

差压式测风微传感器敏感元件的设计

卫克晶¹, 孙学金¹, 杜利东²

(1.国防科技大学 气象海洋学院, 南京 211101; 2.中国科学院 电子学研究所, 北京 100080)

摘要: **目的** 提高测风微传感器的测量准确性。**方法** 首先通过有限元仿真软件对差压式测风微传感器敏感元件材料进行仿真, 确定结构参数; 其次对风测量元件结构周围的风压分布进行模拟, 建立最佳风压分布方程, 并基于风压分布方程设计风速风向解算算法。**结果** 通过对风压分布的仿真与分析, 提出了多导风孔的结构设计及带硅岛压力膜作为风压感压膜的方法。**结论** 该方法提高了测风微传感器的测量准确性。

关键词: MEMS 技术; 测风微传感器; 敏感元件; 仿真与分析

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.06.001

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)06-0001-04

Design of Sensitive Element for Differential Pressure Wind Micro Sensor

WEI Ke-jing¹, SUN Xue-jin¹, DU Li-dong²

(1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China;

2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

ABSTRACT: **Objective** To improve the measurement accuracy of wind micro sensor. **Methods** Firstly, the finite element simulation software was used to simulate the material of the sensitive element for the differential pressure micro sensor to determine the structural parameters. Secondly, the wind pressure distribution around the structure of the wind measurement element was simulated to establish an optimal wind pressure distribution equation; and the wind speed and direction calculation algorithm was designed based on the wind pressure distribution equation. **Results** Through simulation and analysis of the wind pressure distribution, the structural design of multiple air holes and the method of taking the pressure film with silicon island as the pressure sensitive film were proposed. **Conclusion** The method improves measurement accuracy of the wind micro sensor.

KEY WORDS: MEMS technology; wind micro sensor; sensitive element; simulation and analysis

近年来, 随着微电子机械系统 MEMS 技术的发展, 将 MEMS 技术应用在测风传感器中^[1], 不仅可使传统旋转式测风传感器的体积大为缩小, 从而减少传感器对空气流场的干扰, 而且可使测风微传感器具有质量惯性和热惯性小、响应速度高、易集成、低功耗等优点。根据测风的工作原理, 基于 MEMS 技术的测风微传感器主要有热式^[2]、差压式^[3]和提升力式、拖动力式等。其中, 敏感元件是测风微传感器的关键部分, 其稳定性直接决定了测风微传感器的灵敏度、准确度, 对于测风微传感器的性能十分重要。文中就

差压式测风微传感器敏感元件的设计进行重点介绍。

1 差压式测风微传感器

差压式测风微传感器工作时, 通过测量南北方向和东西方向的风压差, 转化为 x 方向风压敏感元件和 y 方向风压敏感元件的输出值, 通过三角关系法算法可获取风速风向值。

设 x 、 y 方向的风速分量分别为 u_x 和 u_y , 通过关系式 (1) 和 (2) 计算出风速 u 和风向值 θ ^[4]。

收稿日期: 2019-01-30; 修订日期: 2019-02-09

作者简介: 卫克晶 (1978—), 女, 山西人, 硕士, 副教授, 主要研究方向为大气环境自动探测技术。

通讯作者: 孙学金 (1964—), 男, 江苏省人, 博士, 主要研究方向为大气探测技术。

$$u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \quad (1)$$

$$\theta = \arg \tan(u_x/u_y) \quad (2)$$

1.1 系统组成

差压式测风微传感器的系统框图如图 1 所示, 由风导流模块、 x 方向风压敏感元件、 y 方向风压敏感元件、信号采集与补偿模块、电源管理模块、数据处理模块、通讯模块和上位机组成。

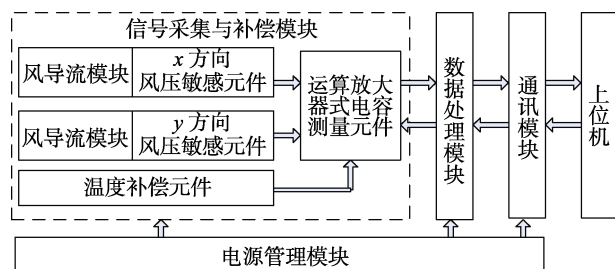


图 1 微风传感器系统

各模块的功能为:

1) 风压敏感元件。风压敏感元件为 SOI 硅片, 经 MEMS 加工形成厚度均匀的感压薄膜^[5], 与带孔 7740 玻璃通过键合形成常压空腔室, 构成电容式风压敏感元件, 其结构及封装如图 2 所示。

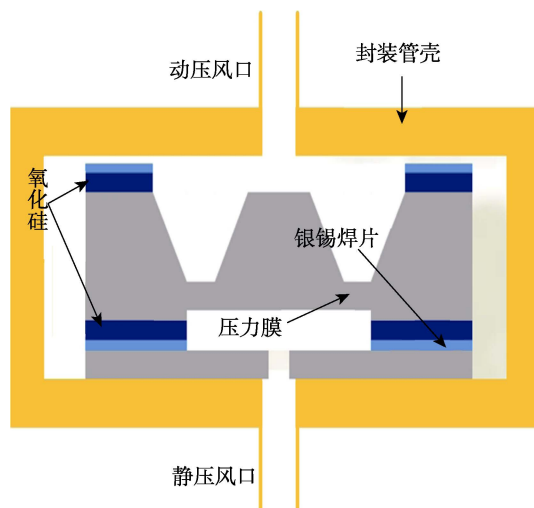


图 2 电容式风压敏感元件及其封装

2) 风导流模块。风导流是在风压敏感元件基础上, 采用动压孔与静压腔结构, 实现风压的产生与测量。动压孔以及静压腔与风压敏感元件直接相连, 其结构如图 3 所示。

3) 信号采集与补偿模块。信号采集与补偿模块基于高性能的 MCU, 采用运算放大器式电路, 获取风压敏感元件原始信号, 通过运算器放大电路, 将原始信号转换成与压力敏感膜挠度成线性关系的信号, 补偿电容式风压敏感元件输出的非线性问题。

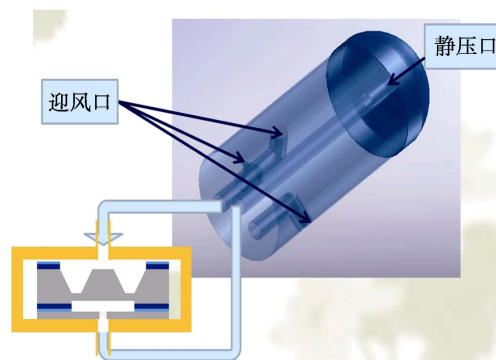


图 3 风导流模块

4) 电源管理模块。系统采用直流 12 V 电源, 通过参考源芯片为气压敏感元件提供恒流源或者恒压源。通过电压转换元件为数据通讯模块、数据处理模块供电, 实现系统电源管理功能。采用节能设计, 利用低功耗芯片以及外部晶振的方法, 降低传感器功耗。

5) 通讯模块。与上位机通讯时, 按照通讯协议通过数据通信接口进行信息交换, 实现数据的自动或者从动上报。具有查询与预设通讯模式, 设计有与上位机匹配的通讯接口。

6) 数据处理模块。实现传感器数据的分析与处理, 按通讯协议以及上位机要求提供相应的数据。

工作时通过 x 与 y 方向风压敏感元件和温度补偿元件检测微型风传感器所处环境的风压差和温度值, 通过传感器信号解调及补偿单元进行信号解调、容错以及转化, 使原始检测量转变成数据处理单元可处理数据, 通过信号解调与补偿单元实现风压和温度信号的转换和补偿, 使之成为数字量。通讯控制单元基于光纤实现与上位机通讯, 通过内部定义的通讯协议, 基于 UART 接口进行数据的交换, 并为光纤传输提供数据。

1.2 风压敏感元件的结构设计

要得到精确的风速 u 和风向值 θ , 当风从 0° 到 359° 吹向传感器时, 风速分量 u_x 和 u_y 需要很好地符合正余弦函数变化。若将风压敏感元件封装在圆柱体内, 理想情况下, 圆柱体周围风压的分布为一个余弦形状的曲线, 可用式 (3) 表示:

$$P_s = P_0 + \frac{1}{2} \rho v_0^2 (1 - 4 \sin^2 \theta) \quad (3)$$

式中: P_s 为理想情况下圆柱体周围的风压; P_0 为静压; ρ 为空气密度; v_0 为风速; θ 为风向值。

在实际情况下, 由于风速不同, 会产生层流和湍流, 再加上卡门涡街的存在, 圆柱体周边的压强分布并非为一个理想的余弦曲线, 其分布随时间变化而变化。测量圆柱封装周边风压分布与标准的余弦曲线会有较大误差, 其分布曲线如图 4 所示。因此在设计封装之前, 首先需要确立实际圆柱体周围风

压分布模型。

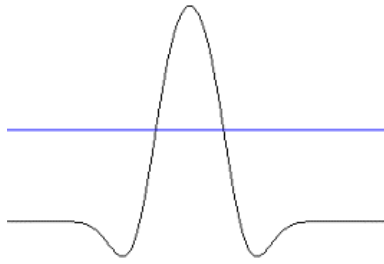


图 4 圆柱体周围风压分布曲线形状

1) 导流结构设计。由于风压分布的对称性, 首先考虑 $0^\circ < \theta < 180^\circ$ 时的情况。 θ 越大, 曲线与余弦偏离越远, 所以 $0.5\rho v_0^2(1-4\sin^2\theta)$ 要乘以一个与 θ 有关的修正系数。另外, 当 θ 略大于 90° 的时候, 压强渐渐趋于一个定值, 这个定值与风速 V_0 相关。因此考虑拟合方程:

$$P_s = P_0 + 0.5\rho v_0^2(1-4\sin^2\theta)\exp\{-a\theta^n\} + g(v)(\exp\{-b\theta^n\} - 1) \quad (4)$$

其中 $0^\circ < \theta < 180^\circ$, a 、 b 、 n 均为大于 0 的常数。对式 (4) 进行定性分析: 当 θ 较小时, 选取合适的 a 、 b 、 n 就可使 $\exp\{-a\theta^n\}$ 、 $\exp\{-b\theta^n\}$ 接近 1, 从而压强分布接近理想状态。随着 θ 变大, $\exp\{-a\theta^n\}$ 、 $\exp\{-b\theta^n\}$ 逐渐接近 0, 风速为 v 的情况下, 当 θ 足够大时, $P_s \approx P_0 - g(v)$ 。在实际风传感器封装设计时, 不断优化选取合适的修正因子系数 a 、 b 、 n , 获得实际风压分布模型。设计时若直接在圆柱的圆周上对称地开四个孔, 根据实际风压分布曲线, 风压测量元件获得的测量结果将是一种非余弦曲线, 利用式 (1) 和式 (2) 计算风速风向时, 误差将会非常大。为了减小这种误差, 采取多导风孔的方法, 如图 5 所示, P_1 和 P_2 点的压强可通过孔开口处的压强按孔截面积做加权平均求得:

$$P = \frac{\sum_i P_i S_i}{\sum_i S_i} \quad (i=1, 2, \dots) \quad (5)$$

式中: P_i 为开口处的实际风压; S_i 为开口处截面积。

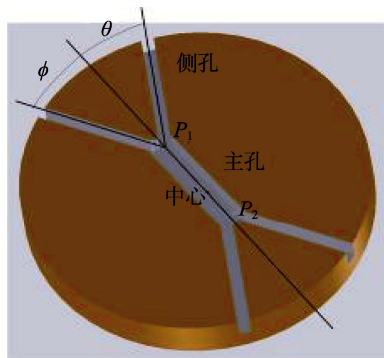


图 5 多导风孔结构

因此, P_1 和 P_2 之间的压差即为风速风向解析所需的压差。通过不断计算与实际测试调整开孔角度、数量 x 和 y 方向的压差变化尽可能地符合正弦或余弦函数, 提高风速和风向测量的精度。

2) 风压敏感元件的结构设计。风压敏感元件是测风微传感器的核心, 需要测量的压强范围为 $0 \sim 2209$ Pa (60 m/s 的风速对应的压强为 2209 Pa), 即需要制作量程范围约 2250 Pa 的差压传感器。由于所测压强非常小, 故需选择较大面积的薄膜。首先用 ANSYS^[6] 软件对在 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的方膜片进行挠度计算^[7], 如图 6 所示。采用图 6a 所示膜片结构与封装壳构成电容后, 电容可通过式 (6) 计算:

$$C = \int_{-l}^l \int_{-l}^l \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{D - w(x, y)} dx dy \quad (6)$$

式中: ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为介电常数; D 为电容两极初始间距; $w(x, y)$ 为压力膜挠度变化函数。

由于压力膜挠度函数 $w(x, y)$ 随 x 、 y 的变化而变化, 因此电容值测量难度较大。把图 6 方膜片变为带硅岛的膜片 (如图 6b 所示), 电容可以通过式 (7) 计算。

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{D - d_{\max}} \quad (7)$$

式中: S 为硅岛面积; $d_{\max}$ 为挠度变化最大值;

从式 (7) 可以看出, 使用图 6b 结构膜片的电容有效地降低了电容值检测的难度。因此拟采用带硅岛压力膜^[8]即 E 型膜作为风压测量元件感压膜。

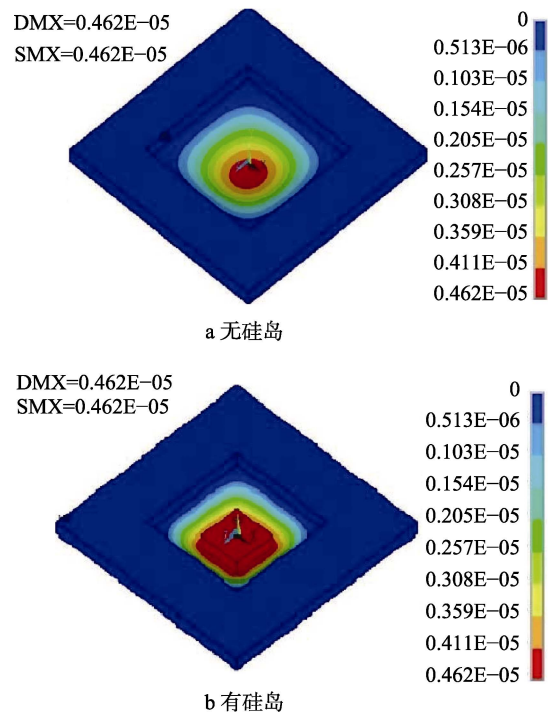


图 6 方膜片挠度仿真

加工风压敏感元件时, 以 SOI 硅片为基本材料^[9], 带硅岛压力膜采用 SOI 硅片一侧的单晶硅层制作,

SOI 硅片中的氧化层作为制作空腔深刻蚀工艺的停止层,从而可以形成距离一致的空腔。感压膜形成后,与带孔 7740 玻璃构成风压测量元件^[10]。

2 结语

针对差压式测风工作原理的特点,通过有限元仿真软件对差压式测风微传感器敏感元件材料进行了仿真,确定了结构参数。对风测量元件结构周边的风压分布进行了模拟,建立了最佳风压分布方程。基于风压分布方程,设计了风速风向解算算法。通过对风压分布的仿真与分析,提出了多导风孔的结构设计及带硅岛压力膜作为风压感压膜的方法,提高了测风微传感器的测量准确性。

参考文献:

[1] 沈广平, 吴剑, 张骅, 等. 二维 MEMS 风速风向传感器的设计与测试[J]. 微纳电子技术, 2007(7/8): 285-287.

- [2] LAGHROUCHE M. ADANE A. BOUSSEY J, et al. A Miniature Silidon Hot Wire Sensor for Automatic Wind Speed Measurements[J]. Renewable Energy, 2005, 30: 1881-1896.
- [3] 张远征. 差压式风速风向传感器的研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2011.
- [4] DU Li-dong, ZHAO Zhan, PANG Cheng, et al. MEMS-Based Micro Solid State Drag Force Wind Sensor[J]. 纳密技术与精密工程, 2009, 7(4): 370-374.
- [5] 许高斌. MEMS 表面微加工工艺技术[J]. 测控技术, 2006, 25(4): 26-29.
- [6] 李晔辰, 孙承松. ANSYS 在硅岛膜设计中的应用[J]. 传感器世界, 2002(11): 26-28.
- [7] 杜利东, 赵湛, 庞程. MEMS 固态风速风向传感器的设计与制作[J]. 微纳电子技术, 2007(7/8): 245-248.
- [8] 李晔辰. 硅电容差压传感器的研制[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2003.
- [9] 黄庆安. 硅微机械加工技术[J]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [10] 黄庆安, 童勤义. SiO₂ 钝化膜对硅/玻璃静电键合的影响[J]. 半导体学报, 1995, 16(5): 391-394.