

# 基于聚偏氟乙烯的扫描探针显微镜系统

魏晋鹏 黄强先 张昔峰 盛秀丽

合肥工业大学,合肥,230009

**摘要:**采用聚偏氟乙烯(PVDF)压电薄膜和压电陶瓷(PZT),并结合由电化学研磨得到的钨探针,研制了一种具有对称结构的新型轻敲模式扫描测头。在该测头中,PVDF压电薄膜作为振动梁,其下方中间位置固定有钨探针,在PZT的驱动下,PVDF和探针处于谐振振动状态,同时,PVDF作为微力传感器检测探针顶端原子与试样表面原子间的作用力。所构建测头结合三维纳米定位台、控制程序等构成了新型扫描探针显微镜系统。介绍了测头的构成、工作原理、特性以及SPM系统的整体结构、测量原理、三维工作台的定位控制、信号处理过程和整系统特性测试,并以一维标准光栅为试样进行三维图像扫描,证明了该新型扫描探针显微镜系统的可行性和有效性。

**关键词:**PVDF 振动梁;钨探针;定位控制;扫描探针显微镜

中图分类号:TH71;TH89

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.23.014

## SPM System Based on a New-stylus Fabricated by PVDF Membrane

Wei Jinpeng Huang Qiangxian Zhang Xifeng Sheng Xiuli

Hefei University of Technology, Hefei, 230009

**Abstract:** Using PVDF piezoelectric film and PZT-actuators, combined with a tungsten probe derived from electrochemical grinding, a new scanning stylus with a symmetrical structure of tapping mode was developed. In the stylus, PVDF piezoelectric film as a vibrating beam and the tungsten probe fixed below the middle of the beam were in the state of resonance driven by the PZT. At the same time, PVDF film as a micro-force sensor to probe the atomic force between the top of probe and the surface of sample. A new SPM system was constituted from the constructed probe combined with three-dimensional locator and control procedures etc. This paper described such contents as the composition, working principle, characteristics of the stylus, in addition, the overall structure, measuring principle, three-dimensional positioning table control, signal processing and properties of the whole system test of the SPM system were also described, and three-dimensional image scanning was completed by taking a standard one-dimensional raster as the specimen, and the feasibility and effectiveness of the new SPM system were proved.

**Key words:** PVDF(polyvinilidene fluoride) vibrating beam;tungsten tip;positioning control;scanning probe microscopy(SPM)

## 0 引言

随着微细加工技术、MEMS技术的发展, MEMS器件和微型机械零件的应用也越来越广泛,同时这些器件的几何尺寸越来越小、加工精度越来越高,因此,对测量也提出了更高的要求。目前,以扫描隧道显微镜(STM)、各种扫描力显微镜(SFM)<sup>[1]</sup>为代表的扫描探针显微镜(SPM)自身都存在一定的局限性。由于STM仪器利用了量子隧道效应产生隧道电流的原理,因而对于绝缘体根本无法实现测量。如果在样品表面覆盖导电层,则会因为导电层涂覆的均匀性等问题导致测量结果的失真。常规原子力显微镜(AFM)虽然适合于各种材料,且具有亚纳米级的垂直分辨力和较小的测量力<sup>[2]</sup>,但AFM受到所采用探针有效长度和锥角的

限制。AFM探针有效长度一般仅有数微米,不适合具有数十、甚至数百微米高度的微观台阶以及大深宽比的微沟槽的测量,且测头中一般采用光学方法检测悬臂变形,有可能产生干涉、漏光现象<sup>[3]</sup>,从而给AFM的表面测量带来误差。适合于测量这些器件的纳米三坐标测量机(Nano-CMM)目前还处于研制阶段,测量精度在亚微米量级。目前,学者们利用微音叉、石英音叉、PVDF等构建了新型扫描探针显微镜测头<sup>[4]</sup>,但这些测头需要进一步改进并构建有效的测量系统。

聚偏氟乙烯(Polyvinilidene Fluoride, PVDF)压电薄膜近年来出现了在微夹持和微操作方面的应用<sup>[5]</sup>。笔者采用PVDF压电薄膜和PZT,结合扫描隧道显微镜中的钨探针,构成了完全对称的表面扫描测头,采用类似于AFM<sup>[6]</sup>的轻敲模式(tapping mode)型扫描,适合分析柔软、黏性和脆性的样品,并适合在液体中成像。进一步

收稿日期:2011-09-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975075);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100111110011)

结合信号处理电路、反馈控制模块、高精度扫描平台和图像显示等构成了以 PVDF 压电薄膜为谐振梁的 SPM 系统。在测头 PVDF 悬臂梁下粘接的钨探针的有效长度为数百微米<sup>[7]</sup>,可以实现对大深宽比的沟槽结构进行有效测量。

### 1 SPM 系统总体结构及工作原理

系统由 PVDF 薄膜振动梁式测头、测头信号处理电路、数据处理及控制系统、扫描成像系统及三维纳米定位控制系统五部分组成,图 1 所示为系统构成框图。

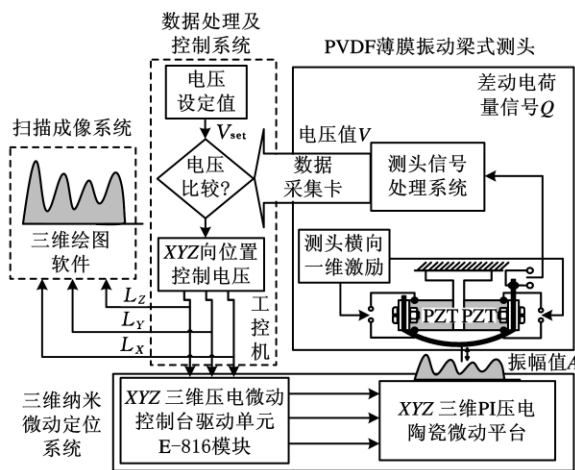


图 1 SPM 系统构成框架图

系统的工作原理是,当测头上完全对称的两块 PZT 受到相同的正弦信号激励后,PVDF 薄膜振动梁被 PZT 的横向运动所驱动,带动探针沿垂直的 Z 向做恒定振幅为 A 的自由振荡,薄膜表面产生的电荷经电路放大处理为一定幅值的电压信号 V。当试样在微动平台的带动下与探针发生接触后,振动梁自由振幅 A 将减小为 A',相应的电信号由 V 减小为 V',将这一变化的电信号经处理电路传至计算机的数据采集单元,与电压设定值比较后输出一个压差信号,送入 Z 向位移控制机构,通过调整 Z 向工作台使得探针与试样的间距处于设定值并恒定不变,以此形成振幅反馈型控制。最后,通过程序使位移台沿 X、Y 方向步进一定步距,在试样表面上进行下一点的扫描。直到整个试样表面待测点测量完成后结束。根据扫描点处稳定到恒高状态下的 Z 向位移值以及 X、Y 向的步进量就可以重构出试样表面微观形貌图。图 2 是 SPM 系统整体实物图。

### 2 SPM 各部分构成原理

#### 2.1 测头的工作原理及特性

基于 PVDF 压电薄膜振动梁的轻敲式扫描

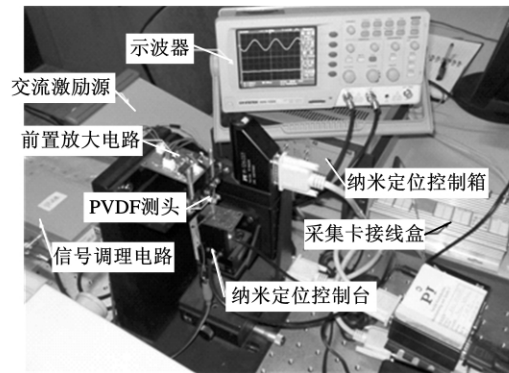


图 2 SPM 系统构成实物

测头的结构及原理如图 3 所示。测头主体部分由 PVDF 压电薄膜构成的振动梁及采用电化学研磨法得到的钨探针构成。PVDF 薄膜经极化后具有优良的压电特性,沿垂直于极化面方向的压电常数  $g_{31}$  可达  $0.26 \text{ V} \cdot \text{m}/\text{N}$ 。薄膜的密度在  $1.76 \sim 1.80 \text{ g}/\text{cm}^3$  之间,薄膜轻薄、柔软,厚度均匀。钨探针由直径为  $60 \mu\text{m}$  的钨金属丝经电化学研磨制备而成,其有效长度可达数百微米。该测头结构中,PVDF 薄膜振动梁被设计为具有一定弯曲弧度的简支梁形式,在其下表面中央处粘接钨探针。薄膜的左右两端通过夹持机构分别固定在两个完全相同的压电驱动器的外侧,两压电驱动器的内侧固定在它们共用的 T 形测头架上,由此构成振动梁探针结构。

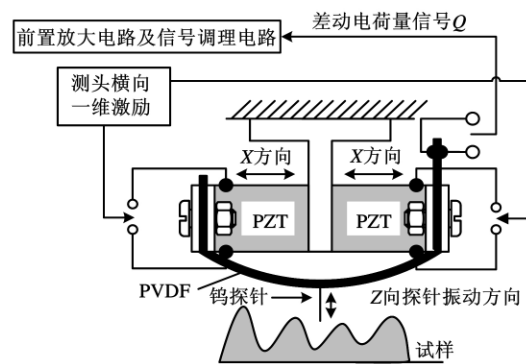


图 3 基于 PVDF 薄膜的测头的结构及原理图

测头处于工作状态时,两压电驱动器被激励后沿 X 方向伸缩;迫使 PVDF 振动梁沿垂直的 Z 向振动,同时带动探针始终振动于近共振状态。因此,测试中探针与试样不会持续接触,它们之间的相互作用方式是不断地以极小力瞬间接触、接触瞬间即分离,所以称这种扫描方式为微测力轻敲型扫描。对于该新型 SPM 测头,文献[8]只给出了一些初步的研究结果,本文将详细讨论其系统性能。

该 PVDF 薄膜具有良好的谐振特性。图 4 是通过工控机程控函数信号发生器输出信号激励 PVDF 薄膜振动,进行频率扫描得到的频谱曲线

图。谐振频率约为 3470Hz,对应前置放大电压信号幅值为 0.79V,品质因数约为 45,因此该振动梁对外力很敏感。

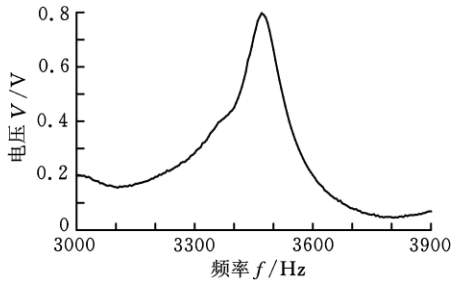


图 4 PVDF 薄膜的频谱图

### 2.2 测头信号的检测及处理

测头输出信号的检测及处理电路包括前置放大电路和信号调理电路,图 5 是电路组成框图。利用函数信号发生器给测头提供适当幅值和频率的正弦交流信号,该信号激励 PZT 带动 PVDF 薄膜振动于谐振状态,由测头薄膜上下表面输出的等量正负电荷信号经由电荷/电压放大和差动信号放大后转化为经过前置放大的交流电压信号。而采集单元需要的是便于采集的直流信号,所以电路还设计了带通滤波、电压二级放大、交直流转换、低通滤波等信号处理部分,最后得到了高性噪比的直流电压信号。

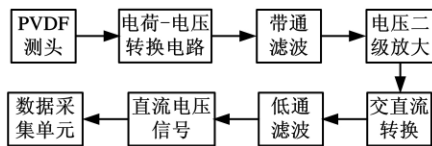


图 5 信号检测及处理电路

### 2.3 精密定位台

精密定位台由宏动部分与微动部分构成。宏动部分用于定位台的粗定位,利用直流伺服电机,通过 RS232 串口和计算机相连实现运动控制,定位精度约为 0.1 $\mu$ m。X、Y、Z 三方向行程均为 25mm。微动工作台由压电驱动器驱动,微动台的 X、Y 方向工作台集成了高精度应变式传感器,其运动分辨力在开环模式下为 0.2nm,闭环模式下为 2nm,Z 方向工作台集成了电容式传感器来进行位移测量或实现闭环反馈控制,其闭环和开环工作状态下的运动分辨力都是 0.05nm。三个方向的控制模式均可根据需要设置成开环控制或者闭环控制。X、Y、Z 三方向行程分别为 100 $\mu$ m、100 $\mu$ m、12 $\mu$ m。

### 2.4 反馈定位及扫描成像系统

本系统通过 VC++ 编程来实现采集卡驱动、串口处理、数据读取及处理和系统控制。X、Y、Z 三个方向的反馈及纳米定位控制系统构

成方式如图 6 所示。在进行试样扫描时,X、Y 两方向利用计算机内的控制程序通过 RS232 串行口向微动控制箱提供位移量控制命令,经过微动控制箱内部集成的 D/A 转换模块和伺服控制放大模块以完成工作台的精确定位。另外,探针与试样之间位移的调整是通过测头电压值作为输出信号,经过信号调理电路送入工控机与预先设定的比较电压进行比较,通过 PI 算法对电压差值进行处理输出,经 D/A 转换、放大后输出电压信号,控制 Z 向工作台上的压电驱动器伸缩,调整试样与探针之间的距离使之处于恒高状态。Z 向位移台闭环调节的过程中,采用的是增量式 PI 控制算法,比例参数 P、积分参数 I 选取得是否合适对试样扫描时间的长短具有直接的影响。另外,Z 向工作台的运动时刻受到其内部集成的电容位移传感器的“监视”,传感器输出信号经过放大整形、A/D 转换后被送入工控机,作为该点的 Z 向坐标。三维扫描成像信号来自于工作台的三维位移信号,即利用软件程序从 PI 平台微动控制箱读取位移台三维空间位移值,再由三维位移信号构建被测试样表面的三维微观形貌图。

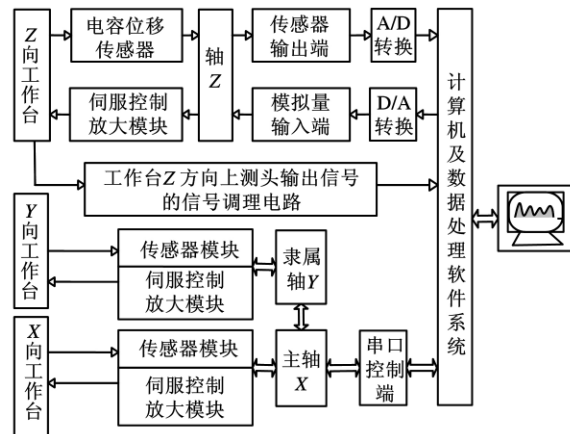


图 6 反馈及定位控制系统

## 3 系统特性

该新型扫描探针显微镜系统的测试主要包括以下四个重要方面:系统噪声测试、探针与试样逼近一分离测试、PI 动态响应测试和图像扫描显示测试。噪声大小是影响测头 Z 方向空间分辨力的重要因素之一,但系统存在噪声是无可避免的。本系统利用自行编写的程序完成对系统噪声水平的测试,程序中设置采样率为每秒 200 点,采样时间为 3s,以测头谐振状态下输出的直流电压信号为测试对象,通过对采集到的数据进行处理得到系统的噪声水平。如图 7 所示,系统测头谐振状态下噪声信号峰峰值约为 9mV。

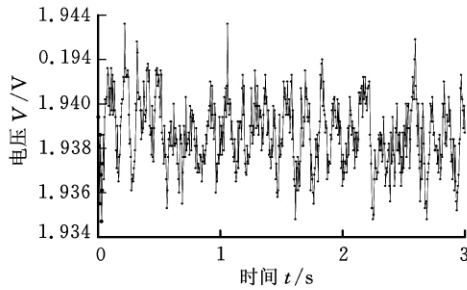


图 7 系统噪声测试结果

试样与探针在逼近过程中,其间距和作用力之间的相互关系通过程序获取。位移台默认测试初始位置为相对零位。开始测试后,位移台相对于该零位的位移值与其相对应的测头直流信号电压值就表征了试样与探针间的距离和作用力,图 8 是力曲线测试图。通过线性拟合得到曲线线性段斜率,即试样与探针接触过程的灵敏度为  $49.8\text{V}/\mu\text{m}$ 。再根据噪声测试结果,最终得到系统垂直方向空间分辨力为  $0.18\text{nm}$ 。目前,基于压电微音叉构成的轻敲测头灵敏度可以达到  $0.46\text{V}/\mu\text{m}$ ,其系统垂直方向空间分辨力为  $1.9\text{nm}$ <sup>[4]</sup>,本系统与之相比,具有明显的优越性。大气环境下的轻敲模式 AFM 垂直分辨力一般在亚纳米量级,在分辨力上本系统与之相当,但本系统的钨探针有效长度有数百微米,在测量深度上具有明显的优越性。

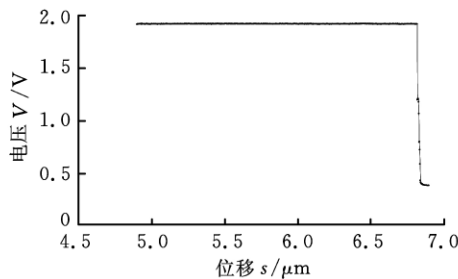
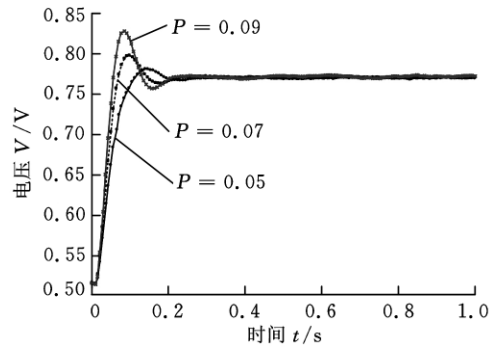
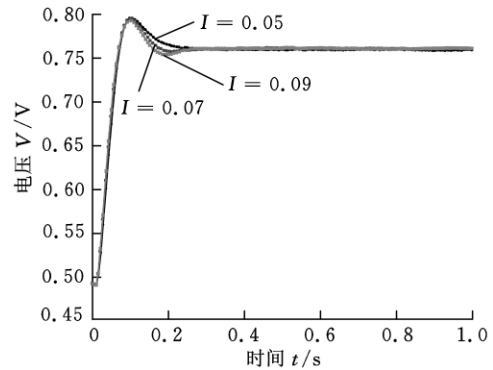


图 8 探针-试样逼近的力曲线图

为测定扫描探针显微镜系统在垂直方向上的动态响应特性,通过计算机程序发出指令控制纳米定位台向探针方向移动一定的位移量,以此模拟一个阶跃信号,测试系统稳定到设定电压值处的动态响应特性。通过测试 SPM 系统对此阶跃信号的响应,得到系统的动态响应特性并确定系统最佳  $P$ 、 $I$  参数值,测试结果见图 9。如图 9a 所示,当维持  $I=0.09$  不变时,参数  $P$  大小的改变直接影响系统的响应速度及到达稳态的时间;如图 9b 所示,当维持  $P=0.07$  不变时,参数  $I$  大小的改变影响系统调节静态误差的强度。最终确定  $P$  的范围为  $0.07 \sim 0.09$ ,  $I$  的范围为  $0.05 \sim 0.09$ ,相应的系统超调量为  $30\text{mV}$  左右,动态响应时间在  $130\text{ms}$  左右。



(a) 维持  $I=0.09$  恒定



(b) 维持  $P=0.07$  恒定

图 9 系统动态响应测试结果

#### 4 测量结果及分析

扫描探针显微镜系统通过采集被测试件表面的三维位移信息,经过处理后获取试样表面的三维微观形貌图。图 10 是系统扫描方式和数据点采集示意图,通过程序控制  $X$ 、 $Y$  两方向的纳米定位台以预先设定步长对试样进行逐点逐行式扫

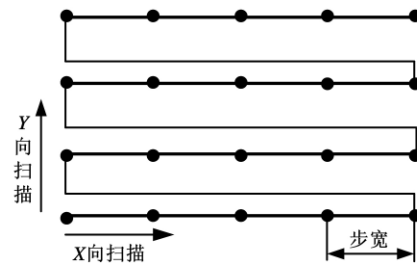


图 10 扫描方式示意图

描,即  $X$  方向每次以一个步长开始扫描,得到该点  $Z$  向坐标后,位移台再移动一个步长,探针开始下一点的扫描。每扫描完一行就返回到起点,沿  $Y$  方向步进一次,接着沿  $X$  向进行下一行的扫描,如此反复,直到扫描完预先设定的范围为止。为了验证系统测量的可行性,以公称栅距为  $2\mu\text{m}$  的光栅为试样,对所研制的 SPM 系统进行检验,获取的三维图如图 11 所示。扫描范围为  $18\mu\text{m} \times 18\mu\text{m}$ ,  $X$  向步进量  $30\text{nm}$ ,  $Y$  向步进量  $600\text{nm}$ ,每行 600 个点,共由 30 条扫描线构成,平均栅距

2.04 $\mu\text{m}$ ,与理论值相符。图12为使用本原公司CSPM4000扫描探针显微镜得到的试样表面形貌图,扫描范围10 $\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ ,平均栅距1.92 $\mu\text{m}$ 。通过比较,两者获得的形貌轮廓相近,但本文中的栅距值与理论值更接近。

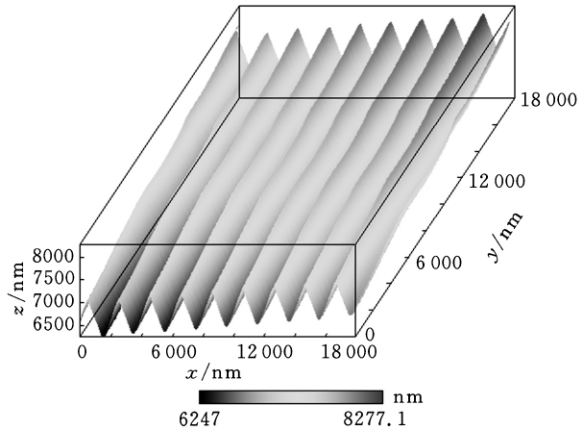


图11 光栅表面三维图

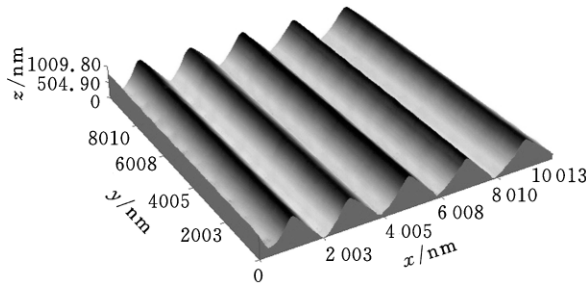


图12 电镜扫描图

## 5 结语

利用PVDF谐振梁和钨探针所构建的扫描测头中,PVDF薄膜既作为带探针的振动臂又作为微小位移的传感器,结构简单,不需要辅助的振幅检测系统,垂直分辨力高,达到了亚纳米量级。同时,所采用的钨探针有效工作长度可达数百微米,这使得对具有大深宽比的MEMS器件沟槽进行测量成为可能,填补了目前各类扫描探针显微镜系统的测量空白。另外,通过对聚酯材料光栅的测量表明该新型测量系统是有效的。

### 参考文献:

- [1] 白春礼,田芳.扫描力显微镜研究进展[J].物理通报,1997,26(7):402-406.
- [2] Garcia R, Perez R. Dynamic Atomic Force Microscopy[J]. Surface Science Reports, 2002, 47: 197-301.
- [3] Mendez-Vilas A, Gonzalez-Martin M L, et al. Artifacts in AFM Images Revealed Using Friction Maps[J]. Applied Surface Science, 2004, 238: 42-46.

- [4] 黄强先,高桥健,初泽毅,等.表面轮廓测定用扫描探针测头研究[J].机械工程学报,2005,41(8):213-216.
- [5] Wejingya U C, Shen Y, Xi N, et al. An Efficient Approach of Handling and Deposition of Micro and Nano Entities Using Sensorized Microfluidic End-effector System[J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2008, 147(1): 6-16.
- [6] 朱杰,孙润广.原子力显微镜的基本原理及其方法学研究[J].生命科学仪器,2005,3(1):22-25.
- [7] 黄强先.基于电化学研磨的SPM钨探针制备方法研究[J].仪器仪表学报,2005,26(3):272-278.
- [8] 黄强先.基于聚偏氟乙烯(PVDF)薄膜的新型SPM测头结构及性能研究[J].工具技术,2009,43(5):95-97. (编辑 卢湘帆)

作者简介:魏晋鹏,男,1986年生。合肥工业大学仪器科学与光电工程学院硕士研究生。主要研究方向为精密测试技术与仪器。黄强先(通信作者),男,1968年生。合肥工业大学仪器科学与光电工程学院教授、博士研究生导师。张昔峰,男,1980年生。合肥工业大学仪器科学与光电工程学院硕士研究生。盛秀丽,女,1985年生。合肥工业大学仪器科学与光电工程学院硕士研究生。

## 没有滚珠轴承照样转的 永磁轴承离心泵

新研制的永磁轴承离心泵只有转子,没有转轴和有形轴承,靠永磁力作用达到无形轴承的功能。科研人员说,永磁力来源于两块磁铁间的作用力。轴承的内圈固定在叶轮,外圈固定在定子上。电机的转子与定子不发生机械接触。永磁力以同极相斥、异极相吸的原理,通过相互间相斥产生的永磁力使转子达到悬浮效果。

这种广泛用于工业、农业、医药等行业的永磁轴承离心泵,叶轮外形像一个飞碟,在永磁力支撑下处于5个自由度的全悬浮状态。电机轴端紧固一个磁盘,吸引泵体内固定在叶轮上的另一个磁盘旋转。叶轮的旋转带动里面液体的旋转,产生离心力。当流体到达叶轮外周时流速高,流出离心泵时速度降低。流体的部分动能转换成压力能,从而完成输送液体的过程。

据发明设计者江苏大学教授钱坤喜介绍,永磁轴承离心泵有三大优势:一是其转子与泵体无机械接触和摩擦噪声小;二是永磁轴承离心泵内部无机械磨损,无需润滑和密封,不用停机维修和保养,可无限期运转;三是永磁轴承的应用,使离心泵体积更小、能效更高、用途更广。(工作总部)