.95  $\text{mC/m}^2$   
 最大测得电压：1600 V，即  $30.8 \times 10^6 \text{ V/m}$   
 最大变换能量：30.9  $\text{mJ}$ ，即 207  $\text{kJ/m}^3$

稍后的试验表明压电膜器件可以长时间承受上述能量的 10% 左右，而不会出现可测得的损坏。

## 电机变换

当一片压电薄膜受到电压的作用时，由于内部偶极子在所加电场下的吸引或排斥，而使膜的尺寸发生变化。加一电压极性，压电膜就变薄、变长和变宽。而加相反极性，则使压电膜的长度和宽度收缩并变厚，加交流电压就使压电膜“振动”。

变形的大小可根据压电“ $d_{3n}$ ”常数来计算：

$$\text{对长度变化: } \Delta l = l d_{31} V/t$$

式中：

$\Delta l$  = 每米膜长变化

$l$  = 膜原长度（米）

$d_{31}$  = 长度方向压电常数（“ $n = 1$ ”方向）（m/V）

$V$  = 厚度方向（ $t$ ）所加电压

$$\text{对宽度变化: } \Delta w = w d_{32} V/t$$

式中：

$d_{32}$  = 宽度方向压电常数（“ $n = 2$ ”方向）

$$\text{对厚度变化: } \Delta t = t d_{33} V/t = d_{33} V$$

式中：

$d_{33}$  = 厚度方向压电常数（“ $n = 3$ ”方向）

例三：

一块长（ $l$ ）3cm，宽（ $w$ ）2cm，厚度（ $t$ ） $9\mu\text{m}$  的压电薄膜，按 3（厚度）方向加  $V = 200\text{ v}$  的电压。这个电输入产生的应变  $S$  等于  $d$  乘以所加电场。

在长度方向上：

$$S_1 = \frac{\Delta l}{l} = d_{31}(V/t) \quad \text{where } d_{31} = 23 \times 10^{-12} \frac{\text{m}}{\text{V}}$$

$$\Delta l = d_{31}(V/t)l = \left( 23 \times 10^{-12} \frac{\text{m}}{\text{V}} \right) \frac{(200\text{ V})(3 \times 10^{-2}\text{ m})}{(9 \times 10^{-5}\text{ m})}$$

$$\Delta l = 1.53 \times 10^{-5}\text{ m} \quad \text{or } 15.3 \mu\text{m}$$

在厚度方向上：

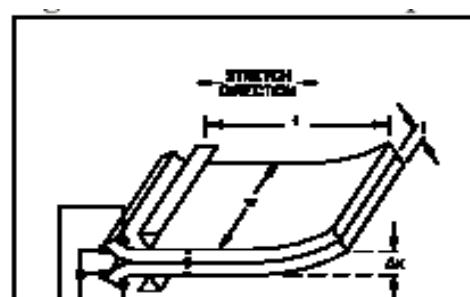
$$\Delta t = t d_{33}(V/t) = d_{33} V = \left( -33 \times 10^{-12} \frac{\text{m}}{\text{V}} \right) (200\text{ V}) = -6.6 \times 10^{-9}\text{ m} \quad \text{or } 66\text{ \AA}$$

## 执行器

一般来说，压电薄膜执行器的设计，主要取决于应用的各种要求，诸如运行速度、位移量、产生的力以及可提供的电源等。压电膜技术可以提供不同的设计方案来实现上述应用要求，这些设计方案包括：

- 为客户订做的单面或双面电极图形；
- 多层叠层结构或双压电膜片；

图 29. 双压电薄膜片





- 折叠或卷筒式多层结构；
- 挤出成型压电管和压电电缆；
- 在各种基片上浇注压电共聚体；
- 模塑三维结构。

上述各种设计方案均各有其优缺点，例如，卷筒式多层执行器可以产生比较高的力，但却要牺牲一定的位移量。

### 双压电薄膜片

与双金属片相似，二片极性相反的压电薄膜粘在一起，就构成了一个弯曲的元件，或“双压电薄膜片”（图 29）。在这种双压电膜片上加上电压之后，使其中一片加长，而另一片缩短，这样就形成了弯曲。加相反极性的电压时，它就向相反方向弯曲。这种结构形式将微小的长度变化变为很大的端部弯曲，但所产生的力小。若采用加厚的压电膜和多层结构，可增加这种双压电薄膜片所产生的力，但要牺牲一定的位移量。

端部弯曲量和所产生的力，按下式计算：

$$\Delta x = 3/4 d_{31} (l^2/t^2) V \text{ 米}$$

$$F = 3/2 Y w d_{31} (t/l) V \text{ 牛顿}$$

式中：

$\Delta x$  = 直流时的位移量

$F$  = 产生的力

$d_{31}$  = 在“1”方向上的压电常数

$l, t, w$  = 压电膜的长度、厚度和宽度

$V$  = 所加电压（伏）

$Y$  = 压电膜的 Young 氏模量 ( $2 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ )

当加交流电压时，双压电膜片就成了类似昆虫翅膀那样的扇子。尽管双压电膜片的确显示了直流响应，但只在谐振时才获得最大的端部弯曲，这是由其长度和厚度来决定的。

### 例四：

在由两条  $9 \mu\text{m}$  PVDF 压电膜构成的  $2 \text{ cm}$  悬臂双压电膜片的二端加  $100 \text{ V}$  电压，其端部的位移量  $\Delta x$  等于：

$$\Delta x = \frac{3/4 V d_{31} l^2}{t^2}$$

$$\Delta x = \frac{3/4 (100 \text{ V}) \left( 23 \times 10^{-12} \frac{\text{m/m}}{\text{V/m}} \right) (2 \times 10^{-2} \text{ m})^2}{(9 \times 10^{-5} \text{ m})^2}$$

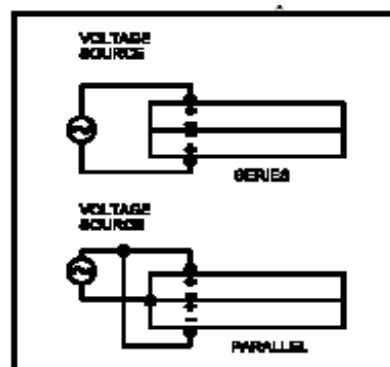
$$\Delta x = 8.52 \text{ mm}$$

如上式所示，较长的双压电膜片可以获得较大的位移量，而较宽的双膜片则可获得较大的力。在谐振频率和直流时的位移量由代表机械增益的 Q 值决定，双压电膜片的典型 Q 值为 20~25。

例如，在一长 5mm，厚 70 $\mu$ m 的双压电膜片上加 120v 的直流电压，所产生的位移量为 57 $\mu$ m。但是，同样的双压电膜片，在 580Hz 的谐振频率上，却可以获得 1.4mm 的位移量。对于需要较大力的应用场合，如冷却风扇等，可以考虑采用多层结构。所产生的力随层数的增加而成比例地增大。

双压电膜片的电连接方面，有二种基本的方法如图 30 所示，即串联和并联。为获得相同的位移量，并联时所需电压要低于串联时。但另一方面，串联时所需的电流要小于并联时。这二种接线方法对执行器来说总的电功率是相同的。不过，很显然，对加工来说，串联要比并联简单得多。这种双压电膜片的弯曲器件，主要应用于风扇、玩具和装饰物等。

图 30. 双压电膜片的引线连接法



### 盘卷式执行器

将图 31 中所示的柱形盘卷式双压电膜片所产生的位移量表达如下：

$$x = d_{31}El \quad \text{米}$$

$$E = V/t \quad \text{V/m}$$

$$F = Yd_{31}EA \quad \text{牛顿}$$

$$f = (1/2\pi)\sqrt{YA/(M_e + 0.405M_p)}$$

式中：

x = 直流时的位移量（米）

F = 所产生的力（牛顿）

f = 谐振频率

l, t = 压电膜片的长度和厚度（米）

Me = 外加负载的质量（kg）

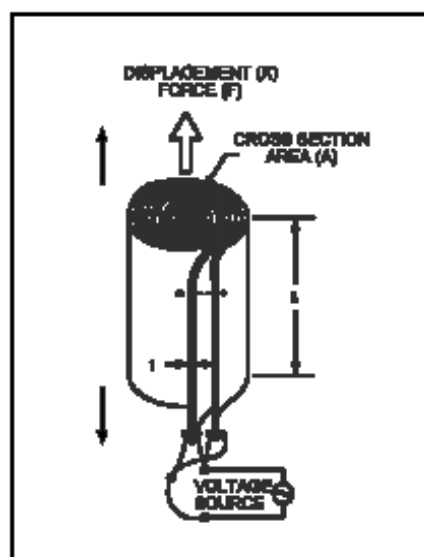
Mp = 压电执行器的质量（kg）

A = 横截面积（m<sup>2</sup>）

Y = Young 氏模量（N/m<sup>2</sup>）

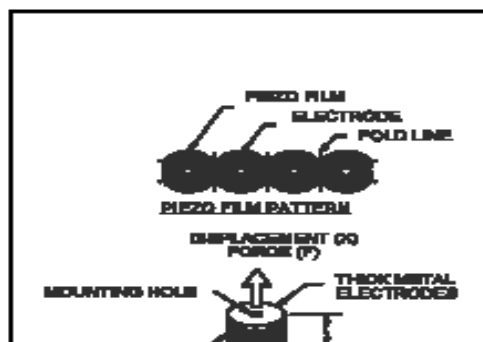
E = 电场（V/m<sup>2</sup>）

图 31. 盘卷式双压电膜片



如上式所示，一个盘卷式的压电膜执行器，随着横截面积的增加，可以产生出更大的力和与更高的谐振频率响应。加长执行器，则产生更大的位移量，但降低了响应速度。应当指出，

图 32. 折叠式压电膜执行器



当  $M_e=0$  时，若将长度  $l$  调节到满足谐振条件，则执行器输出可达到最大。例如，一个直径为 12mm，长度为 25mm 的盘卷式压电膜执行器，在 32KHz 的频率上将达到最大输出。

## 折叠式执行器

另一种提高速度和增加力的设计方案就是图 32 所示的长条压电薄膜折叠式执行器。这种方案有效地增大了压电膜片的并联叠层。中心孔用于在底座上固定执行器。可将盘卷式执行器的设计公式用于此类执行器的计算。只是将式中的  $d_{31}$  改成  $d_{33}$  ( $\sim 33 \times 10^{-12} \text{C/m}^2$ ) 即可。下面是一个折叠式压电膜执行器实例的技术规范：

位移量：1 $\mu\text{m}$  / 1mm 长

产生的力：15kg / 10mm 直径

频率：dc-100 kHz

驱动电压：800V

与机械式或者压电陶瓷执行器相比较，多层压电膜执行器，因其  $Q$  值低，所以较少存在减幅振荡问题。多层执行器一般应用于工业设备的微动台、声波发生器和喷墨打印机等。

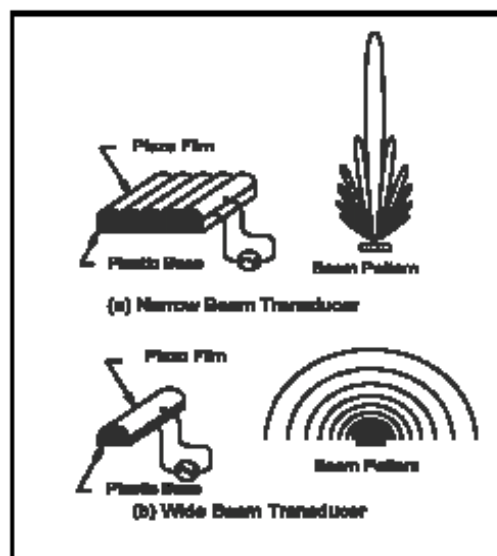
## 超声执行器

超声执行器，如下所述，不适用于甚高频 ( $>1\text{MHz}$ ) 的发射器应用。在甚高频方面的应用，主要为医用超声成像及无损探伤，使用的是厚度模式  $d_{33}$ 。本节所讨论的是低频 (20~100kHz) 应用，压电膜工作在长度变化模  $d_{31}$  式。

压电膜在低频超声方面应用的优点在于这种材料的柔性。它可以很容易地卷曲成为园形振子（见图 33）。波束图形取决于半园单元的数目和直径。工作频率则由半园单元的直径决定。应当指出，图 33(a) 和图 33(b) 之间的区别在于有效单元的数目和直径的不同。要想展宽波束的覆盖面，就应减少有效单元的数目。一个园柱形的振子，可以获得  $360^\circ$  的波束图形。

在超声应用方面，对于远距离测量，则要求具有最少旁瓣的锐波束。但对于诸如汽车尾部防撞探测等方面的应用而言，则需要达到  $180^\circ$  以上的宽波束。图 33 所示为宽、窄二种波束的超声振子的设计外形。

图 33. 压电膜超声振子



压电膜在透过空气作超声波执行器应用方面，包括车辆倒车安全测距，人身安全系统，空气流速（多普勒）探测，和物体内部通讯等。类似的结构形式还可以应用于水下、液体探测，包括流量、液位传感器以及通讯等。

### 热电基础

压电聚合材料，如 PVDF 和其  $VF_2/VF_3$  共聚体，同时也是热电聚合材料。热电传感材料通常都是具有随温度变化的偶极矩的介电材料。由于这种材料均吸收热能，它们也就会膨胀或收缩，从而感应出二次压电信号来。当压电膜受热时，膜内的偶极子在热激励下作随机运动。这就使膜内的平均极化减少，而在膜面上产生出电荷，其输出电流与温度变化速率 ( $\Delta T$ ) 成正比，温度每上升（或减少）一度所产生的电荷数目，可以用热电系数， $\rho$  来表示。

面积为 A，介电常数为  $\epsilon$ ，厚度为 t 的压电薄膜，所产生的电荷和电压，按下式计算：

$$Q = \rho \Delta T A$$

$$V = \rho t \Delta T / \epsilon$$

### 例五：

一个膜厚度 (t) 为  $9\mu m$ ，介电常数 ( $\epsilon$ ) 为  $106 \times 10^{-12} C/Vm$  和热电系数 ( $\rho$ ) 为  $30 \times 10^{-6} C/(m^2 \cdot K)$  的压电膜热电探测器，因为受到红外辐射，而使温度 ( $\Delta t$ ) 上升了  $1^\circ K$  (华氏)，其输出电压的计算如下：

$$V = \frac{(30 \times 10^{-6} C/m^2 \cdot K)(9 \times 10^{-6} m)(1-K)}{(106 \times 10^{-12} C/Vm)}$$

$$V = 2.55 \text{ volts}$$

压电薄膜的热电电压系数，大约比锆钛酸铅 (PZT) 和钛酸钡 ( $BaTiO_3$ ) 高一个数量级。表 5 比较了这几种材料的热电特性。

表 5：热电材料比较表

Material	TGS	LiTaO <sub>3</sub>	BaTiO <sub>3</sub>	PZT	PbTiO <sub>3</sub>	PVDF	VF <sub>2</sub> VF <sub>3</sub>
$\rho_Q$	350	200	400	420	230	30	50
$\epsilon/\epsilon_0$	30	45	1000	1600	200	10.7	8.0
$\alpha$	.16	1.31	1.00	.44	.67	.06	.06
L	225	646	564	374	461	138	138
$P_T$	1.32	.50	.05	.03	.10	.47	.71
$M_l$	.53	.16	.02	.01	.03	.20	.31
Pyroelectric Charge Coefficient				$(\rho_Q)\mu\text{Coul}/[m^2 \cdot ^\circ K]$			
Dielectric Constant				$(\epsilon/\epsilon_0)$ , where $\epsilon_0 = 8.85\text{pF/m}$			
Thermal Diffusivity				$(\alpha)m^2/\text{sec} \cdot 10^{-6}$			
Thermal Diffusion Depth @ 1Hz				(L) $\mu m$			
Pyroelectric Voltage Coefficient				$(P_T)\rho_Q/\epsilon, V/[\mu m \cdot ^\circ K]$			
Figure of Merit				$(M_l)\rho_Q/[C_T \cdot \epsilon], V \cdot mm^2/J$			

压电薄膜的优点包括：

- 不吸潮（<0.02% H<sub>2</sub>O 吸水性）
- 低导热性
- 低介电常数
- 化学惰性
- 大尺寸探测器

压电薄膜的热电响应也是压电传感器在低频应用时的噪声源。用于低频应力感应时，可以有几种方便的方法“共模抑制”热电响应。例如：

在一个压电膜器件上采用二个相同形状尺寸的电极；一个电极与  $d_{31}$  同向，而另一个电极则与  $d_{31}$  方向相垂直，两个电极响应热信号时产生的信号相同，但与  $d_{31}$  同向的电极面积所产生的却是垂直方向电极的 10 倍。减去这一信号后，就得到纯压电响应。

二个尺寸大小相同的压电膜器件，均为多层堆叠结构，一个膜为  $d_{31}$  取向，并与应力面平行；另一个膜也为  $d_{31}$  取向，但与应力面相垂直。如上所述，信号是相减的，这就将压电响应从热响应中分离出来。

还有其他共模抑制技术，可以由 MSI 公司的应用工程师们去阐明。

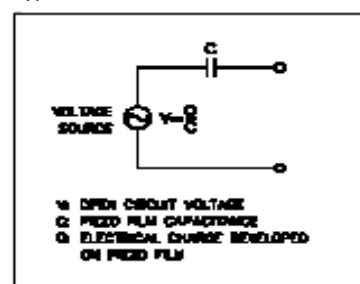
在较高频率上应用时，压电薄膜器件温度变化速率低于要测的应力过程时，采用频率滤波器可以很方便地去除不需要的热信号。

## 基础电路原理

一个设计合理的接口电路在压电膜传感器的优化过程中将起着关键作用。压电膜的应用从玩具到军用传感器，接口电路和应用是密切相关的。在很多应用中，压电膜可以直接与电子电路相连接，无须作特别的接口考虑。但对于要求具有接口电路的应用场合，建议遵循以下三个步骤进行考虑：

1. 在所期望的动态范围内，考虑频率范围及信号幅度要求。
2. 选择适当的负载电阻以确保低端的工作频率并使因负载效应造成的信号损失最小。
3. 如果信号电平很低，选用一个缓冲电路。如果需要，应选一个高值负载电阻（如 22M $\Omega$  或以上），应选一个低漏损高阻抗的缓冲放大器。市面有售用于缓冲电路的 JFET 或 CMOS 运算放大器。

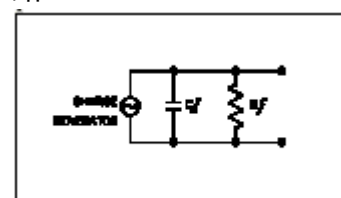
图 34. 压电薄膜的等效电路



## 简化的等效电路

接口电路设计的第一步，就是把压电膜的特性理解为等效电路的一部分。图 34 给出了压电薄膜的一个简化等效电路。它由一个电压源与相串联的电容组成，串联电容  $C_f$  表示压电薄膜的电容，它与膜

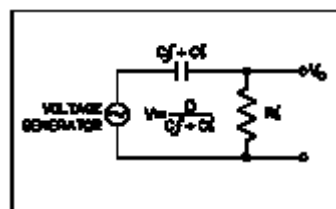
图 35. 压电薄膜的等效电路



的介电常数和面积成正比，而与膜厚成反比。电压源的幅度等于压电膜的开路电压，根据激励大小的不同，其变化范围从几微伏到 100 多伏。等效电路对大多数应用都适用，但对在高频时如做超声波振子时意义不大。

图 35 给出了一个作为电荷发生器的等效电路，该等效电路中给出了膜电容  $C_f$  和内阻  $R_f$ 。如前所述，感应电荷  $Q$  是与所加的力成线性比例，电容  $C_f$  与膜的表面积成正比，而与膜厚成反比。当应用于低频率的情况下时，内阻  $R_f$  非常高，可以忽略不计。输出电压可以通过膜电容来求出，即： $V = Q / C_f$ 。

图 36. 有接口输入阻抗的压薄膜等效电路



## 输入电阻

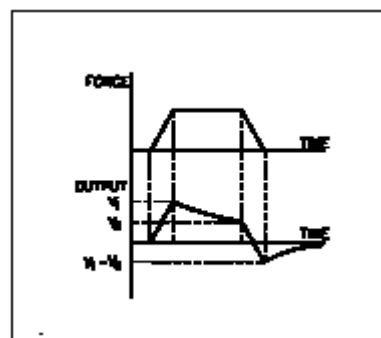
接口电路最关键的部分就是输入电阻，输入电阻影响着低频测量能力及信号幅度。这称之为“负载效应”。

压电薄膜电容可以被视为等效源阻抗。源阻抗将随着膜电容的减小及工作频率的降低而增大，注意到这一点是重要的。这个源阻抗与输入电阻相结合，形成了一个分压器。随着输入电阻与源阻抗之比的减小，总的输出电压则减小。因此，为电子接口选择适合的输入电阻，是将负载效应减至最小的关键。

## 时间常数

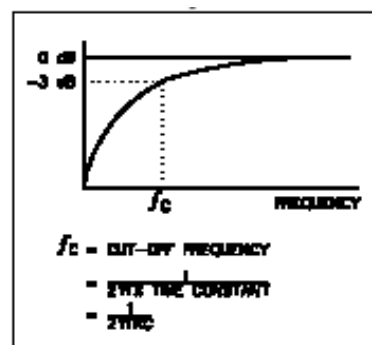
除了输入电阻之外，接口电路的输入电容，同样对输出造成影响。图 36 给出了压电膜的等效电路，输入电阻为  $R_i$ ，输入电容为  $C_i$ 。压电膜的典型时间域响应见图 37。加力后所产生的电荷，按  $R_i (C_f + C_i)$  所确定的时间常数衰减。

图 37. 压电薄膜的时间响应



时间常数表示一个信号衰减至其原始幅度的 70.7%（ $\sim 3\text{dB}$ ）时所需的时间。时间常数越小，信号衰减越快。由于这有限的时间常数，所以压电薄膜仅适用于动态测量，而非静态测量（最小 0.001Hz）。

图 38. 压电薄膜的高通滤波器特性曲线



如果要求一个长的时间常数，可以采用高输入电阻和膜电容。但是，要知道高输入电阻也会产生较高的噪声，需要采用屏蔽补偿。

## 频率响应

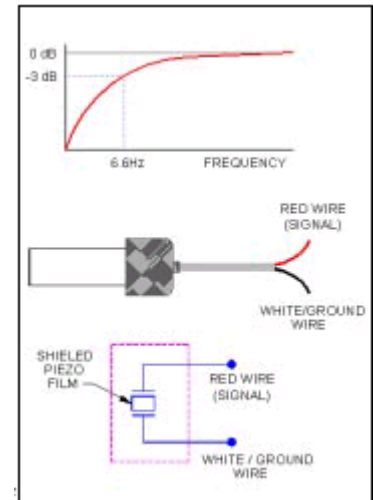
时间常数的另一个重要方面就表现在等效电路的频率响应上，该等效电路具有如图 38 所示的 RC 高通滤波器特性曲线。竖轴表示测得的输出信号与产



生的信号（压电膜的开路电压）之比。0dB 表示没有信号损失，而截止频率（3dB 以下）与时间常数成反比，当一个压电膜传感器工作在该截止频率以下时，其输出信号将大大下降。在低频测量时，输入电阻要求要足够高，以使截止频率明显地低于所需要的工作频率。从时间常数和负载效应来考虑就可实现这个目标。

做为一个例子，图 39 给出了一个加有屏蔽的压电膜传感器（SDT1 型）的频率响应。例中，SDT 与一个有 10M $\Omega$  负载电阻和一个 FET 的电路相接。压电膜的电容为 2.4nF，由于负载电阻为 10M $\Omega$ ，故其时间常数为 24 毫秒，因此，其截止频率是 6.6Hz。为了对比，如果用 100M $\Omega$  的电阻而不是 10M $\Omega$  的负载电阻，截止频率就减小到 0.66Hz。这种传感器元件可以在该阻值决定的那个截止频率以上的任何应用中工作。

图 39. SDT1 频率响应



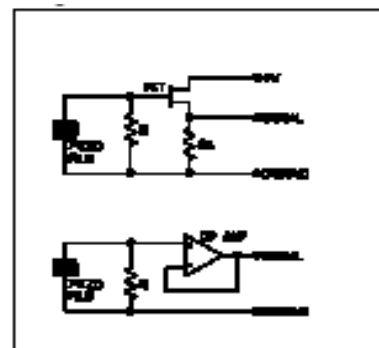
当电路不能置于传感器附近时，推荐在传感器附近加一个缓冲电路。该缓冲电路将压电膜器件的高输出阻抗变为低输出阻抗，从而使电缆中的信号损失和噪声减小到最低限度。对于大尺寸（即高电容）的压电膜传感器，即使是小信号和长电缆，也可能不需要缓冲电路。

当需要压电膜高输出阻抗时，一个低漏损高阻抗的缓冲电路是需要的。例如，红外移动传感器和加速度计应用中，就需要高达 50G $\Omega$  的输入电阻，以获取很低的频率响应。此时，缓冲电路的输入阻抗应比压电膜的输出电阻高得多，以维持很低的频率响应。此外，为达到最高的测量精度，将缓冲电路的泄漏电流降至最小也是重要的。低泄漏缓冲电路的例子包括：JFET $\sim$ 4117 (Siliconix, Sprague)；运算放大器 LMC660, LF353 (National 半导体)，OP80 (PMI)，和 2201 (Texas 仪器仪表公司)。

图 40 所示为通用的单增益缓冲电路举例。

图 40. 压电薄膜传感器用单增益缓冲电路

用作缓冲电路和放大器的运算放大器种类很多。即可用于作电荷式放大器也可用于电压式的放大器。图 41 给出了基本电荷和电压放大器的配置图。电荷放大器的电压输出由  $Q/C_f$  确定，式中的  $Q$  为压电膜上所产生的电荷， $C_f$  为电荷放大器的反馈电容。



电荷放大器的输出电压由反馈电容确定，而不是输入电容。这表明，电荷放大器的输出电压与电缆电容无关。电荷放大器的主要优点就体现在压电膜传感器和电子电路之间使用长电缆时。此外，它还大大减小了由传感器周围的寄生电容而造成的电荷泄露。另外，简单的电压放大器足以满足大部分的应用。图 41 中的电路是一种典型的非变换式电压放大器。



电压放大器的优点在必须考虑环境温度时才体现出来。在不同温度时电压灵敏度（g 常数）的变化小于电荷灵敏度（d 常数）的变化。因此，接有压电薄膜的电压放大器，受温度的影响较小。在图 41 中，电荷放大器和电压放大器的时间常数分别由  $RC_f$  和  $RC$  确定。

做为一个设计例子，来描述一个交通传感器接口电路。由于其柔软特性，压电电缆对交通测量应用是一种理想的传感器材料。MSI 的 BL 交通传感器是将压电电缆用铜护套压扁后按安装要求配以不同长度的信号电缆而构成。其感应长度超过 3 米。在此例中，BL 传感器是 2 米长。这个电屏蔽的传感器有 100 英尺同轴电缆。传感器的电参数包括：

电 容=9.5nF (包括压电电缆和信号电缆电容)  
 输 出=500mV (对一个在 55mph 和 70°F 时 800 磅的轮  
 载)  
 信噪比=10:1

接口电路的基本要求是： 低端频率=1.6Hz  
 电路输出=数字脉冲计数

满足这些要求的接口电路见图 42。这个电路就是一个比较电路。为使截止频率减小到 1Hz，选用 10MΩ 输入阻抗。这个电阻的实际截止频率可按 1.6Hz 计算。用一个 10MΩ 电位器来调节阈值电压  $V$ ，二极管用于保护元件免受高压损坏。一辆以 55mph 速度行驶的小客车典型的压电膜和接口电路输出信号见图 42。

## 信号整理

由于压电薄膜即有压电效应又有热电效应，必需有预防措施去掉或减小不需要信号的影响。信号整理的基本原则包括：

滤波——给出所要的带通和带阻特性的电子滤波器。  
 平均值——如果所要的信号有周期性，而不想要的信号是随机的，单平均值可以增加信噪比。  
 共模抑制——

## 基本开关电路

有多种电路可用于压电膜的接口，包括场效应晶体管 (FET)，运算方大器 (OpAmps) 和低电流数字逻辑电路 (CMOS)

由于 FET 已用于表面贴装技术，可在小尺寸应用时考虑用 FET。使用 FET 时应考虑的重要特性是开关频率，压电膜电容，FET 关断状态的漏电流，输入偏置阻

图 41. 压电薄膜用典型放大器

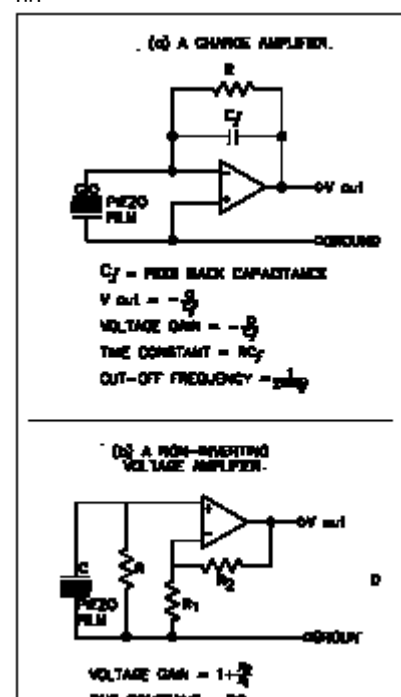


图 42. 交通传感器的接口电路

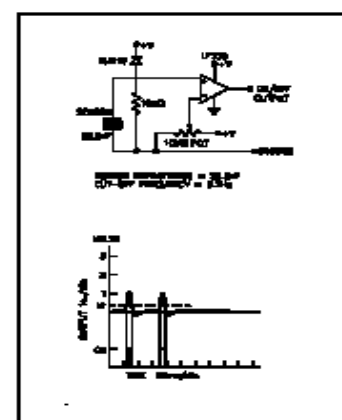
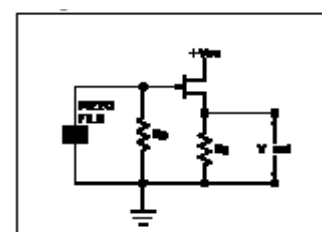


图 43. 高频, 低增益 FET 电路接口



抗和电磁干扰（EMI）屏蔽。

图 43 和图 44 是典型的压电膜开关的 FET 电路图。

图 43, 共漏极或源极跟随器在应用中应用的很好, 在应用中简单的缓冲器是重要的。在这里, 电路电压增益约为 1。

在图 44 中的共源极电路对需要电压增益的低频应用是合适的。增益由阻抗  $R_d$  和  $R_s$  确定。当增益增加时, 频率带宽按每 20dB 增益/十倍频程的系数减小。

运算放大器为压电膜开关应用提供了很大方便。对特定的应用, 很容易与其匹配。重要的运算放大器电路特性包括输入偏置阻抗, 薄膜开关电容和 EMI 屏蔽。

图 45 的运算放大器电路, 一个电荷放大器, 适合一个测得的振动触发开关的应用。在小信号应用中也工作的很好。一个电荷放大器消除了压电膜和连接电缆的时间常数效应。电荷放大器是一个零输入阻抗的电流运算电路, 结果是在膜两面没有电压产生。电荷放大器快速的吸收薄膜产生的电荷。由于在薄膜电极上无电荷, 薄膜表现出无时间常数。

薄膜和连接点缆的电容在电路的传递功能上没有反效应。因而薄膜尺寸和电缆长度公差控制不需要特别严格。电荷被从薄膜输送到放大器反馈环的电容, 此电容确定输出电压:  $V=Q/C_f$ 。

该电荷放大器需要一个有高输入阻抗和低偏置电流的运算放大器。一个高输入阻抗避免了在反馈电容上电荷的泄漏, 低偏置电流防止反馈电容过度充放电。电荷放大器电路的布局是关键。运算放大器外壳必须很好接地输入端应保护好并象外壳一样很好接同一地。

有保护输入端的布局见图 46。为防止运算放大器放大造成的泄漏噪声, 应用绝缘良好的 STANDOFF 接头端接输入电缆。

尽管有上述保护措施, 输出电压仍会漂移。为补偿漂移, 通常在电路中设计一个复位开关隔一端时间用手动将输出置零。一种就是在电阻上串联一个簧片开关, 但与反馈电容  $C_f$  并联。起动簧片开关关闭此开关, 放掉存在反馈电容内的电压。

图 44. 低频, 高增益 FET 电路接口

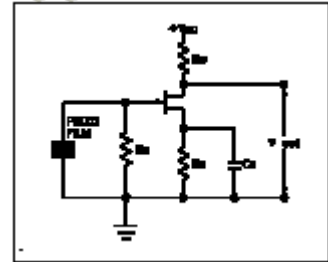


图 45. 运算放大器接口电路作为电荷放大器

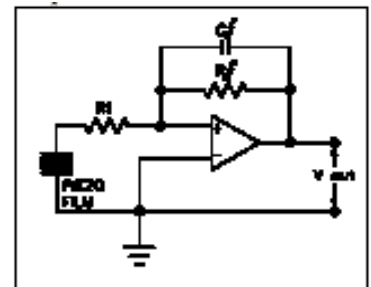


图 46. 保护输入端的布局

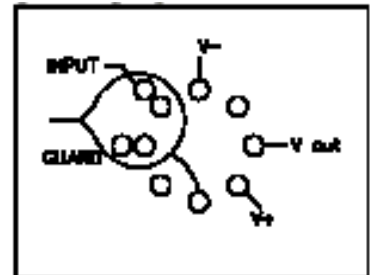
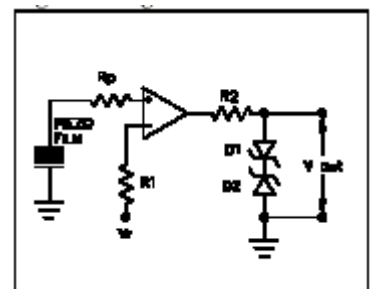


图 47. 信号电平检测器



另外一个方法是使用一个 MOSFET 器件, 在这器件中最大输出电压和关门电压决定 FET 的最小门电压。实际应用中, 给 MOSFET 门一个大于放大器电压的电压, 降低其漏/源极阻抗和为反馈电容放电创建一个电流路径。

第三种办法是在反馈回路并一个分压电阻。这个电阻产生一个时间常数 ( $C_f R_f$ ), 这个时间常数与薄膜电容无关并可精确控制。

图 47 的信号电平检测器适用于大信噪比的应用。这个电路对在低电平振动中检测冲击是理想的。对信噪比低和必需将冲击或压力信号从背景振动中鉴别出来的情况, 图 48 的微分放大器电路是合适的。这个电路由两个驱动微分放大器的传感器组成。

这个电路用共模抑制概念。两个开关机械耦合用于消除模拟二者的不想要的振动。在一个开关上的输入或压力信号会产生输出, 而另一个却没有。

CMOS 逻辑电路提供了与压电薄膜接口的一个低成本方案。如前所述, 用 CMOS 技术实现的低能耗电路非常适用于压电薄膜开关。对压电薄膜来说 CMOS 应用一般是对低频工作。其它要考虑的特性包括器件输入泄漏电流, 输入阻抗, 输入偏置阻抗, 和 EMI 效应。例如, 一个 CMOS 电路可用于感应一个单个冲击或一个压力信号。

图 49 的 D 触发器显示冲击或压力信号会推动一个声音报警。

图 50 中的电路在记数应用中感应多次冲击或压力信号。

对与压电膜接口有许多不同的 CMOS 电路配置可用。所有电路的共同点是输入偏置电阻与压电薄膜并联, 输入电阻与压电薄膜串联。偏置电阻负责漏电流而串联电阻限制电流保护其不受静电放电电荷的冲击。

## 电缆

在不可能在压电薄膜传感器附近接入放大电路的应用中, 必需考虑选用可传输高阻信号的连接电缆。

屏蔽的同轴电缆被用于减小噪音时, 会产生电缆泄漏和附加电容。在大多数情况下, 电缆的初始绝缘层已有较高的阻抗, 非极化塑料如高纯度聚乙烯或 Teflon® (PTFE)。由于电缆的移动产生噪音从而干扰信号传输, 使电缆保持非振动状态同样是重要的。

图 48. 微分运算放大器接口电路

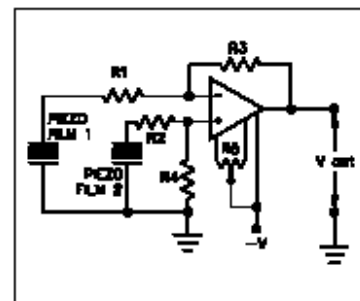


图 49. 用于检测单个冲击的 CMOS 电路

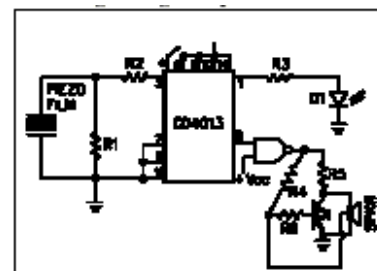
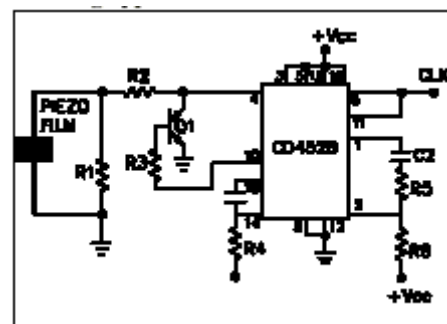


图 50. 用于记数应用的 CMOS 接口电路



## 制造

压电膜卷料是在净化房环境下生产的，首先是将 PVDF 颗粒料熔化并挤压成片状，然后，再进一步延展至挤压片料 1/5 的厚度。低于聚合物熔点温度的延展使分子的链群成为平行的结晶面，称之为“ $\beta$  相”。为取得高等级的压电活度，将这种  $\beta$  相的聚合体置于很高的电场中，使晶粒顺应极化场排列，PVDF 共聚体则无需延展即可极化。

经蒸发沉积的金属化层厚度通常是 500~1000Å，几乎任何金属化层均可以这样沉积。常用的金属有：镍、铝、铜、金及其合金。电极的制造是掩膜喷镀，或用光刻胶进行化学蚀刻连续金属化。分辨率现可以达到 25 $\mu$ m 线宽，采用导电银墨进行丝印电极，其电极就厚得多，约为 5~10 $\mu$ m，这种方法多用于在单片材上构成多个传感器且需要复杂形状的电极。银箔层是以薄胶层粘合，并与压电膜容性耦合。每种电极各有优缺点。

总的来说，喷镀金属用于高分辨率的阵列、低热质量的热电应用，或者惰性侵入式的医学应用。全金属化片材可以用剃须刀片小心切割，不会造成膜厚方向的短路。网印油墨则非常牢固，也很柔韧，可以承受很高的应力(>10%)，也可以在高电压条件下使用，不会发生击穿，并适于连续印制。但是，由于从丝印电极上切下元件时，极有可能使有厚油墨的压电膜在厚度方向上短路，因而要留出非金属化的边缘。电极层从机械上限制了压电膜对于作用在膜平面上的外部应力和应变的响应，但它在“厚度模式”方向工作时很有用。

经过金属化之后，还要经许多加工步骤后才生产出最后的成品。简言之，压电膜是层压在一种保护载体膜上，经切割成形，并加引线或端子后包装，有时还包括信号整理电路。经封装后的传感器件范围很广，从几平方毫米(包括 ASIC 芯片)的运输损坏传感器到数平方米体育运动记分靶传感器，足以说明这种技术的广泛用途。

## 应用

下面所述的传感器应用，体现了采用压电膜传感器的产品的良好效果。

## 开关

一般接点式开关，由于其触点受潮和积尘而结垢，可靠性会下降。而压电膜开关为单体结构，没有了这种缺陷。所有开关应用中最具挑战性的是弹子游戏机上的应用。

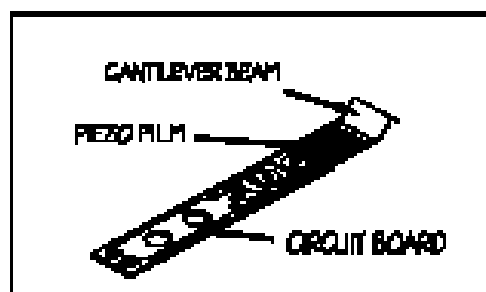
一位弹子游戏机的制造商，在他的机器上采用了 MSI 公司所生产的压电膜开关，取代了原来的瞬时翻转型开关。这种开关是在弹性钢片上层压了压电膜并作为一个悬臂安装在印制电路板的端部。

数字压电膜开关具有一个在常开状态下并不消耗电源的简单 MOSFET 电路的特点。响应一个直接的接触力时，这个压电膜弹片就瞬时触发 MOSFET 电路，于是产生一个瞬时“闭合”达 50V 的最大电压。这种小型无触点开关的输出十分适合于逻辑电平切换。它不像普通接点式开关那样，会出现腐蚀、麻点以及跳动等。

该公司对这种开关进行了超过千万次以上的试验未出现过失效。这种开关解决了这种弹子游戏机中触点结垢的头痛问题，大大地减少了停机和费用开支。该设计的简化在以下的应用中很有效，这包括：

装配线和轴转速计数器开关  
自动过程开关  
机器配料产品的冲击感应  
面板开关  
脚踏板开关  
门关闭开关

图 51. 弹子游戏机用开关

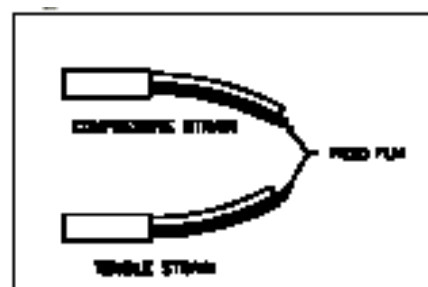


改进承载压电薄膜的悬臂梁，以调节不同冲击力的开关灵敏度。图 51 示出了这种数字开关的结构。

图 52. 梁式开关

## 梁式开关

压电膜开关可以用在测量一个事件的幅度、频率和方向，及物体探测和识别，计数，唤醒开关及双向编码等应用中，梁式开关的结构示于图 52。



注意压电膜元件是层压在较厚的基片一面上，另一面的压层较薄，这样就使其中心轴线不在压电膜元件上。于是，当应力向下时，在压电膜上形成完全的拉伸应变，而当应力向上时又形成了压应变。如果中轴线位于压电膜的中心，也就是说两边的压层厚度一样，则不管向上或向下变形，上半部的压电膜会承受下半部的反方向应力，于是，所产生的信号被抵消。

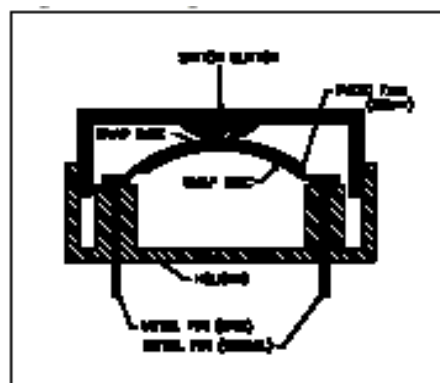
这种梁式开关应用在天然气压力表中的轴转速计数器或者电子公用仪表中的齿数计数器。梁式开关不需外部电源，所以，天然气表相当安全而无火花之患。在其他方面的应用实例有：测球击的垒球靶，测投篮命中率的篮圈感测计数器，以及软洋娃娃吻脸和逗乐开关（传感器缝制在布娃娃中），另外

图 53. 快动开关

## 快动开关

压电材料对纯直流没有响应，对低频事件如 0.0001Hz，通常是无法用压电膜来检测的。当应用要求直流响应时，可以将压电膜配合一个可触动的园顶罩，产生出一个高压脉冲。

当按钮器件触动时，压电膜快速地应变，一般在图 53 所示的 1MΩ 电路中产生一个 10V 的脉冲。这种概念特别适用于唤醒开关，电路





总是处在不工作状态，只有当触动开关时才工作，压电脉冲将电路接通。用电池的泊车表是应用压电式快动开关的一个例子，因为电池寿命是很重要的。

## 碰撞传感器

### 击打式打印机

高速击打式打印机要求非常精确的打印头定时，有字符的高速运转的钢带刚好位于打印锤前的瞬间就必须产生打击。打印锤的任何提前或滞后动作，都只能导致打印错位。

压电膜传感条装在打印机压板内，监测打击时间和打印头的打击力以及向控制器发出信号。执行器的定时是根据打印头定时的微小变化而自动调节的。钢带的高速运转（300 英寸/秒）要求有非常快速反应的开关。原有的打击开关，由于打印头打击力大，损坏得很快。压电薄膜开关在这一应用中已无故障地工作了五年多。

### 体育记分

压电膜传感器可用来测量打击时间、位置（精度）以及力，而这些参数在好几种体育运动记分方面都是需要的。90mph 的投掷有约 50,000 瓦的瞬时功率，这一应用的挑战是靶标的坚固性而同时在设计中又不引入强烈的颤动。

第二项记分应用就是电子箭靶盘，它是由压电膜监测许多打击区，实现电子记分。

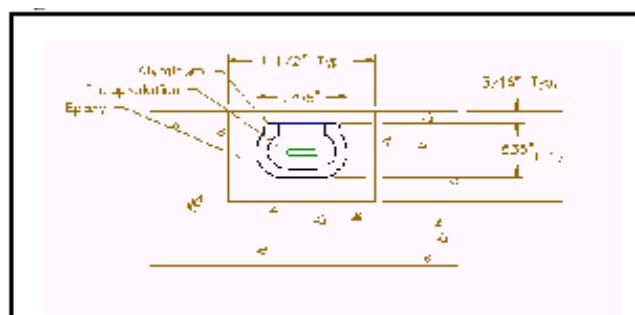
## 乐器

电子技术在乐器上的大量应用在鼓和钢琴上带来一个特殊问题，压电膜打击元件可满足鼓触发器和钢琴键盘很高的动态范围和频率响应要求。压电膜片再配合以脚踏板开关，来实现低音鼓声，触发器实现小鼓下弦音和印度土人鼓声。压电膜打击开关对力很灵敏，可以忠实地复制出鼓手和钢琴家的风格。在电子琴中，压电膜开关的动态响应范围和时间常数均与钢琴极近似。

## 交通传感器

美国政府当前正在积极地研究“智能高速公路”，以完善新的高速公路的建设。主导思想就是如果对现有高速公路实现电子化管理，可以满足更大的车流密度。

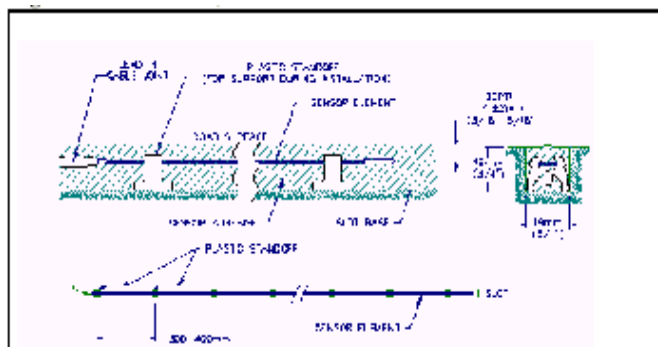
图 54. 路面下永久性交通传感器



除对高速公路的研究和执法的常规交通监测外，智能化车辆/高速公路系统（IVHS）计划对新等级“智能高速公路”高速探测器提出了要求，对车辆要计数、分类，提供车道控制，要监控车重和速度。IVHS 还需要“智能车”传感器，先进的车辆

监视，通讯以及软件系统等。类似 IVHS 这样的未来计划和更多的像“战略高速公路研究计划（SHRP）”这样的现代项目均需要采集交通数据并向美国联邦高速公路署提供所需要的高速公路建设所需资料。近年来信号处理方面的进步打开了改善实时车辆数据分析的大门，但前提是要开发出低成本可靠的传感器技术。

图 55. 路面下永久性交通传感器

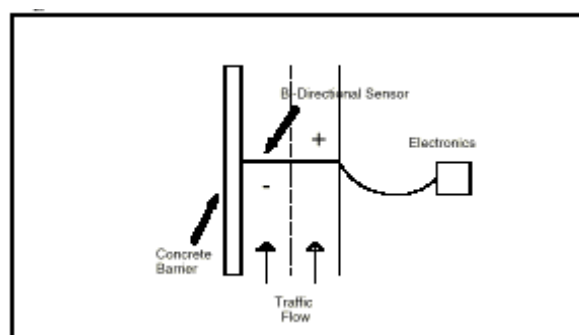


道路气动导管长期以来一直是交通数据采集的主力，它为压电薄膜提供气动脉冲，车轴经过时触发附近的电子设备。

对各种传感器技术的评估表明压电膜电缆可以为高速公路州际车辆分类和行驶中称重系统提供所需的灵敏度、线性、抗噪声性以及环境稳定性。压电膜电缆 BL 传感器被用于加拿大萨斯喀彻温省至美国佛罗里达州的交通数据采集系统。

压电电缆交通传感器的结构示于图 54 和 55。它主要分为二类~永久性的和临时性的。总之,永久性的是安装在道路中间,使传感器的顶部与路面平齐;而临时性的均粘在路面上,作短期监测用。永久性传感器均应用于收费站及州际数据采集,安装时与路面平齐,必须经得住年复一年的高密度车辆往来,扫雪车辆,盐、砂、水的覆盖和清扫。

图 56. 多方向传感器



“新泽西隔离墙”，这种现代化的水泥隔离墙将公路相反方向车道分隔开，这就产生了四车道高速公路的多车道传感问题。压电电缆利用一个传感器对每一相应车道有相反极性的办法解决这一问题。当车辆通过邻近车道时，就会产生出一个与远处车道上车辆相反符号的信号。这种在一个传感器上提供车道情况的能力，是一个重大的发展。

交通传感器可以监测车速，计轴数，车辆称量，方向判定以及车辆分类等。最近，已证明这种传感器在机场滑行跑道上是有用的。从输出信号机场管理人员可以观察到飞机的地速（两传感器间的时间延迟），方向，重量（含燃料），机轮轴数，及飞机翼展（根据速度和已知的两探测器间的固定距离求得）。这些信息可以用来对飞机分类，提供滑行跑道的交通管制及机场的安全情况。

## 振动传感器

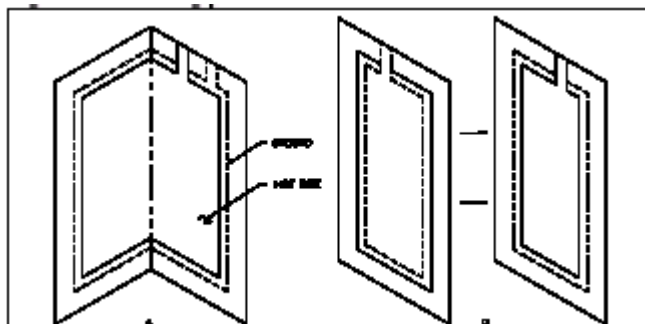


压电膜最早应用之一就是小提琴的拾音器。后来, 吉布森吉它公司用压电膜做成鞍形弦码拾音器装在弦码内推出了一系列的声学吉它。这种拾音器的非常高的保真度引出了一系列的振动传感和加速度计应用。

## 乐器拾音器

图 57. 屏蔽压电膜

目前, 压电膜在吉它拾音器的应用有四种设计方案: 第一种是厚膜的, 压迫式应力型(在弦码下)设计; 第二种是低成本的加速度计; 另外二种为接触式麦克风, 一种是包在插在弦码内的鞍形上, 另外一种是在乐器上的拾音器。由于材料的 Q 值低, 没有陶瓷拾音器的自谐振问题。



屏蔽请参看图 57 的折叠方案, 热的一面就是折起来后的内侧的稍窄的电极。由于屏蔽是用压电材料构成, 所以折叠技术可提供比其他屏蔽法较高的拾音灵敏度, 传统屏蔽层可以很容易地以多层压电膜, 粘胶及屏蔽箔制成。

## 机器监控

屏蔽压电膜传感器在乐器中表现出的高保真度导致了机器监测用的振动传感器的开发。在其最简单的模式中, 压电膜振动传感器基本上就像动态应变片一样。压电膜不需要外部电源, 但发出的信号比应变片放大后的信号还要大。一个典型的压电膜传感器产生的电压信号比箔片式应变片大四个数量级, 比半导体式的高二个数量级, 压电薄膜应变片的频率响应也十分优越。

高灵敏度是由于压电膜材料的形状所致, 小的材料厚度意味着非常小的横截面积, 因此, 非常小的纵向力就可以在材料内产生非常大的应力。

压电膜传感器可以贴装在振动表面上监测振动结构的频率和幅度。这种传感器比普通的应变片覆盖较大面积, 因此, 为得出有意义的结果, 应在均匀的应变场中做直接比较。很明显, 点式传感器总有需要它的地方, 尽管小传感器的电容较小, 还要在设计上考虑附加因素。采用传统的电荷放大器, 或因为信号电平相对高而采用高阻抗场效应管缓冲电路都可以达到几分之一赫兹的工作频率。

## 轴承磨损检测器

一种经过屏蔽的压电膜传感器已经被用来监测轴承的磨损和破碎现象。这种传感器是用环氧树脂永久性地粘在轴承套外表面上。由于质量小, 外形小, 可以作轴承的内置无损探伤传感器, 而不用浪费时间对加速度计做定期故障检修。

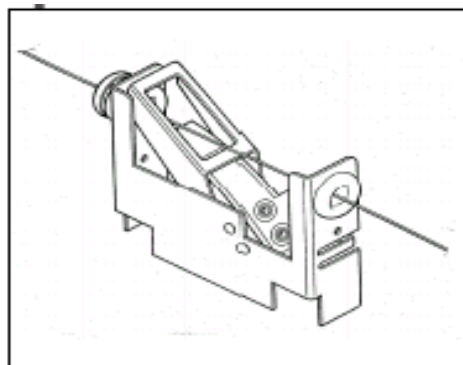
## 风机气流传感器

一种层压梁式传感器在管道气流中用作离心风机的故障传感器。由紊流效应造成的传感器内大约 100Hz 的振动测出气流的存在。没有气流时, 信号消失, 触发电路工作。传感器和开关点路是采用 TL084 四组套的双场效应管运算放大器构成, 标准输入信号为 80mV。传感器的可靠性是关键特性, 但由于它实际上并不受任何应力, 因此工作寿命是无限限制的。

图 58. 断纱传感器

## 断纱传感器

纺织厂需对成千上万条纱线进行断纱监测。一旦漏检就会导致大量的材料报废, 生产这些材料的劳动费用是要超出其制造费用的。跌落开关, 就是当断纱时, 开关的接点闭合, 十分不可靠。纤维屑会塞住开关的接点, 这样就产生不出输出信号来。而压电膜振动传感器是装在很薄的钢片上, 监测着纱线滑过钢片时磨擦所产生的声音信号, 类似小提琴的弦(图 58), 一旦停止振动, 就即刻触发机器停机。



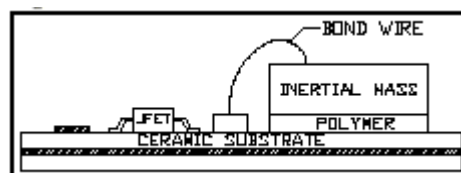
## 自动售货机传感器

将加屏蔽层的压电膜动态应变片贴装在出货槽下面检验产品的售出。非碰撞所产生的振动会发出一个“故障”告警信号。第二种应用就是投币机, 由压电膜器件对硬币计数。传感器确认所赢得的硬币, 使赌徒们不敢随意虚假投诉设备故障。在售票配票机中, 用梁式压电膜器件进行出票计数。

## 加速度计

MSI 公司压电技术的许多振动传感器应用的一个自然产物就是加速度计。这些加速计设计基于很传统的压电陶瓷和压电聚合物材料。基本材料的选择可使产品为特定用途而订制。表 6 列出了 MSI 加速度计产品系列的主要规格。

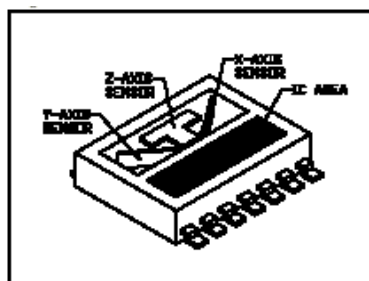
图 59. ACH-XX 加速度计内视图



与很传统的传感器一样, 这些加速度计可配置为压缩式设计或是梁式设计。压缩式设计的加速度计通常有较高的谐振频率, 提供较宽的有用频带。因此, 它们的灵敏度往往较低。MSI 的 ACH01~XX 压缩式设计加速度计的内视图如图 59 所示。

另一方面, 梁式设计的加速度计往往有较低的谐振频率和有用频带, 但有较高的灵敏度。梁式设计加速度计还有另一

图 60. ACH04-08-05 内视图



个很有趣的特性：只用一个采用 MSI 的“Origami”梁式专利技术（“Origami”是日语，意思是折纸工艺）的单片式感应单元通过取向来感应多轴加速度。带 Origami 感应单元的 ACH~04~08~05 梁式设计加速度计的内部视图如图 60 所示。

为了降低系统成本和简化使用，所有 MSI 加速度计包含了一些集成电子传感器接口。ACH~01 加速计产品系列和 ACH~04~08~05 多轴加速计都使用了简单的 JFET 阻抗缓冲器。对这些传感器，JFET 偏置和信号处理在设备的外部完成。其余的 ACH~04~08 多轴加速计产品系列使用专用 ASIC（特定用途集成电路）提供阻抗匹配、增益和信号处理。可对系统增益、输出类型（模拟或数字量）和输出轴进行编程（通过芯片上的 EEPROM）使传感器可简单地特定用途而配置。为使功耗最小，也包括一个 SLEEP 模式。

ACH~01 系列产品通常被用于要求有宽频带、高灵敏度、低噪声和低成本的应用中。这类应用包括：扬声器反馈和控制系统、汽车防盗系统、拾音器、机械状态和泵监测系统以及医疗人体运动监测。

ACH~04~08 产品系列，由于其性能性较宽，而被用于很多种用途，例如计算机硬盘震动感应、扬声器反馈和控制系统、家用电器故障监测、虚拟现实系统、汽车系统、医疗人体运动监测系统、运输损坏和材料搬运监测系统、GPS 系统、振动开关和地震断路器。对多轴测量加速度或振动的 OEM 应用，使用 ACH-04-08 是最理想的。

精量电子公司持续开发并改善其加速度计产品系列。有关这些产品或想订制我们的其它产品，细节请与精量电子公司联系。

表 6. 加速度计产品系列

生产合格的加速度计					
		ACH-01-XX	ACH-04-08-01	ACH-04-08-07/08	ACH-04-08-05
关键特性		-宽频带 -宽动态范围 -高灵敏度 -低噪声 -极高的谐振频率 -JFET 缓冲 IC	-集成 ASIC -可编程 -数字&模拟输出 -SLEEP 模式 -不是为新的设计	-集成 ASIC -可编程 -数字&模拟输出 -SLEEP 模式 -IR 回流焊	-低频工作 -3 轴同步模拟输出
感应轴	X 轴	---	---	---	X
	Y 轴	---	X	X	X
	Z 轴	X	X	---	X
	与 Z 轴夹角	---	X	X（仅对 08）	---
灵敏度		10mV/g	15 至 150mV/g 0.3mV/rad/s <sup>2</sup>	22 至 250mV/g 0.4mV/rad/s <sup>2</sup> （仅	1.8mV/g

			对 08)	
频率范围 ( $\pm 3\text{dB}$ )	1. 0Hz-20KHz	30Hz-3KHz	11Hz-3KHz	0. 5Hz-5KHz
动态范围	$\pm 250\text{g}$	$\pm 67\text{g}$ (Max)	$\pm 45\text{g}$ (Max)	$\pm 250\text{g}$
分辨率 (@100Hz)	$20 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	$1800 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	$390 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	$200 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
谐振频率	>35KHz	6. 5KHz	6. 5KHz	9. 2KHz
谐振 Q (Hz/Hz)	30	10	10	10
横向灵敏度	5%	25%	10%	15%
线性度	0. 1%	0. 1%	1%	0. 1%
工作温度	-40°C 至 +85°C	0°C 至 +70°C	0°C 至 +70°C	-40°C 至 +85°C
贮藏温度	-40°C 至 +85°C	-40°C 至 +85°C	-40°C 至 +105°C	-40°C 至 +85°C
最大冲击	1000g	1000g	1000g	1000g
电源电压	3V 至 40V	4. 5V 至 5. 5V	4. 5V 至 5. 5V	3V 至 40V
电源电流 (mA)	典型 $2 \mu\text{A}$	典型 2mA	典型 2mA	典型 $2 \mu\text{A}$
重量	3 克	0. 35 克	0. 35 克	0. 35 克
尺寸 (mm)	13x19x6	11x10x1. 8	11x10x1. 8	11x10x1. 8
安装方法	胶粘	手焊至 PCB	回流焊至 PCB	手焊至 PCB

表 7. 加速计应用

加速计产品					
工业	应用	ACH-01-XX	ACH-04-08-01	ACH-04-08-07/08	ACH-04-08-05
航天与国防电子	反干扰传感器	X	X	X	X
	监视	X			
	模型分析	X	X	X	X
汽车	前置气囊		请向厂家咨询多轴气囊加速度计信息		
	侧置气囊				
	防盗	X	X	X	X
	打滑/雨水传感器	X	X		
计算机与外围部件	磁盘驱动器震动传感器		X	X	
	计算机鼠标传感器				X
	虚拟现实传感器				X
	失衡传感器		X	X	X

家用电器	喷雾臂阻塞传感器		X	X	X
	微波声学传感器	X		X	
	振动开关		X	X	
消费电子	扬声器反馈	X		对其他选件 请咨询厂家	
	拾音器	X			
	保安		X	X	X
工业	机械状态监测	X		X	X
	轴承监测仪	X		X	X
仪器与 测量设备	有源振动阻尼	X			X
	振动开关		X	X	
	预防性维护	X		X	X
医疗	运动传感器		X	X	X
	起搏器	请向厂家咨询进一步信息			
电站	地震断路				X
	机器监测	X		X	X
电信	GPS 系统		X	X	
	振动开关		X	X	
运输与材料 搬运	运输监测	X			X
	铁路系统	X			X

## 超声波应用

压电薄膜聚合结构的宽频响应和物理属性使它可以成为一些医疗探测仪和无损探伤应用的选择。此外，也正在寻求将薄膜传感器应用于基于超声波的感应设备，如用于测量距离的空气测距超声波、流体液位传感器以及使用与流体流动成比例的声速扰动多普勒频移的流量测量仪器。

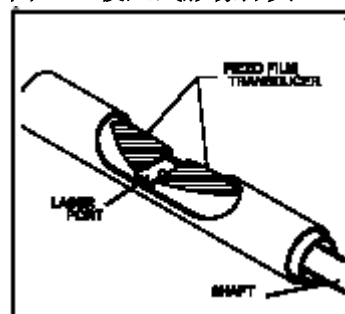
## 医疗影像超声

压电陶瓷材料因其高灵敏度和宽频带而被用于医疗影像传感器。 $d_{33}$  常数，对所加

电压产生的应变,是压电陶瓷比压电聚合物高一个数量级。压电陶瓷的一个缺点是声音阻抗较高,约为  $30\text{Mrayls}$  ( $1\text{Mrayl}=10^6\text{kg/m}^2\text{s}$ ),而人体组织约为  $1.5\text{Mrayls}$ 。此阻抗不匹配可由  $1/4$  波长匹配层来补偿,但这会因粘接层和连接方法而造成超声波脉冲衰减。压电薄膜的声阻抗约  $4\text{Mrayls}$ ,这样匹配好的多,此外,高频应用要求很小的压电单元,陶瓷太脆,而且不能加工成想要的几何形状。

侵入式影像要求有比外部探头功率更低的设备。侵入式导管的更高频率使影像的分辨率大大提高。一家医疗影像公司已开发出了一种使用压电薄膜的侵入式影像探头用于治疗前列腺激光导管(图 61)。压电薄膜传感器约 30 微米厚,位于导管末端附近。探头的工作频率在 7MHz 以上,此新型导管可令前列腺手术成功率大大提高,且比现用的方法更少痛苦和失血。

图 61: 侵入式影像探头



使用压电聚合物薄膜的体内导向相控阵影像器件现已首次被杜克大学的研究人员制造出来了。由 32 个  $1\text{mm}\times 0.56\text{mm}$  单元组成的单元阵列同一个匹配良好优化传感器的电路连接起来并已通过测试。结果,工作频率为 2.5MHz 时,其灵敏度比 PZT 传感器低 28dB,然而,压电薄膜阵列改进了轴向分辨率,有更佳的角度响应(30 度时有 6dB 脉冲回响),以及低的  $\sim 35\text{dB}$  单元间交叉耦合。尤其困难的是用钻石将 PZT 陶瓷切割成这些小单元,而对压电薄膜,可在金电极表面上蚀刻成复杂的电路。由于严重的单元间交叉耦合问题,PZT 必须被切成小块。杜克大学的研究人员计划通过将单元阵列数目增加到 128 个来改进聚合物探头。

可通过在压电薄膜表面蚀刻电极电路来做成有极高分辨率的阵列。一项正在开发的技术是直接将其沉积在硅片上。硅片被蚀刻为最小的单元间耦合,然后喷涂共聚物,极化,再制作上电极和内部连接。此先进产品可产生高分辨率影像,而用目前的方法是不可能达到的。

## 无损探伤 (NDT)

人们希望将先进的复合材料用于制作结构件。重量轻、强度高、耐腐蚀和无磁性是这些材料的优点。为防止脱层造成的灾难性事故而对这些结构件进行例行的无损探伤需求,是最受关注的技术之一。柔性压电薄膜传感器阵列层,能在声学上与复合材料极好地匹配,人们寄希望于将其用于无损探伤。一个例子是火箭发射前对其发动机外壳的 NDT 探伤阵列。这些阵列可被用于复合燃料箱的表面,每一单元被顺序激活以提供脉冲反射响应。阵列单元尺寸约 0.5 到 1 平方英寸就足以用于这种场合和许多大面积无损探伤。这种传感器阵列的典型中心频率是  $3\sim 10\text{MHz}$ ,以及超过 100%的 -6dB 分量带宽。

系统和仪器有限公司的人员将压电薄膜用于航天引擎部件的无损探伤。现在需要无损探伤传感器有  $1/64$  英寸的裂纹探测能力。此外,这些新材料的频率响应范围也要比常规传感器的带宽要宽。系统和仪器公司发现这是能覆盖所需带宽的单个宽带传感

器。他们的传感器也用于需要高分辨率和短脉冲持续时间的表层无损探伤。系统和仪器公司的探头探测到表面 1mm 以内，大小为 0.8mm 的缺陷。

复合结构中的关键节点或无法接近的探测区域，如海洋石油平台支架是脱层或其他损坏尤其容易出现的地方，可通过永久性地将特制无损探伤阵列固定在上面来进行使用中的探测和监视。在多单元传感器阵列的单元间达到 $\pm 1\text{dB}$ 的一致性。为获得特别的焦点特性，可将这些聚合物传感器做成特殊形状。

## 声传播

包括强化玻璃纤维复合物、铝、钢和玻璃这样一些材料的声传播可使用压电薄膜接触式麦克风完成或象无损探伤那样使用大面积阵列。这些阵列可持续监测结构的 0.1~1.0MHz 声传播，作为结构性故障的预报器。宽带的压电薄膜在此频率范围内有良好的响应，这一性能对关键性应用如运输有毒物的油罐车、地下油库和核设施等尤其需要。

## 流体液位传感器

对设计者而言已有许多流体液位传感器技术存在。滑动电位器上的移臂仍广泛用于汽车中。测量从一固定传感器到流体表面的距离（从上通过空气或从下通过流体）的超声波脉冲反射设备仍很普遍。也用一些流体变成电介质的新型电容型产品。每一项技术都是在系统成本、性能和可靠性间的权衡。由 MSI 公司正在开发的一种新型超声波液位传感器有希望成为一种数字化，固态超声波液位传感器。

新颖结构是有多个发送器和一个公共接收器的超声波发射液位传感器。传感器是将一未金属化的压电薄膜片附在印刷电路板上，该电路板有电极图形、导体和连接电路板另一面电路的内部连接部分。电极图形与压电薄膜层电容耦合，生成多个发送单元。与图形单元平行的第二根导电条作为公共接收器。

由于流体的存在，它会把发射信号耦合给接收器，这比通过流体上方空气耦合的超声波能大得多（60dB）。发射器的激励信号是 1.1MHz 峰峰值为 20 伏的正弦波。所需电路组成包括高频振荡器、时钟、一个模拟开关阵列、一个带输入门的单接收器放大器和一个阈值检测电路。这些电子元件可压缩到芯片级并集成在电路板的背面。

液位感应器的分辨率由电路板上发射图形电极的分辨率确定。2mm 宽平行单元，间距为 0.5mm 最具代表性。压电薄膜发射阵列在液体一侧的发射器接地电极表面完全镀金。接收器由同一压电薄膜构成，与印刷板（PCB）上的导线图形的信号电极电容式耦合。接地在薄膜背面电极上。

新的液位传感器有些独特的优点。发送单元的间距不需一致。对于在其高度方向上体积不均匀的储液罐来说，简单的 PCB 布局可通过相应地设定发射器单元的间距来线性化非线性的罐体积。器件的输出是数字化的，无需昂贵的模/数转换。液位传感器宽度很小，小于 1 英寸，所以它可塞入小管径的管子中。管子阻挡液体的运动，排除由运动引起的液面高度读数的大波动，例如转弯时汽车的油箱。极大地提高了可靠性。



液位传感器可自诊断，以确保发射器/接收器对传输的信号是有意义的。无信号表明有故障。有关超声波油墨位感应的详细讨论，请见附录 C。

## 空气测距超声波

脉冲反射模式超声波设备用于机器人技术、运输工具安全及控制系统、物体识别系统以及其它远距离测距设备。传感器在目标方向上提供高分辨率，并通过测量从发射到接收所经时间来确定到物体的距离。不象压电陶瓷和静电感应器件那样，压电薄膜能够发出极短的脉冲（因它有较低的品质因数），使得同一器件既可用作发射器也可用作接收器，甚至在传感器近场。

很容易制做多个压电薄膜单元，如图 62。为，可以通过设计这些圆柱形单元（长度、弯曲半径、单元数目）的几何形状控制方向性模式和声音特性。已制出了工作频率为 40~200KHz 的传感器。ElotechGmbH 报告指出在 1 米处，传感器灵敏度的平均值在接收模式时（噪声小于 1uV）为 0.2~1mV/Pa，发射模式时为 20~50mPa/V。脉冲反射模式下的最小测量距离是 30 毫米。主波束的宽度小于 10 度且最大单边波瓣振幅在 60KHz 处下降 12Db 时可测量到 15 米的距离。单个和多个单元传感器方向性模式的例子示于图 63。

多个单元也可用于扫描物体而无须移动传感器。传感器内的每个单元可被顺序激活，就象超声波阵列那样。

这些超声波空气测距单元的应用包括卡车和农机具运输安全系统的警报设备，和高速公路交通密度的监视系统。压电薄膜传感器阵列的另一极端应用是测量现代飞机机架结构的间隙尺寸以改进叠层间的配合。压电薄膜阵列已制成并通过测试可测出空气间隙，在厚达 5cm 的厚度上分辨率可达 25um。这些有发射器和接收单元在 2.5cm 中心上 30X30cm 阵列的工作频率为 3.5MHz。

## 音响 扬声器

压电薄膜最早的应用之一是先锋电子公司开发的立体声高频扬声器（图 64）和头戴式耳机。由于在电极可靠性和引线连接及封装技术方面进行了改进，在这些应用方面又有了更强烈的兴趣。GalloAcoustics 开发了一种 52um 厚的压电薄膜圆柱体的高保真全向高频扬声器，该高频扬声器在 2kHz 以下衰减，特性如下：

图 62 空气测距超声波

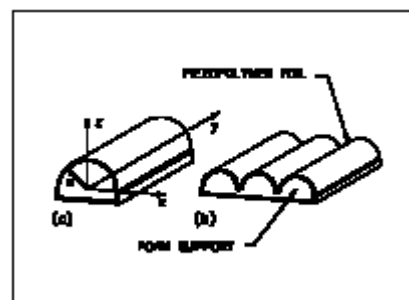


图 63. 空气测距方向性模式

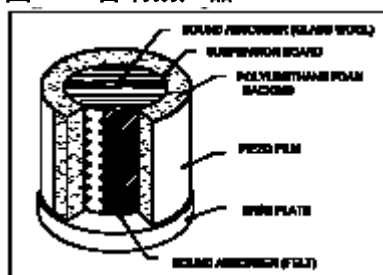


- 高频时水平方向发散角为 330 度，是常规高频扬声器的 10 倍。
- 极宽的动态范围。
- 线性频率响应
- 极快的输入脉冲响应，真实再现高频部分。

已开发出新型的高频扬声器。这些设备利用了压电薄膜的薄、轻、一致的自然

特性。实例包括用于吹制件（如气球和吹气玩具）的扬声器，服饰扬声器（包括头戴听筒）以及用于杂志广告、贺卡和邮寄品的薄膜扬声器。

图 64：音响扬声器



## 麦克风

将压电薄膜固定在保持环上或装在一底盘孔上可制成优质的麦克风。在设计中采用支撑使压电薄膜稍微偏离中轴线，用泡沫衬垫、小支柱、撑条或类似结构使压电薄膜有轻微的曲率半径。薄膜的自支撑圆柱曲面也可产生偏置，但通常不这样用。使麦克风灵敏度和电声效果最佳的典型压电薄膜曲率半径为  $R_o=25\text{mm}$ ，与静电麦克风结构类似。

Sennheiser 报告了  $R_o=25\text{mm}$  时，典型的 25mm 直径泡沫衬垫压电薄膜麦克风的频率响应。对垂直于薄膜方向的声压入射，在 1KHz 时测得的器件自由场灵敏度在 1V/Pa 时为  $\sim 58\text{dB}$ 。声压级超过 122dB 时谐波失真仅不到 1%，且在更高频率范围时没有显著升高。

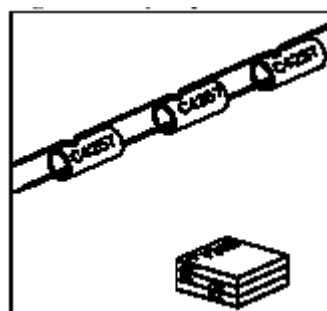
压电薄膜制作的麦克风成本低，但更重要的是固有的防潮性，这是与静电型麦克风不同的。

静电麦克风占有市场是因为通过极大批量的生产而获得低成本。尽管如此，压电薄膜麦克风正在寻找那些在设计中环境稳定性是关键点的应用。防水麦克风已开始供应潜水员，经得住完全浸泡在盐水中而不损坏。

## 声纳

从四十年代开始，压电陶瓷材料就已用在声纳的水下测听器上。压电陶瓷有许多水下测听器所需要的特性，包括较高的流体静力灵敏度、高容量、可制成一定形状和厚截面（灵敏度与压电单元的厚度成正比）。然而，压电陶瓷的重量比水大的多，所以必须总是在结构上加浮子作为补偿。

图 65. 水下测听器



当前，声纳发展的趋势是在船体上装多个水下听音器。目前正在考虑为船队配备长串拖曳阵列和更大且更多安装在船壳上的水下测听器。这种趋势需要重量更轻的先进的水下测听器，使得压电薄膜成为此应用的最佳选择。

已造出了片状和圆柱状的厚膜（1200um）压电聚合物水下测听器（图 65）。约 2~3cm 长、直径小于 1cm 的圆柱体被串起来成为连续的水下测听器线阵列。水下测听器的重量极轻（0.60g/cm<sup>3</sup>），却有很高的流体静力灵敏度。

封装在船壳上的压电聚合物水下测听器，面积约一平方米，压电聚合物厚度超过 1000um，已用于英国和法国海军的潜水艇中。被称为“侧翼阵列”，这些装置与先进声纳系统中的长串托曳阵列相结合工作。压电薄膜不脆，与船壳的曲率半径一致，成本低。压电厚膜水下测听器的典型灵敏度与压电陶瓷型产品类似（在 1V/uPa 时为-192 至 -195dB）压电膜水下测听器的低电容由并联的水下测听器的大面积和数量来补偿。

新的水下听音技术，包括为潜水员用的水下超声波影像及相关应用也在开发中。

压电薄膜的应用	
<b>计算机输入/输出</b> 键盘阵列 X-Y 坐标 数字化仪 鼠标 游戏杆 数字化笔 打印机 针打运动时间 喷墨生成与检测 调色与喷墨等级 调色动作 商用设备 自动柜员机 自动柜员机的防入侵设备 数硬币机 复印机 开关 走纸开关 调色等级及动作 磁盘驱动器 振动感应加速计  <b>工业</b> 开关 固态 快动	人身安全及能源管理 VIDICON 视像管 玻璃受损探头 地板/垫感应器 侵入检测 接触式麦克风 压电电缆周界安全 高温计/火焰感应器 气流/液位 涡流 流体振荡器 暖通空调气流 多普勒超声波 固态液位 层流/扰流边界层  <b>仪器仪表</b> 机器状态监视 加速度计 接触式麦克风 高应力动态应变片 气象传感器 降雨强度 冰雹探测 风速 有源振动抑制 应变片传感器阵列

悬臂梁 键盘 防破坏 本质安全 CMOS 唤醒 微变形 蜂鸣开关 数硬币机 声音开关 轴转动 机器人技术 触觉感应器 微定位器 安全垫与开关 缓冲器冲击	执行机构阵列 无损探伤 软接触无损探伤探头 无损探伤阵列 声音传播感应器 空气侧距超声波 安全性 距离  自适应光学 光纤开关/调制器 可变形镜 激光扫描仪 石油勘探 水下测听器 地震地音传感器
--	--

## **医疗**

### **诊断**

窒息监视  
流动/走动监视器  
血压臂套  
脉搏计数器  
听诊器  
睡眠紊乱监视器  
呼吸器气流  
均匀动力学  
病床监视器

### **超声波**

近距离影像  
前列腺疾病  
皮肤转换  
灯光转换  
冠状动脉疾病  
胸病  
碎石术  
水下测听器校准探头

### **残疾人帮助**

开关  
布莱叶盲文读出器  
助听  
语言强化训练

### **植入物**

起搏器状态监视器  
植入开关  
动脉搭桥术监视器  
微功率电源

### **仪器仪表**

静脉注射计数器  
静脉注射气泡探测  
激光开关/调节器

## **汽车**

加速计  
座位占据感应器

### **开关**

乘客位置开关  
喇叭开关  
控制面板

汽油液位，轮胎转速，保安

无钥匙启动  
动作（防盗）感应器

## **消费类**

### **乐器**

拾音器  
鼓击  
体育运动设备  
目标定位  
反应时间  
犯规界限  
力量（空手道，撞击）  
最有效击球点

### **玩具/游戏**

开关  
接近性（空气测距超声波，热能）  
新型扬声器  
目标记分

### **音响**

高频扬声器  
吹气扬声器  
新型扬声器（头盔式，邮寄品式）  
麦克风  
扬声器失真反馈  
电子钢琴键盘

### **电器**

洗衣机失衡  
真空污染感应  
洗碗机喷水臂  
液位感应开关

## **军事/政府**

### **水下测听器**

串缆阵列  
外壳封装阵列  
声纳浮标  
有效噪声抑制

### **弹道学**

安全与战备状态引信  
冲击波计  
地震加速计

### **实际安全**

视野计  
地震/震波听音器  
转换麦克风

### **交通感应器**

交通工具分类  
动态衡重

	速度，红灯限制 车道指示 收费亭	
--	------------------------	--

## Asia

### 联系方式

智美康科技（深圳）有限公司

**ZHIMK TECHNOLOGY (SHEN ZHEN) CO.,LTD.**  
Shenzhen , China 518033

Tel: +86 755 8303 5030 / 8989 4565 , 13048972929

Email: liulijun18 @126.com

[www.zhimk.com.cn](http://www.zhimk.com.cn)