

文章编号 1004-924X(2002)06-0619-07

压电泵的现状与发展

阚君武,杨志刚,程光明

(吉林大学 机械科学与工程学院,吉林 长春 130025)

摘要:压电泵作为一种新型压电驱动器,有着广阔的发展前景。本文综合国内外现有研究情况,分析了现有各类压电泵的结构、原理、性能、特点及应用情况,提出了压电泵目前存在的问题,并预测了未来几年的发展前景。

关键词:压电泵;压电振子;研究进展

中图分类号:TH38 **文献标识码:**A

1 引言

压电泵是压电驱动器的重要分支,它是利用压电振子作为换能器的流体传输装置。根据文献^[1],压电泵的研究可追溯到二十世纪七十年代。早期的具有代表性文献之一是美国 Sandia 国家实验室的 W.J. Spenser 于 1978 年发表的关于“电控压电胰岛素泵和阀”的文章^[2];此后,Standora 大学的 Smits 于 1980 年提出了压电液体蠕动泵^[3],1983 年,荷兰 Twente 大学利用硅微加工及薄膜技术研制多个压电驱动微型泵^[3]。基于不同结构和原理,已经提出多种不同形式的压电泵。根据压电振子能量转化方式,压电泵可分为压电薄膜泵^[2-9]和压电超声泵^[10-13]两大类。压电薄膜泵和压电超声泵的主要区别在于:压电薄膜泵是直接或间接利用压电振子机械变形来改变泵腔体积,通过阀实现流体的单向流动;而压电超声泵则是利用压电振子产生的超声波,无须借助阀即可实现流体的单向(沿着波的传播方向)流动。根据阀的结构特点,压电薄膜泵又分为有阀压电薄膜泵(悬臂梁、浮动球阀或锥型阀等)^[2-6,8,9,14]和无阀压电薄膜泵(如锥型管无阀压电薄膜泵^[15-19],温控制动阀压电薄膜泵^[20]等),每种压电薄膜泵又包括压电片驱动^[2-5]和压电叠堆驱动^[6,8]、单腔体(大多压电泵是单腔体)和多

腔体^[14,16,21,22]等多种结构。

同传统泵相比,压电泵的特点是结构简单、体积小、重量轻、耗能低、无噪声、无电磁干扰,可根据施加电压或频率控制输出流量等。因此,压电泵具有相当广泛的应用领域,在医疗^[3,5]、化学分析^[6]以及汽车发动机燃料供给^[7]等领域都可应用。目前世界上许多国家(如日本、美国、荷兰、瑞典、瑞士、英国、德国、新加坡、以色列等)都在进行压电泵的研制开发工作,而国内从事这方面研究的科研机构还很少,起步较晚,1998 年吉林大学压电驱动研究室首次发表了有关压电泵的研究报道^[19]。历经二十多年的发展,具有某些功能的小型压电型泵在日本已商品化,满足更高功能要求的压电泵正在进一步研制开发中。

2 压电泵研究现状

2.1 有阀压电薄膜泵

早期的压电泵大多属于单向阀式压电薄膜泵,以下简称有阀压电泵。它包括压电片式有阀压电泵(压电振子是单个压电片),压电叠堆式有阀压电泵(压电振子是压电叠堆)和压电片式多腔体有阀压电泵。

2.1.1 压电片式有阀压电泵

压电片式有阀压电泵的基本结构如图 1 所示。主要由泵体、薄片型压电振子和两个单向阀

收稿日期:2002-04-15;修订日期:2002-10-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 59975040)

国家 863 计划资助项目(No. 2002AA431250)

构成。压电振子往复弯曲变形振动引起泵腔体积和压力交替变化,吸程时,泵腔体积增大、压力减小,使进口阀打开、出口阀关闭,流体向腔内流动;反之,排程时,进口阀关闭,出口阀打开,流体从泵腔内排出。可见,单向阀开启和关闭是通过泵腔内压力的交替变化实现的,因此其开启/关闭动作滞后于压电振子的振动。日本山形大学铃木胜义教授等对压电片式有阀压电泵进行了试验研究^[2-3],结果表明,压电振子的工作频率有一个最佳范围,使得压电泵的输出流量最大。他们制作的压电片式有阀压电泵的最佳频率为 2~3Hz;驱动电压 120V、无负载时的最大输出流量为 110ml/min。

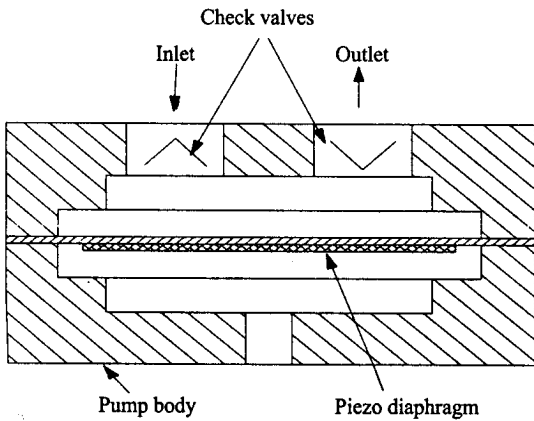


图 1 压电片式有阀压电泵

Fig. 1 Piezo diaphragm pump with check valves.

2.1.2 压电叠堆式有阀压电泵

压电片式压电泵的优点是结构简单,制作成本低;缺点在于压电振子所能承受的电压低、变形小、承载能力相对较弱。美国 Massachusetts 工学院的 H. Q. Li 等利用压电叠堆振子制作了高频率、大流量压电叠堆式有阀压电泵,其结构如图 2 所示^[8]。压电叠堆振子垂直方向变形引起腔体体积变化,吸程时腔体体积增加,迫使进口微型硅单向阀片向上弯曲,使进口打开,同时出口阀片向下弯曲,将出口关闭,液体向泵腔内流动;同理,排程时,进口被关闭,出口打开,流体从泵腔内排出。压电叠堆式有阀压电泵的特点是在高电压、高频率下工作。H. Q. Li 等研制的压电叠堆式微型压电泵(压电振子为直径 1mm、高 1mm 的圆柱形压电叠堆),在峰值电压 1200V(基压 600V)、4.5kHz、输出压力为零时的最大输出流量可达到 3ml/min。

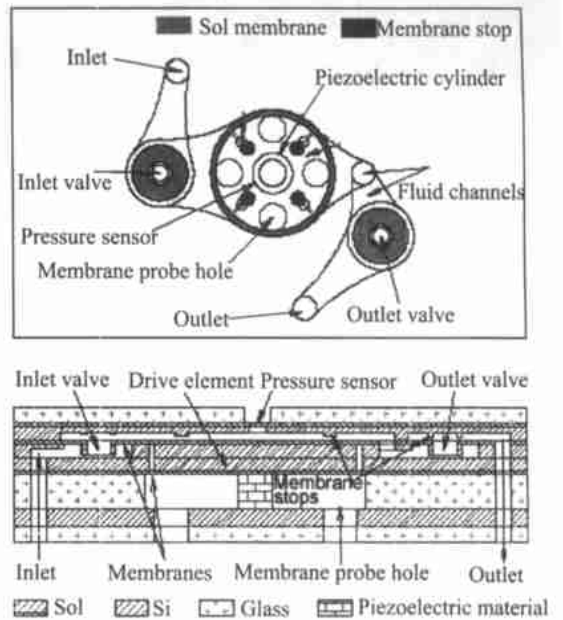


图 2 压电叠堆式有阀压电泵

Fig. 2 Piezo stack pump with check valves.

压电叠堆式有阀压电泵的一种改进形式是利用位移放大机构来增加泵腔体积的变化量,可一定程度改善泵的性能。如图 3 所示,压电叠堆振子不是直接作用在薄膜上,而是通过位移放大机构驱动薄膜,因此增加了泵腔体积的变化量,提高了压电泵的输出流量。日本计器制作所采用积层放大结构开发的压电泵已进入实用阶段,CH30-S6N01 型压电泵在施加电压 110V、工作频率 10Hz 时,其输出流量达 50ml/min,输出压力 60kPa。

有阀压电泵虽然结构相对复杂,但可实现流量精确控制。瑞士学者 Didier Maillefer 等设计一种植入式低流量微型硅截止阀压电泵,在流量为 0~0.1ml/h 的范围内,每个工作循环输出流量精度可达 ±10%^[5]。

2.1.3 多腔体有阀压电泵

有阀压电泵的性能不仅与压电振子的结构形式、工作参数有关,同时也受腔体数量及其联接方式的影响。日本机械工程实验室的 Yoshio Kojima 等^[14]为了获得连续的、低脉动的输出特性,制作了多通道、多段式(多腔体串联、分步工作)微流量有阀压电泵,该结构可以有效地提高压电泵的输出流量和压力。他们设计的三腔串联压电泵以

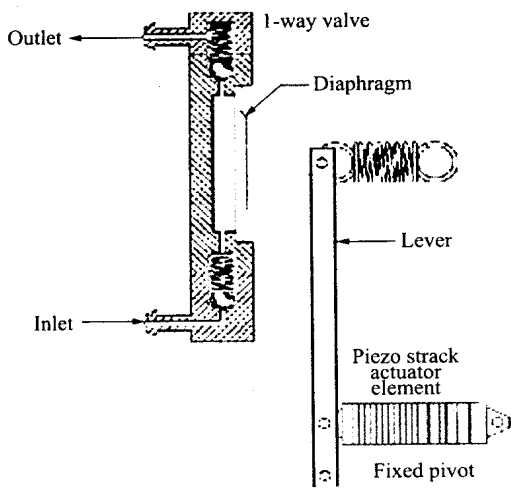


图 3 压电叠堆放大式有阀压电泵

Fig. 3 Piezo stack pump with displacement amplifier.

10Hz 的频率同步工作时,输出压力 18kPa,大约是同结构单腔体泵输出压力的两倍。他们还认为,如果在各个腔体间安装单向阀,还可使泵的输出压力进一步提高。日本东北大学电子工程系的 Shuichi Shoji 等^[6],在研究用于集成式化学分析系统的微型压电泵时,分别采用了两腔四阀(并联)两腔三阀(串联)结构,利用两个腔体交叉工作(即一个腔体吸入时,另一个腔体输出),来实现低脉动输出。在电压相同(100V)、无负载的情况下,两腔四阀泵的输出流量明显提高,工作频率 20~40Hz 时,其流量大约是相同结构单腔体泵的两倍;工作频率在 40Hz 以下时,两腔三阀泵与单腔体泵的流量无明显差别,当频率增加(低于 80Hz)时,两腔三阀泵流量有增加趋势,而单腔体泵的流量开始下降。

以上两个应用事例表明,增加腔体数量是提高有阀压电泵性能的有效途径。目前,对多腔体有阀压电泵的系统性研究还不够充分,关于腔体的数量、联接方式以及阀的安装形式等对压电泵性能的影响规律还有待于进一步研究。

2.2 无阀压电薄膜泵

有阀压电泵的结构通常较复杂,在加工工艺和集成上存在一定的难度,因此,人们又开始研制无阀压电泵,利用管道的特殊结构或流体的粘度特性等实现流体的单向流动。

2.2.1 锥型管无阀压电泵

1993 年,瑞典 Chalmers 工业大学计算机工程

系的 Erik Stemme 首次提出利用收缩管/扩张管制作无阀压电泵^[15],本文称为锥型管无阀压电泵。这种泵没有可动阀体,它是利用流体流过收缩管和扩张管的不同阻力来实现流体单向输送的。如图 4 所示,当泵腔体积变化时,液体从进口和出口同时流入或排出,但由于阀的结构特殊,每一个循环进/出口吸入和排出的流量不同。腔体增大时,进口(作为扩张管)流体压力损失小于出口(作为收缩管)流体压力损失,从进口流入液体多;相反,泵腔体积减小时,出口(作为扩张管)排出的液体比入口(作为收缩管)排出的多。因此,当泵腔体积不停地交替变化时,就形成了流体的单向流动。锥型管无阀压电泵的特点是可以实现微型化;缺点是反向止流性能差。Erik Stemme 利用直径 16mm 压电振子制作的第一个试验样机,在工作频率为 100Hz 左右时,最大输出流量为 16ml/min,最大输出压力 19.6kPa。

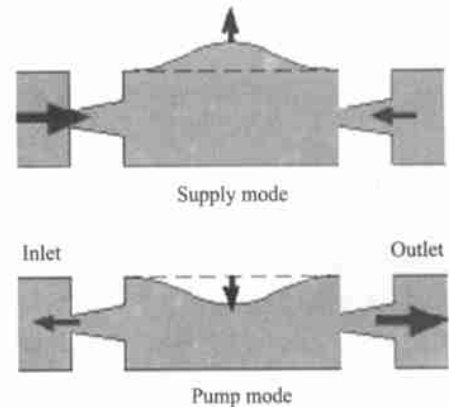


图 4 锥型管无阀压电泵

Fig. 4 Diffuser/ nozzle valveless piezo pump.

锥型管无阀压电泵是目前微流动系统最热的研究课题之一,许多国家(瑞典^[15,21,22,25],以色列^[16],德国^[7,17,18],中国^[9,26,27]等)都在进行这方面技术的研究,有些研究内容是重复性的,甚至有的研究结论似乎相互矛盾。德国 IImenau 科技大学机械工程学院的 Torsten Gerlach 等制作的锥型管无阀压电泵进出口方向(收缩管出流)^[17,18]与 Erik Stemme 设计的压电泵出口方向(扩张管出流)^[15]相反。Torsten Gerlach 认为出现这一现象的原因在于 Erik Stemme 的压电泵是用传统技术制造的,体积较大(Torsten Gerlach 制作的压电泵泵腔尺寸为 10x10x(0.4~0.7)mm³),而且进出

口采用的是细长的锥型管道,因此具有不同的流体力学特性^[17]。吉林大学压电驱动技术研究室的研究发现^[27]:锥型管无阀压电泵的出流方向与锥型管的角度有关,锥型角小于 20°时扩张管出流;锥型角在 20°~ 120°之间时收缩管出流。

同有阀压电泵一样,增加腔体数量也可改善锥型管无阀压电泵的性能。瑞典 Royal 工业大学仪表实验室 Anders Olsson 等对两个腔体并联(即将图 4 中泵的进口与进口、出口与出口分别连在一起)的锥型管的实验研究表明(1995 年)^[21],两个腔体交叉工作(一个吸入,另一个排出)比两个腔体同步工作(同时吸入或排出)的效率(压力、流量)高两倍、且输出脉动小,工作频率 540Hz 时泵的最大输出流量和压力分别为 16ml/min 和 16.7kPa。Anders Olsson 的另一项研究(1999 年)^[22]表明,串联泵两个腔体交叉工作时最大输出流量和压力都优于单腔体泵,根据仿真分析结果,他认为:减小锥型管的通流面积也可能提高输出压力。以色列 Tel-Aviv 大学工程学院的 Amos Ullmann^[16]对两个腔体锥型管无阀压电泵的各种联接情况进行了理论分析,研究结果表明,两个腔体串联比并联更能提高高压电泵的性能。

2.2.2 异型管无阀压电泵

由于无阀压电泵没有运动阀体,因此它可以输送带有悬浮颗粒的流体。美国华盛顿大学机械工程系的 Ling-Sheng Jiang 等研制一种固定阀微型泵(fixed-valve micropump),亦称为无移动阀泵(no-moving-parts valve pump),它是依靠特殊的管路形状实现流体的单向流动。为有别于其它形式的无阀压电泵,本文称为异型管无阀压电泵。图 5 是 T45/4x2 型异型管无阀压电泵结构图^[28],图中黑色区域为阀和泵腔、中间白色部分(直径最小处)是压电振子(直径为 5mm)、灰色区域是导电环氧树脂、箭头指向流体流动方向。实验表明,它可以输送直径为 3.1~ 20.3μm 的聚苯乙烯微球悬浮物,微球的密度高达 9000 粒/μl 时仍然能够正常工作,不堵塞,这相当于每秒钟有 90000 多个微球以 0.6ml/min 的速度从泵中流过。

2.2.3 温控无阀压电泵

无阀压电薄膜泵的另一形式是利用液体粘度对温度的依存关系,实现流体的单向传输。日本 AIST/MITI 机械工程实验室的 S. Matsumoto 等利用这个原理研制了温控无阀双向流体压电

泵,其工作原理见图 6^[20]。压电振子通电时,薄膜向上弯曲,腔体减小,流体压力增大,同时出口加热器通电(进口加热器断电),则出口处流体温度升高、粘度降低,从出口排出的流量较大;相反,压电振子断电时,进口加热器接通(出口加热器断开),从进口吸入的流量较多。提高压电振子的电压或延长加热器的通电时间可提高泵的输出流量。温控无阀压电泵特点是,可以通过置换进/出口加热器的相位来改变流向。

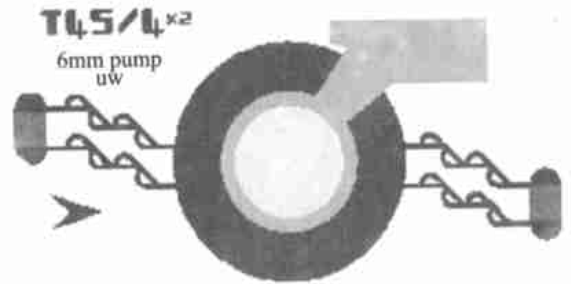


图 5 异型管无阀压电泵

Fig. 5 No-moving-parts valve pump.

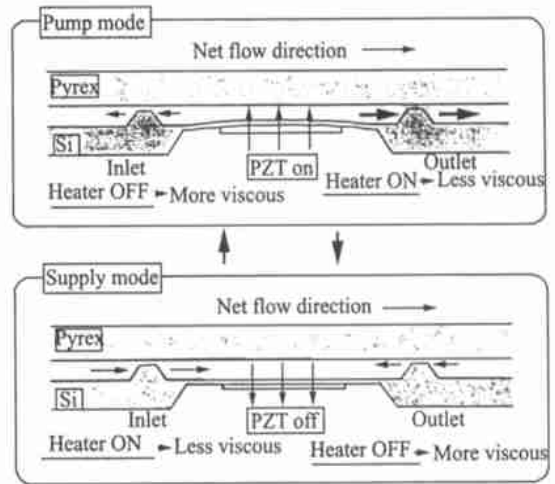


图 6 温控无阀压电泵

Fig. 6 Viscosity-based dynamic valve piezo pump.

2.3 压电超声泵

新加坡 Nanyang 科技大学和美国加利福尼亚大学共同研制一种超声弯曲平面波微型泵(ultrasonic flexural plate wave micropump),简称为超声泵(acoustic pump)或 FPW-泵,是一种无阀泵^[10]。它是基于超声流(acoustic streaming)现象实现流体输出的,当弯曲波在薄膜内传播时,在靠

近薄膜的液体内出现了高强度超声场,它促使超声场内的液体沿着超声波的行进方向流动。压电超声泵的特点是:工作电压低,不发热,而且对所传输的液体/气体类型没有限制,可用于传输包含DNA及其它生物试样的液体等。加利福尼亚大学的 Audra H. Meng 等利用辐射超声波振子(radial transducer)制作了压电超声泵(结构及原理详见文献[12]),在输入电压为12V、工作频率3.79MHz时,可获得最大输出流速1.15mm/s;另外,辐射超声波振子还成功地把直径2nm的聚苯乙烯球聚束,使其通过宽度不足100nm的束腰(beam waist)。

美国喷气驱动实验室,即JPL(Jet Propulsion Laboratory),为美国国家航空和宇宙航行局(NASA)研制了一种弯曲行波驱动的压电蠕动泵^[11,13]。这种压电超声泵是基于压电马达原理,将两个膜片按图7方式固定,由两组压电振子分别驱动,使之波的传播保持同步,这样在两个膜片交界面上行波波峰之间就形成了多个腔体(其中充满了液体/气体),腔体交替地形成与关闭将带动流体沿着波的行进方向流动。目前,该泵最大输出压力1.1kPa,流量4.5ml/min,工作频率为数十kHz,进一步的理论分析和实验研究仍在进行。

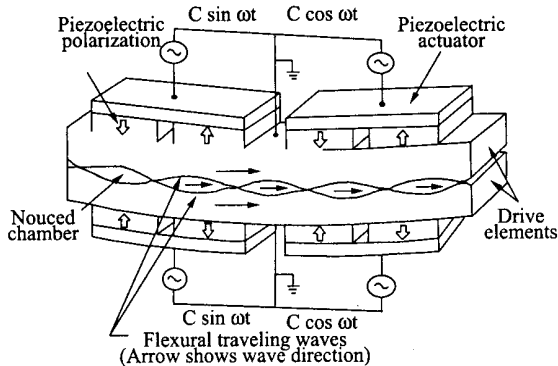


图7 压电超声泵

Fig. 7 Piezoelectrically actuated peristaltic pump.

3 压电泵的应用与发展

目前所研制的压电泵大多是微型泵(micropump),Peter Woias在“微型泵前20年的总结与回顾^[1]”一文中列举(引用)最早、最多的都是压电泵。历经二十多年的发展,压电泵的研究开始由理论研究向实用性研究方向迈进。日本计器制作

所生产的各种小型有阀压电泵已投放市场,可用于血液输送、微小部件清洗、粘接剂喷涂、化学分析等领域。日本山形大学铃木胜义教授正在进行小型压电泵改进开发工作,以期通过改进泵的结构(如多腔体)来提高性能价格比。同传统泵相比,压电泵有很多优点,但是,从试验样机发展到可靠的、易于应用的产品还存在许多困难。实际应用表明,对用户来说,目前在操作上还存在较大的难度,不足之处主要在于:微型泵灌装操作太困难、再现性不好;另外一点是可靠性低。

综合目前的研究结果不难发现,大流量(大于1ml/min)的压电泵性能相对较好,结构相对简单,易于加工制作;可是,有许多应用场合要求流量低(一般小于1 μ l/min)、控制精确,如植入式(人体/动物体)药品注入系统等。这种情况下,就要求泵的使用寿命长(大于10年)、安全可靠、流量精确,并且不受外界环境影响。这种性能优越的压电泵不仅限于应用于药品注入系统中,还有其他潜在的应用领域,如微化学分析和基因工程等领域。具有这种功能的压电泵尚在研制之中,距离实际应用还有相当长的距离。

压电泵是集机械、电子、材料以及流体等诸多学科于一体的综合性研究课题,研究机构遍布世界十几个国家,研究的重点也由以前的结构原理型向实用化方向转变,研究内容包括:仿真分析、优化设计^[10,22,24,30,31],加工方法^[25],以及适于规模化生产的新型压电材料(硅复合压电薄膜)^[9]。压电泵总的发展趋势是向着高压、大流量,以及结构尺寸微小化、低能耗、输出流量高精度方向发展。

同其他国家相比,我国压电泵研究较晚,有关的理论与试验尚处于起步阶段,在未来的几年里我们应该着重解决压电泵的实用性研究方面的问题,主要包括:

- (1) 结构分析及参数优化设计:主要包括腔体、阀及管道尺寸因素分析与设计,多腔体压电泵的联接特性等;
- (2) 产品部件化:开发耗能低(低电压、高频率或可用直流电驱动)、集成化的便携式控制系统,如便携式医用点滴注射器、内植式自动给药系统等;
- (3) 开发压电控制主动阀,实现高频下流量的精确控制。

参考文献:

- [1] Woias P. Micropumps-summarizing the first two decades [J]. *SPIE*, 2001, 4560: 39-52.
- [2] Spencer W J, Corbett W T, Dominguez L R, *et al.* An electronically controlled piezoelectric insulin pump and valves [J]. *IEEE Trans. Sonics Ultrasonics*, 1978, *SU-25*(3): 153-156.
- [3] van Lintel H T G, van de Pol F C M, Bouwstra S. A piezoelectric micropump based on micromachining of silicon [J]. *Sensors and Actuators*, 1988, 15: 153-167.
- [4] Linnemann R, Woias P, Senff C D, *et al.* A self-priming and bubble-tolerant piezoelectric silicon micropump for liquids and gases [A]. *Proc. of the 11th IEEE MEMS 1998 Technical Digest* [C]. Heidelberg, Germany, 25-29, 1998: 532-537.
- [5] Mailefer D, van Lintel H, Mermet G R, *et al.* A High-performance silicon micropump for an implantable drug delivery system [A]. *Proc. of the 12th IEEE MEMS 1999 Technical Digest* [C]. Orlando, Florida, USA, 1/17-21/99: 541-546.
- [6] Shoji S, Nakagawa S, Esashi N. Micropump and sample-injector for integrated chemical analysis system [J]. *Sensors and Actuators A*, 1990, 21-23: 189-192.
- [7] Ederer I, Raetsch P, Schullerus W, *et al.* Piezoelectrically driven micropump for on-demand fuel-drop generation in an automobile heater with continuously adjustable power output [J]. *Sensors and Actuators A*, 1997, 62: 752-755.
- [8] Li H Q, Roberts D C, Steyn J L, *et al.* A high frequency high flow rate piezoelectrically driven MEMS micropump [A]. *Proceeding IEEE Solid State Sensors and Actuators Workshop* [C]. Hilton Head, 2000.
- [9] Michael K, Nick H, Evans A L G R, *et al.* A novel micromachined pump based on thick-film piezoelectric actuation [J]. *Sensors and Actuators A*, 1998, 70: 98-103.
- [10] Nguyen N T, White R M. Design and optimization of an ultrasonic flexural plate wave micropump using simulation [J]. *Sensors and Actuators*, 1999, 77: 229-236.
- [11] Cohen Y Bar, Chang Z. Piezoelectrically actuated miniature peristaltic pump [J]. *SPIE*, 2002, 3992: 669-676.
- [12] Meng A H, Nguyen N T, White R M. Focused flow micropump using ultrasonic flexural plate waves [J]. *Biomedical Microdevices*, 2000, 2(3): 169-174.
- [13] Cohen Y B, Chang Z. Piezoelectrically actuated miniature peristaltic pump [J]. *SPIE*, 2001, 4327: 425-432.
- [14] Kojima Y, Okusawa T, Tsubouchi K, *et al.* Fundamental investigation of a piezoelectric pump for a trace liquid feed [J]. *JSME International Journal. Series C*, 1995, 38(3): 531-537.
- [15] Stemme E, Stemme G. A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump [J]. *Sensors and Actuators A*, 1993, 39: 159-167.
- [16] Ullmann A. The piezoelectric valve-less pump—performance enhancement analysis [J]. *Sensors and Actuators A*, 1998, 69: 97-105.
- [17] Gerlach T, Schuenemann M, Wurmus H. A new micropump principle of the reciprocating type using pyramidal micro flowchannels as passive valves [J]. *J. Micromech. Microeng*, 1995, 5: 199-201.
- [18] Gerlach T, Wurmus H. Working principle and performance of the dynamic micropump [J]. *Sensors and Actuators A*, 1995, 50: 135-140.
- [19] 程光明, 杨志刚, 曾平, 等. 压电薄膜流体泵的初步研究 [J]. *压电与声光*. 1998, 20(4): 233-236.
- [20] Matsumoto S, Klein A, Maeda R. Development of bi-directional valve-less micropump for liquid [C]. *Proc. IEEE MEMS*, 1999: 141-146.
- [21] Olsson A, Stemme G, Stemme E. A valve-less planar fluid pump with two pump chambers [J]. *Sensors and Actuators A*, 1995, 46-47: 549-556.
- [22] Olsson A, Stemme G, Stemme E. A numerical design study of the valveless diffuser pump using a lumped-mass model [J]. *J. Micromech. Microeng*, 1999, 9: 34-44.
- [23] 铃木胜义, 鹿内元治, 深泽宏之, 等. 压电ポンプの研究 [A]. 日本机械学会东北支部讲演会论文集 [C]. 1997.
- [24] Richter M, Linnemann R, Woias J. Robust design of gas and liquid micropumps [J]. *Sensors and Actuators A*, 1998, 68: 480-486.

- [25] Olsson A, Larsson O, Holm J, *et al.* Valve-less diffuser micropumps fabricated using thermoplastic replication [J]. *Sensors and Actuators A*, 1998, 64 : 63-68.
- [26] 程光明,杨志刚,曾平,等. 锥型阀压电薄膜泵的初步研究[J]. 压电与声光,1998, 20(5):300-303.
- [27] 李军. 无阀压电泵的流体动态特性及工作机理研究[D]. 长春:吉林大学,2001.
- [28] Jiang L S, Morris C J, Sharma N R, *et al.* Transport of particle-laden fluids through fixed-wave micropump [J]. *Microelectromechanical Systems (MEMS) ASME*, 1999,1:503-509.
- [29] Smits J G. Piezoelectric micropump with three valves working peristaltically [J]. *Sensors and Actuators A*, 1990, 21-23:203-206.
- [30] Christopher J M, Forster F K. Optimization of a circular piezoelectric bimorph for a micropump driver [J]. *J. Micromech. Microeng.*,2000,10: 459-465.
- [31] 张建辉,夏齐霄,王大康,等. 抽样定理在周期性非连续信号的压电泵气穴现象中的应用方法[J]. 光学精密工程, 2002,10(5):476-482.

Research on piezoelectric pump and its development

KAN Jun-wu, YANG Zhi-gang, CHENG Guang-ming

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract : Piezoelectric pump, a new type of piezoelectric actuator, has many potential applications in the future due to its characteristics. Based on public literature, the state of research progress for a piezoelectric pump is surveyed in this paper, including its structure and principle. The performance is described, the application and main trends are also discussed.

Key words : piezoelectric pump; piezoelectric vibrator; research progress

作者简介:阚君武(1965-),男,吉林省榆树县人,吉林大学讲师,在读博士研究生,2000~2001年赴日本山形大学学习压电驱动与控制技术,现主要从事压电驱动微型泵的研制与开发。E-mail:jutkw@yahoo.com.cn