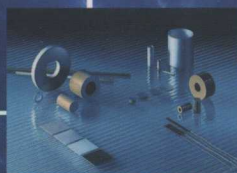


史丽萍◇著

多次压电效应探析 及在传感执行器上的 应用基础研究



史丽萍◇著

多次压电效应探析 及在传感执行器上的 应用基础研究



黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

多次压电效应探析及在传感执行器上的应用基础研究/
史丽萍著. -- 哈尔滨: 黑龙江大学出版社, 2014.3
ISBN 978-7-81129-640-2

I. ①多… II. ①史… III. ①压电效应-应用-传感
器-执行器-研究 IV. ①O738②TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 166464 号



多次压电效应探析及在传感执行器上的应用基础研究
DUOCI YADIAN XIAOYING TANXI JI ZAI CHUANGAN ZHIXINGQI SHANG DE
YINGYONG JICHU YANJIU
史丽萍 著

责任编辑 张永生 魏翥然
出版发行 黑龙江大学出版社
地 址 哈尔滨市南岗区学府路 74 号
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 720 × 1000 1/16
印 张 9.75
字 数 131 千
版 次 2014 年 3 月第 1 版
印 次 2014 年 3 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-81129-640-2
定 价 23.00 元

本书如有印装错误请与本社联系更换。

版权所有 侵权必究

前 言

自从 1880 年 Curie 兄弟在石英晶体上发现压电效应以来,压电效应已由基于应力的纵向、横向、剪切效应等二维效应发展到基于变形的拉压、弯曲、扭转效应等三维复合效应。以上压电效应均属于一次压电效应领域。由于科学技术的发展、工程实际的需要以及多次压电效应的感生电场和感生应变的逐渐微小化,研究人员需要进一步对多次压电效应的理论与应用进行研究。孙宝元教授于 1999 年首次提出多次压电效应的概念。国内外同类文献中,只有少量有关二次压电效应理论研究的报道,尚无关于二次压电效应的应用以及二次以上压电效应理论与应用研究的报道。

本书分析了一次、二次以及多次压电效应与压电体机械边界条件、电学边界条件的关系。多次压电效应产生的前提是满足相应边界条件。将以压电材料为核心的系统看成一个热力学系统,分析了三种能量、四种能量以及六种能量间主效应与交叉耦合效应的线性关系,还分析了压电效应与电磁效应的相似性,说明压电效应与电磁效应都具有双向可逆性,都存在着二次、三次等多次感生效应。

本书对从一次正、一次逆压电效应开始的多次压电效应进行了理论研究,建立了多次压电效应的解析表达式,同时分析了多次压电效应对压电体介电系数、等效电容、弹性系数、泊松比、压电系数的影响规律。

本书使用压电石英和 PZT-5 压电陶瓷叠堆,对从正压电效应开始的一次正、二次逆、三次正压电效应以及从逆压电效应开始的一次逆、二次正、三次逆压电效应进行了实验验证,证明了多次压电效应的存在。

本书进行了多次压电效应在传感执行器上的应用基础研究;探讨了从一次正压电效应开始的二次逆压电效应的应用;提出了应用二次逆压电效应设计微驱动装置的方案,并通过实验验证了其可行性;提出了利用一次正、二次逆压电效应设计“可作动传感器”的方案及其实现结构;探讨了从一次逆压电效应开始的二次正压电效应的应用;提出了利用一次逆、二次正压电效应设计“自感知执行器”的方案及其实现结构。

本书中研究工作的意义具体体现在以下两个方面:

第一,多次压电效应研究的理论意义。多次压电效应的研究属于晶体物理学、压电学、静电学、弹性力学、实验力学等多学科交叉的前沿课题。该研究一方面有助于从不同角度全面、深入地揭示压电机理与压电效应,另一方面对压电理论体系建设和学科建设与发展具有重要理论意义。

第二,多次压电效应研究的应用意义。一方面,由于多次压电效应在机电变换中存在机械阻抗和电阻抗等消耗,感生效应在尺度上将逐渐变小,因此可利用该效应进行微传感器、微执行器的研发;另一方面,由于多次压电效应的各次正、逆压电效应是在同一压电体内存在的双向效应,因此多次压电效应特别适用于进行传感器、执行器集成一体化研究,这对于微机电系统(MEMS)的发展具有重要的理论与现实意义。

第 1 章	压电效应研究背景及其应用	1
1.1	压电效应的研究历史及国内外现状	1
1.2	压电传感器与执行器的研究历史及国内外现状	5
1.3	压电传感器与执行器集成一体化研究的历史及国内外现状	17
第 2 章	压电效应、压电方程与边界条件	23
2.1	压电效应与压电材料	23
2.2	边界条件与压电方程	26
2.3	多次压电效应与边界条件的关系	29
2.4	压电双向换能器理论研究	35
第 3 章	能量间物质效应模型及压电效应与电磁效应的相似性分析	41
3.1	能量间物质效应模型	41
3.2	热力学关系及压电方程的热力学基础	45
3.3	压电效应与电磁效应的相似性分析	54
第 4 章	多次压电效应的理论模型	65
4.1	正压电效应开始的多次压电效应的理论分析	65
4.2	正压电效应开始的多次压电效应对物性常数的影响	68

4.3	逆压电效应开始的多次压电效应的理论分析	73
4.4	逆压电效应开始的多次压电效应对物性常数的影响 ...	77
4.5	压电效应的高阶效应及在传感器、执行器中的应用	81
第 5 章	多次压电效应的实验研究	89
5.1	压电石英与压电陶瓷特性	89
5.2	实验设备	95
5.3	压电叠堆的性质	97
5.4	正压电效应开始的多次压电效应实验研究	103
5.5	逆压电效应开始的多次压电效应实验研究	112
第 6 章	多次压电效应在压电传感执行器上的应用基础	
	研究	122
6.1	功能集成型传感执行器分类	122
6.2	正压电效应开始的多次压电效应的应用基础研究	123
6.3	逆压电效应开始的多次压电效应的应用基础研究	128
6.4	多次压电效应在压电传感执行器上的应用基础研究结论与 展望	134
参考文献		136
附 录		145

第 1 章 压电效应研究背景及其应用

1.1 压电效应的研究历史及国内外现状

随着现代科学技术的飞速发展,各种晶体材料和晶体器件的应用范围越来越广,几乎涉及国民经济与国防科技的各个领域。对晶体各种物理性质的研究,以及对晶体中机、电、热、磁、光、声等各种物理量相互作用、相互耦合关系的研究越来越多。郑哲敏等^[1]在回顾力学发展史、展望力学发展趋势时指出,力学将融合力、热、电、磁等效应,这些效应的结合孕育着极有前途的新机会。以往那个只注意利用材料的某一方面特性的时代已经过去,随着科学技术的发展,现在人们已经将注意力转向对材料的交叉耦合特性的研究。

压电学的发展已经有 100 多年的历史。1880 年 Curie 兄弟^[2]在研究热电现象和晶体对称性的关系时,在石英晶体上发现了压电效应,并设计出第一台基于压电效应的石英天平,将其应用于放射性现象的研究工作中。随后,Lippmann 根据热力学方法,应用能量守恒和电量守恒定律,预先推断了逆压电效应的存在,并给出了数值相等的石英晶体正、逆压电效应的压电常数。Curie 兄弟用实验验证了逆压电效应的存在。Hankel 提出了“压电学”这个名词,Kelvin 在热力学基础上建立了压电唯象理论。1894 年,Voigt 用热力学理论推导出压电方程,分析了压电效应与晶体对称性的关系,指出在 32 种点群的晶体中,仅有 20 种非中心对称点群的晶体才可能具有压电效应,而每种点

群的晶体最多有 18 个不为零的压电常数,为压电效应理论的形成奠定了基础。1910 年 Voigt^[3] 出版了压电学方面第一本经典著作 *Lehrbuch der Kristallphysik*,利用张量的概念定义了压电张量、弹性张量等物性常数,并指出压电方程通过张量相互联系,应力张量正比于应变张量,应变张量又正比于电场张量。因此,耦合力学量与电学量的压电常数是相等的。1920 年, Born^[4] 用晶格动力学研究了立方晶系的介电、热电以及压电效应。1940 年以后,对压电效应及其应用的研究取得了很大进展,并且 Cady^[5]、Mason^[6] 和 Tiersten^[7] 等将压电理论进行了综合论述,从此压电效应开始由理论研究转向实际应用。之后,国际上有关压电学方面的术语基本上以此为准。

为了促进压电学的发展,国际上成立了压电晶体委员会。该委员会 1945 年推荐了专用术语,1949 年颁布了压电晶体轴的定义,1957 年颁布了压电振子的定义和测量方法,1958 年颁布了弹性常数、压电常数、介电常数的测量方法,1961 年颁布了压电陶瓷的测量方法。

自此,压电学已经形成了较系统的理论体系,对压电体的纵向效应、横向效应、剪切效应都有了一定的认识与工程应用,并且在此研究范围内建立了基于应力分析的压电效应理论。当前压电效应的研究已经由基于应力的纵向效应、横向效应、剪切效应等二维效应发展到基于变形的拉压效应、弯曲效应、扭转效应等三维复合效应,但是基于变形的压电效应理论尚未完善。目前,大连理工大学孙宝元教授在国家自然科学基金的多次资助下,正在致力于对压电体扭转效应的理论与应用研究,Gao、Sun 等^[8] 已经证实了石英晶体存在扭转效应,且扭转效应中存在非线性极化以及扭转电荷的灵敏度分布等问题。在研究基于变形的三维复合效应的压电理论的同时,孙宝元教授在深入分析压电效应理论发展的基础上,从工程实际出发,于 1999 年首次提出压电多次感生效应的概念^[9],认为压电效应除一次效应外,还存在着二次、三次等多次感生效应,并于 2001 年获得了教育部高等学校博士学科点专项科研基金的资助。如果说纵向、横向、剪切、拉压、弯曲、扭转等压电效应从晶体应力、应变角度出发,在广度上揭示了机电耦合

与变换的一次压电效应规律,那么多次压电效应的研究将在深度上揭示机电耦合与变换的周期性、延续性及其规律。

到目前为止,国内外学者对一次压电效应进行了大量的理论与应用研究,但只有少数学者提到了二次压电效应。1958年、1964年,Bechmann^[10]、Cady^[5]先后在其著作中介绍了二次压电效应的概念,以及二次压电效应对弹性常数、介电常数的影响。1984年,孙慷、张福学等^[11]基于以上研究成果介绍了二次压电效应,并对二次压电效应理论展开了探索性研究。这几年,根据一次压电效应理论设计的压电传感器与执行器的应用领域越来越广阔,而压电效应的基础理论研究却没有较大的发展。

1979年,苏联学者 Korolev 等^[12]在研究表面驱动压电换能器的输入阻抗时指出:二次正压电效应的影响只占初级逆压电效应的1%,可以忽略。1985年,日本学者 Yutaka 等^[13]在使用干涉法测量锗和砷化物的弹性常数时指出,在 GaAs 中二次压电效应对弹性常数的影响可以忽略。

1995年,鲁敏^[14]在研制一种自校准压电加速度计的过程中指出,驱动元件增加会使加速度计在进行振动测量时因驱动端开路而产生二次压电效应,但因为其影响较小,所以没有给予分析与考虑。1995年,周桃生^[15]从压电方程导出了压电点火电压与能量公式,且利用二次压电效应及机电耦合关系分析了能量之间的关联性和有关压电材料参数之间的关联性,给出了压电点火材料参数综合性选择的一般性结论。2003年,石艺娜等^[16]基于 Karman 薄板非线性理论、压电基本方程和经典层合板理论,对上、下表面粘有压电薄膜的圆薄板压力传感器的力-电耦合模型进行了分析,给出了压电薄膜感应电量的计算公式,同时定量讨论了二次压电效应对感应电量和层合板中心挠度的影响,并指出当压电薄膜厚度比板的厚度小时,二次压电效应的影响可以略去不计。

虽然有关二次压电效应理论与应用研究的文献极少,但是所检索到的文献能够说明,在压电传感器与执行器的开发、应用及其静、动态

实验中,二次压电效应会因边界条件的改变而显现,只是大多数情况下,这种现象被忽略了。

从二次压电效应被提出直到现在,鲜有学者对二次压电效应的理论做进一步研究,而有关多次压电效应的研究,除笔者导师孙宝元教授的文章^[9]外,没有相关报导。

目前国内外对正、逆压电效应的研究方法主要是应用一次线性状态方程来描述各力学、电学物理量以及联系各物理量的物性参数。应该说,在很多情况下,可以用一次压电方程近似描述压电效应而不至于产生较大的误差。但是,在某些情况下,一次压电效应理论与实验现象会发生比较严重的偏离。例如,利用正压电效应可以制成各种传感器,其中压电石英具有非常优良的机电品质,其频率稳定性无与伦比,但其作为传感器时测力精度不如应变传感器,测位移精度不如电容传感器。究其原因,除了二次仪表的影响外,一次压电效应理论也致使其在变换检出中存在较大的误差。这说明,以往的压电石英传感器仅仅应用了一次压电效应理论,而没有考虑到客观存在的二次以及二次以上压电效应对感测结果的影响;利用逆压电效应可将压电元件制成智能结构中的驱动器,但它在电场作用下存在非线性效应和迟滞效应,这些现象在工程应用中一直没有得到彻底的解决。在这方面,除了需要对热释电效应、铁电效应、电致伸缩效应等进行进一步研究外,同样需要对多次压电效应理论进行讨论和研究。

同时,为了应对压电效应在工程应用中出现的实际问题,近年来对压电效应的非线性效应的研究出现了增多的趋势。这是因为,许多晶体的重要特性从根本上来说都是非线性的,因此需要将线性理论推广到高阶情况,并引入非线性的物性参数。

目前,对压电器件承受载荷的要求越来越高,线性本构关系理论与实际情况的偏差也越来越大,关于迟滞效应、非线性效应对压电材料工作状态影响的研究是有意义的。近年来对压电材料非线性本构关系的研究取得了不少成果。压电材料的非线性效应可以引起其压电性质、介电性质、弹性性质的变化。1983年、1996年,Beige^[17]、

Aurelle等^[18]分别论述了压电陶瓷中关于电位移的非线性模型;1996年,Damjanovic等^[19]基于 Rayleigh 定律描述了从正压电效应开始的非线性效应;1999年,Hall等^[20]描述了从铁电陶瓷逆压电效应开始的非线性压电、介电效应;1996年、2000年于 IEEE 国际铁电体应用会议上,Perez等^[21-22]阐述了压电陶瓷的非线性介电效应。虽然石英晶体是最早被发现具有压电效应的晶体,但是由于石英晶体本身具有优良的机电品质,而且其既不是热释电晶体又不是铁电晶体,压电系数比电致伸缩系数大几个数量级,因此,人们一直认为无论是从正压电效应开始,还是从逆压电效应开始,石英晶体都只有线性压电效应。直到1974年,Besson^[23]在研究石英谐振器时发现,由于石英晶体的非线性效应通常不被重视,石英谐振器的正常使用已经受到了影响。

1.2 压电传感器与执行器的研究历史及国内外现状

1.2.1 压电材料的发展与应用

压电效应是在石英晶体上首先被发现的,以 α 石英为代表的压电晶体是最早被使用的压电材料。1916年,Langevin在第一次世界大战期间使用压电激励的石英晶片产生水中声波,制成了水下发射和接收的换能器,用来探测潜水艇,开始了超声学和水声学的研究。1917年,美国贝尔实验室对石英、酒石酸钾钠等许多压电晶体进行了大量的研究,1919年第一个酒石酸钾钠电声器件问世。1921年石英谐振器和滤波器相继研制成功,开创了压电晶体在频率控制方面应用的先河。在高稳定性的要求下,石英晶体被广泛地应用于晶体振荡器的频率控制。美国国家标准学会将石英晶体振荡器作为频率标准,开始了石英晶体振荡器在军用与民用通信中的应用历史,尤其是其在军事通信设备中的应用,在第二次世界大战中得到了飞速的发展。1933年开始,一些科技工作者先后发现了石英晶片的AT、BT、CT、DT、ET、FT、GT等

切型,其中 AT 切型石英晶片至今仍是所有压电石英晶片中应用最广的一种。由于各种切型石英晶片的出现,采用压电石英晶片作为力电转换元件的传感器和测力仪的开发与研制有了很快的发展。

在石英晶体迅速发展与广泛应用的同时,压电陶瓷的研究引起了各国学者的注意。压电陶瓷是压电材料中的一类,与压电晶体相比具有较强的压电效应、热释电效应、铁电效应等。1942 年,第一种压电陶瓷材料——钛酸钡(BaTiO_3)先后在美国、苏联和日本制成,自此压电材料分成了压电晶体和压电陶瓷两大类。1947 年诞生了第一个压电陶瓷器件——钛酸钡拾音器,是苏诺托恩公司所出售的留声机拾音器。1954 年美国贾菲等人发现了一种性能大大优于钛酸钡的压电陶瓷材料——锆钛酸铅(PbZrTiO_3 ,简称为 PZT)。PZT 非常强、非常稳定的压电效应的发现具有重大的实际意义,使得压电器件的制造变为可能。20 世纪 60 年代到 70 年代,压电陶瓷不断得到改进,如用多种元素改进的 PZT 二元系压电陶瓷,以 PZT 为基础的三元系、四元系压电陶瓷,透明压电陶瓷等都应运而生。PZT 等具有铁电效应的压电陶瓷的出现与应用使压电材料的应用翻开了新的一页。目前压电陶瓷已经在惯性器件、声表面波(SAW)器件等方面得到了广泛的应用,并成为实现微定位、微驱动的主要材料。

在压电效应发现与发展的前 80 多年里,压电晶体和压电陶瓷的理论与应用研究占主导地位。而最近 40 多年来,另一种新型的压电材料——有机高分子压电材料迅速发展起来。1969 年,日本学者 Kawai^[24]发现聚偏二氟乙烯(PVDF)薄膜在合成高分子材料中具有最强的压电效应,并具备工业使用价值。1971 年,Bergman 等发现 PVDF 具有热释电效应。PVDF 具有很强的压电效应和热释电效应,其机械强度高、化学性能稳定(耐湿、耐腐蚀、耐电磁辐射)、易于加工、可制成大面积薄膜和不规则形状、制作成本低。目前,日本、法国、美国等均实现了 PVDF 的批量化生产。1977 年,中国科学院上海有机化学研究所开始研制压电性 PVDF 及其共聚物,从那以后 PVDF 在我国的研究与应用日趋广泛。除了常用的 PZT、PVDF、ZnO 外,20 世纪 80 年代中

期还出现了铌镁酸铅(PMN)等复合材料。

美国佛罗里达大学研制成的压电聚合物传感器可以识别盲文书信,具有近100%的准确性。意大利比萨大学利用PVDF研制成的压电皮肤传感器对于环境温度和压力具有敏感性。利用PVDF传感器可以建立入侵报警系统,也可以设计交通切换系统,记录路面的振动情况,了解公路交通状况。PVDF压电薄膜还可以被利用在桥梁、大坝、房屋等大型结构的测震减震上。近20年来,有机高分子压电材料在自动控制、微机电一体化、公路交通、建筑、航空、航海、生物医学等领域中都已经开始了广泛的研究与应用。

综上所述,压电材料具有的独特优点是其被大量应用的前提条件。压电材料具有双向可逆效应,即正、逆压电效应,这使得压电材料既可做传感元件又可做驱动元件。而且压电材料还具有许多优良品质,即机电转换频率高、线性范围宽、重复精度高、稳定性好、刚度大、绝缘阻抗高、滞后小、对温度不敏感、功耗低等,因此压电材料被广泛地应用于传感器和执行器的设计与制作。

1.2.2 压电传感器的研究现状

应用较广的压电传感器有压电力传感器、压电加速度传感器等。压电传感器主要是利用正压电效应原理制造而成的,传感器输出电荷量与作用力成正比,所以配上适当的电荷放大器就可以测出作用力的大小。在1960年之前,利用压电石英晶片研制的测力传感器与测力仪还不能用于静态测量,因为经过外力作用后,压电石英晶片产生的电荷只有在回路具有无限大的输入阻抗时才能得到保存,而实际的情况不是这样的。这决定了压电传感器只能够用于动态信号的检测,不能测量静态和准静态力,其实用价值不大,致使压电传感器与测力仪的发展处于停滞状态。在高阻抗电荷放大器出现后,压电电荷泄露问题得以解决,这时采用压电材料作为传感器的压电测试学科才有了质的变化,从静态到动态、从低频到高频的信号均可测量。^[25]

1963年,德国亚琛工业大学首先成功研制了采用三向压电石英力传感器的三向车削测力仪。瑞士苏黎世联邦工业大学对压电测力仪进行了基础理论研究,并与瑞士 Kistler 公司合作成功研制了具有优良性能的压电石英力传感器系列,包括车削、钻削、铣削测力仪,多分量测力平台以及电荷放大器等,构成了压电测试系统所需的成套设备。^[26]

我国研究和应用压电石英力传感器及测力仪相对较晚。1977年,大连工学院应国防工程中测试动态切削力的急需,开始了压电石英力传感器与测力仪的研发工作。孙宝元教授等先后研制成功 YDS-781 型单向压电力传感器, YDC-78 型动态切削测力仪, YDS-Ⅲ89 型三向压电力传感器,刀杆式三向压电测力仪,压电铣削、钻削、磨削和测力轴承传感器等。图 1-1 为三向压电石英力传感器组合晶组的构成。

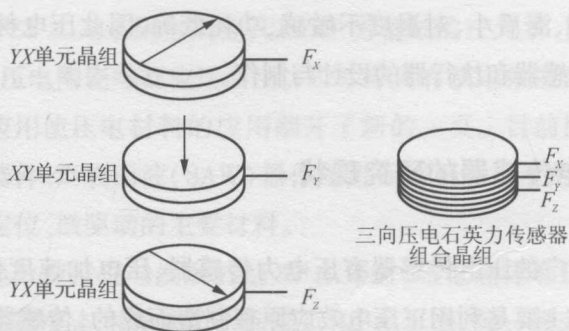


图 1-1 三向压电石英力传感器组合晶组的构成

压电元件上的力 F 与电极面上的电量 Q 可由式 1.1 表示。

$$Q = dF \quad (1.1)$$

压电石英力传感器与测力仪的静态性能好、灵敏度高、静刚度好、线性度好、滞后小、频率特性和瞬态响应理想、稳定性好、抗干扰能力强。由各种切型石英晶片组装成的压电石英力传感器与测力仪在国防工业、汽车业、航海业、机械工程、土建工程、生物工程等领域得到了广泛的应用。

2002年Wang等^[27]、2003年黄朋生等^[28]研制了基于微机电系统的压电加速度传感器,其中三维压电薄膜加速度传感器如图1-2所示,它采用由单一质量块和四方梁构成的高度对称结构。使用有限元软件ANSYS进行了不同加速度条件下传感器的静态和模态分析,结果表明该传感器能够同时独立测出X、Y、Z三个方向的加速度,其灵敏度分别为 $2.76 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ 、 $2.76 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ 、 $2.96 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{s}^2/\text{m}$,横向灵敏度几乎为零。

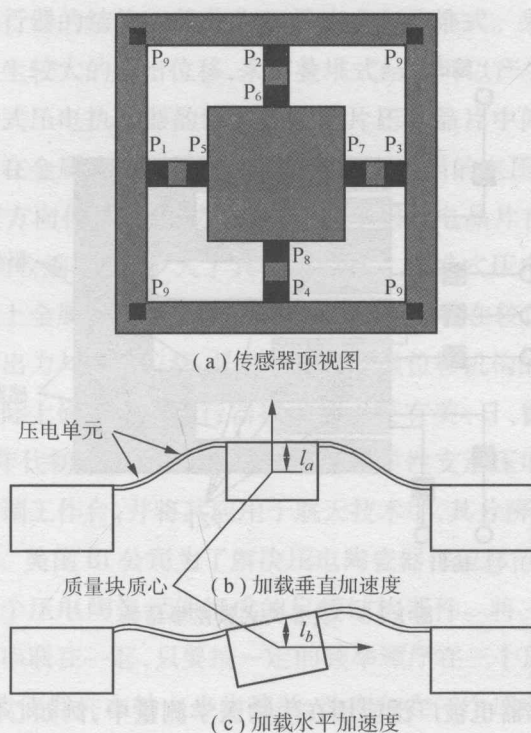


图1-2 三维压电薄膜加速度传感器

压电加速度传感器是一种常用的加速度计,它具有结构简单、体积小、质量小、使用寿命长等优点。压电加速度传感器在飞机、汽车、船舶、桥梁和建筑的振动与冲击测量中已经得到了广泛的应用,特别是在航空和航天领域中更有它的特殊地位。

2000 年、2001 年,马薇等人^[29-30]利用 PZT 压电材料的正、逆压电效应研制出了以 PZT 薄膜为驱动和传感材料的压电薄膜微陀螺。微陀螺有两种结构:一种为双音叉式结构,一种为四梁式结构。双音叉式微陀螺结构如图 1-3 所示。对于双音叉式微陀螺,在输入端输入交流电压时,驱动臂的 PZT 薄膜由于逆压电效应而产生振动,并迫使驱动臂振动,进而带动感测臂产生振动,在输出端产生输出电压,该电压与微陀螺转动角速度成正比。

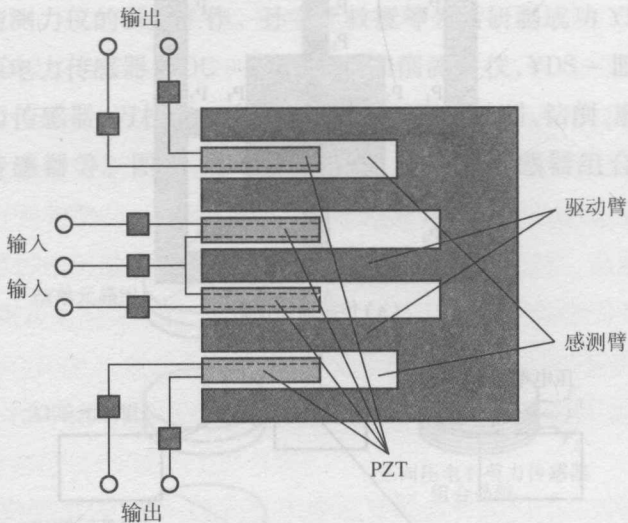


图 1-3 双音叉式微陀螺结构

压电传感器也被广泛应用在生物医学测量中,例如心室导管式微音器就是由压电传感器制成的。近年来发展起来一种新的基因检测工具——压电基因传感器,它是利用晶体表面的质量变化 Δm 与其引起的晶体谐振频率变化 Δf 之间存在简单线性关系的原理来进行基因检测的。

1.2.3 压电执行器的研究现状

对以压电材料为驱动源的压电执行器的研究,均起源于压电体的