

# 压电泵的研究——泵阀滞后性

张建辉 王大康

(北京工业大学机电学院 北京 100022)

王守印

(中国科学院长春精密光学研究所)

小贯晃义

(日本山形大学工学部 山形 992-8510)

摘要: 就有阀压电泵增频流量骤减现象进行了分析与研究。发现了现有提高频率使压电振子振幅减小为增频流量骤减现象主要成因的说法是一种错误解释, 并通过试验证明了现有理论的非正确性。提出了解释增频流量骤减现象成因的泵阀滞后性模型, 同时开发了观察这种现象的具体新方法及观测新装置, 并利用这一新装置观察到了泵阀滞后现象。提出了可以评价、考察有阀压电泵的泵阀的量化值——滞后系数, 并把其作为泵阀优化设计的具体目标。

关键词: 泵 压电泵 阀 泵阀滞后性 优化设计

中图分类号: TH32

## 0 前言

20 年前, 日本航空宇宙技术研究所的 T. Narasaki<sup>[1]</sup>首先开拓性地发明了使用具有逆压电效果的压电陶瓷作为动力装置的压电泵。从理论上讲, 压电泵具有机电转换效率高、构造简单和控制方便等特点, 所以, 除可以替代小型往复式泵之外, 还可以应用于微小流体机械领域。同时, 压电泵在工作时不产生电磁场, 对于医疗、卫生和保健等领域都有广泛的应用的前景。

由于压电泵的压电振子的振幅很小, 一次振动往复的容积变化也很小, 所以一次振动往复所产生的泵流量也很少。要想提高泵流量, 只有采用提高压电振子的振动频率的方法。可是, 使用了蝶形阀、板阀、球阀及锥阀的压电泵, 增频后均出现了泵流量骤减的现象<sup>[2~5]</sup>。

铃木等于 2000 年底把增频流量骤减现象的主要成因错误的解释为: 提高频率使压电振子的振幅减小, 进而流量降低<sup>[5]</sup>。如果不能正确的解决增频流量骤减现象问题, 有阀压电泵的实际应用将受到严重影响。

首先介绍增频流量骤减现象并通过试验证明铃木理论分析的非正确性; 然后提出解释增频流量骤减现象成因的泵阀滞后性模型; 同时提出观察这种现象的具体新方法及开发实际观测新装置, 并利用这新装置观察泵阀滞后现象; 最后提出滞后系数概念用以评价泵阀的优劣。

## 1 有阀压电泵

图 1 所示为典型的有阀压电泵。其结构主要是由泵体、压电振子、吸入与吐出阀三大部分组成。压电振子是压电陶瓷片与金属振动放大片的粘贴复合体, 其作用是把电能转换为变形机械能, 从而使具有逆压电效果的压电陶瓷为主体的压电振子成为泵的动力装置。这种电能—机械能的转换器具有转换效率高、构造简单和控制方便等优点。

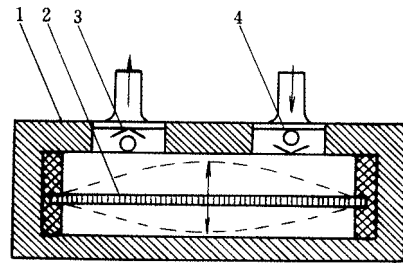


图 1 有阀压电泵

1. 泵体 2. 压电振子 3. 吐出阀 4. 吸入阀

到目前为止, 有阀压电泵的吸入与吐出阀都在使用小型往复式泵所利用的蝶形阀、板阀、球阀及锥阀等阀体。

## 2 增频流量骤减现象

为了便于说明, 采用文献<sup>[5]</sup>所使用的锥阀压电泵来介绍其增频流量骤减现象。锥阀压电泵频率  $f$  与流量  $q_v$  关系曲线如图 2 所示。频率在 3 Hz 以下时, 频率与流量均为递增; 可是频率超过 4 Hz 时,

随着频率的增加，流量呈现递减。把随频率增加而出现的流量快速减少称为增频流量骤减现象。

这种现象不仅仅存在于锥阀压电泵，而且存在于有阀压电泵；更广泛地说，存在于全部往复式泵，只是低频时表现不明显罢了。

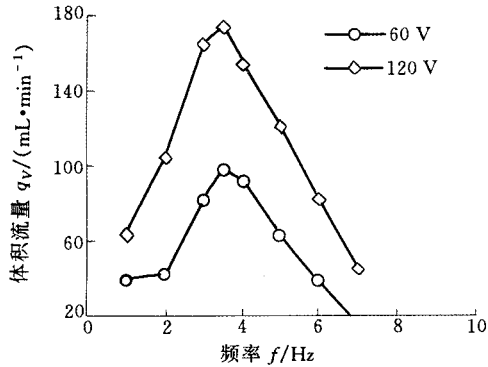


图 2 锥阀压电泵频率与体积流量曲线

铃木等撰文，把有阀压电泵增频流量骤减现象的主要成因解释为：提高频率使压电振子的振幅减小，进而流量降低<sup>[5]</sup>。

压电振子的往复运动所产生的容积变化，理论上等于泵瞬时流量。其变化量  $\Delta V_{th}$ ，表示如下<sup>[6,7]</sup>

$$\Delta V_{th} = 2\pi \left[ \int_0^R w(r, t_2) dr - \int_0^R w(r, t_1) dr \right] = q_{V,th} \quad (1)$$

式中  $w(r, t)$ ——圆板型压电振子上任意点  $r$  瞬时振幅

$R$ ——压电振子的半径

$T$ ——时间

$t_1, t_2$ ——任意时刻

由式(1)可精确地计算出理论泵流量  $q_{V,th}$ ，在此采用简化模型算出理论泵流量  $q_{V,th}$ ，简化模型由下式给出

$$\begin{cases} q_{V,th} = \pi R h w_{max} \\ h = \sqrt{R^2 - (R - w_{max})^2} \approx \sqrt{2R w_{max}} \\ w_{max} = w(R, t_{w \rightarrow max}) \end{cases} \quad (2)$$

压电振子的频率  $f$ 、振幅  $w$ 、理论泵流量  $q_{V,th}$  以及实际泵流量  $q_{V,r}$  (mL·min<sup>-1</sup>) 如表 1 (施加电压  $U=60$  V，压电振子半径  $R=25$  mm)。为了对应文献<sup>[5]</sup>，这里只采用 2~10 Hz 的频率范围。由简化模型式(2)所计算的理论泵流量将小于式(1)的精确理论泵流量。即便是这样，理论泵流量  $q_{V,th}$  也远远大于实际泵流量  $q_{V,r}$ 。

增加频率将会提高泵流量，减少振幅将会减少泵流量，由图 3 可知，随着频率的增加振幅是在减小，但是理论上其综合影响，根据式(2)及表

1 所示数据，至少在频率达到 200 Hz 时(数值计算只计算到 200 Hz)，不会出现泵流量随频率增加、振幅减小而产生极值后减少现象，在频率达到 200 Hz 之前，泵流量为单调递增。表 1 所示 2 Hz 到 10 Hz 之间，振幅的减小不是使泵流量明显减少的原因。

表 1 频率、振幅、理论泵流量及实际泵流量

频率 $f/\text{Hz}$	振幅 $w/\text{mm}$	理论泵流量 $q_{V,th}/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$	实际泵流量 $q_{V,r}/(\text{mL} \cdot \text{min}^{-1})$
2	0.089	1 761	42
3	0.089	2 642	81
4	0.088	3 482	91
5	0.089	4 403	62
6	0.088	5 222	38
7	0.087	6 024	15
8	0.087	6 885	-
9	0.087	7 746	-
10	0.086	8 506	-

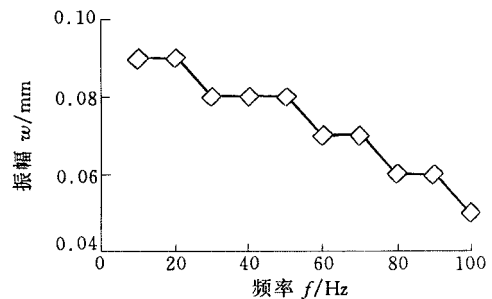


图 3 有阀压电泵压电振子的振幅随频率变化曲线

### 3 泵阀滞后性

有阀压电泵是利用压电振子电能转变机械变形能，进而产生容积变化的换能器，由于流体传递振动机械能时要耗时，另外泵腔内的流体也并非不可压缩。所以被动开启与关闭的泵阀随着振动频率的提高，开启与关闭将滞后于压电振子的运动。吸入过程时，吸入阀开启的滞后使流入泵腔的流体量少于容积变化量，吐出阀关闭的滞后使已流出泵腔的流体回流至入口。当振动频率达到某种水平时，有阀压电泵将出现动态平衡，这时宏观上流量下降至零。在此把这种泵阀的运动落后于压电振子运动的行为称为泵阀滞后性。

如果把压电振子吸入与吐出过程的起始时刻定义为： $T_i$  ( $i=1,2$ )，1 为吸入过程，2 为吐出过程；把吸入阀，吐出阀的实际吸入与吐出过程的起始时刻定义为： $t_{kj}$  ( $k=a,b, j=A,B$ )， $a$  为实际吸入过程， $b$  为实

际吐出过程，A 为吸入阀，B 为吐出阀。那么根据以上分析，具体的泵阀滞后时间量  $\Delta T_j$  可表示为

$$\Delta T_j = t_{kj} - T_i \tag{3}$$

### 4 试验装置与试验方法

经过上述分析得出增频流量骤减现象取决于泵阀滞后性，可是泵阀滞后的观测要求是能够同时检测到高频振动的压电振子及泵阀的运动并对其进行比较。为此开发了如图 4 所示试验装置。具体的试验方法如下。

在压电振子的某点处，采用激光测振传感器测量其振动变化周期，最高与最低振幅点为压电振子吸入与吐出过程的起始时刻  $T_i$ 。

(1) 入口处吸入阀或者吐出口处吐出阀采用高频敏感噪声传感器测量其噪声变化周期。

(2) 激光测振传感器与高频敏感噪声传感器的信号同时传送到多频信号处理器，经过处理器处理后的信号输入计算机。

(3) 计算机屏幕上可同时、同步显示压电振子的振动变化与吸入阀或者吐出阀的噪声变化。

(4) 多频信号处理器同时具有高速傅里叶变换机能(FFT)，根据 FFT 后的结果，可准确地确定吸入阀或者吐出阀的开启与关闭时的噪声频率，进而可确定阀开启与关闭的起始时刻  $t_{kj}$ 。

(5) 根据式(3)可得到泵阀滞后时间量  $\Delta T_j$ 。

### 5 试验

表 2 给出了泵阀滞后检测试验装置的主要仪器名称及型号。

表 2 仪器名称及型号

仪器名称	型号
笔记本式计算机	SONY VAIO—800
高频敏感噪音传感器	RION NA—20
激光测振传感器	KEYENCE LK—030
多频信号处理器	KEYENCE NR—350

在频率为 8 Hz，电压为 80 V 的试验条件下，得到如图 5 所示的压电振子振动与泵阀噪声曲线。根据图 5 可知，吸入阀的开启与吐出阀的关闭时的噪声峰值明显滞后于所对应的压电振子振动峰值。也就是说，有阀压电泵的泵阀运动滞后于动力源压电振子的运动，称为泵阀滞后现象。按照上节所述的具体方法，利用式(3)可计算得到阀滞后时间量： $\Delta T_A=46.9$  ms， $\Delta T_B=59.4$  ms。

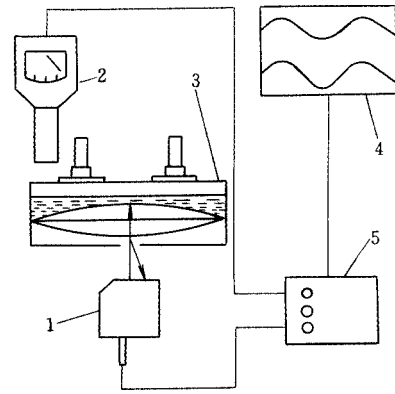
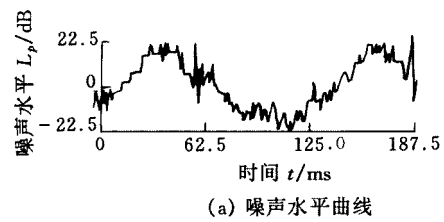
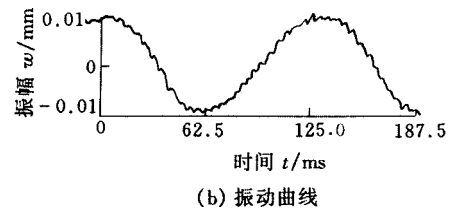


图 4 泵阀滞后检测试验装置

- 1. 计算机 2. 有阀压电泵 3. 高频敏感噪声传感器
- 4. 激光测振传感器 5. 多频信号处理器



(a) 噪声水平曲线



(b) 振动曲线

图 5 压电振子振动与泵阀噪声曲线

### 6 滞后系数

压电振子的最高振幅点与吸入阀噪声峰值之间的相位差与压电振子的最低振幅点与吐出阀噪声峰值之间的相位差定义为吸入与吐出阀滞后系数  $\delta_j$ ， $j=A,B$ ，A=吸入阀，B=吐出阀。对于单一的泵阀而言，当  $\delta$  为 0 时，称之为完全不滞后；当  $\delta$  为  $\pi$  时，称之为完全滞后； $\delta$  越小不滞后性就越好。一般情况下压电振子的频率越高，泵阀的不滞后性将越差，流量也就越低。所以，使用泵阀的有阀压电泵，因阀的不滞后性差，泵流量都很小。

定义了滞后系数  $\delta_j$  之后，就可以利用其评价、考察有阀压电泵的泵阀，进而作为泵阀优化设计的量化目标。具体可表示为

$$\lim(\delta_j) \rightarrow \min \quad j = A, B \tag{4}$$

滞后系数  $\delta_j$  一般取决于泵阀的结构、材料和质量等。在此有必要回顾一下文献[5]，铃木等人在解释增频流量骤减现象时，特别提到了减小泵阀重量，

有利于提高压电振子驱动频率。

## 7 结 论

(1) 发现了有阀压电泵增频流量骤减现象, 现有提高频率使压电振子的振幅减小为主要成因的解释是错误的, 并通过实验证明了其理论的不正确性。

(2) 提出了解释增频流量骤减现象成因的泵阀滞后性模型, 同时提出了观察这种现象的具体新方法。

(3) 开发了实际观测新装置, 并利用这新装置观察到了泵阀滞后现象。

(4) 给出了可以评价、考察有阀压电泵的泵阀的量化值和滞后系数。

### 参 考 文 献

- 1 榑崎哲二. 双层振动子泵, 日本国公開特許公報, 昭 57-137671
- 2 深泽宏之. 压电泵的研究: [硕士学位论文]. 日本山形: 日本山形大学, 1997
- 3 一刀学. 压电泵的研究: [硕士学位论文]. 日本山形: 日本山形大学, 1998
- 4 铃木胜义, 深泽宏之. 压电泵的研究. 见: 日本机械学会东北支部讲演论文集, Iwaki, 地方讲演会, Iwaki, 1997, Iwaki: 日本机械学会, 1997: 193~194
- 5 铃木健一, 铃木胜义, 中西为雄. 锥阀压电泵的研究. 见: 日本设计工学会 2000 年东北支部讲演论文集, 米泽讲演会, 米泽, 2000, 米泽: 日本设计工学会, 2000: 16~17
- 6 张建辉, 王守印, 杨东平. 压电锥形流管无阀泵的研究——振动解析及泵体容积变化量. 压电与声光, 1999, 21(6): 457~460
- 7 张建辉, 王守印. 压电锥形流管无阀泵的研究——单向流

动原理及泵流量. 压电与声光, 2001, 23(3): 192~195

## RESEARCH ON PIEZOELECTRIC PUMP—LAGGING OF VALVE

Zhang Jianhui Wang Dakang  
(Beijing University of Technology)

Wang Shouyin  
(Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences)

Qnuki Akyoshi  
(Yamagata University, Japan)

**Abstract:** The piezoelectric pump with valve regarding the phenomenon of abrupt output-decreasing with frequency-increasing (ODFI) is analyzed and researched. The research finds that it is wrong that the increase of the frequency results in the decrease of the amplitude of piezo vibrator is the leading cause for the phenomena of abrupt output-decreasing with frequency-increasing (ODFI). And the experiment has testified that the existing theory is incorrect. The model of lagging of valve that can be used to explained the cause for the phenomena of abrupt output-decreasing with frequency increasing is forward. with frequency increasing is forward. Meanwhile it mentions a new method to observe and develops new observation device used to observe the phenomena of ODFI. It introduces the quantized valve--lagging coefficient, which can be used to evaluate and review the valve, and makes it as the goal function of optimal design of valve.

**Key words:** Pump Piezoelectric pump Valve  
Lagging of valve Optimal design

作者简介: 张建辉, 男, 1963 年出生, 博士。主要从事机械方面的研究。