

3D 打印的锥管坡面腔底无阀压电泵^{*}

张蕊华¹, 张建辉², 朱银法¹, 李培远¹

(1. 丽水学院工程与设计学院 丽水, 323000)

(2. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 为提高无阀压电泵的流量特性和解决泵加工工艺性差的问题, 研制出了锥形流管坡面腔底无阀泵。首先, 提出并设计了锥形流管坡面腔底无阀泵, 分析了该泵的工作原理; 然后, 利用 ansys 软件对泵腔内流场做了模拟分析, 分析结果表明该泵具有传输流体的能力; 最后, 利用 3D 打印技术制作了锥形流管坡面腔底无阀泵, 并对泵的流量-流量特性进行了试验, 驱动频率为 8 Hz 时, 锥形流管坡面腔底无阀泵的流量达到最大值 26.8 ml/min, 比相同尺寸坡面腔底无阀压电泵在相同驱动电压条件下输出的最大流量增加了 18.6%。试验结果表明, 锥形流管坡面腔底无阀泵的流量特性优于坡面腔底无阀压电泵, 且采用 3D 打印技术制作压电泵, 提高了泵加工的工艺性, 缩短了加工周期, 降低了加工成本。

关键词 无阀压电泵; 锥管; 坡面腔底; 流量; 3D 打印

中图分类号 TH38; TN384

引 言

无阀压电泵是利用压电材料的逆压电效应将电能转换为机械能的装置, 其动力源依靠压电振子在交变电压作用下产生的交变弯曲振动, 促使泵腔容积变化, 使泵吸入、吐出流体, 从而达到传输流体的目的^[1]。因其结构简单、易微小型化、应用广泛等优点, 受到了众多研究者的关注。

目前, 无阀压电泵的结构主要有: 锥形流管无阀压电泵^[1-5]、热粘性无阀压电泵^[6]、超声无阀压电泵^[7-8]、两腔和多腔体无阀压电泵^[9-11]、非对称坡面腔底^[12]及“Y”形流管等无阀压电泵^[13]等。其中, 非对称坡面腔底无阀压电泵的结构设计巧妙, 将传统的光滑腔底设计成非对称坡面形状, 使泵具有传输流体能力的同时, 还具有混合搅拌的功能, 当泵同时输送多种液体时, 在泵腔内能进行充分的混合搅拌。该泵适合于医疗、化工等领域的液剂配比, 应用前景广阔。但是该泵也有流量小、传输能力小的不足, 不能满足大流量的应用场合。

为了进一步提高泵的流量特性, 笔者对传统非对称坡面腔底无阀压电泵的结构进行了改进, 将坡面腔底和锥形流管(简称锥管)组合在一起(即在泵腔两端增设了一对同向放置的锥形流管)形成一个

新型锥形流管坡面腔底无阀泵。

3D 打印技术是快速成型领域的一种新兴技术, 它不需要传统加工手段使用的刀具、夹具以及多道工序, 利用三维设计数据在一台设备上可快速而精确地制造出任意复杂形状的零件, 解决了许多过去难以制造的复杂结构零件的加工问题, 大大缩短了加工周期, 而且越是复杂结构的产品, 其制造的速度作用越显著。该技术一出现就取得了快速的发展, 在医学、航天技术、建筑业、制造业、考古文物等各个领域都取得了广泛的应用^[14-15]。

笔者研究的新型泵的结构工艺性差, 腔底楔块为坡面, 且与腔底和锥管为一体, 用传统加工技术制造很难实现, 其加工周期很长、成本很高。而采用 3D 打印技术制作体积小、少量的结构复杂的新型泵样机结构更具优势, 很容易实现, 制作时间短(用时约 100 min)、成本低, 易于微小型化。

笔者分析了该新型泵的工作原理, 对其进行了流场分析, 研制了锥管坡面腔底无阀压电泵, 并对泵的流量特性进行了试验。

1 泵结构与工作原理

锥管坡面腔底无阀压电泵的结构主要包括压电振子、泵体、泵腔、一组非对称坡面楔块、一对同向布

* 国家自然科学基金资助项目(51375227); 江苏省自然科学基金资助项目(LY14E050002)

收稿日期: 2015-06-16; 修回日期: 2015-09-18

置的方形截面锥管和导管等,其结构简图如图 1 所示。泵腔内非对称坡面楔块和方形截面锥管共同起到了迫使流体单向流动的作用,如图 2 所示。

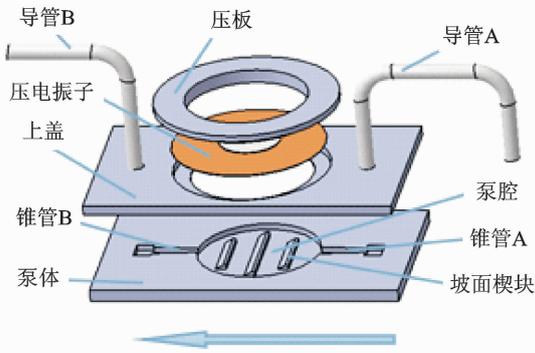
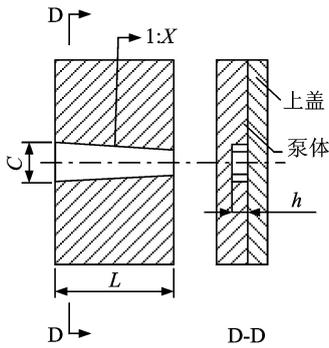
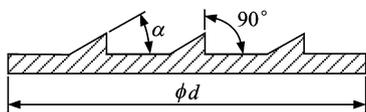


图 1 锥管坡面腔底无阀压电泵

Fig. 1 Valveless piezoelectric pump with taper pipe slopes element



(a) 方形截面锥管
(a) Square cross-section of taper pipe



(b) 坡面楔块
(b) Slope wedge

图 2 泵体图

Fig. 2 Schemes of pump cavity

压电振子在交变电压作用下产生振动,在半个周期内,压电振子从平衡位置向上运动时泵腔内容积增大,压力降低,导管 A, B 同时吸入流体。流体流经锥管 A, B 后进入泵腔。当压电振子从最高点向下运动回到平衡位置时泵腔容积减小,压力增大,迫使流体通过锥管 A, B 同时从导管 A, B 排出(见图 3)。压电振子的振动引起泵腔容积周期性变化,迫使泵腔内流体吸入和排出的流动,因流体从左向右流经锥管和坡面楔块时的流阻与从右向左流经锥管和坡面楔块时的流阻不同,从而宏观上呈现出流体从 A 端向 B 端流动,实现了泵的流体传输功能。

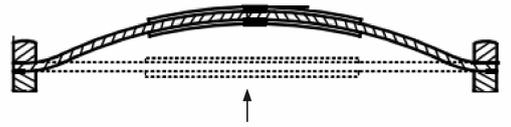


图 3 压电振子半周期振动的工作示意图

Fig. 3 Working schematic of piezoelectric vibrator in a half cycle of vibration

2 泵单向流动原理

在泵在每个吸排程周期内,锥管和每个楔块都要经过一次从左向右流动和从右向左流动的过程。以泵腔右端为例,如图 4 所示。

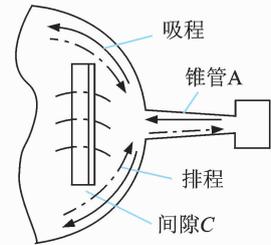


图 4 泵腔内流体流向示意图

Fig. 4 A schematic view of the fluid flow in the pump chamber

当泵从 A 端吸入流体时,流体首先流过锥管 A (扩张管) 进入泵腔,此时,由于楔块坡面角度 90° ,流体被阻挡后,遂从楔块两端与泵腔内壁之间的间隙 C 流入泵腔内部。若忽略壁面的摩擦,且间隙 C 的尺寸足够大(非狭小缝隙),流体流过锥管 A (扩张管) 和 m 个间隙 C 时总压强损失 ΔP_L 的表达式为

$$\Delta P_L = \Delta P_{AK} + \Delta P_{m_1}(c) + \Delta P_{m_2}(c) + \dots + \Delta P_{m_i}(c) \quad (1)$$

其中: ΔP_{AK} 为流体流经扩张锥管时的压强损失; $\Delta P_{m_i}(c)$ 为流体流经第 i 个间隙 C 时的压强损失, $i=1, 2, \dots, m$ 。

流体局部压强损失 ΔP 的表达式为

$$\Delta P = \xi \frac{\rho v^2}{2} \quad (2)$$

其中: ρ 为流体密度; v 为平均速度; ξ 为流阻系数。

将式(2)带入式(1)有

$$\Delta P_L = \frac{\rho v^2}{2} \xi_{AK} + \frac{\rho v^2}{2} \sum_{i=1}^m \xi_{m_i}(c) = \frac{\rho v^2}{2} \left[\xi_{AK} + \sum_{i=1}^m \xi_{m_i}(c) \right] \quad (3)$$

其中: ξ_{AK} 为流体流经扩张管时的流阻系数; $\xi_{m_i}(c)$ 为流体流经第 i 个间隙时流阻系数。

令流体从右向左流入泵腔时的总流阻系数为 ξ_L , 其表达式为

$$\xi_L = \xi_{AK} + \sum_{i=1}^m \xi_{ni}(c) \quad (4)$$

当泵从 A 端排出流体时, 由于楔块坡面角度 α_1 小于 90° , 一部分流体能够从角度 α_1 的楔块坡面流过, 另一部分流过间隙 C, 最后通过锥管 A(收缩管) 排出泵体。流体流经角度 α_1 的楔块坡面、 m 个间隙 C 和收缩锥管 A 时总的压强损失 ΔP_R 表示式为

$$\Delta P_R = \Delta P_{AS} + \Delta P_{n1}(c) + \Delta P_{e1}(\alpha_1) + \Delta P_{n2}(c) + \Delta P_{n2}(\alpha_1) + \dots + \Delta P_{ni}(c) + \Delta P_{ei}(\alpha_1) \quad (5)$$

其中: ΔP_{AS} 为流体流经收缩锥管 A 时的压强损失; $\Delta P_{ei}(c)$ 为流体上行流经第 i 个角度 α_1 的楔块坡面时的压强损失, $i=1, 2, \dots, m$ 。

同理, 将式(2)代入式(5)整理可得

$$\Delta P_R = \frac{\rho v^2}{2} \left\{ \xi_{AS} + \sum_{i=1}^m [\xi_{ni}(c) + \xi_{ei}(\alpha_1)] \right\} \quad (6)$$

其中: ξ_{AS} 为流体流经收缩锥管 A 时的流阻系数; $\xi_{ei}(\alpha_1)$ 为流体流经第 i 个角度 α_1 的楔块坡面时的流阻系数。

令流体从右向左流出泵腔时的总流阻系数为 ξ_R , 其表达式为

$$\xi_R = \xi_{AS} + \sum_{i=1}^m [\xi_{ni}(c) + \xi_{ei}(\alpha_1)] \quad (7)$$

压电泵的流量是流体从同一端吸入和排出流量的差值。根据文献[6], 锥管坡面腔底无阀压电泵在半个振动周期内的流量可以近似的表达式为

$$Q = \Delta V f \frac{\xi_L - \xi_R}{\xi_L + \xi_R} \quad (8)$$

其中: f 为压电振子的振动频率; ΔV 为振子运动半周期泵腔容积的变化量。

由式(4)和式(7)联立可知

$$\xi_L - \xi_R \neq 0 \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)可得 $Q \neq 0$, 即流体从 A 端吸入和排出的流量不相等, 说明泵中的流体产生了单一方向的流动, 使泵具有了输送流体的功能。

为了使泵在吸入和排出流体时的流阻不同, 实现流体的单一方向的流动, 利用流体流经收缩管和扩张管的流阻不同的原理, 将泵的入口管道设计成锥形, 并且将一对锥管在泵的两侧同向放置, 同时将楔块的两侧面设计成不同角度, 使流体从左向右和从右向左流过楔块时的流阻不同, 即锥管和坡面腔底的结构形状使泵具有了传输流体的功能。

3 流场模拟仿真

图 5 是锥管坡面腔底无阀压电泵速度矢量图。

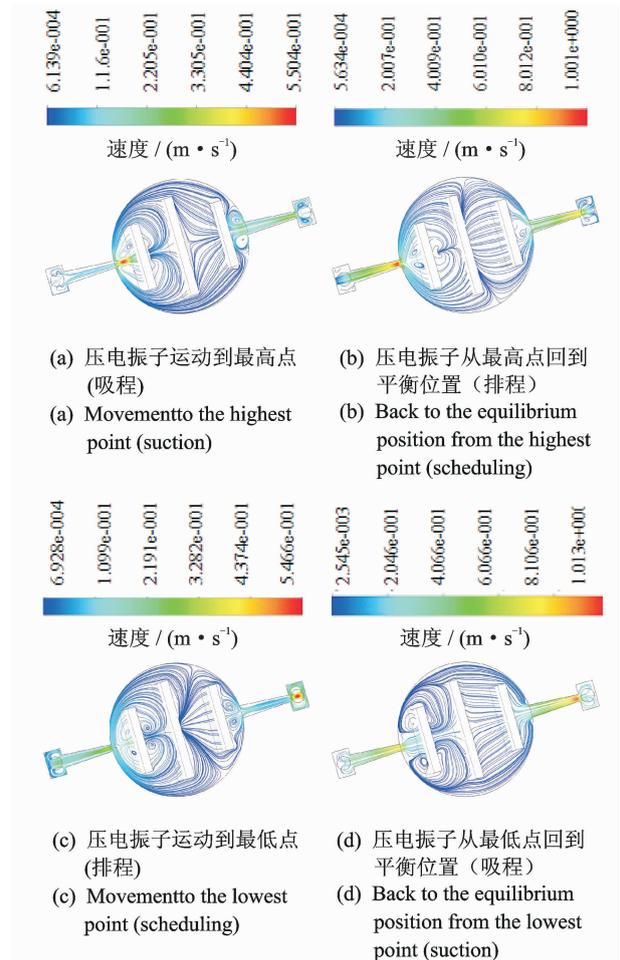


图 5 压电泵速度流线图

Fig. 5 Velocity streamline pattern of piezoelectric pump

压电泵的 1 个工作周期包括 2 个部分: 排程和吸程, 振子从最高点经过中间位置运动到最低点的过程为排程, 从最低点经过中间位置运动到最高位点的过程为吸程。图 5 中运用 Ansys12 中 Fluent12.0 模块来对泵腔流场进行模拟, 工作介质为水(密度为 0.9982 g/ml , 动力黏度为 $6.018 \times 10^{-2} \text{ kg/(m} \cdot \text{min)}$), 工作温度为 20°C , 进出口压力值都为 1 个标准大气压, 驱动频率为 20 Hz , 振子最大振幅为 0.08 mm , 泵腔直径为 40 mm , 楔块坡面角度为 $\alpha_1 = 30^\circ$, 矩形截面锥管尺寸: $L = 14.7 \text{ mm}$, $e = 4 \text{ mm}$, $h = 2 \text{ mm}$, 锥度 $1:3.6$ 。

由图 5 可知, 在压电振子的一个运动周期内, 无论是吸程还是排程, 泵腔左半部分流体的涡旋都要比右半部分流体形成的涡旋强烈, 流速更加湍急。根据伯努利方程: 流体等高流动时, 流速大、压力小的原理可知, 泵腔右边的压力高于左边的, 因此流体就会从右边流向左边, 宏观上形成了泵内流体的单向流动, 从而使泵具有了传输流体的功能。

由于通流截面积的突然改变,流体在锥管和泵腔的交界处,以及在楔块周围都产生了复杂的涡旋流场,使进入泵腔的流体能够进行充分的混合搅拌,该特性可使泵在同时传输两种或多种流体的过程中,能够对其进行充分的混合搅拌,该泵集传输和搅拌功能于一体,拓展了泵的应用范围。

4 试验验证

试验中使用的压电泵样机零件全部由 MBot Cube 桌面 3D 打印机打印,使用 PLA 环保材料(见图 6),其压电振子参数如表 1 所示。

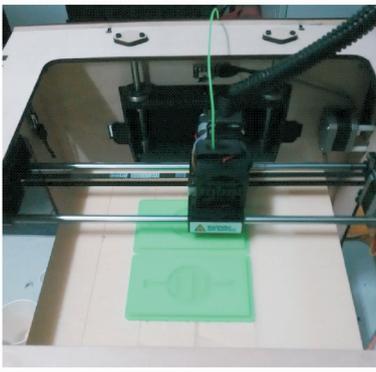


图 6 泵体 3D 打印
Fig. 6 Pump body 3D printing

表 1 压电振子参数

Tab. 1 The piezoelectric vibrator parameters

mm			
基片直径	瓷片直径	基片厚度	总厚度
50.0±0.1	25.0±0.3	0.20±0.03	0.40±0.05

锥管坡面腔底无阀压电泵样机及其流量测试系统见图 7。试验泵的几何参数和介质参数与模拟分析时一致。为减小压电泵的振动噪声,用正弦波作为压电泵的驱动信号,电压峰峰值为 600 V。

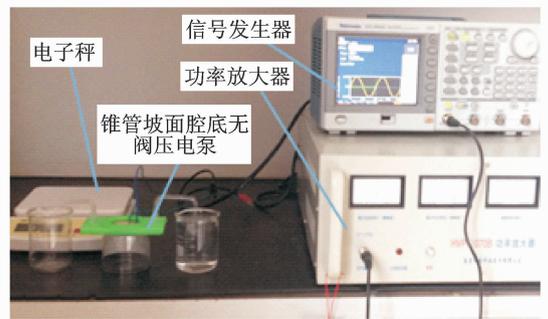
为了验证研制泵传输流体的能力,测试了泵频率-流量特性并得到了试验曲线,如图 8 所示。从图 8 中可以得到,在相同条件下坡面腔底泵在驱动频率为 7 Hz 时流量达到最大值 22.6 ml/min,锥管坡面腔底泵在驱动频率为 8 Hz 时流量达到最大值 26.8 ml/min,比前者增加了 18.6%。另外,坡面腔底泵在驱动频率达到 10 Hz 之后不再有流体输出,而锥管坡面腔底泵在频率达到 18 Hz 之前,一直都有流体输出。可见,锥管坡面腔底泵的频率-流量特性明显优于坡面腔底泵。



(a) 坡面腔底无阀压电泵泵体照片
(a) Photograph of valveless piezoelectric pump with slopes element



(b) 锥管坡面腔底无阀压电泵泵体照片
(b) Photograph of valveless piezoelectric pump with taper pipe slopes element



(c) 泵流量测试系统照片
(c) Photograph of pump flow rate experiment System

图 7 锥管坡面腔底无阀压电泵流量测试系统照片
Fig. 7 Photographs of valveless piezoelectric pump with taper pipe slopes element flow rate experiment

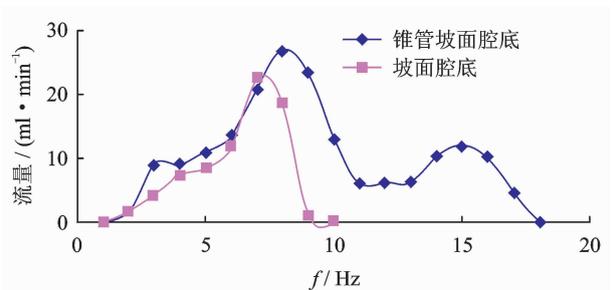


图 8 压电泵的频率-流量特性曲线图
Fig. 8 Curve of driving frequency vs flow rate

5 结束语

笔者对传统坡面腔底无阀压电泵进行了改进,

提出了并研制了一种新型锥管坡面腔底无阀压电泵样机。采用有限元法对锥管坡面腔底无阀压电泵进行了流场模拟分析,得到了一个周期内的锥管坡面腔底无阀压电泵腔内部流场流速图,分析结果表明该泵具有单向传输流体的能力。对该泵的流量-频率特性进行了试验测试。当驱动频率为 8 Hz 时,泵的流量达到最大值 26.8 ml/min,比相同条件下坡面腔底无阀压电泵输出的最大流量增加了 18.6%。试验结果表明,该泵不仅可以传输流体,而且其传输流体的能力要优于坡面腔底无阀压电泵。

参 考 文 献

- [1] Erik S, Göran S. A valve-less diffuser/nozzle-based fluid pump[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 1993,39(2): 159-167.
- [2] Gerlach T, Wunnus H. Working principle and performance of the dynamic micropump[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 1995,50(1):221-226.
- [3] 程光明,杨志刚,曾平,等. 锥型阀压电薄膜泵的研究[J]. *压电与声光*, 1998,20(5):300-303.
Cheng Guangming, Yang Zhigang, Zeng Ping, et al. The original study of the piezoelectric membrane pump with taper valve[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 1998,20(5):300-303. (in Chinese)
- [4] Nguyen N T, Huang Xiaoyang. Numerical simulation of pulse-width-modulated micro-pumps with diffuser/nozzle elements[C]//*Proceedings of International Conference on Modeling and Simulation of Micro-systems*. San Diego, US: [s. n.], 2000:639.
- [5] 张建辉,王守印. 压电泵锥形流管无阀泵的研究-单向流动原理及泵流量[J]. *压电与声光*, 2001,23(1):23-25.
Zhang Jianhui, Wang Shouying. A study of piezoelectric valveless diffuser/nozzle-based fluid pump: one-way flow principle and the pump flow[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2001,23(1):23-25. (in Chinese)
- [6] Matsumoto S, Klein A, Maeda R. Bi-directional micro-pump based on Temperature dependence of liquid viscosity[J]. *Journal of Mechanical Engineering Laboratory*, 1999,53(6):187-193.
- [7] Rife J C, Bell M I. Miniature valveless ultrasonic pumps and mixers[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2000, A(86):135-140.
- [8] Nguyen N T, White R M. Design and optimization of an ultrasonic flexural plate wavemicropump using simulation[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 1999, 77(3):229-236.
- [9] 程光明,姜德龙,孙晓锋,等. 双腔体四振子压电泵设计及试验[J]. *排灌机械工程学报*, 2010,28(3):190-193.
Cheng Guangming, Jiang Delong, Sun Xiaofeng, et al. Design and experiment on dual-chamber piezoelectric pump with four actuators[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2010, 28(3): 190-193. (in Chinese)
- [10] 彭太江,杨志刚,程光明,等. 双腔体压电泵的设计[J]. *光学精密工程*, 2009,17(5):1078-1085.
Peng Taijiang, Yang Zhigang, Cheng Guangming, et al. Design of double-chamber piezoelectric pump[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009,17(5):1078-1085. (in Chinese)
- [11] Olsson A, Larsson O, Holm J, et al. Valve-less diffuser micropumps fabricated using thermoplastic replication[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 1997, 64(98):63-68.
- [12] 夏齐宵,张建辉,李洪,等. 非对称坡面腔底无阀压电泵[J]. *光学精密工程*, 2006,14(4):641-647.
Xia Qixiao, Zhang Jianhui, Li Hong, et al. Valveless piezoelectric pump with unsymmetrical slope chamber bottom [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(4):641-647. (in Chinese)
- [13] 张建辉,黎毅力,夏齐宵,等. “Y”形流管无阀压电泵流量及流管流阻特性分析[J]. *机械工程学报*, 2007,43(11):136-141.
Zhang Jianhui, Li Yili, Xia Qixiao, et al. Analysis of the pump volume flow rate and tube property of the piezoelectric valveless pump with Y-shape tubes [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(11):136-141. (in Chinese)
- [14] 曾光,韩志宇,梁书锦,等. 金属零件 3D 打印技术的应用研究[J]. *中国材料进展*, 2014,33(6):376-383.
Zeng Guang, Han Zhiyu, Liang Shujin, et al. The applications and progress of manufacturing of metal parts by 3D printing technology[J]. *Materials China*, 2014, 33(6): 376-383. (in Chinese)
- [15] 卢秉恒,李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. *机械制造与自动化*, 2013,42(4):1-4.
Lu Bingheng, Li Dichen. Development of the additive manufacturing (3D printing) mechnology[J]. *Machine Building & Automation*, 2013, 42(4): 1-4. (in Chinese)



第一作者简介:张蕊华,女,1970年4月生,博士,副教授。主要研究方向为压电驱动技术和金属橡胶技术。曾发表《金属橡胶高压精密流量阀流场分析》(《振动、测试与诊断》2013年第33卷第1期)等论文。

E-mail: zhangrh_hit@sina.com

