第 2 章　微系统的工作原理

2.1　引言

正如我们在第 1 章中所看到的，微制造技术的快速发展已经使得许多新型的 MEMS 产品出现在市场上。在本章中，我们将给出一些典型的 MEMS 器件及微系统的工作原理。读者很快就会了解，正如 1.5 节中描述的那样，各类 MEMS 和微系统产品的设计和制造涉及了科学与工程领域多学科理论的应用。学习掌握了大量这类器件的工作原理之后可以使得工程师们在设计和制造各种新型 MEMS 产品的时候能够更具有悟性。不过，我们也只能给出描述这些工作原理所必需的基本信息。对这类器件的制造工艺和加工过程的详细描述可以参阅两本主要文献——[Madou，1997]和[Kovacs，1998]。对于相关产品的几何结构以及一些早期产品中各类微器件的制造技术的描述，读者可以在一篇很好的综述性文献[Trimmer，1997]中查阅到。但是读者也应该认识到，本章中所选取介绍的一些微器件主要是基于它们充满新意的想法，事实上可能其中许多器件在市场上并没有获得成功。

2.2　微传感器

微传感器是目前获得最广泛应用的一类 MEMS 器件。按照文献[Madou，1997]中给出的定义，传感器就是这样一种器件，它能够将能量由一种形式转变为另一种形式，同时依据特定的可测量的输入信号给用户提供一种可用的能量输出。例如，在压力传感器中就是将引起薄膜变形所需的能量转变为电能(信号)输出。图 1.1 所示是一个由传感元件及相关的信号处理硬件组成的传感器系统。一个智能传感器单元应该具有自动校准、干扰信号消减、寄生效应补偿、失调偏移修正和自检测功能。所有这些附加的功能使得该传感器单元最终成为一个智能化的微系统，如图 1.7 所示。

我们在第 1 章中已经介绍过，微传感器可以用来测量很多物理量。一般说来，它们覆盖了 10 个不同的测量领域[White，1987]，后面我们将会介绍它们的主要应用领域。在各个不同的产业中，都有大量微传感器可以用来实现各种不同的功能。对于这些传感器的诸多详细描述可以在文献[Madou，1997]和[Kovacs，1998]中找到。下面将重点介绍其中几种传感器的工作原理。

2.2.1　声学波传感器

对于许多新兴的工业产品来说，声学波传感器既具有极高的灵敏度，又具有很好的可靠性。从每年 30 亿只的需求量来看，通信产业是这类传感器的主要用户。这类传感器的主要用途是用作移动电话与基站中的带通滤波器[Drafts，2000]。声学波传感器快速的市场增长还包括汽车中应用的扭矩传感器和轮胎压力传感器，医学上应用的化学传感器和生物传感器，以及工业和商业上大量应用的各种气体传感器、湿度传感器、温度传感器和质量传感器。声学波器件还可以在微流控系统中用来驱动流体的流动。

严格来说,“声学波”这个术语用在这里是有可能产生歧义的,因为在相关的传感器中产生的波,并不是像字面上所指出的那样,与声音有多少直接的关系。更确切地说,在这些传感器中所产生的波更多的是与传播这些波的介质中的应力或形变密切相关的。在后面的介绍中,无论传感器中所涉及到的波的形态是什么样的,我们都将继续沿用“声学波”这个术语。

声学波传感器的工作原理涉及探测声学波在通过某种媒介传播的过程中,由于其他异质材料的存在,所引起的媒介传播特性的改变,这些特性包括质量和粘弹性(所谓粘弹性,简言之,就是材料的弹性特性随着时间的变化情况),或者是一些其他可测量的特性参量,例如湿度或化学成分,也可能是传播媒介几何结构和尺寸的改变。

在传感器中产生声学波是需要驱动能量的,这个驱动能量通常由两种主要机理来获得:压电效应和磁致伸缩效应。特别是压电效应可以说是产生声学波的一种更为普遍的方法。采用压电晶体材料,例如石英,就是一种将机械能转变为电能的常用手段,反过来,也可以将电能转变为机械能。我们将在2.3.3节和第7章中了解到更多有关压电晶体方面的知识。

图2.1显示了一个常见的利用压电晶体材料作为传输介质的声表面波(SAW)传感器的工作原理。在一块由氧化铝构成的衬底上淀积一层较厚的压电薄膜材料,然后再在这层压电薄膜表面淀积一层较薄的导电薄膜,例如金属铝薄膜,最终由这层金属铝薄膜形成两组电极。其中一组电极用来产生激励的声波,另一组电极则用来探测波的频率和振幅等特性。这两组电极各有两个导电臂,每个导电臂分别连接了数个紧密排列的指状电极。对于用来产生声波的那一组电极来说,随着外加交流(AC)电源所施加电场的变化,静电力将会导致指状电极之间的间隙变得更为紧密或疏松。由于指状电极是附着在压电薄膜的表面上,因此上述指状电极之间间隙的变化就会进一步导致其下方较厚的压电薄膜表面发生拉伸和压缩。这样就会产生一个随空间变化的波,并且它会沿着压电薄膜的表面传播。与这个空间变化的波相关的机械能最终将通过较厚的压电薄膜传播到另一组电极的位置,如图所示。这一组电极将起到输出端叉指换能器的作用(IDT),它可以探测并记录通过压电薄膜传播过来的波的频率和振幅。当有其他任何异质材料存在时,就会引起波的传播特性发生改变,因此通过测量这种这种变化就可以获得有关待检测物质的特征和数量等信息。

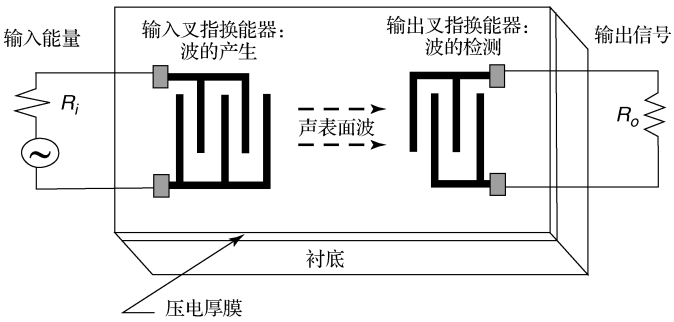

图2.1 典型的声表面波传感器

2.2.2 生物医学传感器和生物传感器

近年来生物医学产业已经变成了继汽车产业之后微系统产品的另一个主要用户。BioMEMS这个术语也已经被MEMS产业和学术界广泛地使用,它包含:(1)生物传感器;(2)生物仪器和外科手术工具;(3)用于对生物物质进行快速、精确、低成本检测的生物测试和分析系统。

BioMEMS 给工程师们提出了一个巨大的挑战，因为设计和制造这种类型的传感器既要求设计者具有工程技术领域的知识和经验，还要求设计者具有分子生物学和物理化学方面的知识和经验。

将 MEMS 技术应用于生物医学领域所涉及的技术问题主要包括以下几个方面：

1. 生物医学操作的功能性；
2. 对现有仪器和设备的适应性；
3. 与患者生物系统的兼容性；
4. 类似腹腔镜检查术所要求的可控性、机动性、易导向性；
5. 具有高深宽比 MEMS 结构的加工技术，其中深宽比定义为结构的深度与表面尺寸的比值。

微传感器是构成任何一种生物 MEMS 产品的最基本单元。在生物医学领域，通常应用两种类型的传感器：(a)生物医学传感器；(b)生物传感器。生物医学传感器是用来检测生物物质的，而生物传感器则可以被更广泛地定义为任何含有生物成分的测量设备[Buerk 1993]。这些传感器通常会涉及生物分子，例如生物抗体和生物酶，它们会与被检测的分析物发生互相作用。

生物医学传感器　生物医学传感器可以划分为用来测量生物物质的生物医学仪器以及用于医学诊断目的仪器这两大类。这些传感器可以快速而准确地分析生物样本。这些小型化的生物医学传感器比起传统的分析仪器具有很多的优点。它们通常只需要很小量的样本，并且能够以更快的速度进行分析，甚至几乎没有死区。目前市场上已经有很多不同类型的生物医学传感器。

电化学传感器的工作原理是这样的，某些生物物质，例如人体血液中的葡萄糖，能够通过化学反应释放出某些元素，而这些元素则能够改变传感器中的电流模式，这样一来就很容易被检测出来。下面给出的就是这类传感器的一个实例[Kovacs，1998]。

在图 2.2 中，把少量的血液样本通过聚乙烯醇溶液溶解后放入一个传感器中，该传感器上置有两个电极，一个是金属铂的薄膜电极，另一个是银/氯化银薄膜构成的参考电极。血液样本中的葡萄糖和聚乙烯醇溶液中的氧之间就会发生如下的化学反应：

$$\text{葡萄糖} + O_2 \rightarrow \text{葡萄糖酸内酯} + H_2O_2$$

通过在铂电极上外加电压可以使得上述化学反应中产生的 H_2O_2 发生电解，从而产生带正电的氢离子，并且这些氢离子还会流向铂电极。因此，血液样本中葡萄糖的浓度就可以通过测量两个电极间电流的方法得到。

生物传感器　生物传感器的工作原理取决于待检测的分析物与利用生物学方法衍生出来的生物分子之间的相互作用，这些生物分子包括某些特定形式的酶、抗体以及其他不同类型的蛋白质。这些生物分子可以附着在传感单元上，当它们和待检测的分析物相互作用时能够改变传感器的输出信号。图 2.3 显示了这类传感器的工作原理。给不同的传感单元(例如化学的和光学的传感单元，如图中右侧方框中所示)上选取合适的生物分子，就可以用来检测特定的分析物。对生物传感器更深入的描述还可以在专著[Buerk，1993]中找到。

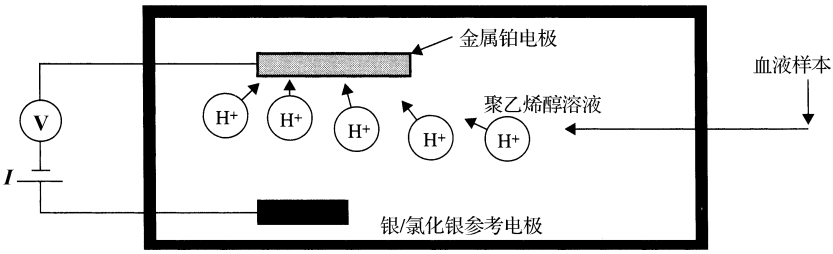

图2.2 测量葡萄糖浓度的生物医学传感器

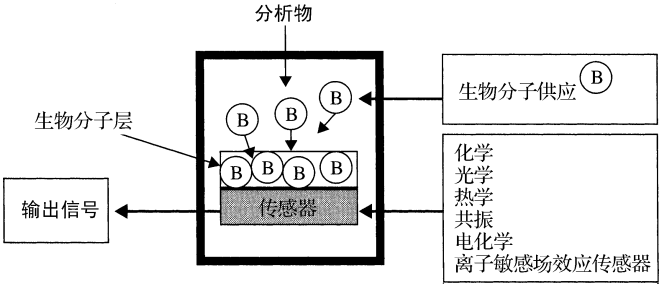

图2.3 生物传感器示意图

生物检测与分析系统 这些分析系统能够将生物样本中的不同成分进行分离，并且已经普遍应用于DNA序列测定工作。这些待检测的分析物包括各种不同的生物物质和人类基因组。对这些分析系统的操作涉及利用电液动力学的方法，例如电渗透原理和电泳法，来驱动毛细管或微管道中仅有纳升数量级的微量样品。电液动力学牵涉到利用外加的电场来驱动离子化的流体。对于这种形式的流体我们将在第3章中进一步介绍。之所以在毛细管或微管道中能够隔离并分离出各种不同的成分，是因为这些不同的成分各自具有其内在不同的电渗透流动性。一旦完成成分分离之后，就可以使用诸如荧光检测等光学方法来甄别这些不同的成分。通常，这些微型化的电液动力学系统还必须与实现信号转换、整形和处理的微电子电路制作在一起。我们可以把成百上千个这样的毛细管集成在一块芯片上来进行并行的检测分析。这种微型化的生物分析系统通常只需要非常微量的待检测样品，但是却仍然能够给出精确和几乎立等可取的结果。

图2.4所示为一个在生物检测与分析中使用的简单分析系统，它采用了一个毛细管电泳(CE)网络。该系统由两个直径在30微米左右的毛细管构成，也可以由两个类似尺寸的微管道组成。其中稍短的一个管道连接着注入样本储液器A和废弃待检物储液器A′，而另一个稍长的管道则连接着缓冲溶剂的储液器B和B′。某个生物样本中包含了S_1，S_2，S_3…等多种不同成分，它们各自具有不同的电渗透流动性。把该样本注入到储液器A中之后，在储液器A和A′之间施加一个电场就可以促使注入的样本由A流向A′。由于在两个管道的交叉位置处液体的流动会遇到更大的阻力，因此在此交叉位置处就会出现注入样本的聚集。此时再通过电路切换给储液器B和B′的两端施加一个高压电场，这样就可以驱使缓冲溶剂中聚集的样本从储液器B流向B′。由于样本中的各个不同成分具有各自不同的电渗透流动性，因此它们在这个电渗透流动的过程中就能够被分离开来。

上面的描述介绍了毛细管电泳分析系统的工作原理。正如还有很多其他类型的生物检测

与分析仪器及方法一样，显而易见，也还有很多其他类型的毛细管电泳(CE)分析系统，详细情况可以参考[Kovacs，1998]。

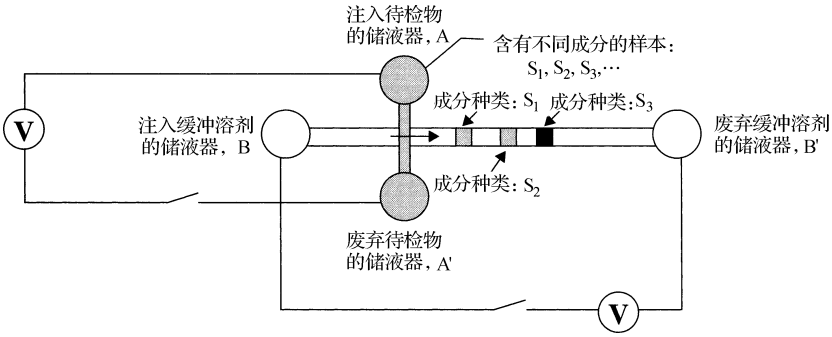

图 2.4　毛细管电泳系统示意图

2.2.3　化学传感器

化学传感器通常用来探测特定的化合物，例如各种不同的气体成分。事实上这类传感器的工作原理非常简单，正如我们在日常生活中经常看到的那样，很多物质都是对化学腐蚀作用十分敏感的。举例来说，大多数金属材料如果长时间暴露在空气中都有被氧化腐蚀的危险。在金属表面形成的一层氧化层能够改变金属材料的各种性能，例如金属的电阻。这种自然现象显示了设计和开发各类微化学传感器所依据的原理。可以肯定的是，从原理上说我们完全可以通过测量金属材料发生氧化反应后电阻值的改变来感知氧气的存在。当然这种通过化学传感器来探测氧气存在的方法，必须要比金属发生自然氧化的过程快得多，而且所需检测样品的实际大小也是在微尺度的范围。

材料对某些特定化学物质的敏感性已经被用作很多化学传感器的基本原理。下面给出的是 4 种值得一提的典型情况[Kovacs，1998]：

1. **如图 2.5 所示的化学电阻传感器：**把某些有机聚合物和嵌入的金属插入电极组合在一起，当这些有机聚合物暴露在某些特定的气体中时，就能够引起金属的电导率发生变化。例如，一种称作酞菁染料的特殊聚合物和铜电极组合在一起就可以用来检测氨(NH_3)和二氧化氮(NO_2)气体。

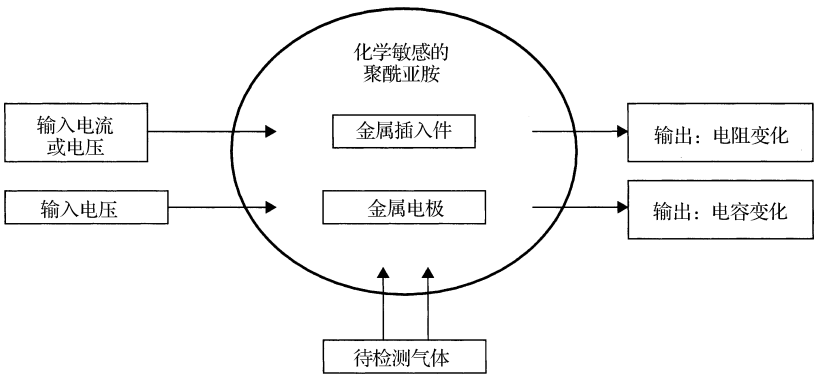

图 2.5　化学电阻传感器的工作原理

2. **同样如图2.5所示的化学电容传感器：**某些聚合物可以用作电容器中的电介质材料，当这些电介质材料暴露在某些特定的气体中时，它们的介电常数就会发生变化，这样就改变了两个金属电极间的电容。例如，可以采用聚苯乙炔(PPA)来检测如CO、CO_2、N_2和CH_4等气体。
3. **化学机械传感器：**某些特定的材料(例如某些聚合物)，当它们暴露在某些化学气氛(包括水汽)中的时候，其形状就会发生改变。我们可以通过测量这种材料的尺寸变化来探测这样的化学物质。这类传感器的一个实例就是采用玻璃增强聚酰亚胺(PI-2722)的湿度传感器。
4. **金属氧化物气体传感器：**这类传感器的工作原理类似于前面介绍的化学电阻传感器。有几种半导体金属(例如SnO_2)在吸收了某些气体之后会改变其自身的电阻，如果采用加热的方法来增强待检测的气体与半导体金属之间的反应性，则上述过程会变得更快。图2.6给出了一种基于半导体材料SnO_2的微传感器示意图[Kovacs，1998]。

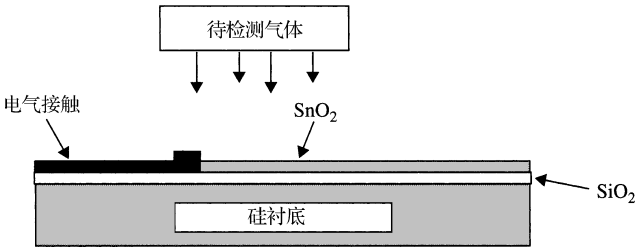

图2.6 典型的金属氧化物气体传感器(引自[Kovacs，1998])

如果将一些金属催化剂沉积在传感器的表面还可以获得更好的结果。这样的沉积物能够加快反应速度，从而提高传感器的灵敏度。表2.1给出了一系列目前可获得的用于探测不同气体的金属氧化物传感器。

表2.1 有效的金属氧化物气体传感器

半导体金属	添加的催化剂	可探测的气体
$BaTiO_3/CuO$	La_2O_3，$CaCO_3$	CO_2
SnO_2	Pt + Sb	CO
SnO_2	Pt	乙醇
SnO_2	Sb_2O_3	H_2，O_2，H_2S
SnO_2	CuO	H_2S
ZnO	V，Mo	卤代烃
WO_3	Pt	NH_3
Fe_2O_3	Ti掺杂 + Au	CO
Ga_2O_3	Au	CO
MoO_3	无	NO_2，CO
In_2O_3	无	O_3

资料来源：[Kovacs，1998]。

2.2.4 光学传感器

在量子物理学中，人们已经建立了非常完善的有关光线中的光子与受到光照射的固体中电子之间的相互作用原理。人们也已经开发了多种能够把光信号转变成电信号输出的器件，

并已经在大量消费产品(例如电视机)中获得应用。已经开发出了微光学传感器，可以用来测量光的强度。通常采用诸如 P 型或 N 型晶体硅这样的半导体材料来作为传感材料，因为它们能够提供很强的光子-电子相互作用。P 型晶体硅的原子中比其自然状态要缺少一个电子，而 N 型晶体硅的原子中则比其自然状态要多出一个电子。我们在第 3 章的 3.5 节中将会介绍，可以采用掺杂工艺来形成 P 型或 N 型晶体硅。图 2.7 展示了 4 种基本的光学传感器件[Kovacs，1998]。

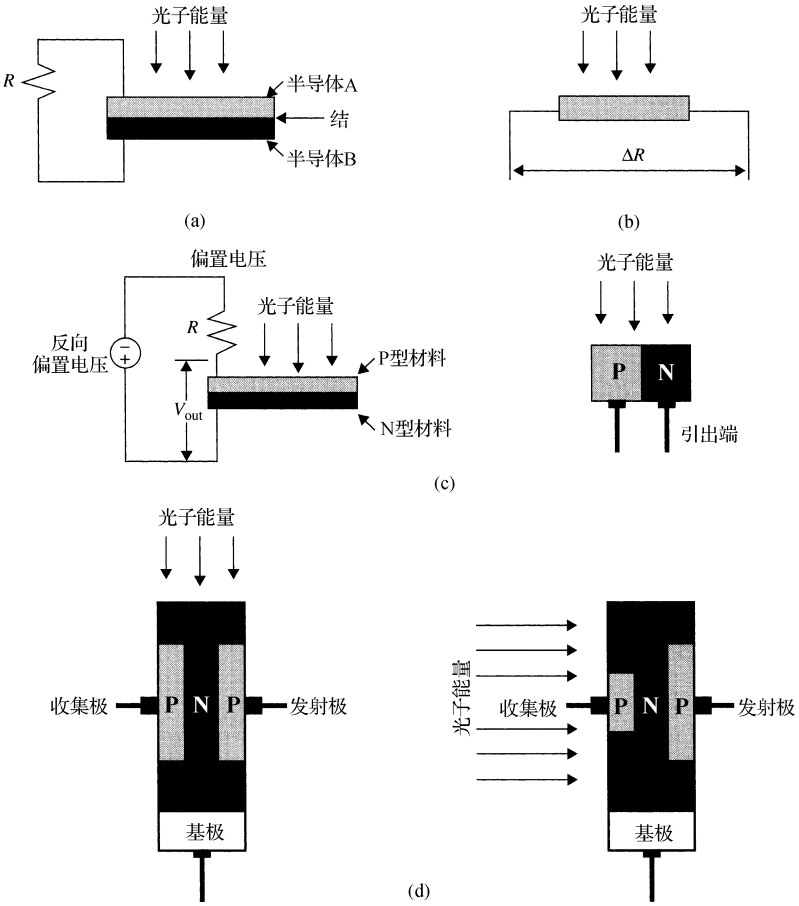

图 2.7　光学传感器件(引自[Kovacs，1998])：(a)光伏结；(b)光电导器件；(c)光电二极管；(d)光电晶体管

如图 2.7(a)所示，当透光性较强的半导体衬底 A 受到入射光子能量的辐照之后，图中的光伏结上就会产生一个电势。由此产生的电压可以通过一个电桥电路中的电阻变化测量出来。图 2.7(b)展示了一种特殊的材料，它可以在受到光照的条件下改变其自身的电阻。图 2.7(c)所示的光电二极管是由 P 型掺杂和 N 型掺杂的两层半导体构成的，而图 2.7(d)所示的光电晶体管则由 P 型掺杂、N 型掺杂和 P 型掺杂的三层半导体构成。如上述图中所示，入射的光子能量能够被转换成电流从这些器件中输出。图 2.7 所示的各种器件在尺寸上都可以实现小型化，并且其产生输出电信号的响应时间也可以非常短。它们是实现各种微光学传感器的极好的备选结构。

我们将在第 12 章讨论量子物理方面的内容，这些内容将涉及如何把入射的光子能量转变为某些特定材料中电子的能量。

用于制作光学传感器的材料选择基本上是基于量子效率方面的考虑，即材料通过接收外部入射的光子来产生电子-空穴对(形成电信号输出)的能力。像硅和砷化镓这样一些半导体材料是制作光学传感器的常用材料。砷化镓具有更高的量子效率和更高的输出增益，但是其生产成本也更昂贵。碱金属材料，例如锂(Li)、钠(Na)、钾(K)、铷(Rb)也可以用来制作这类传感器，而最常用的碱金属材料则是铯(Cs)。

与图2.7(c)所示的结构类似，由硅晶圆片上的P型层和N型层组合结构引起的光伏效应已经被应用于太阳能光伏电池的制造中。这种太阳能电池的重量通常比较轻，而且其能量转换效率要高于其他的太阳能收集方法。近年来生产太阳能光伏电池的成本已经大大下降了，这就使得太阳能光伏电池的应用领域已经从早期的空间卫星以及其他的外太空飞船电力供应拓展到单个的家庭和商业的电力供应。将大量太阳能光伏电池组合装配在一起的太阳能光伏模块如果和现有的大电网连接在一起，必将越来越多地给人类的电力供应提供补充。

2.2.5 压力传感器

正如我们在第1章中已经了解到的那样，微压力传感器已经在汽车和航天工业中获得了广泛的应用。大多数这类传感器的工作原理都是建立在待测压力所引起的薄膜片机械形变与应力的基础上。这种机械效应引起的薄膜片形变和应力接下来可以通过几种转换方法将其转变成电信号输出。

一般说来有两种不同类型的压力传感器：绝对压力传感器和压差计传感器。绝对压力传感器在传感薄膜的一侧有一个抽真空的腔室，待测量的压力是以真空作为参考压力而得到的“绝对”压力值。在压差计传感器中是不需要抽真空的，此时有两种不同的方法给传感薄膜施加压力。第一种方法如图2.8(a)所示，从传感薄膜的背面施加压力，这样不会对信号转换器形成干扰，因为像压敏电阻这类信号转换器通常都是通过离子注入技术制作在传感薄膜的上表面的；另外一种施加压力的方法，即如图2.8(b)所示的在正面施加压力，这种方法只用在非常特殊的情况下，因为施加压力的介质可能会对信号转换器带来干扰。由于空间上的局限性以及互连引线方面的困难，信号转换器很少放置在传感薄膜的背面。

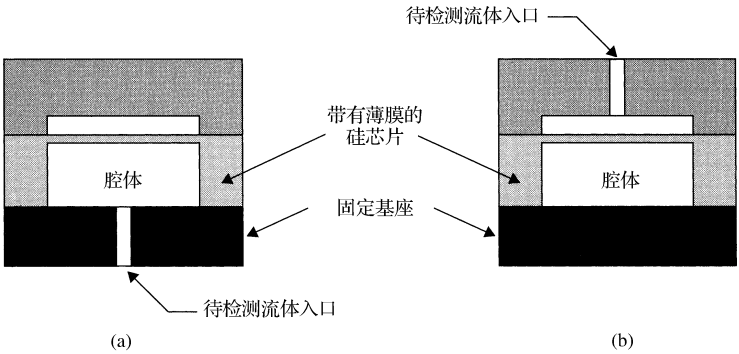

图2.8 典型的微压力传感器剖面图：(a)背面施压；(b)正面施压

如图2.8所示，传感元件通常由尺寸在几个微米到几个毫米见方的薄硅芯片构成。采用微加工技术在硅芯片的一面制备出一个空腔，空腔的顶部就形成了一个能在被测液体压力作用下变形的薄膜，硅薄膜的厚度通常在几个微米到几十个微米之间，由陶瓷或玻璃(通常采用的是一种称作派热克斯Pyrex材料的耐热玻璃)制作的固定底座支撑着这个硅芯片。外加

压力引起的薄膜形变可以通过不同的转换技术转变成电信号输出，这将在本节的后面进一步介绍。组装好的传感元件如图 2.8 所示，在完成合适的表面钝化处理后，它再和信号转换元件一起被封装到一个由金属、陶瓷或塑料做成的坚固外壳中。

图 2.9 给出了一个压力传感器的封装示意图，其中硅芯片的顶视图显示了采用离子注入技术在硅芯片表面形成的 4 个压敏电阻（R_1、R_2、R_3和 R_4），它们将外加压力在硅膜上引发的应力转换为其自身电阻的变化，然后再通过惠斯登电桥电路将电阻的变化转换成电压信号输出。这些压敏电阻从原理上说就是一种微型化的半导体应力计，它们可以把机械应力的改变转化成自身电阻的变化。如图 2.9 所示，压敏电阻 R_1 和 R_3受到外加压力所引起的应力场作用，该应力场导致上述两个压敏电阻的阻值增大，而压敏电阻 R_2 和 R_4 则由于其取向的原因，其电阻值发生相反的变化。这些由外加的待测压力所引起的电阻变化可以通过惠斯登电桥电路以动态偏差的工作模式进行检测，其输出结果为：

$$V_o = V_{in}\left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_3}{R_2 + R_3}\right) \tag{2.1}$$

其中，V_o和 V_{in}分别是惠斯登电桥电路的输出电压和外加电压。

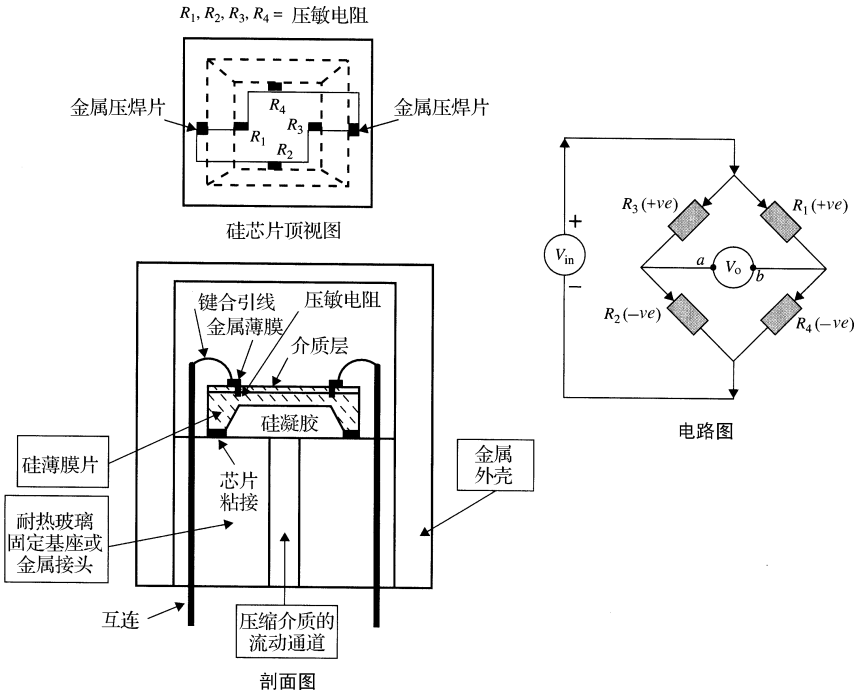

图 2.9　一个典型的微压力传感器的封装示意图

我们将在第 7 章中深入研究压电电阻材料的特性。正如图中的剖面图所示，利用细的压焊引线来连接两个金属焊盘和互连引脚，从而传导出来自压阻电桥的电压变化。图 1.2 左侧所示为一个已经封装好的这种类型的压力传感器。我们将在第 11 章中详细讨论这些压力传感器的封装技术。采用压电电阻的微型压力传感器具有较高的增益，且在平面内应力和输出电阻变化之间具有很好的线性关系。但是它也存在一个主要的缺点，就是对温度变化比较敏感。

微压力传感器中的信号转换方式可以依据其对传感器灵敏度和精度的要求有多种不同的

选择。另外人们还开发出了其他几种可用于微压力传感器的信号转换方式，我们接下来将介绍其中的两种。

图2.10展示了一个利用电容的变化来进行压力测量的微压力传感器，它采用分别附着在上盖底部和敏感薄膜顶部的两个薄金属片作为电容的两个电极，由外部所施加压力引起敏感薄膜的任何变形都会使两个电极之间的间距变窄，从而导致两个电极之间电容的变化，该方法的优点是与工作温度相对无关。这种平行板电容器的电容量 C 与两极板之间距离 d 的关系可表示为：

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d} \tag{2.2}$$

式中，ε_r是绝缘介质的相对介电常数，ε_0是自由空间(即真空)的介电常数，$\varepsilon_0 = 8.85$ pF/m (pF = 皮法 = 10^{-12}法拉)。

表2.2给出了几种常见物质的相对介电常数。

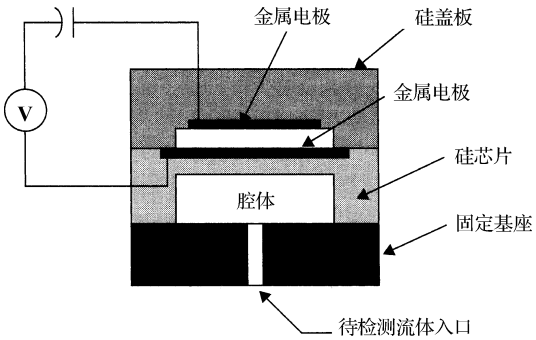

图2.10 采用电容进行信号转换的微压力传感器

表2.2 某些介质材料的相对介电常数 ε_r

介质材料	相对介电常数
空气	1.0
纸张	2~3.5
陶瓷	6~7
云母	3~7
变压器油	4.5
水	80
硅	12
硼硅玻璃	4.7

例题2.1 确定平行板电容器的电容值。两个极板的尺寸均为 $L = W = 1000$ μm，电极间距离为 $d = 2$ μm，两个极板之间的介质材料是空气。

解答：根据表2.2可知，空气的相对介电常数 $\varepsilon_r = 1.0$。由 $\varepsilon_0 = 8.85$ pF/m 和式(2.2)，可以计算出电容量为4.43 pF。

在各类微系统中，电容器是一种常用的传感器和致动器。电容器容量的改变可以通过一些简单的电路来测量，如图2.11所示[Bradley等人，1991]。

图2.11所示的电桥电路与图2.9所示的用于电阻测量的惠斯登电桥电路相似。可以通过输出电压 V_o的变化来测量电容量的改变。该电路中电容量的变化可以通过下面的公式求出：

$$V_o = \frac{\Delta C}{2(2C + \Delta C)} V_{in} \tag{2.3}$$

式中，ΔC 是微压力传感器中的电容改变量，C 是电桥电路中的其他电容值，电桥电路上施加了一个恒定的电压源信号 V_{in}。

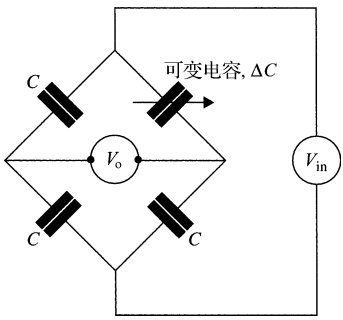

图2.11 用于电容测量的典型电桥电路

图2.12所示为用于汽车上歧管绝对压力(MAP)测量的传感器示意图[Chiou，1999]。该传感器采用

一个电容器作为信号转换器，其中的硅芯片在压力腔中的安装细节和图 1.22(c)所示的情况类似。

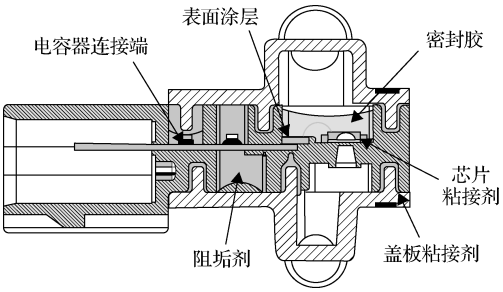

图 2.12　采用电容器作为信号转换器的歧管绝对压力传感器(经摩托罗拉公司许可使用)

采用电容器作为信号转换器的微压力传感器还是没有采用压敏电阻元件作为信号转换器的微压力传感器的灵敏度高，但是它也不像压敏电阻元件那样对工作温度那么敏感。另一方面，我们也应该认识到电容式压力传感器存在的一个主要缺点，即电桥电路输出电压的变化量与外界压力变化引起的电容变化量之间并不成线性关系。这种非线性的输入/输出关系已经由式(2.3)给出。下面的例题将进一步展示这种非线性关系。

例题 2.2　计算图 2.11 所示的电桥电路的输出电压，其中的平行板电容器及其两个平板电极的间隙变化如例题 2.1 所述。

解答：应用式(2.2)和式(2.3)可以建立如下的电压输出表：

电极间隙 d(μm)	电容量 C(pF)	电容改变量 ΔC(pF)	电压比率(V_o/V_{in})
2.00	4.425	0	0
1.75	5.057	0.632	0.029
1.50	5.900	1.475	0.056
1.00	8.850	4.425	0.100
0.75	11.800	7.375	0.119
0.50	17.700	13.275	0.136

图 2.13 展示了电极间隙 d 的改变与电容变化量之间的非线性关系。

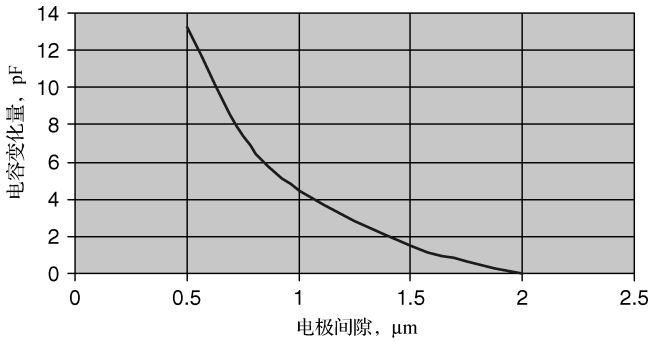

图 2.13　一个采用电容作为信号转换器的压力传感器的非线性输出

图 2.14(a)展示了一个采用振动梁作为信号转换器的微压力传感器结构[Petersen 等人，1991]。在跨越硅芯片上表面浅腔的两侧安置一个薄的 N 型硅梁，在 N 型硅梁的下方通过扩散工艺在浅腔表面制备出一个 P 型电极。P 型电极和 N 型硅梁分别采用硼掺杂和磷掺杂，我们将在第 3 章中对这种掺杂工艺进行详细介绍。无论 P 型掺杂还是 N 型掺杂的硅材料都是可以导电的。在对硅薄膜施加压力之前，首先通过在 P 型掺杂的扩散电极上施加一个交流信号促使硅梁以其谐振频率发生振动。施加到硅薄膜(和硅芯片)上的应力将被传递到振动梁上，沿着梁的方向的应力将会使得梁的谐振频率发生改变。梁的谐振频率的改变可以与传递

过来的压力相关，进而也就与施加到硅薄膜上的压力相关。我们将在第4章中给出计算上述振动梁的谐振频率改变的相应公式。

这种类型的信号转换器也是对温度不敏感的，而且能够给出很好的线性输出信号，如图2.14(b)所示，其缺点则是制造成本较高。

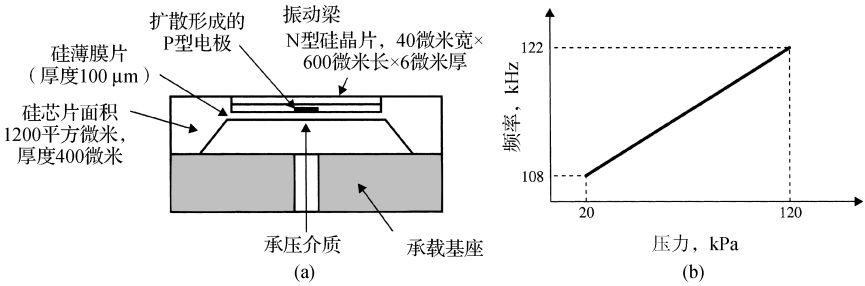

图2.14 采用振动梁作为信号转换器的微压力传感器：(a)压力敏感单元；(b)已经报道的灵敏度

2.2.6 热传感器

热电偶是最常用的一种热传感器，其工作原理是：将两个由不同金属材料构成的导线连接在一起，当两个导线的连接点(称为结点)受到加热时，就会在这两个不同金属线的开路端产生一个电动势[如图2.15(a)所示]。由于加热的作用使得结点的温度升高，这个温升与其产生的电动势或电压的幅度相关。我们可以把这些金属导线及其结点做成非常小的尺寸。如图2.15(b)所示，在上述热电偶电路中再增加一个结点，并将其置于不同于第一个结点的温度上，这时就会在电路内部形成一个温度梯度。这种由冷热两个结点构成的热电偶能够产生所谓的塞贝克效应，该效应是由T. J. Seebeck在1821年首次发现的。由热电偶产生的电压可以利用公式$V=\beta\Delta T$进行计算，其中β是塞贝克系数，ΔT是热结点与冷结点之间的温度差。事实上，冷结点的温度通常保持恒定，例如将其浸入到冰水混合物中使其保持0℃。系数β取决于构成热电偶导线的材料以及所测量的温度范围。表2.3给出了一些常见热电偶的塞贝克系数。

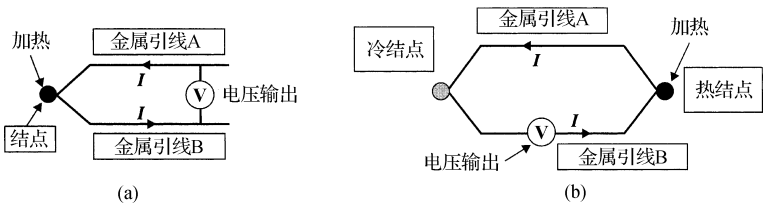

图2.15 热电偶示意图：(a)单一热电偶；(b)双结点热电偶

表2.3 常用热电偶的塞贝克系数

类型	导线材料	塞贝克系数(μV/℃)	温度范围(℃)	电压范围(mV)
E	铬镍/康铜	0℃时58.70	-270~1000	-9.84~76.36
J	铁/康铜	0℃时50.37	-210~1200	-8.10~69.54
K	铬镍/镍铝	0℃时39.48	-270~1372	-6.55~54.87
R	铂(10%)-铑/铂	600℃时10.19	-50~1768	-0.24~18.70
T	铜/康铜	0℃时38.74	-270~400	-6.26~20.87
S	铂(13%)-铑/铂	600℃时11.35	-50~1768	-0.23~21.11

资料来源：[Kreith, 1998]。

基于热电偶原理的微型温度传感器的一个严重缺点是其输出信号的幅度会随着导线及其结点尺寸的减小而降低，因此单个热电偶本身并不是理想的微型温度传感器。

微热电堆是实现小型化热传感的一个更为实际的解决方案。热电堆工作时同样也有热结点和冷结点，但是它们的组成方式是将各个热电偶相互并联，而电压输出采用串联形式，图 2.16 展示了热电堆的这种组成方式。热电堆中使用的导线材料和热电偶是一样的，也是铜/康铜(T 型)以及铬镍/镍铝(K 型)等材料，如表 2.3 所示。

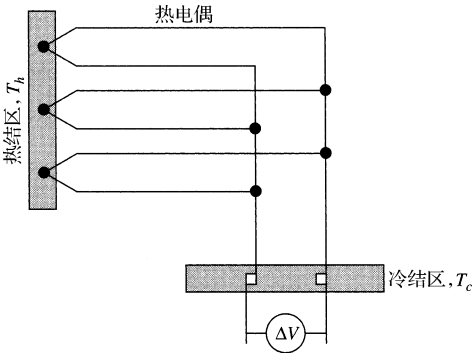

图 2.16　热电堆的组成示意图

由热电堆产生的输出电压可以通过下面的公式求得：

$$\Delta V = N\beta\Delta T \tag{2.4}$$

式中，N 为热电堆中所包含的热电偶对的个数；β 为两种热电偶材料之间的热电势(即塞贝克系数)，其单位是 V/K(参见表 2.3)；ΔT 为热电偶两端的温度差，单位是 K。

Choi 和 Wise 在 1986 年研制出了一个微型热电堆，如图 2.17 所示[Choi 和 Wise，1986]。该热电堆中包含了 32 个由多晶硅-金构成的热电偶。制造这个热电堆的硅芯片尺寸仅为 3.6 mm×3.6 mm×20 μm。利用一个温度为 500 K 的黑体辐射源，在 Q_{in} = 0.29 mW/cm^{2}的条件下该热电堆可以产生 100 mV 的典型输出信号，其响应时间为 50 ms 左右。

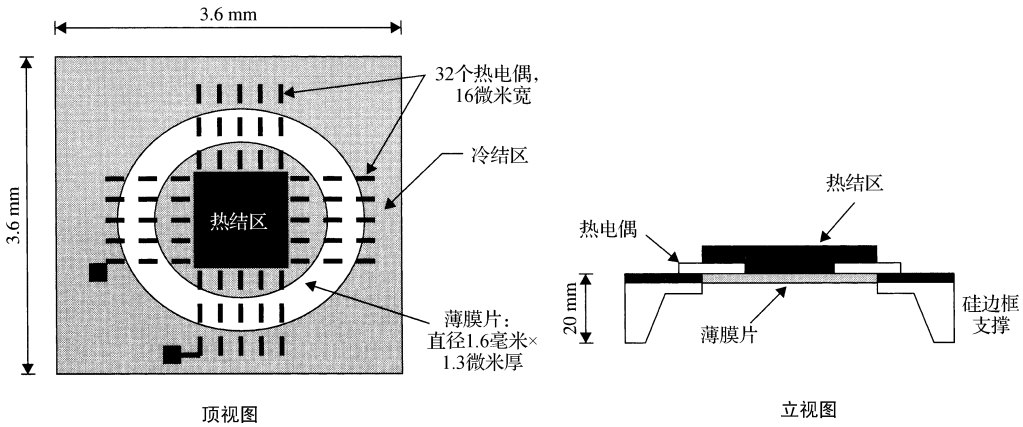

图 2.17　一个微型热电堆示意图

与图 2.10 类似的压力传感器也可以用来测量工作介质的温度。在这种情况下，硅薄膜的形变则是由热源引起的，而不是像在压力传感器中那样是由压力引起的。引起硅薄膜变形的热应力最终可以与电极发生形变的电容建立相关性。但是如果要求更高的灵敏度，则还是需要采用热电堆或热电偶来制作敏感元件。

2.3　微致动

韦伯斯特词典[Mish，1995]对“致动器”(actuator)的定义是“用来移动或控制某个物体的机械部件”。致动器在涉及运动的微系统里是一个非常重要的组成部分。通常用来驱动微器

件运动的4个主要手段为:(1)热力;(2)形状记忆合金;(3)压电晶体;(4)静电力。电磁致动器广泛应用于宏观尺度的大型设备和机器中,但是由于它不能适应不断按比例小型化的规律,因此很少用于微器件中,我们将在第6章中对此做进一步的说明。本节中将主要讨论以上4种方法的工作原理。

对于致动器的设计,就是要求在动力源的驱动下能够完成所需要的动作。简单的致动器可能只是一个继电器开关,而复杂的致动器则可能是一个喷墨打印头。根据不同的应用要求,各种致动器的驱动源也可以是多种多样的。一个电路中的开关可以用通过电流的双金属片形变来控制,这种双金属片在电阻的热效应作用下会产生形变来驱动开关。另一方面,大多数的电动致动器,例如电动机和螺线管装置,都是靠电磁感应现象来驱动的,这种电磁感应现象遵循法拉第定律。

对于各种属于微观或者介观尺度的器件来说,几乎没有空间来安装电磁感应装置所需要的导电线圈,因此就必须要研究其他方式的驱动力。接下来将介绍微致动领域中常用的3种动力源。

2.3.1 利用热力的致动

双金属片就是一种基于热力驱动的致动器,它由两片具有不同热膨胀系数的金属片粘合在一起所构成,当由初始的参考温度开始对其进行加热或冷却时,由于两种材料的热膨胀系数不同,双金属片就会发生弯曲。一旦外加的热源消失,双金属片又会恢复到原来的形状。这种致动原理已经运用于诸如微夹钳或微阀门等几种不同的微致动器中。在这些应用场合,双金属片中的一片金属用作电阻加热器,而另一片则可由硅单晶或多晶硅等普通的微结构材料构成[Riethmuller 等人,1987]。

图2.18展示了热致动双金属片的特性。构成双金属片的两种材料的热膨胀系数分别为α_1和α_2,且$\alpha_1 > \alpha_2$。当受到外部热源加热时,原来直的双金属片就会变形成如右图所示的弯曲形状。而当热源去除之后,双金属片就会恢复为原始形状。

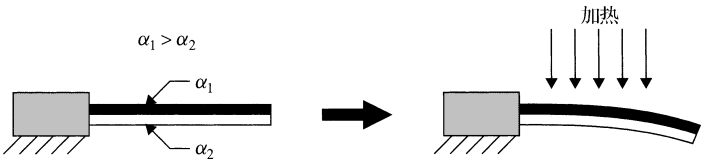

图2.18 由不同材料导致的热致动

2.3.2 利用形状记忆合金的致动

利用诸如镍钛合金这样一类的具有形状记忆特性的合金材料可以制造出更加精确和更为高效的微型致动装置,这种形状记忆合金(SMA)在预置的温度下具有恢复到原来形状的能力。我们可以用图2.19来说明采用形状记忆合金的微致动器的工作原理。首先将一个形状记忆合金片粘附到一个硅悬臂梁上,该形状记忆合金片在所设计的预置温度T时是处于原始的弯曲状态,而硅悬臂梁在室温时则是直的。当我们把硅悬臂梁以及粘附于其上的形状记忆合金片加热到温度T时,就会唤醒形状记忆合金片的“记忆”,从而使其恢复到原来的弯曲形状。合金片的弯曲将迫使与其粘附在一起的硅悬臂梁同时发生形变,最终达到硅悬臂梁的微

致动效果。这种类型的致动方式已经被广泛应用于微型旋转致动器、微型关节与机器人以及微弹簧上[Gabriel 等人，1988]。

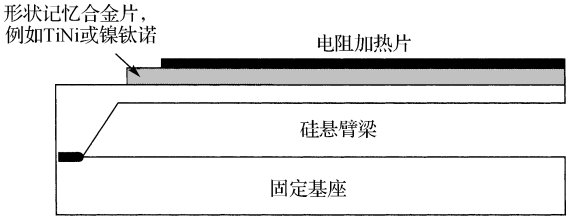

图 2.19　利用形状记忆合金的微致动

2.3.3　利用压电效应的致动

自然界中存在的某些晶体材料，例如石英晶体，在外加电压的作用下会产生形变；反过来也一样，当晶体材料在外力的作用下发生形变时，也会在晶体材料的两端产生电压。这种现象称作压电效应，如图 2.20 所示。

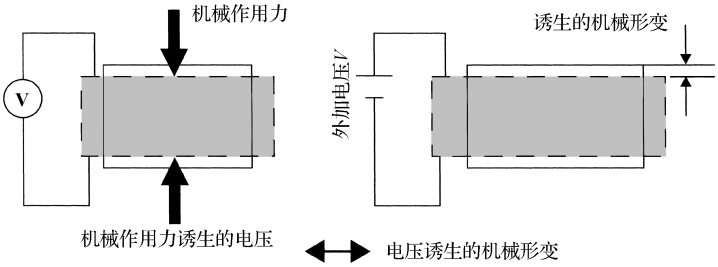

图 2.20　压电效应

压电特性最早是由皮埃尔·居里和雅克·居里兄弟在 1880 年发现的，皮埃尔·居里是一位著名的物理学家，也就是玛丽亚·居里的丈夫。而“压电特性”这个词则是威尔海姆·汉克尔在 1881 年首次提出的。在很多 MEMS 与微系统器件中，压电特性目前已经成为一种主要的微致动方法。

我们参照图 2.21 所示来说明利用压电特性实现微致动器的工作原理。图中在一根弹性的硅悬臂梁上粘附了一个由两个导电电极夹持的压电薄膜条。在压电晶体上施加电压将会使其发生形变，进而引起弹性硅悬臂梁的弯曲。已经有报道关于压电致动原理在微定位机制和微型夹具等领域的应用[Higuchi 等人，1990]。

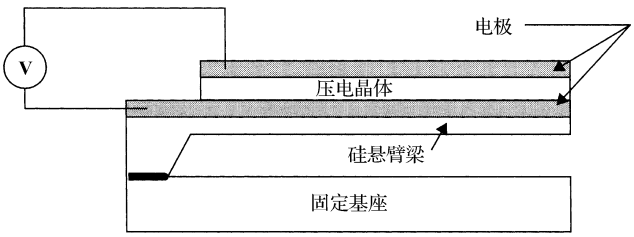

图 2.21　采用压电晶体的致动器

压电晶体材料是微致动器中使用的基本材料。有关常用压电晶体材料的晶体结构以及确定晶体材料各种机电特性的数学公式等更多信息，我们将在第7章中给出。

2.3.4 利用静电力的致动

许多致动器都利用静电力作为驱动力。在很多微型电动机和致动器的设计工作中，准确地估算出静电力的大小是非常重要的内容。为了能够在微致动器的设计中有效地利用这种重要的动力源，我们很有必要对静电学的基础知识进行一次重新回顾。

库仑定律 静电力 F 定义为由电场 E 引起的排斥力或吸引力。正如我们在物理课中所学到的，在正电荷和负电荷之间存在电场 E。查尔斯·奥古斯丁·库仑(1736—1806年)最早发现了这种现象并得出了计算两个带电粒子之间作用力 F 大小的数学公式。

如图2.22所示，假设两个带电粒子A和B位于它们各自产生的电场中，根据库仑定律，它们之间的静电力为：

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qq'}{r^2} \tag{2.5}$$

式中，$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\ \mathrm{C^2/N \cdot m^2}$，它是自由空间即真空中的介电常数(等同于电容器中的8.85 pF/m)；式(2.5)中的 r 则是电场中两个带电粒子间的距离矢量。

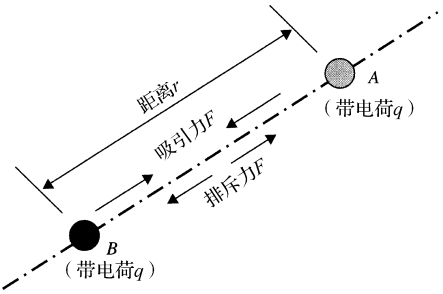

图2.22 电场中的两个粒子

当 q 和 q' 同时为正电荷或负电荷时，静电力 F 表现为排斥力；而当二者电荷相反时，静电力 F 变为吸引力。

平行板之间的静电力 图2.23展示了一个由介质材料(也就是电绝缘材料)隔开的两块带电平板，其间距为 d。当给两块平板之间施加一个电动势或电压时，平板就会被充电，这个充电过程就说明两块带电的平板之间具有一定的电容，该电容可以表示为：

$$C = \varepsilon_r\varepsilon_0\frac{A}{d} = \varepsilon_r\varepsilon_0\frac{WL}{d} \tag{2.6}$$

式中，A 是平板的面积；ε_r 是介质材料的相对介电常数。表2.2给出了一些常见介质材料的相对介电常数 ε_r。

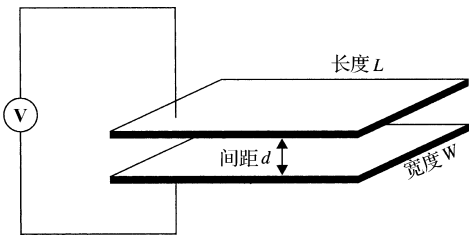

图2.23 两个平行板之间的电势

不难设想，只要施加在系统上的电压一直维持下去，图2.23中的上下两块平行板上就会一直保持不同的电荷。但是如果用一个导体将两个平行板短接，则存储在任何一个平板上的电荷都会因放电而立即消失。因此可以得出结论，即在图2.23所示的这种情况下确实存在着电势，而与该电势相对应的电势能则可以表示为：

$$U = -\frac{1}{2}CV^2 = -\frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 WLV^2}{2d} \tag{2.7}$$

上述计算电势能的公式前面有一个负号，这是因为当外加电压升高时，电势能会减小。

与之相关联的垂直于平板的法向静电力(即沿着 d 的方向)则可以通过电势能的式(2.7)推导出来：

$$F_d = -\frac{\partial U}{\partial d} = -\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 W L V^2}{d^2} \tag{2.8}$$

例题 2.3　如图 2.24 所示，一个平行板电容器是由尺寸 $L = W = 1000\ \mu m$(或 1 mm)的两块方板组成的。当两个极板之间的间距为 $d = 2\ \mu m$ 时，求法向静电力。隔开两个平行板电极的介质材料是静止的空气，它允许两个极板之间的间距 d 毫无阻碍地发生微小的变化。

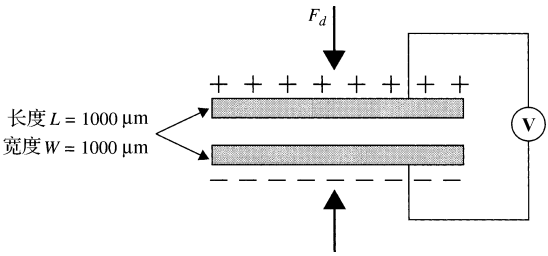

图 2.24　平行板电容器中的法向静电力

解答：作用在平板上的法向静电力可以利用式(2.8)计算出来，其中空气为绝缘介质，其相对介电常数为 $\varepsilon_r = 1.0$，真空中的介电常数为 $\varepsilon_0 = 8.85$ pF/m 或 $8.85 \times 10^{-12}\ C^2/N \cdot m^2$，由此得到：

$$F_d = -\frac{1.0 \times (8.85 \times 10^{-12})(1000 \times 10^{-6})(1000 \times 10^{-6})V^2}{2 \times (2 \times 10^{-6})^2}$$

$$= -1.106 \times 10^{-6} V^2 \qquad \text{牛顿 (N)}$$

因此，当在两块之间施加 100 V 电压时，作用在平板电极上的静电力为 11 mN(毫牛顿)。

由式(2.8)还可以推导出沿着宽度 W 和长度 L 方向作用在平板电极的静电力的表达式，这两个方向的作用力是当平板电极在相应的方向上发生局部偏移时而感应出来的[Trimmer 和 Gabriel, 1987]。下面给出的是式(2.8)的一个通用形式，可以用来计算上述作用力。

$$F_i = -\frac{\partial U}{\partial x_i} \tag{2.9}$$

式中，下标 i 代表发生偏移的方向，例如沿着宽度 W 的方向或长度 L 的方向。式(2.9)中的负号表示平板电极沿着 x 方向相对运动的任何一点增加，都会导致平板电极之间相对重叠面积的减小，而这将进一步引起电势能函数 U 的下降。

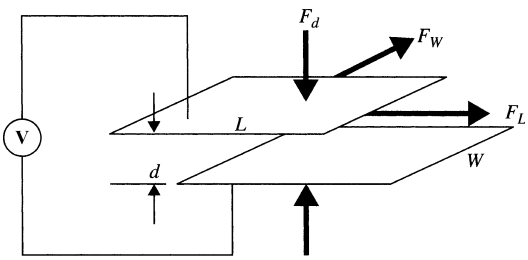

图 2.25　作用在平行板电极上的静电力

因此，根据图 2.25 中指定的作用力方向，可以写出沿着上述两个方向上的静电力的表达式：

$$F_W = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 L V^2}{d} \tag{2.10}$$

沿着长度方向：

$$F_L = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 W V^2}{d} \tag{2.11}$$

式(2.8)中的法向作用力 F_d 也同样可以利用式(2.9)的偏微分方法导出。式(2.10)和式(2.11)给出的平面内的静电力 F_W 和 F_L，只有当平板电极在相应方向上发生偏移时才存在，也就是说，只有当平板电极在宽度方向上发生偏移时，静电力 F_W 才存在。从上面两个表达式还可以看到，F_W 与宽度 W 无关；同样，F_L 与长度 L 无关。

这些静电力是微马达中用到的主要驱动力，我们将在接下来的 2.4 节 ~2.6 节展示的微器件中进一步介绍。采用直流电源的静电力可以用来驱动微夹钳中的梳状推动杆，而采用交流电源的静电力则可以用来驱动谐振腔中的梳状推动杆。采用静电力驱动的缺点是通过这种方式获得的力通常都是很小的，因此它的应用领域主要局限在如图 1.12 所示的光开关致动器以及下面的图 2.27 所示的微夹钳和图 2.39 所示的谐振腔器件中。

2.4 带有微致动器的 MEMS 器件

下面将展示一些采用了前面几节介绍的微致动原理研制出的微器件。

2.4.1 微夹钳

如图 2.26 所示，带电的平行金属板产生的静电力，可以用来作为夹持物体的驱动力。正如从图中所看到的，一个夹钳中所需的夹持力既可以由两个平板电极之间的法向力来提供[如图 2.26(a)所示]，也可以由发生偏移的一对平板电极平面内的力来提供[如图 2.26(b)所示]。

图 2.26(a)所示的由平板电极的法向静电力提供夹持力的方法，看起来在实际应用中似乎很简单，但这种方法的一个主要缺点就是电极在微夹钳结构中占用了过多的空间，因此这种方法现在已经很少使用。而另一种采用多对交错电极产生静电力的方法则在微器件中获得了广泛的应用，这种方法经常被称为梳状驱动。梳状驱动可以用来产生声波，如图 2.1 所示，也可以用来设计微夹钳，如图 2.27 所示[Kim 等人，1991]。夹钳尖端的夹持动作是通过在与驱动臂和闭合臂相连的平板电极上施加一个电压来启动的。这些交错电极对之间产生的静电力趋向于使这些平板电极对准，从而使得驱动臂弯曲，最终使得用于夹持的延长臂闭合。这些微夹钳可以用来装备微型操纵器或微型机器人，以用于微制造过程或显微外科。Kim 等人制作的夹钳长度为 400 μm，夹钳尖端张开时的距离为 10 μm。

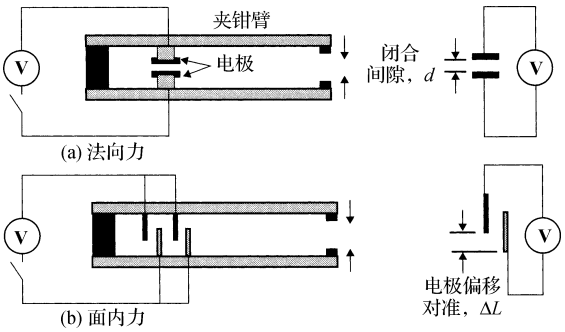

图 2.26 微夹钳中的夹持力

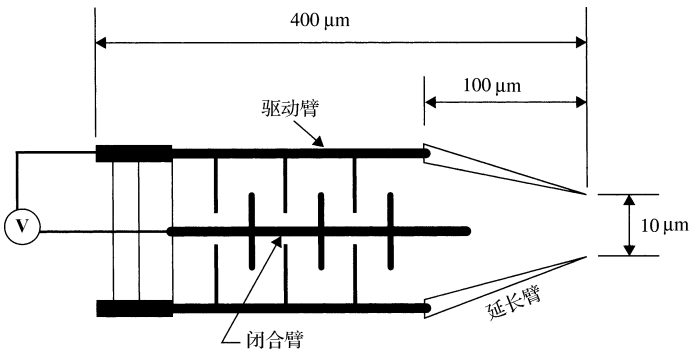

图 2.27 微夹钳示意图