

# 仿生纤毛 MEMS 矢量流速传感器的结构设计及仿真分析



严中稳<sup>1,2</sup>, 刘武<sup>1,2,\*</sup>, 梁贺龙<sup>1,2</sup>, 许海军<sup>1,2</sup>, 訾鹏<sup>1,2</sup>

1. 上海交通大学, 上海 200240

2. 微米/纳米加工技术国家级重点实验室, 上海 200240

**摘要:** 针对精确测量飞行器流场速度分布的需求, 本文提出并设计了一种基于 Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) 技术的仿生纤毛矢量流速微传感器。该传感器主要由 4 组弯曲折叠梁、悬浮薄膜、多纤毛柱以及非对称梳齿电极对组成。运用解析法与有限元数值计算相结合的方法, 分析得到所设计传感器的空气流速测量量程达到 100m/s, 分辨率优于 0.01m/s。与已有的仿生纤毛流速微传感器相比, 该传感器有望获得更大的量程和更高的分辨率。此外, 还设计了微传感器的完整制备工艺流程。初步工艺试验验证了其可行性。

**关键词:** MEMS; 纤毛; 梳齿; 矢量流速传感器; 弯曲折叠梁

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2020.02.010

精确测量飞行器流场速度分布对分析飞行器的空气动力学性能及实现飞行器主动流动控制有着重要的意义。目前, 随着小型飞行器的快速发展, 迫切需要有可分辨 0.01m/s 空气流速变化, 量程达到 100m/s 的宽量程、高分辨率的空气流速传感器来满足其空气动力学测试需求。

在自然界中有很多高性能生物纤毛感受器, 如蟋蟀的尾须、鱼的侧线等, 这些生物都是通过自身纤毛来感受外界流场的细微变化, 从而实现捕食猎物和躲避天敌。经过千万年的自然选择进化, 自然界的纤毛感受器已表现出宽量程和极高灵敏度的性能<sup>[1,2]</sup>。这为科学家们研制高性能的传感器提供了发展思路。为此, 从 2000 年开始, 各国科学家们开始从事仿生纤毛微传感器的研究工作。

目前, 已有报道的仿生纤毛流速微传感器大多数是压阻式传感器。2007 年, 国内东南大学的黄庆生、魏泽文等设计了一种新型可测二维风向硅压阻式流速流向传感器<sup>[3]</sup>。2002 年起, 美国西北大学 Liu Chang 课题组进行了多年仿生纤毛流速传感器的研制工作<sup>[4]</sup>, 2007 年, 该课题组 Chen Nannan

报道了双悬臂梁支撑结构的传感器<sup>[5]</sup>, 其在 0~0.4m/s 水流流速量程内的分辨率为 0.7mm/s。2014 年至今, 新加坡南洋理工的 Jianmin Miao 团队和麻省理工学院 Michael S. Triantafyllou 团队一直合作从事微仿生纤毛传感器的研究工作。2014 年, 该合作团队的 Kottapalli 等报道了基于柔性液晶聚合物基底上制备的金应变压阻单元以及该单元中心通过精密装配黏结立体光刻制备的 Si60 纤毛 (直径 400 $\mu$ m、长 2700 $\mu$ m) 实现的仿生纤毛传感器阵列, 其中在风中传感器的量程为 8m/s、最小可分辨为 0.1m/s 速度变化<sup>[6]</sup>。2016 年为提高金应变压阻纤毛微传感器性能, 他们采用增加纤毛与流体的接触面积来提升传感器的性能, 具体采用静电纺丝技术在 Si60 纤毛制备金字塔形纳米纤维支架并在上面制备水凝胶顶<sup>[7]</sup>, 该传感器灵敏度较 2014 年器件提高 3.5~5 倍。

考虑到压敏电阻对温度较敏感易受环境影响, 以及电容式传感器易制备且有更好温度特性的特点, 本文提出了一种基于弯曲折叠梁的不对称梳齿电极对结构的仿生纤毛矢量流速微传感器, 理论分析表明所提出的矢量流速微传

收稿日期: 2019-11-08; 退修日期: 2019-12-12; 录用日期: 2019-12-24

基金项目: 航空科学基金(2016ZD57006); 青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金(QNLM2016ORP0404); 国家自然科学基金(61871266); 上海市自然科学基金(17ZR1414500)

\*通信作者. Tel.: 021-34206400 E-mail: liuwu@situ.edu.cn

引用格式: Yan Zhongwen, Liu Wu, Liang Helong, et al. Structural design and simulation analysis of biomimetic hair MEMS vector flow sensor [J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(02): 72-76. 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(02): 72-76.

传感器有望获得更高的测量范围和分辨率。

### 1 微型矢量流速传感器原理和结构设计

微型矢量流速传感器测量原理是将流体经过纤毛柱时带来的应变变化转换为梳齿电极对之间电容变化,通过测量电容来实现流速测量。

图1为微型矢量流速传感器结构示意图。当流体作用在传感器时,流场作用力作用在多纤毛柱上,纤毛柱带动悬浮薄膜运动,使得连接在薄膜的梳齿对发生位置上的移动,梳齿电极对之间的电容就会随着距离改变而变化。

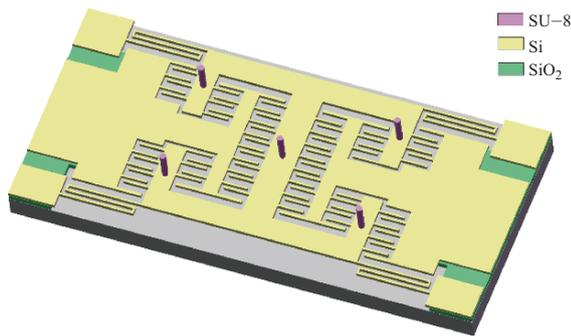


图1 传感器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the sensor

微型矢量流速传感器的结构主要由4组弯曲折叠梁、组成差分结构的不对称梳齿电极、多纤毛柱以及悬浮薄膜组成。传感器以4in(1in=25.4mm)的SOI(绝缘体上的硅)圆片(器件层厚度为45μm、埋层二氧化硅厚度为3μm、Handel层厚度为300μm)为基底进行制备,其具体结构尺寸见表1。

综合考虑电容极板布置便利和大的差分电容变化需

表1 传感器的尺寸参数

Table 1 Size parameters of sensor

梁长/mm	梁宽/μm	纤毛直径/μm	纤毛高度/μm	梳齿长/μm	梳齿宽/μm	梳齿对/对	小间隙/μm	大间隙/μm
2	10	150	500	200	10	136	3.5	20

$$\Delta c = c_1^+ - c_1^- = c_0 [2 \frac{\Delta\delta}{\delta} + 2(\frac{\Delta\delta}{\delta})^2 + 2(\frac{\Delta\delta}{\delta})^3 + \dots] \quad (5)$$

当省略高次项时得到:

$$\frac{\Delta c}{c_0} = 2 \frac{\Delta\delta}{\delta} \quad (6)$$

从理论分析得到差分结构对灵敏度有显著提高,并且可以降低传感器受环境等影响。

求,本文采用图1所示的不等间隙的电容布置形式,其中梳齿电极小间隙为3.5μm,大间隙为20μm。

图2为不对称梳齿电极差分示意图,通过理论分析平行板电容器的电容可以表示为:

$$c = \frac{\epsilon s}{d} \quad (1)$$

式中:ε为空气的介电常数;s和d为表示重叠面积和电容器左右两极板之间的距离。

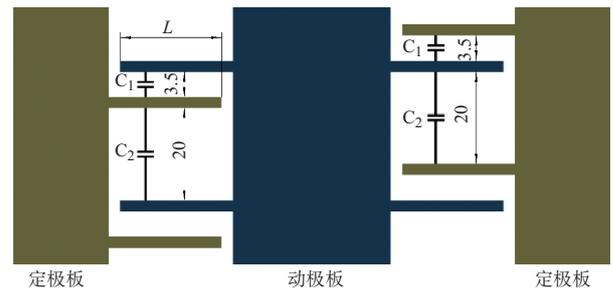


图2 不对称梳齿电极差分结构(单位:μm)

Fig.2 Asymmetric comb electrode differential structure

当动极板上移时左边小间隙变大,右边小间隙变小,现在假设初始电容为c<sub>0</sub>,左右两边的初始小间隙为δ,动极板上移Δδ。此时左边小间隙变为δ-Δδ,右边小间隙为δ+Δδ。

由式(1)可得:

$$c_1^+ = \frac{\epsilon s}{\delta - \Delta\delta} \quad (2)$$

$$c_1^- = \frac{\epsilon s}{\delta + \Delta\delta} \quad (3)$$

差分电容为:

$$\Delta c = c_1^+ - c_1^- \quad (4)$$

当满足Δδ << δ时,根据泰勒级数展开可得电容:

### 2 微型矢量流速传感器的仿真分析

#### 2.1 流体-纤毛作用力分析

本文采用解析法求解流体作用于纤毛柱所产生的力<sup>[8-10]</sup>。对于纤毛所受流体运动可以假设无滑移,流体以平行于无限平板结构的层流情况,平板上的流体速度分布情况如式(7)所示:

$$U_f(z,t) = U_z \cdot e^{j(\omega t + \xi_z)} \quad (7)$$

其中:

$$U_z = U_0 [1 + e^{-2z/\delta} - 2e^{-z/\delta} \cos(z/\delta)]^{0.5} \quad (8)$$

$$\xi_z = \tan^{-1} \{ [e^{-z/\delta} \cdot \sin(z/\delta)] / [1 - e^{-z/\delta} \cdot \cos(z/\delta)] \} \quad (9)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2\mu_f}{\omega \cdot \rho_f}} \quad (10)$$

式中:  $U_0$  为边界层外的自由流速;  $\omega$  为角速率;  $t$  为时间;  $z$  为与平板距离;  $\mu_f$  为流体动力黏度;  $\rho_f$  为流体密度。

根据 Stokes 研究成果, 单位长度纤毛上所受的流体作用力<sup>[9]</sup>为:

$$F(z, t) = Z_s U_r \quad (11)$$

式中:  $Z_s$  为流阻;  $U_r$  为纤毛相对流体的速度。得到  $Z_s$  表达式为:

$$Z_s = 4\pi \cdot \mu_f \cdot G + j\omega \cdot (\pi \cdot \rho_f \cdot R_h^2 - \frac{\pi^2 \cdot \mu_f \cdot G}{\omega \cdot g}) \quad (12)$$

式中:  $R_h$  为纤毛半径;  $G$  和  $g$  表达式如式(13)、式(14)所示:

$$G = -\frac{g}{g^2 + \left(\frac{\pi}{4}\right)^2} \quad (13)$$

$$g = 0.577 + \ln\left(\frac{R_h}{\sqrt{2} \delta}\right) \quad (14)$$

$U_r$  为流体流速减去纤毛速度, 其表达式如式(15)所示:

$$U_r = U_f - j \cdot \omega \cdot z \cdot \varphi_h \quad (15)$$

式中:  $\varphi_h$  为纤毛角位移。

综合式(7)~式(15), 纤毛所受流体黏滞力<sup>[10]</sup>为:

$$F = \int_0^{L_h} F(z, t) \cdot dz = Z_s \cdot \int_0^{L_h} U_r \cdot dz - j\omega \cdot Z_s \cdot \int_0^{L_h} \varphi_h \cdot z \cdot dz \quad (16)$$

式(16)体现了力与流速之间的关系, 通过 Matlab 仿真计算得到纤毛受力跟流速之间的关系如图3所示。

从图中可以看出一定范围内的流速跟力之间是呈线性关系的。

## 2.2 微型矢量流速传感器的应变与应力分析

当纤毛柱受到运动流体作用时, 微传感器的纤毛柱、支撑薄膜和折叠梁会产生形变。为了保证微传感器的空气下流速测量量程能达到 100m/s, 本文采用 ANSYS 软件分析了空气流速为 100m/s 时该传感器所受的应变和应力情况。图4(a)为应变的分析结果, 从仿真结果中得到最大的应变为 0.133 $\mu\text{m}$ , 结果表明梳齿电极小间隙设计的 3.5 $\mu\text{m}$  能够满足要求。图4(b)是应力的分析结果, 从仿真结果得到最大应力为位于折叠梁上的 0.29MPa, 且该应力值远小于 SU-8 纤毛柱自身强度和 Si 的自身强度, 因而该传感器空气流速的量程可达 100m/s。

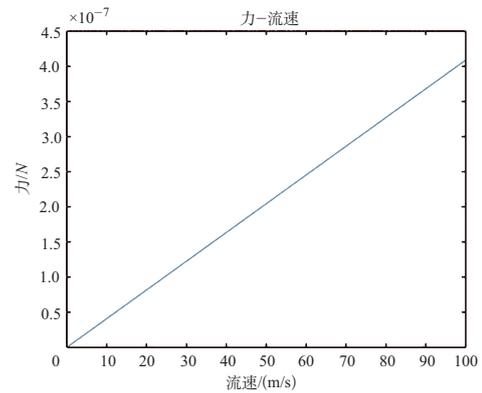
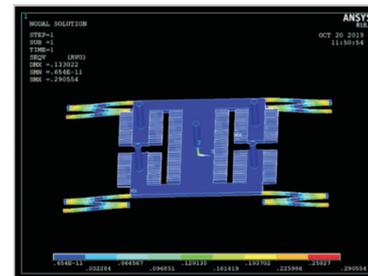


图3 力与流速对应关系

Fig.3 Correspondence between force and flow rate



(a) y方向上的应变分析



(b) 应力分析

图4 流速为 100m/s 传感器的应变和应力分析

Fig.4 Strain and stress analysis of a flow rate of 100m/s

## 2.3 传感器性能分析

本文设计的传感器为电容式流速传感器, 通过分析空气流速与差分电容的变化关系, 并根据微电容的测试能力, 我们可以得到传感器的灵敏度、量程和分辨率。

本文分别分析了采用弯曲折叠梁和传统直梁支撑时, 传感器动梳齿应变和差分电容与空气流速的关系。图5为 ANSYS 有限元分析得到的应变和流速关系图。图6为计算得到的流速与差分电容关系图。根据图5和图6的结果, 我们可知, 对于弯曲折叠梁和直梁支撑传感器, 其在 100m/s 空气流速范围内, 它们的差分电容与流速关系近似为线性关系, 它们的灵敏度分别为 1.45fF/m/s、0.13fF/m/s。相比直梁传感器灵敏度, 弯曲折叠梁传感器的灵敏度可以提升约 11.1 倍。考虑到典型的电容测试芯片

AD7746 电容测量量程在±4pF,分辨率为 4aF,采用弯曲折叠梁的传感器的分辨率可达 0.01m/s,量程大于 100m/s。

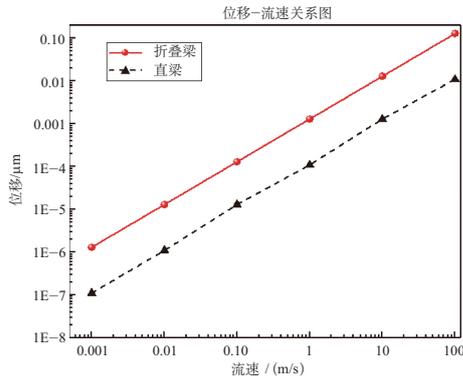


图5 不同结构流速与应变位移关系图

Fig.5 Relationship between velocity and strain displacement of different structures

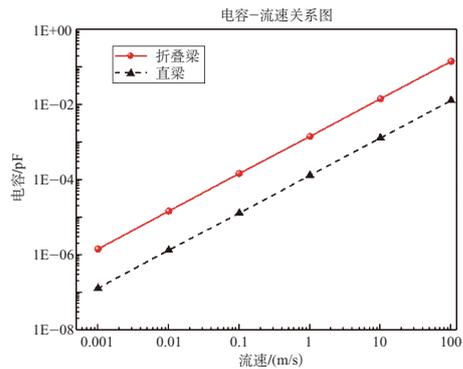


图6 不同结构流速与电容关系图

Fig.6 Relationship between flow velocity and capacitance of different structures

### 3 微型矢量流速传感器的工艺制造

基于 MEMS 加工技术,本文提出了如图 7 所示的基于 SOI 硅片的工艺制造路线。具体工艺步骤:(1)清洗 SOI 硅片;(2)在 SOI 上器件层制备 Cr /Au 电极及其引线;(3)DRIE 刻蚀得到悬浮薄膜结构、梳齿结构和折叠梁;(4)制造 SU8 胶纤毛柱;(5)通过牺牲孔实现牺牲层释放,得到悬浮薄膜、梳齿和折叠梁结构。

目前,制造工作已经完成工艺步骤(1)~步骤(4),图 8 为对应的传感器结构实物照片。制备的传感器结构稳定性好,图形清晰。证实了工艺流程设计合理。后续,我们将完成传感器牺牲层释放并开展实际性能测试工作。

### 4 结束语

提出了一种基于 MEMS 技术的仿生纤毛矢量流速微

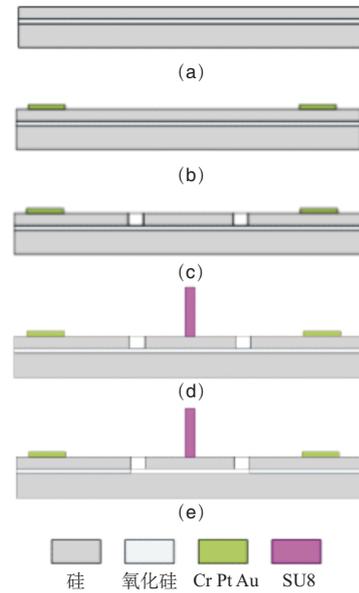


图 7 MEMS 矢量流速传感器加工工艺路线

Fig.7 Process sequence used for MEMS vector flow sensor

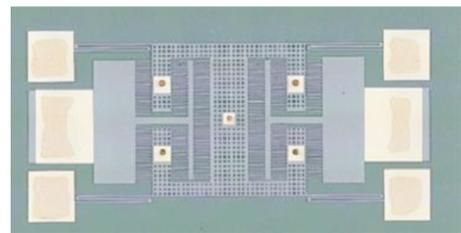


图 8 传感器照片

Fig.8 Sensor experiment photo

传感器,该传感器采用弯曲折叠梁与不对称梳齿电极等结构。我们运用解析法和有限元仿真分析相结合的方法,进行了流体-固体-静电场分析。分析结果表明,所设计的微流速传感器在空气下的测试量程可达 100m/s、灵敏度可达 0.01m/s。此外,我们还提出了该传感器的制备工艺流程,并通过工艺试验验证了该方法的可行性。 **AST**

### 参考文献

[1] Rizzi F, Quattieri A, Dattoma T, et al. Biomimetics of underwater hair cell sensing [J].Microelectronic Engineering, 2015, 132: 90-97.

[2] Shimozawa T, Murakami T, Kumagai T. Cricket wind receptors: thermal noise for the highest sensitivity known [M]. Vienna, Austria: Sensors and Sensing in Biology and Engineering, Springer, 2003.

[3] 黄庆生,魏泽文.一种新型硅压阻式流速流向传感器[J].仪器仪表学报,2007,28(8):1416-1420.

- Huang Qingsheng, Wei Zewen. Design of a novel silicon piezoresistive flow sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(8):1416-1420.(in Chinese)
- [4] Fan Z, Chen J, Zou J, et al. Design and fabrication of artificial lateral line flow sensors[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2002(12): 655-661.
- [5] Chen N N, Tucker C, Liu C, et al. Design and characterization of artificial haircell sensor for flow sensing with ultrahigh velocity and angular sensitivity [J]. Journal of Microelectro mechanical Systems, 2007, 16(5): 999-1014.
- [6] Kottapalli A, Asadnia M, Miao J, et al. Touch at a distance sensing: lateral-line inspired MEMS flow sensors [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2014, 9 (4): 046011.
- [7] Kottapalli A, Bora M, Asadnia M, et al. Nanofibril scaffold assisted MEMS artificial hydrogel neuromasts for enhanced sensitivity flow sensing[J]. Scientific Reports, 2016(6):19336.
- [8] Izadi N. Bio-inspired mems aquatic flow sensor arrays [D]. Netherlands: University of Twente, 2011.
- [9] Humphrey J, Devarakonda R, Iglesias I, et al. Dynamics of arthropod filiform hairs. I. mathematical modelling of the hair and air motions[J]. Philosophical Transactions: Biological Sciences, 1993, 340 (1294): 423-444.
- [10] Shimozawa T, Kumagai T, Baba Y. Structural scaling and functional design of the cercal wind receptor hairs of cricket[J]. Journal of Comparative Physiology a-Sensory Neural and Behavioral Physiology, 1998, 183: 171-186.(责任编辑 王为)

### 作者简介

严中稳(1993-)男,硕士研究生。主要研究方向:仿生微传感器设计。

Tel:18818206892

E-mail:yanzhongwen29@sjtu.edu.cn

刘武(1976-)男,博士,助理研究员。主要研究方向:微机电系统。

Tel:021-34206400

E-mail:liuwu@sjtu.edu.cn

## Structural Design and Simulation Analysis of Biomimetic Hair MEMS Vector Flow Sensor

Yan Zhongwen<sup>1,2</sup>, Liu Wu<sup>1,2,\*</sup>, Liang Helong<sup>1,2</sup>, Xu Haijun<sup>1,2</sup>, Zi Peng<sup>1,2</sup>

1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Micro/Nano Fabrication, Shanghai 200240, China

**Abstract:** Aiming at accurately measuring the flow velocity distribution of aircraft, a biomimetic hair vector flow sensor based on Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) technology is proposed and designed. The sensor is mainly composed of four sets of curved folding beams, a suspension film, a multi-hair and an asymmetric comb-shaped electrode pair. Through the finite element simulation calculation, the measured air flow rate of the sensor reaches 100m/s, and the resolution is better than 0.01m/s. Compared with the existing bionic hair micro sensors, the proposed sensor is expected to reach a larger range and higher resolution. In addition, a complete preparation process for the micro sensor is designed. The feasibility is verified in the preliminary process experiments.

**Key Words:** MEMS; hair; comb pair; vector flow sensor; curved folding beam

**Received:** 2019-11-08; **Revised:** 2019-12-12; **Accepted:** 2019-12-24

**Foundation item:** Aeronautical Science Foundation of China (2016ZD57006); Qingdao National Laboratory of Marine Science and Technology Open Fund (QNL2016ORP0404); National Natural Science Foundation of China (61871266); Shanghai Natural Science Foundation of China (17ZR1414500)

\***Corresponding author.** Tel.:021-34206400 **E-mail:** liuwu@sjtu.edu.cn