

双隔膜泵

Honeywell Intl., Plymouth, MN 55441

霍尼韦尔实验室

Cleopatra Cabuz, William R.Herb, Eugen I.Cabuz, Son Thai Lu

摘要

这篇论文报告了在泵输送微量和半微量气体方面的主要改进，而气体的输送是使用了新开发的静电致动的双隔膜泵(DDP)。该 DDP 使用一个变形的泵增压室和两片静电致动的结构隔膜，从而能够进行准确的(流量)调整。DDP在约为 $1.5 \times 1.5 \times 0.1 \text{cm}^3$ 的满泵量下，演示的流量为 30ml/min，耗电量约为 8mW。DDP 在结构上是完全对称的，能准确地进行双向操作；本质上存在零死区；并可精确测量。为增加泵排量，单独的泵输送通道可以 1D, 2D 和 3D 阵列制造。此特点能使单独的泵输送通道最优化，以获得静电致动条件下最好的性能，让测量的泵排量达到所要求的排量。2×3×5 阵列的泵已作了成功的演示。DDP 阵列每分钟输送 4 升，将比市场上可购得的最先进的(空)气泵[3]在排量上约小 4 倍，耗电量也约小 4 倍。

简介

化学和生物控制检测技术的最新发展已使检测器的灵敏度得到很大的提高，同时其尺寸、重量和成本也有明显的降低。业已证实便携式系统能检测到万亿分之几含量的痕量爆炸物，并可将该系统应用于解决地雷检测的难题上[1]。传统的爆炸物检测器是地面安装的仪器，其尺寸为许多立方英尺。同时，目前正在开发一种能检测到每立方米空气含 1 个微生物的生物检测器。当必须检测气相分析物或大气中的颗粒(尘埃)时，为增加检测概率和缩短检测时间，通常使用取样系统。泵并没有跟上检测技术方面的发展，因而一种可靠、小型、低功率、低成本、高排量、形状简单的泵经常列在系统开发者希望开发项目的清单中。

适用于便携式系统的泵应有非常高的质量因数(FOM)，该质量因数被定义为泵排量/耗电量/重量。小于 1psi 的压头，对提供通过过滤器或限流器的泵送能力来说已足够富裕。同样对于多检测器系统，高度叠装陈列的泵可提高系统的适应性。在使用固体颗粒过滤器的取样系统中，泵双向输送是一个非常有用的特性，因为它能提供清洗过滤器的能力。此外，泵双向输送也可用作作为智能型取样系统中的另一个特征。

我们以前发表的关于半微量泵的论文已对上述许多要求[2,3]作了强调。但由于半微量泵使用的

是多-增压室蠕动泵，所以其泵送效率较低。最新开发的 DDP，将增压室从 4 个降至 1 个，从而使尺寸缩小 3 倍，功率降低 2 倍，而泵排量与具有相同尺寸增压室的泵相比，提高了约 50%。

本文将详细叙述双隔膜泵的结构、工作原理、制造和测定参数。我们将说明霍尼韦尔的双隔膜泵对各种便携式系统来说是一个富有吸引力的选择。

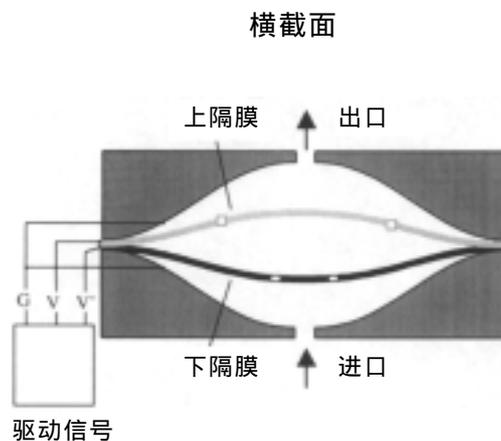


图1 双隔膜泵 (DDP) 的简要结构

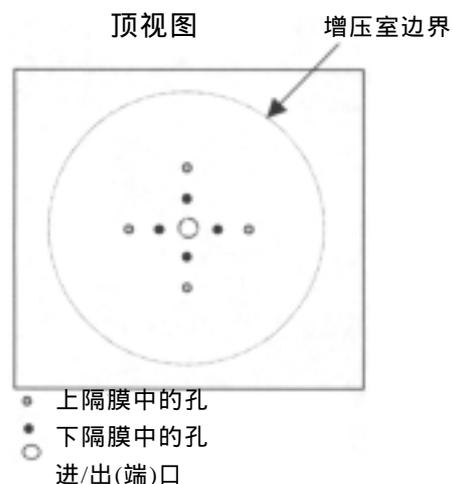


图2 隔膜通孔和进/出(端)口的相对位置

双隔膜泵的工作原理

图 1 所示为 DDP 的简要结构。该泵由一个增压室和两片薄隔膜组成。泵增压室和两片隔膜的每个表面上都有一层非常薄的覆盖有电介质的金属电极。隔膜上有数个通孔，通孔相互之间是不重合的，与进/出(端)口也是不重合的(图 2)。当任一片隔膜完全偏离且被静电夹在泵增压室上或下室壁上时，该隔膜关闭了相对应的进/出(端)口。当两片隔膜被夹在一起时，它们作为一片密封的隔膜移动，沿要求的方向推挤空气。图 3 对工作顺序作了确切说明。

增压室上下室壁上的电极连接在一起接至接地线(G)，每片隔膜两侧的电极被连接在一起，于是具有了图 1 中所示的三个电气连接接头。

泵的工作分为 3 个阶段。在第 3 阶段结束(步骤 3a)时，两片隔膜被夹在泵增压室下室壁上。这是通过对下隔膜施加了一个电压 V，而此时上隔膜与接地线相连实现的。在第一阶段中，电压 V 从下隔膜切换到上隔膜，并将下隔膜接地。

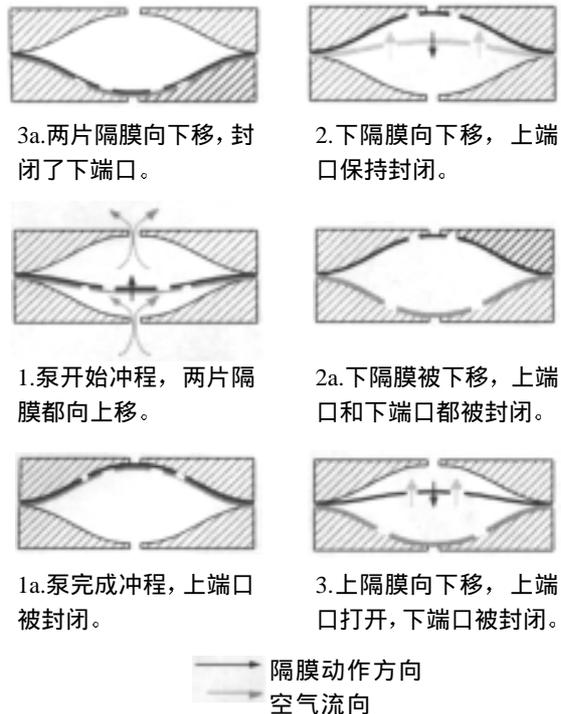


图 3.DDP 三个阶段的工作

这样，两片隔膜继续被静电夹在一起，封闭彼此的孔，但它们开始朝着增压室上室壁移动。在此阶段，增压室内的空气常被压出出口，同时空气通过进口回充到增压室。在第一阶段结束(步骤 1a)，两片隔膜都贴在增压室上室壁上，将室内的空气量

全部压出并封闭出口。在第二阶段中，两片隔膜都连接在驱动电压 V 上。这样使它们彼此分开，且下隔膜移向下室壁。因为隔膜上有通孔，其流动阻力小于进口的流动阻力，所以不会有空气通过进口被压回来。在步骤 2a 中，下隔膜被完全夹在增压室下室壁上，于是封闭了进口。在第 3 阶段中，上隔膜被连接到接地(线)，于是它与上室壁分开，并被吸向下隔膜。同上一部一样，因为隔膜上孔的流动阻力相对低于出口的流动阻力，所以隔膜在增压室中移动时不会在出口产生空气净吸入量。在第三阶段结束时(步骤 3a)，两片隔膜被夹在下室壁上，此时可开始新的 3-阶段循环。实质上，泵有一个零死区，可提供精确的(流量)调整。

泵的制造

泵增压室是用注塑成形方法制造的。可使用各种各样的塑料制造以满足不同的应用需要。电极是通过蒸发沉积的，一种薄型电介质材料是用离子束溅射方法沉积的。隔膜是用金属化的 Kapton 制成的。电介质薄层是用浇铸法贴覆上去的。泵用机械方法组装。制造工艺简单、可靠。

当前设计中采用的增压室既大又深，以便使泵能产生高的排量。较浅的增压室有一个稍作改进的外形，使用这种增压室和更厚的隔膜会产生更高的压头[4]。

实验结果

报告结果说明双隔膜泵有以下的功能参数：测得的每台泵的流量及其与驱动电压和驱动频率的关系；流量与泵输送方向和压头的关系。

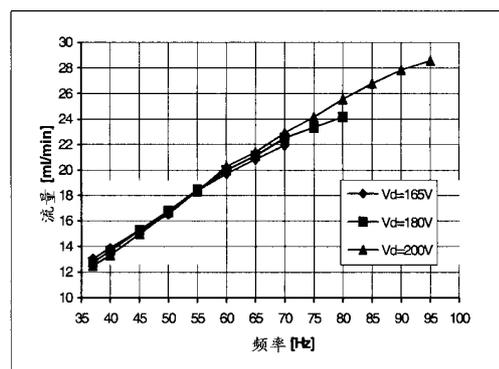


图 4. 不同驱动电压电平下流量与工作频率的关系

图 4 所示为流量对驱动频率和驱动电压的依赖关系。泵在其工作频率范围内可协调稳定地运行。与其它泵的不同之处是流向可随驱动频率的变化而改变。此类装置(泵)在温度范围[5,6]内可能会

出现稳定性的问题。建议的 DDP 流量可通过驱动频率得到可靠的控制。大的驱动电压可使泵在更高频率下运行，结果产生更高的最高流量。

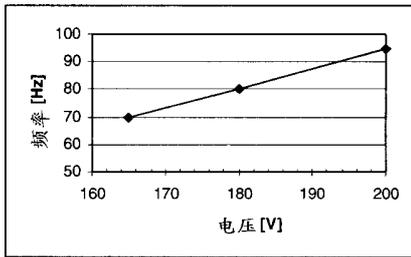


图 5. 电压测得的最高驱动频率对驱动电压幅度的依赖关系

图 5 所示为在有用的电压范围内，最高驱动频率对驱动电压幅度有线性的依赖关系。

图 6 所示为流量与时间的关系，这是在工作频率下一台 Micro Switch (微型开关) AWM3100V 空气流量传感器测得的。测量结果表明无回流。

(流量)调整效率可通过比较测得的每冲程泵送空气量与按几何尺寸计算所得的增压室容量来估算。关于不同电压和不同驱动电压下隔膜实际位移的精确数据是用一台激光振动测量仪采集的。在 66Hz 和 200V 驱动频率下，测得的每冲程容量约为 5.5 微升。在考虑隔膜实际位移时，流量是在增压室几何容积的 99% 范围内。这表示相比以前公布的半微量泵有所改进，在以前的半微量泵中观察到的回流量约是总流量的 15%，每冲程的总流量约是增压室容积的 75~80%。

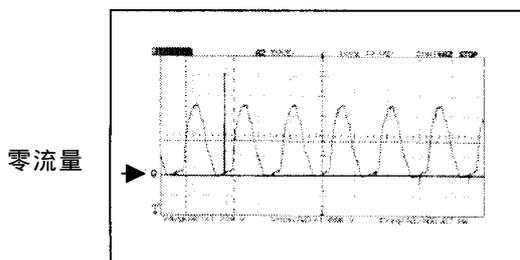


图 6. 用霍尼韦尔流量传感器 AWM3100V 测得的泵流量对时间的曲线

已在所有频率和驱动电压下测定了两个方向上的泵排量。在两个方向上的泵排量为相等的情况下，得出了泵送过程呈现精确对称的结论。泵送方向的改变可通过手动操作开关实现或由计算机控制。可容易生成任何流型(流量和流向)。

当前设计的双隔膜泵，其压头测定值约为 20 厘米水柱。但是可以容易地将泵一台台叠装在一起，从而产生的压头是单独泵压头的数倍。同样如前所述，在要求更高压头的应用场合可使用较浅的增压室。

采用滚动接触的静电驱动器在可靠性方面被认为是难对付的设备。但双隔膜泵中所采用的结构、工作模式和材料使它成为一台可靠的设备。该泵在输送过滤过的空气时可运行数天而不改变其性能。它也能以未过滤的室内空气运行许多小时而性能不变。具体的环境和使用寿命试验正在进行中。初步结果表明环境湿度从 15% 变化到 70% 不会影响泵的运行。

2×3×2 阵列的泵已组装好。阵列的尺寸为 4.5×3.5×0.4cm³。在驱动电压为 160V 时测得的泵排量为 230ml/min，泵排量随驱动电压和驱动频率而增加。阵列的整体尺寸在制成了泵联轴节的专用部件后会进一步减小。

在最高流量时每台泵的耗电量约为 8mW。泵的耗电量随驱动频率和随 V² 而线性变化。已将双隔膜泵的性能与市场上可购得的由 KNF[7]制造的泵作了比较。对于最大流量可达到 300 ml/min 的泵来说，在被定义为泵排量/耗电量/尺寸的 FOM(质量因素)方面，我们的泵约比 KNF 泵要好上约 10 倍。对于更大排量的泵(每分钟约 4 升)，则要好上 20 倍。

结论

本文介绍了一种新型空气泵，它被认为是微量和半微量规格范围内结构最紧凑，有最多功能和最有效的空气输送装置。该泵是用注塑成型方法制造的，经过后处理后，形成了电极和电介质层。该泵可进行双向输送，实际上有一个零死区，显示出卓越的(流量)调整作用。该泵可很容易地以高度叠装阵列的方式连接，以提高泵排量或增加压头。2×3×2 的阵列已作了演示，2×3×30 的阵列正在组装过程中。单个泵的泵排量在以阵列使用时是不会降级的。此泵的特殊性能使它在便携式的和易磨损的应用中获得首选。但在许多其它应用中会利用此泵成本低、功率低和多功能性方面的优点。该泵还显示出良好的可靠性。全面的质量鉴定正在进行中。

参考资料

1. S.Perkins “电子鼻为将来提供新的自动检测”，*科学新闻*，157 卷，2000 年 2 月 19 日，第 125-127 页
2. C.Cabuz, E.Cabuz, T.Rolfer, W.Herb, D.Zook, “以 3D 阵列的静电致动隔膜为基础的半微量取样品”，1999 年 6 月 7 日-12 日，日本仙台，关于固态传感器和执行机构，变换器第十次国际会议会刊

3. M.M.Athavale, H.Y.Li, H.Q.Yang, A.J.Przekwas, W.Herb, C.Cabuz, “BEAD 半微量泵联在一起的静电 (元件)-结构-射流模拟”, 国际机械工程师代表大会和展览会会刊, 1999 年 10 月, 美国田纳西州、纳什维尔
4. M.T.A.Saif, J-MEMS 第 8 卷 (1999), 第 335-345 页
5. W.van der Wijngaart, H.Andersson, P.Enoksson, K.Noren, G.Stemme, “液体和气体使用的第一台自动起动充满的和无阀双向导向叶片的微型泵”, 关于微电子机械系统第 13 届国际会议, 日本 Myiazaki, 2000 年 1 月 23-27 日, 第 674-679 页
6. R.Zengerle et. Al, “双向硅膜微型泵”, 传感器和执行机构杂志, 第 A50 卷(1995), 第 81-86 页
7. KNF Neuberger 公司, www.knf.com

致谢

此文成功发表感谢霍尼韦尔实验室的 Stephanie Poisson, Khanh Nguyen, Jay Schwichtenberg, Leonard Hilton 和 Jerry Bolser 先生的大量工作和奉献。David Zook 先生提供了新的发展理念。David Arch 先生是此项目强有力的支持者。工作经费是按 DARPA 合同 DABT-63-97-C-0071 获得的。衷心感谢 DARPA 的 Bill Warren 先生热情的支持和有效的辅导。