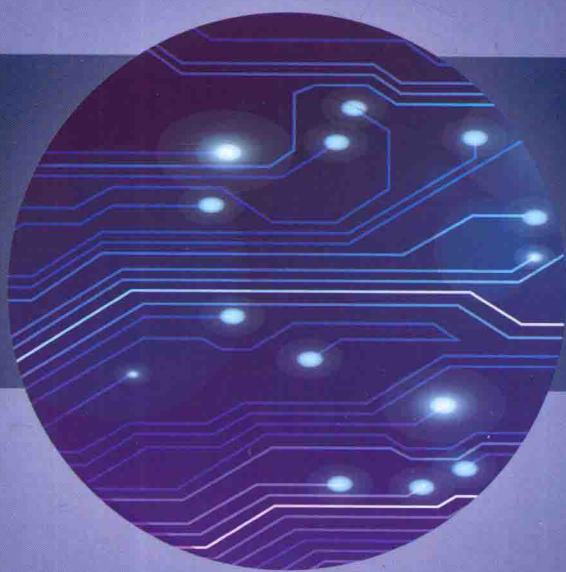


单双相压电泵及驱动控制技术

孙业明 著



科学出版社

单双相压电泵及驱动控制技术

孙业明 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍单双相压电泵结构设计理论及驱动控制技术。对机械结构设计、专用驱动电源研制、压电泵流量自测量及液体精密输送技术进行研究。在对压电振子特性、压电泵工作机理进行分析的基础上,以单、双相压电泵为驱动对象,研制系列模拟式、程控式、数字式专用驱动电源,对压电泵工作性能进行测试;提出一种基于压电自感知的压电泵流量自测量技术;研究基于定脉冲数控制的液体精密输送技术。本书将压电泵机械结构与驱动控制技术相结合,充分发挥了压电泵精密、微流量输送的优点,并实现了双向传输、流量自测量、定体积精密输送功能。

本书适合从事压电执行器、微流体控制研究、设计和应用的工程技术人员参考,也可作为高等院校及科研机构微流体、精密驱动等相关专业研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

单双相压电泵及驱动控制技术/孙业明著. —北京:科学出版社,2018. 11
ISBN 978-7-03-059270-5

I. ①单… II. ①孙… III. ①电动泵-控制系统-研究 IV. ①TH35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 246207 号

责任编辑:孙伯元 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 11 月第一次印刷 印张:9

字数:169 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

压电泵是近年来开发出的一种新型泵,是压电驱动器的一个分支,它具有体积小、噪声小、无电磁干扰、可实现流体精密输送及控制等优点,适用于生物医疗、化学分析、发动机燃料供给、芯片冷却、喷墨打印等领域,具有广阔的应用前景。目前对压电泵的研究多数还处于试验阶段,离实际应用尚远。相对于在压电泵结构设计及优化方面细致、具体的研究,压电泵驱动、控制、自动化测量方面的研究较少,无法充分发挥压电泵在液体精密控制方面的优势,对该方面进行研究显得十分迫切。

本书介绍了作者研究的单双相压电泵及驱动控制技术。在压电泵结构设计、专用驱动电源研制、压电泵控制特性试验、流量自测量技术、液体输送精密控制技术方面进行多层次、多角度的研究。本书将压电泵机械结构与驱动控制技术相结合,充分发挥压电泵精密、微流量输送的优点,并实现双向传输、流量自测量、定体积精密输送的功能,初步构成一个完整的压电泵系统。

本书吸收了作者的最新研究成果,从机构、驱动、控制三个层次对压电泵系统进行研究。机构为基础,驱动建立在机构基础之上,控制又建立在驱动基础之上,形成一种机构—驱动—控制的分层结构,研究内容深入、广泛,且自成体系。

全书共 7 章。

第 1 章,介绍包括压电泵在内的微小型泵工作原理及特点,压电泵国内外研究概况、应用前景,驱动控制技术发展现状,并阐明本书研究内容及意义。

第 2 章,介绍相关压电基础理论,对泵用压电振子驱动原理及工作方式进行分析;结合 Butterworth van Dyke 等效电路模型及电学测试,分析泵用压电振子阻抗特性;对压电振子变形能力进行测试,为压电泵

的结构设计及驱动控制研究打下基础。

第3章,分析压电泵输出性能与压电振子结构、材料、驱动信号之间的关系,主动阀结构对泵工作性能的影响,论述双腔串联压电泵、双腔并联压电泵、主被动阀结合泵、双主动阀压电泵工作机理及设计方法。

第4章,论述压电泵系列专用驱动电源的设计理论、方法。研制模拟式单相压电泵驱动电源、程控式单相压电泵驱动电源、数字控制式双相压电泵驱动电源等专用驱动电源。电源中,压电泵控制变量可以独立连续调节;电源采用模块化设计,调试方便且成本低廉。该章为本书重点内容。

第5章,利用研制的驱动电源对压电泵工作性能参数进行测试,分析压电泵输出性能与驱动电压、驱动频率、相位差之间的关系。其中数字控制式双相压电泵驱动电源与双主动阀压电泵结合,在不改变机械结构的前提下,调节相位差参数,可灵活改变液体输送方向及流量大小,具有独特的控制性能,与设计的初衷相吻合。

第6章,论述基于压电自感知功能的压电泵流量自测量方法,对流量影响因素、传感压电信号与振子变形关系进行分析,根据传感压电信号特征参数与泵流量对应关系对泵输出流量进行预测,对流量自测量方法进行实验验证;论述基于定脉冲数的液体输送精密控制方法,研制定脉冲数控制电路,对基于定脉冲数的液体输送精密控制方法进行实验验证。

第7章,对上述研究工作内容及创新之处进行总结。

在撰写本书的过程中,作者得到导师程光明教授、曾平教授的大力支持,感谢他们多年对作者研究工作的悉心指导及鼓励支持。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目(编号:51505077)、吉林市科技创新发展计划项目(编号:201750230)及东北电力大学博士科研启动基金项目(编号:BSJXM-201523)的大力资助,在此深表感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 微小型泵种类及特点	1
1.2.1 电液动力型微泵	1
1.2.2 静电驱动型微泵	2
1.2.3 热驱动型微泵	3
1.2.4 行波驱动型微泵	4
1.2.5 电磁驱动型微泵	5
1.2.6 压电泵	5
1.3 压电泵研究现状	6
1.4 压电泵的应用	14
1.4.1 医疗中的应用	14
1.4.2 化学分析中的应用	14
1.4.3 电子芯片冷却中的应用	15
1.5 压电泵驱动电路的发展	15
1.6 压电自感知技术研究现状	16
1.7 本书研究内容及意义	18
参考文献	20
第 2 章 泵用压电振子作用机理及性能测试	26
2.1 压电基础特性	26
2.1.1 压电效应	26
2.1.2 压电材料	26
2.1.3 压电材料重要特性参数	27
2.2 压电晶片驱动器原理及工作方式分析	29

2.2.1 驱动原理	29
2.2.2 工作方式及性能分析	30
2.3 阻抗法分析压电振子特性	31
2.3.1 理论依据	32
2.3.2 压电振子阻抗特性测试	35
2.4 圆形压电振子工作性能测试	36
2.5 本章小结	38
参考文献	38
第3章 单双相压电泵结构设计	40
3.1 单腔单振子压电泵结构设计	40
3.1.1 单向截止阀的选择	40
3.1.2 压电泵工作原理及结构设计	44
3.1.3 单腔单振子压电泵结构参数确定	45
3.1.4 泵腔体积变化量分析	46
3.1.5 单腔单振子压电泵理论输出能力	47
3.2 双腔串联压电泵设计	48
3.2.1 双腔串联压电泵结构	48
3.2.2 双腔串联压电泵工作原理分析	49
3.2.3 双腔串联压电泵理论输出性能	50
3.3 双腔并联压电泵设计	51
3.3.1 双腔并联压电泵结构设计	51
3.3.2 双腔并联压电泵工作原理分析	51
3.4 主被动阀结合泵设计	53
3.4.1 主被动阀结合泵结构	53
3.4.2 主被动阀结合泵工作过程	55
3.4.3 主被阀结构参数设计	56
3.5 双主动阀压电泵设计	57
3.5.1 双主动阀压电泵结构	57
3.5.2 双主动阀压电泵实现液体双向输送原理分析	58
3.6 本章小结	60

参考文献	61
第 4 章 单双相压电泵专用驱动电源研制	62
4.1 模拟式单相压电泵驱动电源研究	62
4.1.1 压电泵驱动信号要求分析	62
4.1.2 驱动电源系统	63
4.1.3 模拟式单相压电泵驱动电源电路性能测试	67
4.2 程控式单相压电泵驱动电源研究	68
4.2.1 驱动电源系统设计	68
4.2.2 程控式单相压电泵驱动电源性能测试	73
4.3 数字控制式双相压电泵驱动电源研究	74
4.3.1 电源系统设计	74
4.3.2 数字控制式双相压电泵驱动电源测试	82
4.4 压电泵驱动电源抗干扰设计	84
4.5 本章小结	85
参考文献	86
第 5 章 单双相压电泵输出性能实验研究	88
5.1 压电泵输出性能测试系统构成	88
5.2 单腔单振子压电泵输出性能测试	89
5.2.1 驱动电压对输出性能的影响	89
5.2.2 驱动频率对输出性能的影响	90
5.3 双腔串联压电泵输出性能测试	92
5.3.1 驱动电压对输出流量的影响	92
5.3.2 驱动频率对输出流量的影响	92
5.3.3 两相信号相位差对输出流量的影响	93
5.3.4 驱动频率对输出压强的影响	94
5.3.5 相位差对输出压强的影响	95
5.4 双腔并联压电泵输出性能测试	96
5.4.1 驱动电压对输出流量的影响	96
5.4.2 驱动频率对输出流量的影响	96
5.4.3 信号相位差对输出流量的影响	98

5.4.4 驱动频率对输出压强的影响	100
5.4.5 相位差对输出压强的影响	101
5.5 主被动阀结合泵输出性能测试	101
5.5.1 驱动频率对输出流量的影响	101
5.5.2 信号相位差对输出流量的影响	102
5.6 双主动阀压电泵输出性能测试	103
5.6.1 驱动频率对输出流量的影响	103
5.6.2 信号相位差对输出流量影响	104
5.7 本章小结	106
第6章 流量自测量及液体输送精密控制	108
6.1 基于压电自感知与神经网络的流量自测量方法	108
6.1.1 传感压电片感知压电泵流量原理	108
6.1.2 用于压电泵流量预测的神经网络	110
6.1.3 传感压电信号参数测量电路设计	112
6.1.4 实验研究	115
6.2 基于定脉冲数控制的液体精密输送方法研究	120
6.2.1 定脉冲数控制电路硬件设计	121
6.2.2 定脉冲数控制电路的软件设计流程	123
6.2.3 液体输送精密控制实验研究	125
6.3 本章小结	127
参考文献	128
第7章 结论	131

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

泵是一种输送流体或使流体增压的机械装置,它将外界的机械能,如内燃机及电动机的动能、风能等转化为流体的能量。由于含有轴、齿轮等传动部件,传统的泵体积大、结构复杂,不能精确输送微流量流体,越来越多的人开始关注微型泵。

压电泵是微型泵的一个分支,它把驱动元件、传动元件、执行元件三者融为一体,具有体积小、功耗低、结构简单、无电磁干扰、工作噪声小等优点,尤其适合于流体的精密输送及控制,在细胞注射、微流体生化反应控制、胰岛素微量注射、药物缓释、液体微量采集等领域有着广阔的发展前景。

相比在压电泵结构方面具体、细致的研究,目前对压电泵驱动、控制方面的研究还较少,压电泵的优点无法充分发挥。因此,压电泵驱动、控制技术成为压电泵系统推广发展的瓶颈,对该方面进行研究显得十分迫切。

1.2 微小型泵种类及特点

1.2.1 电液动力型微泵

电液动力泵是依据电液动力学原理工作的一种微型泵^[1,2]。电液动力型微泵工作的必要条件是液体中要有带电电荷。使普通液体产生电荷的方法主要有两种:电荷注入法和电荷诱导法。电荷注入法是将空间中自由电荷通过电化学的方法注入流体中;电荷诱导法是指通过某些方法使液体内部的电荷发生转移,打破液体中的电荷平衡,从而使液体中出现电荷。

注入型电液动力型微泵的工作原理如图 1.1 所示,在电液动力型微泵电极上施加直流电压,阳极边缘注入阳离子,把阳极作为发射级,注入的阳

离子被驱动至集电极,发射极产生了许多远多于负离子的正离子,从而产生了从发射极到集电极的静电荷流。由于流体阻力作用,一些阳离子的能量转移到流体中,带动中性分子,使流体流动。

1.2.2 静电驱动型微泵

静电驱动型微泵^[3,4]以两个平行板间的静电吸引力为驱动力,驱动液体产生定向运动。图 1.2 是静电驱动型微泵结构图,该泵的动力源是两个平行的极板,上极板刚度大,下极板较薄,刚度小。两极板间施加静电电压,在静电吸引力作用下,下板发生较大弯曲,泵腔体积变大,液体从入口进入泵腔;撤去静电电压,静电吸引力消失,下极板恢复原来形状,泵腔体积减小,泵腔中的液体从出口排出。泵中入口阀和出口阀是悬臂梁结构的单向阀。

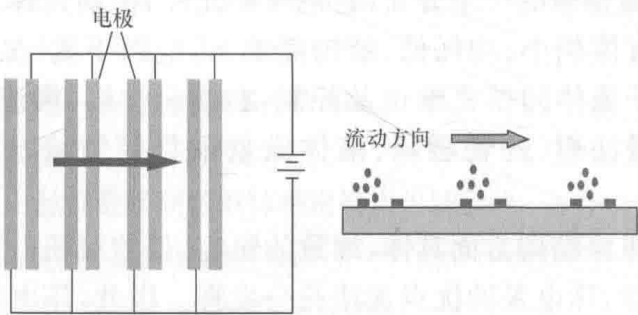


图 1.1 注入型电液动力型微泵

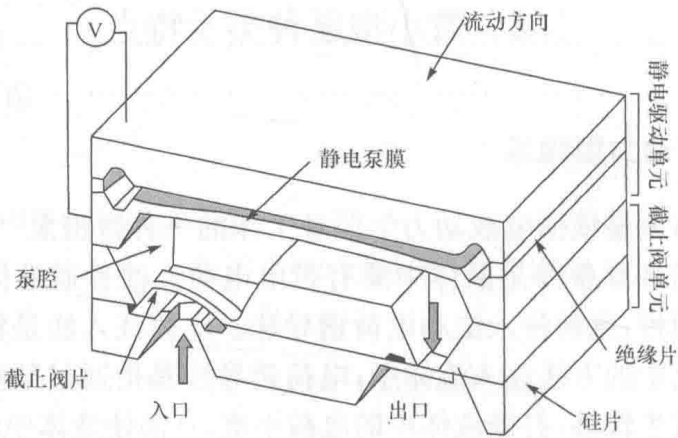


图 1.2 静电驱动型微泵

图 1.3 是另一种形式的静电驱动型微泵^[5], 泵中有 3 个极板, 中间薄膜状极板可动, 上下两个极板固定, 中间极板与下极板之间充满液体, 中间极板与上极板之间为空腔结构。在上极板与中间极板间施加静电信号, 中间极板被吸引, 向上凸起; 在中间电极和下电极施加静电信号时, 中间极板被向下吸引, 由此中间极板产生双向弯曲。该泵中单向阀的结构与图 1.2 不同, 在这里阀利用双向流阻之差, 在宏观上实现液体的定向流动, 吸水时, 左阀流阻大, 右阀流阻小, 从右阀进入泵腔的液体多, 排水时, 左阀流阻小, 右阀流阻大, 泵腔中的液体从左阀排出的多, 从整个过程来看实现了液体“右进左出”的定向输送。

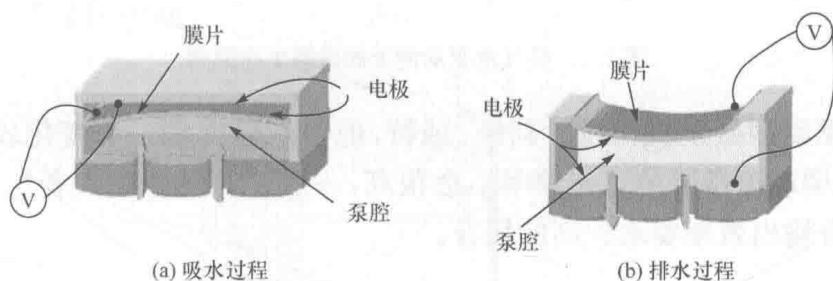


图 1.3 静电驱动型微泵工作过程

静电驱动型微泵的优点是尺寸小, 尺寸范围可从数微米到数毫米, 适合于微流体传送, 流体控制精度高, 生产工艺与互补金属氧化物半导体 (complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS) 制作工艺兼容, 如今 CMOS 生产工艺非常成熟先进, 这对于静电驱动型微泵的商品化来说是非常有利的。

1.2.3 热驱动型微泵

热驱动型微泵通过加热的方式, 使薄膜发生变形或者使泵腔内的流体发生膨胀而发生定向流动^[6~8]。

图 1.4 是热气泡驱动的无阀微泵工作原理图, 泵中间结构为驱动腔。微泵的工作过程分为气泡膨胀和气泡收缩两个阶段, 在气泡生长阶段, 腔体内气相体积增大, 驱动腔中的液体通过左右两边的管向外排出, 在排出过程中, 左管中的液体处于收缩状态, 右管中的液体处于扩张状态, 由于扩张管和收缩管对流动阻力的不对称性, 液体向左流动的阻力大于向右流动的阻力, 因此右管中流量要大于左管中流量, 产生从左向右的净流量, 反之

亦然。从宏观上看,该热气泡驱动的微泵实现了流体从左向右的定向输送。

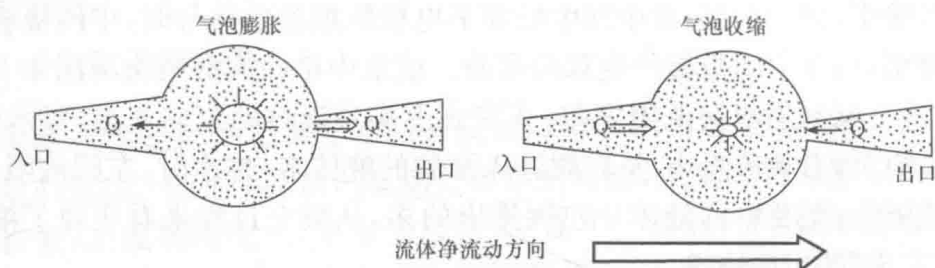


图 1.4 热气泡驱动的微泵工作原理

热驱动型微泵机构设计新颖、独特,但由于温度是一个变化较慢的物理量,热驱动型微泵的工作频率不会很高,一般只有几赫兹或者几十赫兹,不太适合输出效率要求较高的场合。

1.2.4 行波驱动型微泵

机械式微泵内含有活动部件,普遍存在加工精度保证困难、故障率高、工作寿命短等问题。近几年有人提出了一种行波驱动型微泵^[9],这种泵是在压电薄膜基片上制作两个声-电换能器,通过薄膜上产生的声表面波来驱动液体流动。

图 1.5 是行波驱动型微泵示意图,它利用管道壁的振动实现流体的输送。管道壁顶部粘接着压电陶瓷薄膜,利用压电陶瓷产生的超声振动,在输送管道壁上激起行波。该行波驱使管道壁上的质点产生与管道壁垂直

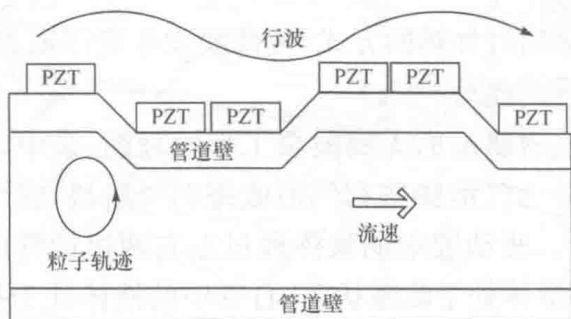


图 1.5 行波驱动型微泵

PZT 为铅钛酸铅压电陶瓷

的椭圆运动,利用管道壁的黏附作用驱动流体运动。这种微泵装置无需泵腔和微阀,在比较低的电压驱动下可产生较大的振动位移,并且可以通过改变驱动电压的相位关系方便地改变流体的运动方向。

1.2.5 电磁驱动型微泵

电磁驱动型微泵是以电磁力为驱动力的微型泵^[10,11]。图 1.6 是一个电磁驱动型微泵原理示意图,泵中含有螺线管、永磁体、膜片结构,在螺线管中输入交流信号,产生交变磁场,在交变磁场的作用下,贴在膜片表面的永磁体产生左右方向的往复振荡,使泵腔面积不断变化,在单向阀的作用下,实现流体定向运动。

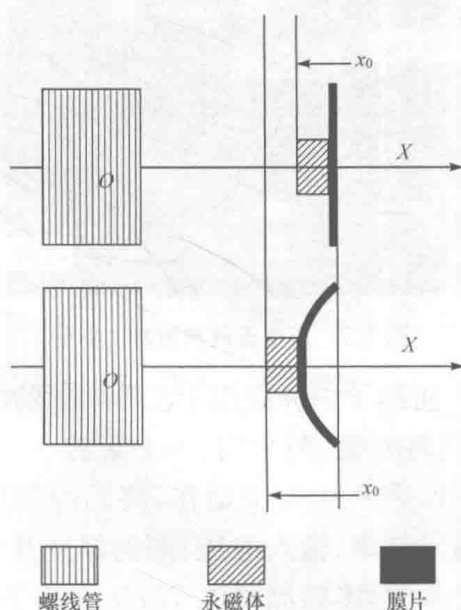


图 1.6 电磁驱动型微泵

1.2.6 压电泵

在微小型泵中,有一个重要的分支——压电泵。在压电泵中,动力来源于压电材料的逆压电效应。压电泵具有体积小、结构简单、能量密度大、无电磁干扰、工作时噪声小等优点,尤其适合于流体精密输送,在生物医疗、化学分析、喷墨打印、发动机燃料供给领域具有广阔前景,成为当前研究的热门内容。

1.3 压电泵研究现状

2008 年, Katsuhiko 等^[12]研制了一种压电无阀喷射泵, 如图 1.7 所示, 该喷射泵由 PZT 薄膜及流道构成。设计的关键在泵腔的颈部, 一个出水流道与两个相对的入水流道形成了交叉结构, 这种结构使得每个振动周期内, 流道中都产生流阻差与势能差。泵腔直径为 11.8mm, 腔高为 0.5mm, 容量为 0.055cm^3 , 当驱动电压为 30V, 驱动频率为 6kHz 时, 最大输出流量为 17mL/min。

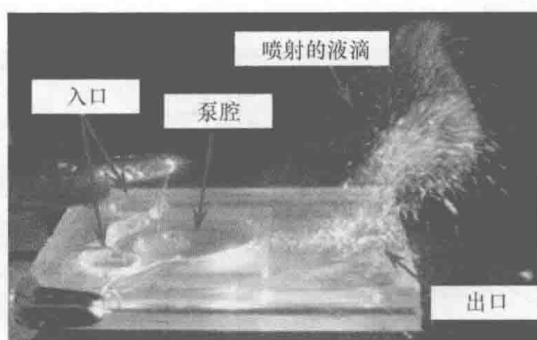


图 1.7 压电无阀喷射泵实物图

2008 年, Ma 等^[13]研制了一种应用于乙醇喷射的燃料供应泵, 如图 1.8 所示, 该泵包括一个燃料喷嘴、两个阀、一个泵腔、一个压电振子。压电器件动作使泵腔体积变化, 阀产生开关动作, 将乙醇输送到固体氧化物燃料单元中。泵腔尺寸、振动频率、输入电压、阀的厚度及形状是关系到该燃料喷射系统性能的重要参数, 实验测得在 75Hz 频率下, 燃料喷射速度可达 170mL/min, 同时, 应用该泵输送乙醇的流速要大于输送水的流速。

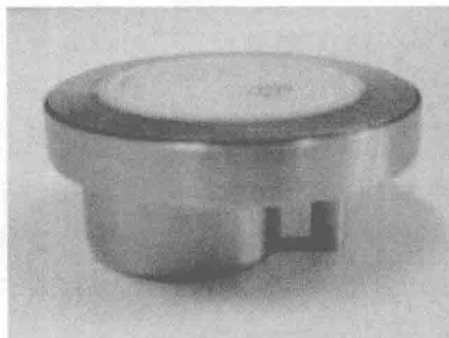


图 1.8 燃料供应泵

2008年, Ma等^[14]还提出了一种结构紧凑、重量轻的薄膜微泵, 用于液体精密控制, 如图1.9所示, 该薄膜泵有两个用铝材质通过高精度数控加工成的阀, 压电泵尺寸为 $28\text{mm} \times 5\text{mm}$, 薄膜及阀由聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 技术制造。研究发现该泵的工作性能受单向阀形状、薄膜结构、压电器件、泵腔容量、驱动信号影响。当使用 $\pm 50\text{V}$ 正弦信号驱动, 在频率为 $70 \sim 180\text{Hz}$ 时, 该泵最大流量为 $72\text{mL}/\text{min}$ 。

2009年, de Lima等^[15]设计了一种微型压电泵, 如图1.10所示, 期望用在血液泵、化学分析及小尺寸芯片温度控制方面。该泵驱动电压为 60V_{pp} , 在频率为 320Hz 时, 流量可达 $103\text{mL}/\text{min}$ 。

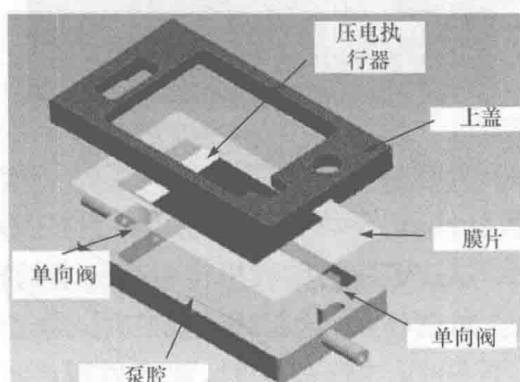


图 1.9 薄膜微泵

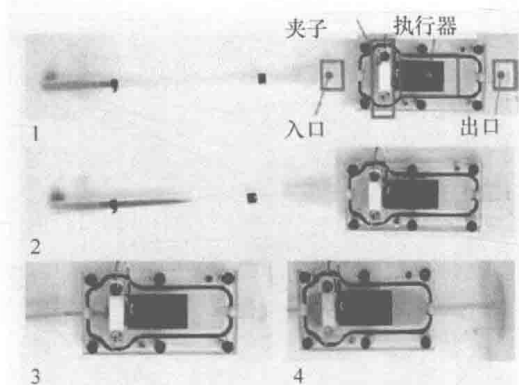


图 1.10 一种微型压电泵

2009年, 韩国学者 Kim等^[16]为微流体器件设计了一种无阀压电泵, 如图1.11所示, 将行波转动式超声电机的驱动机理应用在泵上。泵包括两个同轴圆柱外壳, 分别连着压电陶瓷环和金属基体。为了验证该泵的工作机

理,对提出的模型进行了数字化模拟仿真,制作了样机并进行实验验证。当驱动电压为 120V 时,泵的最大流量为 $580\mu\text{L}/\text{min}$,最大背压为 0.85kPa,实验结果表明,压电执行器的蠕动机理能够有效地应用到无阀微型泵中。

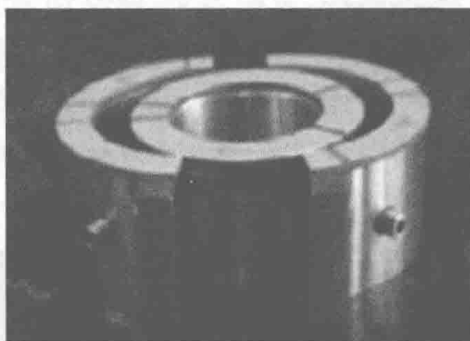


图 1.11 无阀压电泵实物图

2009 年,韩国学者 Ham 等^[17]研制了利用铰链杠杆机构放大位移的压电泵,如图 1.12 所示,该铰链杠杆放大机构包括一个基础框架、一个压电叠堆、一个安装小球的直角杠杆,小球起到支点作用,通过直角杠杆将压电叠堆输出的位移放大,用 100V 电压驱动时,放大后得到的位移可达 $683\mu\text{m}$,获得将近 10 倍的放大率。测试实验表明,该泵的最大输出压强为 6.8kPa,最大输出流量为 $600\text{mL}/\text{min}$ 。

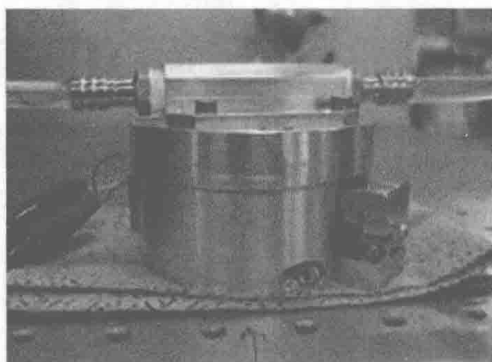


图 1.12 铰链杠杆放大位移的压电泵实物图

2011 年,Li 等^[18]设计了一种压电声学泵,如图 1.13 所示。该压电泵最大流量为 $10.8\text{mL}/\text{min}$,最高输出压强为 260kPa,具有结构简单、输出压强高、能量消耗低、出水连续性好、无泵体振动等优点。