光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.01.005

# 基于双稳态势能调节的仿生纤毛流速传感器

梁贺龙[1,2]，刘　武[1*]，许海军[1,2]，訾　鹏[1,2]

（上海交通大学 1. 微米/纳米加工技术国家级重点实验室；2. 微纳电子学系，上海 200240）

**摘　要：** 针对流速传感器的高分辨率需求，提出了一种基于双稳态势能调节的仿生纤毛流速传感器。该传感器由纤毛、电极层、上部结构层、中间连接层和下部支撑层等多层结构构成，其中上部结构层一方面采用不对称梳齿结构实现差分电容检测，另一方面布置周期性调制梳齿实现系统势能函数呈现双稳态。通过流体-固体力学-静电多物理场耦合分析，得到电容随流速的变化关系，分辨率优于0.001 m/s，另外通过调制梳齿的静电场分析，绘制出系统势能函数曲线。最后，基于MEMS加工技术，通过设计合理的工艺流程制备出了该传感器。

**关键词：** MEMS；双稳态；电容；纤毛；流速传感器

**中图分类号：** TP212.1　**文章编号：** 1001－5868(2021)01－0030－05

## Biomimetic Hair Flow Sensor Based on Bi-stable Potential Energy Adjustment

LIANG Helong[1,2], LIU Wu[1], XU Haijun[1,2], ZI Peng[1,2]

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Micro/Nano Fabrication;
2. Department of Micro/Nano Electronics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, CHN)

**Abstract:** In order to enhance the resolution of the flow sensor, a biomimetic hair flow sensor based on bi-stable potential energy adjustment is proposed. The sensor is mainly composed of hair, electrode layer, top structure layer, middle connecting layer and bottom supporting layer. On the one hand, the top structure layer adopts asymmetric comb fingers to realize differential capacitance detection; on the other hand, periodic modulated comb fingers are arranged to realize bi-stable potential energy function of the system. Through the fluid-solid mechanical-electrostatic multi-physical field coupling analysis, the relation of capacitance changing with the air velocity was obtained, and the resolution was better than 0.001 m/s. In addition, the potential energy function curve of the system was drawn through the electrostatic field analysis of the modulated comb fingers. Finally, based on MEMS processing technology, a reasonable process was designed and the sensor was manufactured.

**Key words:** MEMS; bistable; capacitance; hair; flow sensor

## 0　引言

流速传感器是流体测量中重要的传感器，被广泛用于医疗、工业和环境监测等领域。传统的流场测量装置包括热线风速仪、多普勒超声测速仪、粒子图像测速仪等，存在体积大、结构复杂等问题，难以满足高精度在线流场工程测试的需要。

自然界中有许多生物，如节肢动物蟋蟀和水生动物鱼，为躲避天敌和捕食猎物，都进化出了高性能的流体传感器。蟋蟀纤毛纵横比高，受到气流时，会发生偏转，引起角质层变形，使其能感知热噪声极限为30 μm/s的空气流速变化[1]；鱼类身体两侧各有

**收稿日期：**2020－11－16.

**基金项目：**国家自然科学基金项目(61871266)；青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金项目(QNLM2016ORP0404)；上海市自然科学基金项目(17ZR1414500)；航空科学基金项目(2016ZD57006)；上海市科委专业技术服务平台项目(19DZ2291103).

* **通信作者：**刘　武　　**E-mail：** liuwu@sjtu.edu.cn

一条侧线，能够感知极低的水流速度和方向[2]。

基于仿生研究成果，同时结合 MEMS 加工技术，科研人员开展了仿生纤毛微传感器的研究工作。2000 年，东京大学设计并制作出首个用来测量空气流速流向的新型气流传感器[3]。荷兰 Twente 大学 2003 年设计出仿生纤毛流体传感器[4]，在后续的设计中，从纤毛长度、电容极板间隙、膜片形状等几个部分不断修改和优化。2009 年 Bruinink 等[5]设计出的流速传感器在声学敏感度上提高了 100 多倍，能够测量毫米每秒量级的空气振动。2013 年，Droogendijk 等[6]通过静电弹簧软化改进的方法，使流量检测极限降低至 5 mm/s。2017 年新加坡与麻省理工研究联盟提出一种水凝胶封装形成的仿生流速传感器[7]，通过实验研究发现微孔水凝胶在材料和机械方面对传感器输出灵敏度的提高有较大贡献。2007 年东南大学的魏泽文等[8]首次提出了一种基于压阻测量的二维流速流向传感器，创新性地利用 SU-8 光刻胶作为结构部件。2018 年东南大学杨波等提出了一种谐振式纤毛流速传感器[9]，在 60 Hz 时空气流动幅度检测极限为 3.23 mm/s。

为获得更高分辨率和更低检测阈值的流速微传感器，本文提出一种基于双稳态势能调节的仿生纤毛流速微传感器，其特点是在差分电容式纤毛流速传感器的基础上[10]，增加周期性梳齿结构，通过在调制梳齿上施加直流调制电压，使系统势能处于双稳态，为实现随机共振奠定基础。随机共振的作用在于，当被测流速微弱时，适量白噪声可使得双稳态系统势能的势垒发生改变，从而实现梳齿位移的放大[11]，即放大差分电容，并实现更低阈值的检测。

## 1　结构设计

为实现电容的差分测量和系统的双稳态势能调节，设计的整体结构如图 1 所示。该传感器包含纤毛、电极层、上部结构层、中间连接层以及下部支撑层等多层结构，纤毛分布于动梳齿表面，电极层附着在上部结构层。上部结构层包括五个部分，即折叠梁固定端、折叠梁、动梳齿、检测梳齿和调制梳齿。其中动梳齿通过折叠梁与折叠梁固定端相连，折叠梁固定端通过中间连接层与下部支撑层连接作为固定支撑，动梳齿和折叠梁为悬空结构，动梳齿能够沿敏感方向移动，检测梳齿和调制梳齿通过中间连接层与下部支撑层固定连接，不能移动。中间连接层作为上部结构层与下部支撑层之间的连接层，通过刻蚀来形成凹槽，从而使动梳齿和折叠梁悬空。下部支撑层是传感器的支撑部分。

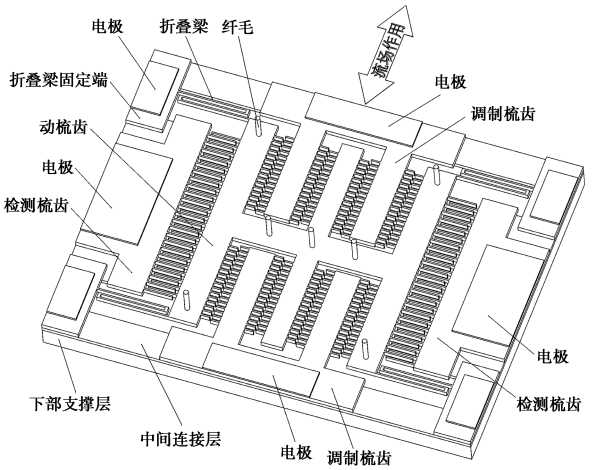



图 1　传感器结构示意图

当传感器受流场作用时，纤毛发生偏转而致使动梳齿沿流场作用力方向移动，引起检测梳齿和动梳齿之间间隙发生变化，进而导致测量电容发生改变，两侧电容间隙变化相反，形成差分电容；通过在调制梳齿上施加调制电压，动梳齿电压为零，使系统势能函数呈现双稳态，为后续随机共振的研究打下基础。

## 2　仿真分析

传感器结构设计完成后，需要对传感器的性能进行仿真分析，结合仿真结果来完成结构的优化和尺寸确定。

### 2.1　传感器敏感方向分析

动梳齿和折叠梁为悬空结构，通过折叠梁端部进行固定。对传感器的悬浮部分进行特征频率分析，可以得到其一阶固有频率为 476.8 Hz，如图 2 所示，动梳齿的敏感方向为图示坐标系的 $y$ 方向。

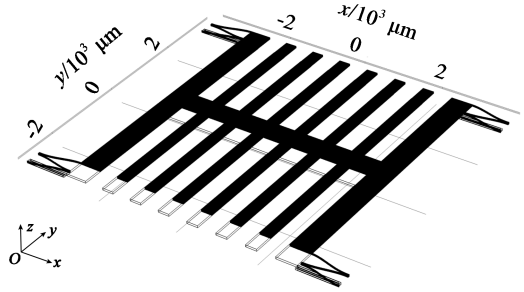



图 2　一阶固有频率分析示意图

在相同风速作用下，折叠梁相比直梁产生变形

更大[10]，检测电容的变化值也更大，这有利于提升传感器的分辨率。折叠梁的尺寸设置对结构刚度的影响比较大，如图 3 所示，$d$ 越大，固有频率越小，刚度越小，越容易变形；$w$ 越大，固有频率越大，刚度越大，越不易变形。该传感器折叠梁所选用尺寸如表 1 所示，可以满足传感器分辨率要求。

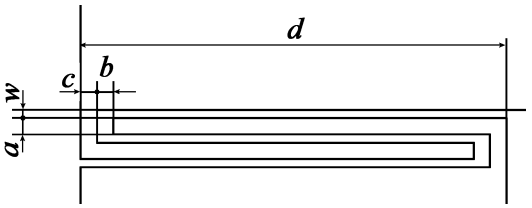



图 3 折叠梁示意图

**表 1 折叠梁尺寸 单位：μm**

| $a$ | $b$ | $c$ | $d$ | $w$ |
|---|---|---|---|---|
| 30 | 40 | 10 | 1 010 | 10 |

## 2.2 传感器分辨率分析

在流场作用下，动梳齿沿着流速方向移动，检测梳齿与动梳齿之间间隙发生变化，检测梳齿分布在传感器左右两侧，采用不对称结构，电容间隙变化方向相反，形成差分电容检测，即通过测量检测梳齿的差分电容值，进而得到空气流速。本文采用 COMSOL 软件进行空气流速与电容值的分析，梳齿的尺寸采用 200 μm×10 μm，间隙采用小间隙 3.5 μm[10]，通过调整梳齿的数量和纤毛的个数来进行仿真分析。首先对动梳齿和两侧检测梳齿建模，通过不同分析模块的连接设置实现流体-固体力学-静电多物理场耦合分析，得到差分电容与空气流速之间的关系，如图 4 所示。可以看出，差分电容随着空气流速的增加而不断增大，且变化幅度越来越大。

考虑到差分电容的泰勒级数展开式[10]，用二次曲线(1)对仿真结果进行拟合：

$$C(v)=M_1v^2+M_2v+M_3 \tag{1}$$

其中，$C$ 为差分电容，$v$ 为空气流速，$M_1$，$M_2$，$M_3$ 为系数，拟合得到 $M_1=0.047$，$M_2=0.211$，$M_3=0.031$。当空气流速从 0 增大到 0.001 m/s 时，差分电容增加 0.2 fF。由于采用测控电路[12]搭载的电容采集芯片 AD7746 的分辨率为 0.004 fF，量程为±4 pF，可以发现差分电容的变化量远大于芯片分辨率，因此该传感器的分辨率优于 0.001 m/s，理论上有望达到 0.000 1 m/s，量程为 6 m/s，实现了高分辨率、小量程的流速测量。

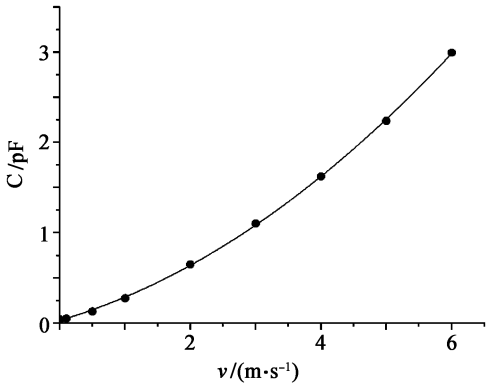



图 4 差分电容和空气流速关系拟合曲线

## 2.3 传感器势能函数分析

为进一步降低传感器的检测阈值，考虑引入随机共振的作用，而随机共振的实现首先需要系统的势能函数处于双稳态，本文通过布置周期性梳齿结构并施加调制电压使得系统的势能函数呈现双稳态。已知系统的势能函数关系表达式[11]为

$$E(x)=\frac{1}{2}kx^2-\frac{1}{2}U^2C(x) \tag{2}$$

其中，$k$ 为结构刚度系数，$x$ 为动梳齿的位移，$U$ 为调制梳齿施加电压(注：动梳齿施加电压为零)，$C$ 为调制梳齿的电容。问题的关键在于梳齿电容和调制电压的计算。调制梳齿示意图如图 5 所示，其电容与梳齿宽度、梳齿高度、梳齿间隙、梳齿周期和梳齿数量等有关，同时会随着梳齿的上下相对移动而发生变化。考虑到实验室 MEMS 工艺加工能力，将梳齿宽度 $f$ 确定为 10 μm，梳齿高度参考现有 SOI 片器件层厚度，确定为 50 μm。

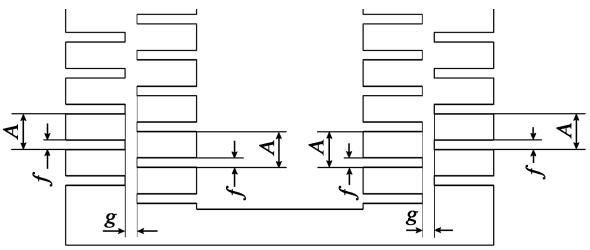



图 5 调制梳齿示意图

接下来重点考虑梳齿周期 $A$ 对电容的影响。当梳齿间隙 $g$ 为 6 μm 时，分析梳齿周期为 22 μm 时电容与位移的变化关系。采用 COMSOL 静电场模块进行仿真分析，为分析方便，所有仿真梳齿数量均为 100 对，建立结构模型，参数化扫描动梳齿位移 $x$ 求解电容，得到电容-位移散点图，大致呈现周期性变化的趋势，如图 6 所示。

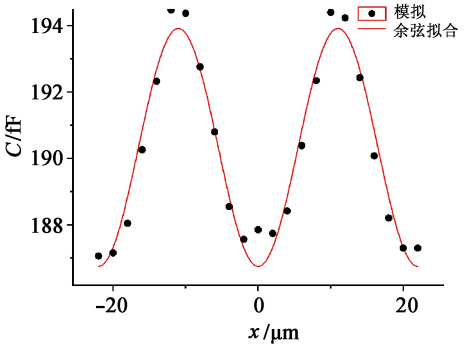



图 6　调制梳齿周期为 22 μm 时电容-位移关系

用余弦函数(3)对电容-位移关系进行拟合得到 $C_p$,$C_0$ 的值[11]：

$$C(x)=N\left[C_p-C_0\cos\left(\frac{2\pi x}{A}\right)\right] \tag{3}$$

其中,$N$ 为梳齿数量,$C_p$,$C_0$ 为电容系数,$A$ 为梳齿周期。同理,设梳齿间隙不变,分析梳齿周期分别为 24,26,28 和 30 μm 时的电容-位移变化关系,并用相同余弦函数表达式拟合得到相应系数。

根据杜芬方程式的分析,系统处于双稳态时,调制电压 $U$ 需满足下式[11]：

$$U\geqslant\frac{A}{\pi}\sqrt{\frac{k}{2NC_0}} \tag{4}$$

在分析过程中,将传感器结构的整体尺寸确定为 9.5 mm×8.5 mm,其刚度系数为 18.5 N/m,取梳齿周期 $A$ 为 22 和 30 μm,分别计算调制电压最小值,结果如表 2 所示。

**表 2　梳齿间隙为 6 μm 时电压计算值**

| $g$/μm | $A$/μm | $C_0$/F | $N$/对 | $U$/V |
|---|---|---|---|---|
| 6 | 22 | $3.58\times10^{-17}$ | 3 640 | 58.9 |
| 6 | 30 | $1.43\times10^{-16}$ | 2 464 | 48.9 |

由于拟采用的测控电路施加调制电压要求不超过 45 V,将梳齿间隙 $g$ 改为 5 μm,重复上述仿真分析过程,拟合得到电容系数 $C_0$,计算调制电压,整理结果如表 3 所示,梳齿周期为 30 μm 时电压值满足要求。

**表 3　梳齿间隙为 5 μm 时电压计算值**

| $g$/μm | $A$/μm | $C_0$/F | $N$/对 | $U$/V |
|---|---|---|---|---|
| 5 | 22 | $6.04\times10^{-17}$ | 3 640 | 45.4 |
| 5 | 30 | $2.03\times10^{-16}$ | 2 464 | 41.0 |

综合比较后确定周期性梳齿结构参数,即梳齿周期为 30 μm,梳齿间隙为 5 μm,调制电压为 45 V,此时系统的势能曲线处于双稳态,计算得到能量势垒为 0.022 nJ,如图 7 所示。

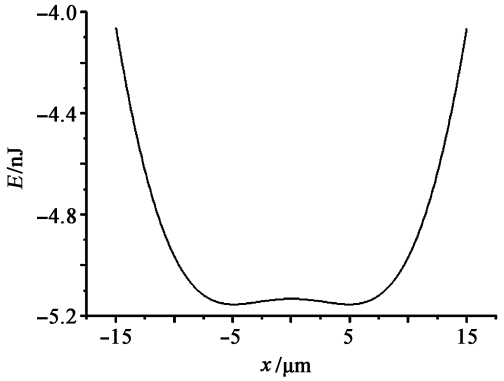
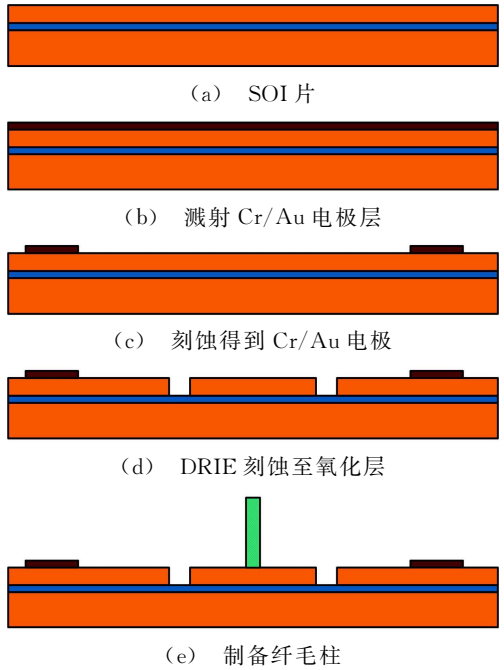



图 7　能量-位移关系

## 3　工艺流程设计与加工

该传感器的制备采用 MEMS 加工技术,设计加工工艺流程如图 8 所示[10]。第一步,准备 11.4 cm (4 inch) SOI (Silicon-on-Insulator),具体规格为器件层硅厚度 50 μm,中间氧化层厚度 2 μm,背硅层厚度 300 μm,其中器件层硅的电阻率为 0.001～0.01 Ω·cm,并按照所设计的结构尺寸绘制掩模版;第二步,在器件层进行离子束溅射 Cr/Au 作为电极;第三步,光刻完成后离子束刻蚀 Cr/Au,得到电极图形,然后去胶;第四步,光刻并进行 DRIE 刻蚀器件层硅,刻蚀至中间氧化层,然后去胶;第五步,采用 SU8 胶光刻显影制备纤毛柱;第六步,使用氢氟酸湿法刻蚀部分中间氧化层,得到悬浮结构,并利用超临界干燥工艺避免吸附。目前,工艺流程已完成,加工得到的传感器如图 9 所示,验证了工艺流程



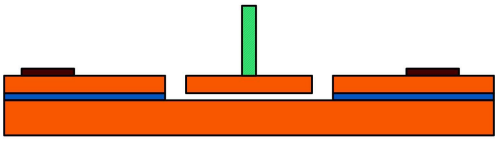
(a)　SOI 片

(b)　溅射 Cr/Au 电极层

(c)　刻蚀得到 Cr/Au 电极

(d)　DRIE 刻蚀至氧化层

(e)　制备纤毛柱



(f) 氢氟酸湿法刻蚀中间氧化层得到悬浮结构

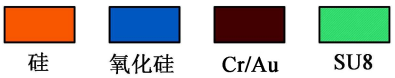



图 8 工艺流程图

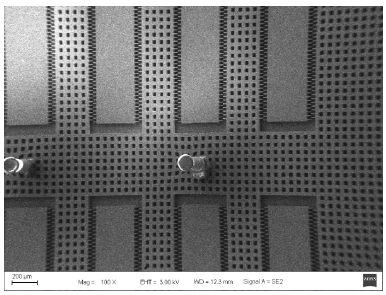


图 9 传感器 SEM 图

的可行性,后续将开展传感器分辨率的性能测试和随机共振机制的进一步研究。

## 4 结论

本文提出了一种实现高分辨率小量程的流速传感器,采用差分电容式传感原理,通过流体-固体力学-静电多物理场耦合分析,得到差分电容随空气流速的变化关系。结果表明其分辨率优于 0.001 m/s,量程为 6 m/s;同时通过对调制梳齿电容的静电场分析,绘制出呈现双稳态的系统势能函数曲线,为实现随机共振、降低传感器检测阈值奠定了基础;另外,基于 MEMS 工艺制备出传感器表头,后续将结合测控电路进行性能测试,以便进一步优化和改进。

**参考文献:**

[1] Casas J, Liu C, Krijnen G. Biomimetic Flow Sensors. In: Bhushan B. (eds) Encyclopedia of Nanotechnology [M]. Dordrecht: Springer, 2012: 264-276.

[2] 张国军, 陈 尚, 薛晨阳, 等. 纤毛式 MEMS 矢量水声传感器的仿生组装[J]. 纳米技术与精密工程, 2009, 7(3): 221-227.
Zhang Guojun, Chen Shang, Xue Chenyang, et al. Bionic encapsulation of a hair cell vector hydrophone based on MEMS [J]. Nanotechnology and Precision Engin., 2009, 7(3): 221-227.

[3] Ozaki Y, Ohyama T, Yasuda T, et al. An air flow sensor modeled on wind receptor hairs of insects[C]// Proc. of IEEE 13th Annual Inter. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems, 2000: 531-536.

[4] Van J J B, Dijkstra M, Wiegerink R J, et al. Fabrication of arrays of artificial hairs for complex flow pattern recognition [C]// Proc. of IEEE Sensors, 2003: 332-336.

[5] Bruinink C M, Jaganatharaja R K, De Boer M J, et al. Advancement in technology and design of biomimetic flow-sensor arrays[C]// IEEE 22nd Inter. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems, 2009: 152-155.

[6] Harmen D, Christiaan B, Remco S, et al. Tunable sensor response by voltage-control in biomimetic hair flow sensors [J]. Micromachines, 2013, 4(1): 116-127.

[7] Ajay K, Meghali B, Elgar K, et al. Cupula-inspired hyaluronic acid-based hydrogel encapsulation to form biomimetic MEMS flow sensors[J]. Sensors, 2017, 17(8): 1728.

[8] 魏泽文, 秦 明, 黄庆安. 一种新型硅压阻式流速流向传感器的设计[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(8): 1416-1420.
Wei Zewen, Qin Ming, Huang Qing'an. Design of a novel silicon piezoresistive flow sensor[J]. Chinese J. of Scientific Instrument, 2007, 28(8): 1416-1420.

[9] Yang B, Guo X, Wang Q H, et al. A novel flow sensor based on resonant sensing with two-stage microleverage mechanism [J]. Rev. Sci. Instrum., 2018, 89: 045002.

[10] 严中稳, 刘 武, 梁贺龙, 等. 仿生纤毛 MEMS 矢量流速传感器的结构设计及仿真分析[J]. 航空科学技术, 2020, 31(2): 72-76.
Yan Zhongwen, Liu Wu, Liang Helong, et al. Structural design and simulation analysis of biomimetic hair MEMS vector flow sensor[J]. Aeronautical Science & Technol., 2020, 31(2): 72-76.

[11] Droogendijk H, De Boer M J, Sanders R G P, et al. Stochastic resonance in a voltage-controlled micromechanical slider[J]. J. of Microelectromechanical Systems, 2015, 24(3): 651-660.

[12] 许海军, 刘 武, 梁贺龙, 等. 基于 STM32 和 ZigBee 的微电容在线检测系统[J]. 电子器件, 2020, 43(5): 1133-1137.
Xu Haijun, Liu Wu, Liang Helong, et al. Micro capacitance on-line detection system based on STM32 and ZigBee [J]. Chinese J. of Electron Devices, 2020, 43(5): 1133-1137.

**作者简介:**

**梁贺龙**(1992—),男,河南许昌人,硕士研究生,主要研究方向为仿生微传感器设计;

**刘 武**(1976—),男,博士,助理研究员,主要研究方向为微机电系统。