

文章编号: 1673-3193(2024)05-0573-10

热式风传感器的仿真优化设计

宋高莹, 高经武, 杨哲懿, 邱永锋

(中北大学 航空宇航学院, 山西 太原 030051)

摘要: 本文基于热温差原理, 利用有限元分析软件 ANSYS 对热式风传感器在恒功率和温度平衡两种控制模式下的工况进行了模拟, 分析了芯片结构的不同特征尺寸参数对传感器输出性能的影响规律。研究结果表明: 传感器的输出分别随着芯片边长和厚度、加热元件长度的增加而增大, 而当加热元件和测温元件之间距离增加时, 输出减小。优化结构尺寸后的传感器在恒功率模式下, 风向误差小于 $\pm 2^\circ$, 风速在 $0\sim 15$ m/s 时, 误差小于 10% ; 温度平衡模式下, 风向误差为 $\pm 3^\circ$, 风速有效测量范围可达 $0\sim 20$ m/s, 误差小于 5% , 测量精度有所提高。

关键词: 风速; 风向; 热温差; 恒功率模式; 温度平衡模式

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.05.003

引用格式: 宋高莹, 高经武, 杨哲懿, 等. 热式风传感器的仿真优化设计[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(5): 573-582.

SONG Gaoying, GAO Jingwu, YANG Zheyi, et al. Simulation and optimization design of thermal wind sensor [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2024, 45(5): 573-582.

Simulation and Optimization Design of Thermal Wind Sensor

SONG Gaoying, GAO Jingwu, YANG Zheyi, QIU Yongfeng

(School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Based on the principle of thermal temperature difference, this article used the finite element analysis software ANSYS to simulate the working conditions of the thermal wind sensor under two control modes of constant power and temperature-balanced. The influence of different dimensional parameters of the chip structure on the sensor's output performance was analyzed. The research results show that the output of the sensor increases with the increase of chip side length and thickness, as well as the length of the heating element. However, the output decreases as the distance between the heating element and the sensing element increases. After optimizing the structural dimensions, the sensor's wind direction error is less than $\pm 2^\circ$ in constant power mode, and when the wind speed is in the range of $0\sim 15$ m/s, the error is less than 10% . In temperature-balanced mode, the wind direction error is $\pm 3^\circ$, and the effective measurement range of wind speed can reach $0\sim 20$ m/s, with an error of less than 5% , and the measurement accuracy is improved.

Key words: wind speed; wind direction; thermal temperature difference; constant power mode; temperature-balanced mode

收稿日期: 2023-04-13

作者简介: 宋高莹 (1999—), 女, 硕士生, 主要从事流体力学、风速风向传感器结构设计的研究。

作者简介: 高经武 (1969—), 男, 副教授, 博士, 主要从事非线性动力学、流体力学、MEMS 器件微结构设计、可靠性分析的研究。E-mail: gaojingwu@nuc.edu.cn。

0 引言

风速风向传感器广泛应用于人们的日常生活和多个领域,其中热式风传感器(Thermal Wind Sensor-TWS)因具有体积小、量程大、精度高、维护成本低等优点而备受关注^[1]。根据芯片加热元件被控参量的不同,传感器存在多种控制方式,其中恒功率(Constant Power, CP)和恒温差(Constant Temperature Difference, CTD)工作方式在TWS的应用中最为广泛,值得注意的是,温度平衡(Temperature-Balanced, TB)模式是CTD的一种特殊情况^[2]。

CP和CTD模式作为TWS常见的控制方式,相关的研究成果很多。王芳等^[3]改进了传感器CTD模式的控制方案,实验结果表明当风速低于20 m/s时,最大测量误差小于8%。Ye等^[4-6]通过在芯片上增加绝缘沟槽降低了CTD模式下传感器功耗,同时热敏电阻形成双惠斯通全桥连接,使得风速测量灵敏度与精度大幅提升。当传感器采用塑料注射封装方式时,风速最高可测量值为30 m/s,测量精度为7%^[7]。Wang等^[8-10]首次提出一种基于功率差热反馈控制的TWS温漂补偿方法,增强了传感器的可靠性。而在CP控制模式下,靳炜^[11]利用遗传算法修正了传感器的温漂,实验结果表明,在-20~40℃的环境温度和0.03~0.3 m/s的风速量程范围内,风速精度可达5.19%;李东升^[12]采用L-M算法对传感器的温漂影响进行修正,结果表明,该系统对低风速测量精度较高且很好地抑制了温漂影响。Zhu等^[13]设计的低功耗宽量程的TWS在CP模式下的风速量程可达33 m/s,测量精度控制在5%以内。近年来,一种CP模式下四悬热线风速传感器设计方式被提出,在10 m/s的风速内,其测量误差仅为±0.2 m/s^[14]。Zhang等^[15]提出了一种综合考虑物理效应和寄生效应影响的热-液-电混合特性的热风速传感器Verilog-a模型,优化了电路设计,有利于减少带出次数,提高了成功率。Tong等^[16]基于FS5热元件和恒温测量方法开发了一种低功耗且易于集成的TWS,并对各种温度范围进行了校准测试,实验表明,在0~18 m/s的风速测量范围内可提供精确测量。

目前,对于TWS的性能主要围绕单一控制方式进行研究,而关于不同控制方式的对比研究尚

有不足。本文使用ANSYS软件模拟了CP和TB两种控制方式下TWS的工作,比较了两种方式下传感器的不同特征尺寸参数对输出性能的影响,并优化了传感器的结构尺寸。

1 理论基础

1.1 工作原理

TWS主要依据强制对流传热原理测量流体的风速和风向^[17]。基于热温差原理^[18],在无风状态下,传感器表面的温度场对称分布,上下游温差为零。当有风经过传感器芯片表面时,上游的热对流效应更剧烈,被带走的热量更多,导致传感器上游温度低于下游。随着经过传感器表面流体主流速度的增大,对流传热效应增强,上下游温差也越大。通过检测传感器上下游测温元件之间的温差,得到对应风速的大小。传感器表面的温度梯度对风向也同样敏感,假设风以一定速度沿自西向东(EW)的方向经过传感器表面,则在芯片EW方向上温度梯度最大,NS方向上温度梯度为零。当风向角改变时,EW和NS方向上的温度梯度也发生相应改变。通过检测两个正交方向上的温度梯度得到风向信息

$$\delta T_{NS} = \delta T \sin \varphi, \quad (1)$$

$$\delta T_{EW} = \delta T \cos \varphi, \quad (2)$$

式中: δT 为实际风向上的温度梯度; δT_{NS} 和 δT_{EW} 分别为 δT 在NS和EW方向上的分量; φ 为风向向量与EW方向的夹角。

在实际情况中,通过检测 δT_{NS} 和 δT_{EW} 得到经过传感器表面的风速 U 和风向 φ ^[19],即

$$U = F(\delta T) = F(\delta T_{NS}, \delta T_{EW}), \quad (3)$$

$$\varphi = \arctan \frac{\delta T_{NS}}{\delta T_{EW}}. \quad (4)$$

1.2 理论模型

为了对芯片表面的温度场进行分析,建立传感器的热模型如图1所示,当TWS在CP模式工作时^[20],得到芯片上、下游测温点 x_0 与 $L-x_0$ 之间的温差 ΔT_0 。

$$\Delta T_0 = T(L-x_0) - T(x_0) = c \frac{1}{k_s} \frac{k_f^{\frac{2}{3}} \rho^{\frac{1}{2}} c_p^{\frac{1}{3}}}{\mu^{\frac{1}{6}}} U^{\frac{1}{2}} \Delta T, \quad (5)$$

式中: k_f , ρ , c_p , μ 分别为气体的热导率、密度、定

压比热容、粘度系数; U 为风速; ΔT 为芯片与环境之间的温差; c 是一个与芯片几何尺寸及上下游测温点位置有关的常数。

当 TWS 在 TB 模式工作时^[9], 维持传感器上的总加热功率 P 不变, 通过调节上下游加热元件上的加热功率来消除上下游测温元件上的温度梯度。最终得到传感器的输出公式为

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{ck_f^{\frac{2}{3}}\rho^{\frac{1}{3}}c_p^{\frac{1}{3}}\mu^{-\frac{1}{6}}U^{\frac{1}{2}}}{R_{th}k_sD\left(\frac{L^2}{\frac{d}{k_s} + \frac{1}{h}} + \frac{L^2\lambda_r}{\delta_r}\right)} \quad (6)$$

式中: L 为芯片的边长; D 为芯片的厚度; h 为芯片与空气之间的对流换热系数; λ_r 和 δ_r 分别为封装胶的热导率和厚度; c 为与传感器几何尺寸有关的常量; R_{th} 为传感器芯片沿着流体流动方向的等效热阻, 可以用集总参数等效模型获得^[21]。

$$R_{th} = \frac{1}{k_sD + L^2h + \lambda_r\delta_r} \quad (7)$$

通过检测传感器南北方向的功率差 ΔP_{NS} 和东西方向的功率差 ΔP_{EW} 即可求得风速和风向。

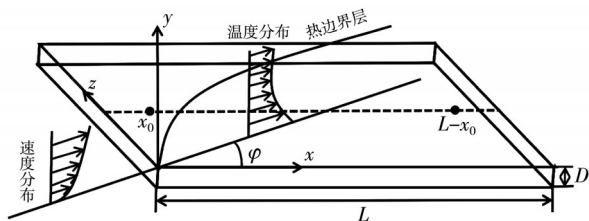


图 1 传感器的热模型

Fig. 1 Thermal model of sensor

2 数值模拟

2.1 CP 模式

传感器的三维结构如图 2 所示, 根据传感器结构建立仿真模型, 模型包括流体通道、玻璃衬底、加热电阻和测温电阻, 由于测温电阻基本不发热, 对温度场的影响可以忽略, 所以用 4 个不同位置的测温点代替, 电阻选择铂金属薄膜电阻。为了更好地实现结构设计的仿真优化, 基于现有的关于 TWS 的研究, 首先设置芯片的边长为 4 mm, 厚度为 0.15 mm, 电阻的长度为 0.5 mm, 宽度为 0.2 mm, 厚度为 0.01 mm, 测温点与加热电阻之间的距离为 0.2 mm。环境温度设置为 293 K。将流体通道入口的边界条件设置为速度

入口, 出口的边界条件设置为压力出口, 流体通道上方设置为可滑移界面, 流体通道与芯片衬底的接触面设置为流固耦合界面。选用压力定常流动计算模型; 由于涉及对流换热及热传导, 因此需开启能量方程; 选用 Laminar 模型; 压力和速度耦合算法采用 SIMPLE 算法, 采用二阶迎风格式; 选用默认残差值, 当所有变量达到收敛标准后, 计算停止。传感器在 CP 条件下工作, 总加热功率为 10 mW, 当风以 10 m/s 的主流速度沿 EW 方向经过传感器芯片表面时, 模型剖面的热分布图如图 3(a), 芯片表面的热分布图如图 3(b)。

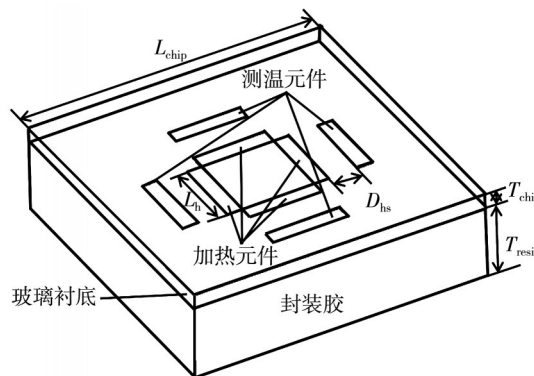
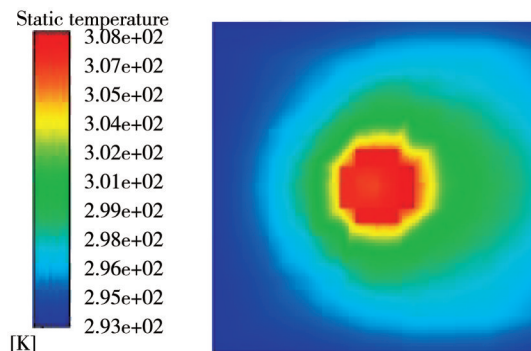


图 2 传感器的三维结构模型

Fig. 2 3D structure model of sensor



(a) 仿真模型剖面的热分布图



(b) 芯片表面的热分布图

图 3 热分布云图

Fig. 3 Heat distribution cloud map

根据恒功率 TWS 的理论模型可知, 传感器的输出与芯片结构的尺寸参数有关, 包括芯片的边

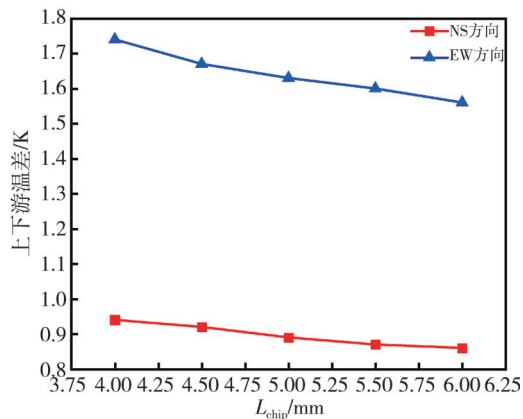
长(L_{chip})和厚度(T_{chip})、加热元件的长度(L_h)以及加热元件与测温元件的距离(D_{hs})等。为了探究不同特征尺寸参数对传感器输出性能的影响,在仿真过程中保持其他条件不变,对所研究的参数进行改变如表1所示。

表1 CP模式不同结构参数

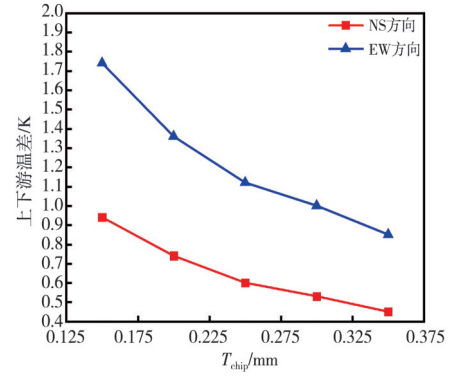
Tab. 1 Different structural parameters of CP mode

实验序号	$L_{\text{chip}}/\text{mm}$	$T_{\text{chip}}/\text{mm}$	L_h/mm	D_{hs}/mm
1	4	0.15	0.5	0.2
	4.5			
	5			
	5.5			
2	4	0.15	0.5	0.2
		0.2		
		0.25		
		0.3		
3	4	0.15	0.5	0.2
			0.6	
			0.7	
			0.8	
			0.9	
4	4	0.15	0.5	0.1
				0.2
				0.3
				0.4
				0.5

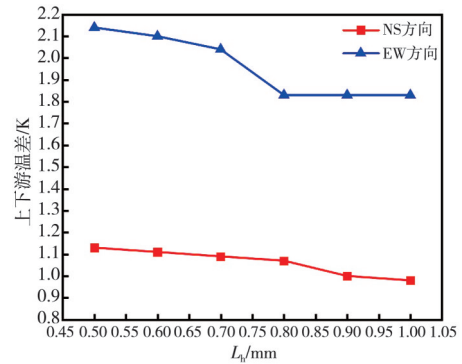
当风沿 30° 方向以 10 m/s 的主流速度经过传感器表面时,传感器的输出与不同结构参数之间的关系如图4所示。可以看出,在相同的材料属性和加热功率下,芯片的边长越小,厚度越薄,加热区域面积越小,加热元件与测温元件之间距离越大,传感器的输出信号越大,灵敏度越高。



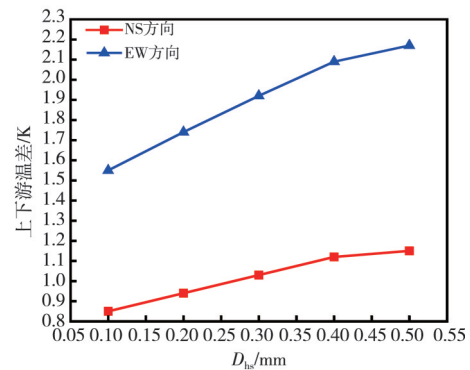
(a) 芯片边长



(b) 芯片厚度



(c) 加热元件长度



(d) 加热元件与测温元件的距离

图4 不同结构参数与传感器输出的关系

Fig. 4 Relationship between different structural parameters and sensor output

根据仿真结果,为了得到较大的温差输出信号,同时拥有较小的芯片成本,并维持一定的机械结构强度,最终确定恒功率TWS的结构参数为芯片的边长为 4.8 mm ,厚度为 0.2 mm ,加热电阻的长度为 0.5 mm ,加热元件和测温元件之间距离为 0.2 mm 。

2.2 TB模式

为了模拟传感器在TB模式下的工作情况,利用上下游加热电阻上的功率差来消除对流导致的上下游温差,所以加热电阻尽量位于芯片边缘,测温电阻则位于加热电阻内侧。仿真时设置边界条件、控

制方程、计算格式以及残差标准与CP模式相同。传感器的总加热功率恒定为20 mW,对上下游加热电阻进行加热功率的参数化扫描。然后提取上下游温度相同时,上下游加热电阻上的功率差,即传感器的输出量 $\Delta P/P$ 。当风沿对角线方向以10 m/s的主流速度经过传感器表面时,芯片表面的热分布图如图5(a),消除上下游温差后芯片表面的热分布图如图5(b)。

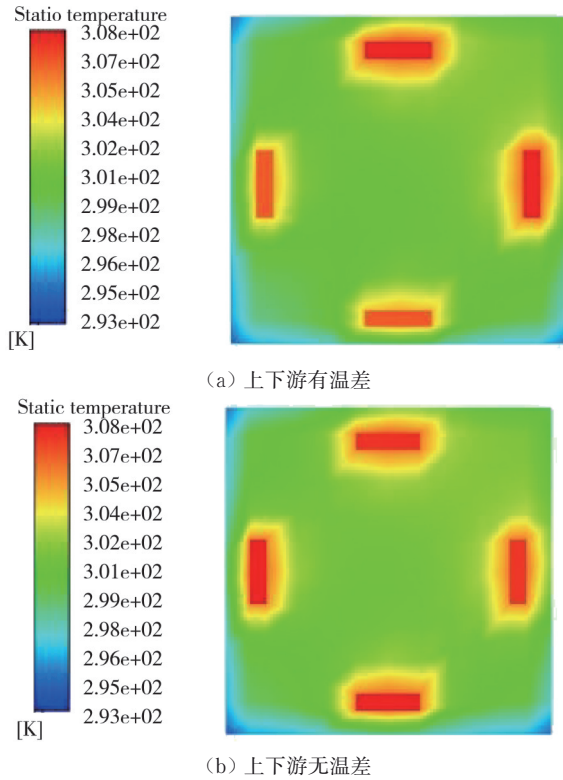


图5 芯片表面的热分布图

Fig. 5 Heat distribution diagram of chip surface

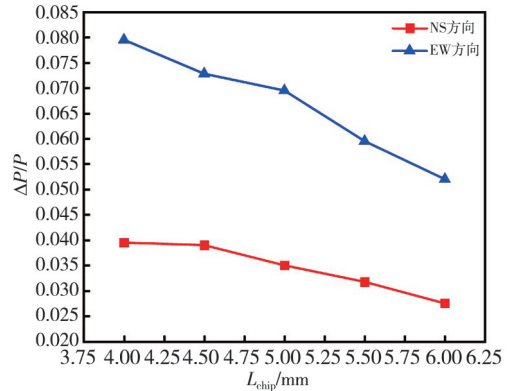
为了探究不同特征尺寸参数对传感器输出性能的影响,针对不同的几何参数设计不同的芯片结构进行仿真分析。在仿真过程中保持其他条件不变,对所研究的参数进行改变。如表2所示。

当风沿30°方向以10 m/s的主流速度经过传感器表面时,不同结构参数与传感器输出之间的关系如图6所示,可以看出,在相同条件下,传感器的输出随芯片边长的增加而减小,随芯片厚度的增加而减小,随封装胶厚度的增加而减小,随加热元件长度的增加而减小,随加热元件与测温元件之间距离的增加而增大。即在相同的材料属性和加热功率条件下,芯片的边长越小,厚度越薄,封装胶厚度越小,加热元件长度越小,加热元件与测温元件之间的距离越小,传感器的输出信号越大,灵敏度越高。

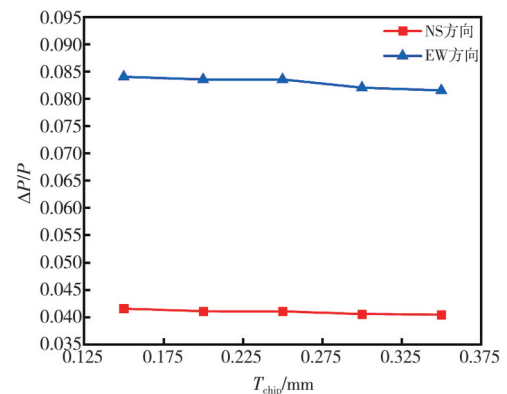
表2 TB模式结构参数

Tab. 2 Different structural parameters of TB mode

实验序号	L_{chip}/mm	T_{chip}/mm	T_{resin}/mm	L_H/mm	D_{hs}/mm
1	4.0	0.15	1.0	0.8	0.2
	4.5				
	5.0				
	5.5				
	6.0				
2	4.0	0.15	1.0	0.8	0.2
		0.20			
		0.25			
		0.30			
3	4.0	0.15	1.0	0.8	0.2
			1.5		
			2.0		
			2.5		
			3.0		
4	4.0	0.15	1.0	0.8	0.2
				0.9	
				1.0	
				1.1	
				1.2	
5	4.0	0.15	1.0	0.8	0.10
					0.15
					0.20
					0.25
					0.30



(a) 芯片边长



(b) 芯片厚度

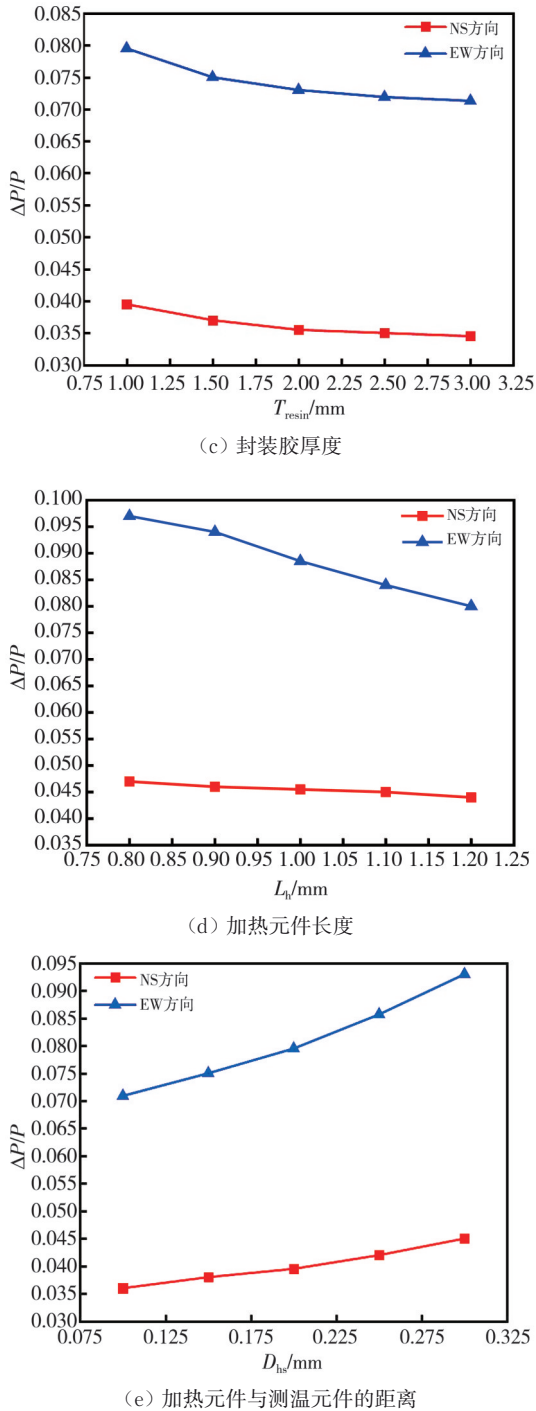


图6 不同结构参数与传感器输出的关系

Fig. 6 Relationship between different structural parameters and sensor output

根据仿真结果,为了获得更大的灵敏度,并保证芯片的强度与可靠性,最终确定温度平衡TWS的结构参数为芯片的边长为4.5 mm,厚度为0.18 mm,加热电阻的长度为1 mm,封装胶的厚度为1.5 mm,加热元件与测温元件的距离为0.2 mm。

3 测试结果及分析

3.1 风速精度测试

根据确定的恒功率TWS的各项结构参数建立仿真模型来测试其风速精度,总加热功率恒定为10 mW,不同风速下,风沿EW方向经过传感器表面,图7为上下游温差及芯片中心温度随风速变化的曲线,可以看出,风速越大,芯片中心温度越低,上下游测温点之间的温差越大,并且随着风速的增大,上下游温差逐渐达到饱和。当风速超过15 m/s时,传感器上下游温差达到饱和,即传感器的风速量程为0~15 m/s。因为风速较大时,加热元件产生的热量未到达上游测温元件就被流体带走,则上游测温元件温度等于环境温度,而下游测温元件温度不可能高于加热元件温度,所以传感器的上下游温差将存在一个饱和值。

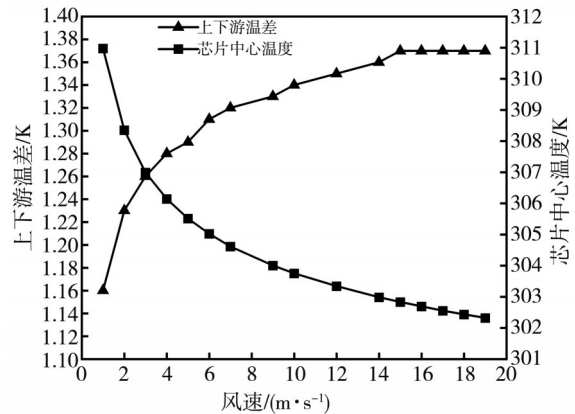


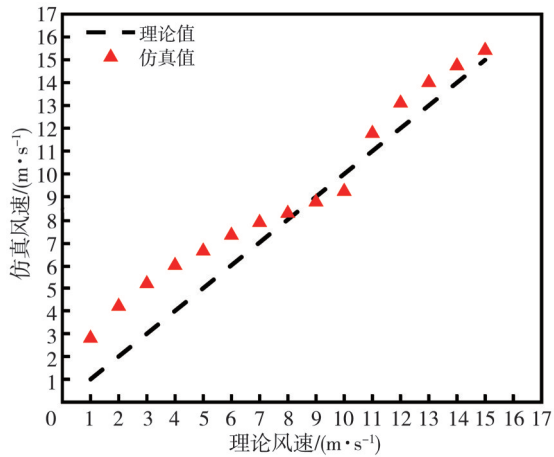
图7 上下游温差及芯片中心温度随风速变化的曲线

Fig. 7 Temperature difference between upstream and downstream and chip center temperature variation curve with wind speed

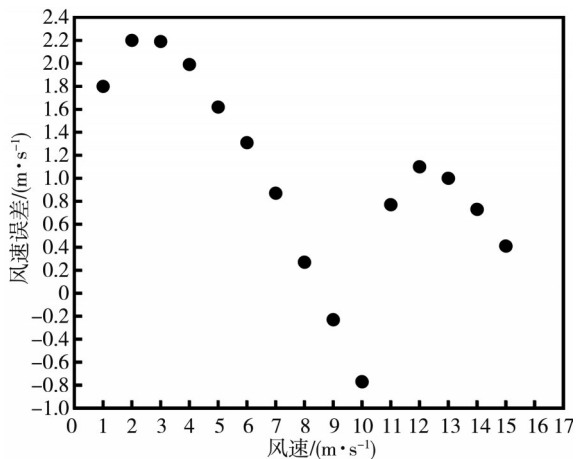
传感器的风速误差如图8所示。图8(a)为风速测量的理论值与仿真值,可以看出,虽然理论值与仿真值之间存在一些差异,但整体吻合较好,这是因为在理论模型建立过程中,为了便于计算求解,对传感器的输出进行了部分简化与近似。图8(b)为传感器的风速误差,可以看出,当风速较小时,误差较大,当风速较大时,误差较小。较高风速下,传感器的风速误差为 ± 1.5 m/s。

根据确定的温度平衡TWS的各项结构参数建立仿真模型测试其风速精度,施加总加热功率为10 mW,不同风速下,风沿EW方向经过传感器表面,图9为传感器输出量 $\Delta P/P$ 随风速变化的

曲线。由图 9 可以看出,传感器的输出量随风速的增大而增大,在 20 m/s 时尚未达到饱和,表明传感器可实现对 0~20 m/s 范围内风速的有效测量。



(a) 风速测量的理论值与仿真值



(b) 风速误差

图 8 恒功率传感器的风速测试

Fig. 8 Wind speed test of the constant power sensor

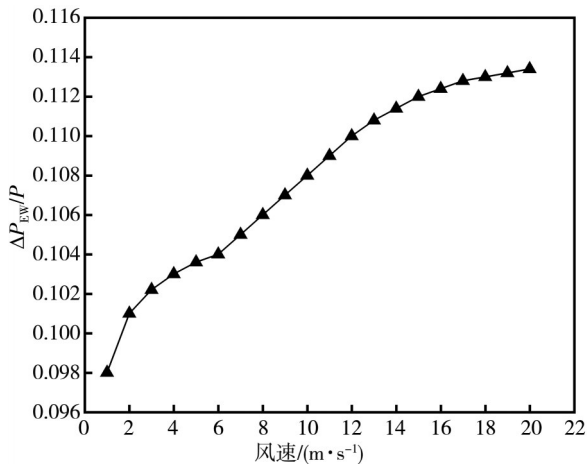
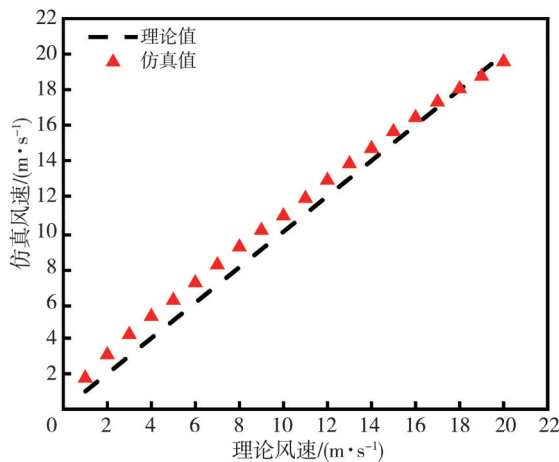


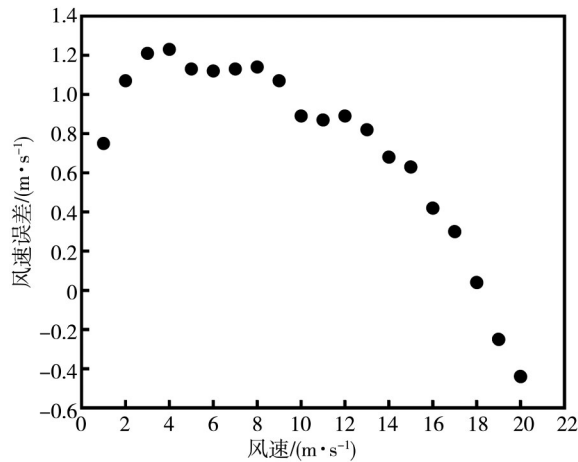
图 9 传感器的输出随风速变化的曲线

Fig. 9 Variation curve of sensor output with wind speed

传感器的风速误差如图 10 所示。图 10(a) 为风速测量的理论值与仿真值,可以看出,与 CP 模式相比, TB 模式下 TWS 的理论值与仿真值的吻合程度更好,表明其测量精度更高。图 10(b) 为传感器的风速误差,可以看出,当风速较小时,误差较大,当风速较大时,误差较小。较高风速下,传感器的风速误差为 ±1 m/s。



(a) 风速测量的理论值与仿真值



(b) 风速误差

图 10 温度平衡传感器的风速测试

Fig. 10 Wind speed test with the temperature balance sensor

3.2 风向精度测试

为了测试传感器的风向响应,将从西向东的风向定义为 0°,从东向西的风向定义为 180°,自南向北的风向定义为 90°,自北向南的风向定义为 270°。以此为依据完成对 0°~360°风向角度的定义。

在风向从 0°变化到 360°的过程中,每隔 30°设置一个风向测试点,在 10 m/s 的风速下对恒功率 TWS 的输出进行记录,得到风向响应曲线如图 11(a);在 8 m/s 的风速下对温度平衡 TWS 的

输出进行记录,得到风向响应曲线如图11(b)。由图可知,两种控制模式下,传感器在NS和EW方向上的输出均随风向的变化严格遵循正弦曲线和余弦曲线,变化趋势与理论模型相符。

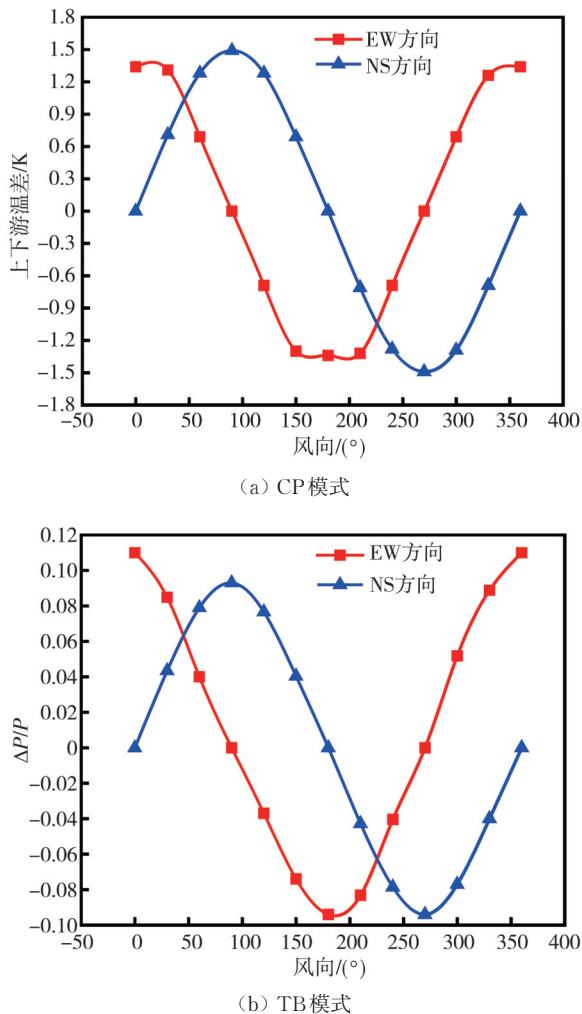


图 11 传感器的输出随风向的变化

Fig. 11 Changes of sensor output with wind direction

恒功率 TWS 的风向测量精度如图 12 所示。图 12(a) 是风速分别为 5 m/s 和 10 m/s 时,风向测量的理论值与仿真值,图 12(b) 为风向误差。由图可知,传感器的风向误差为 $\pm 2^\circ$ 。

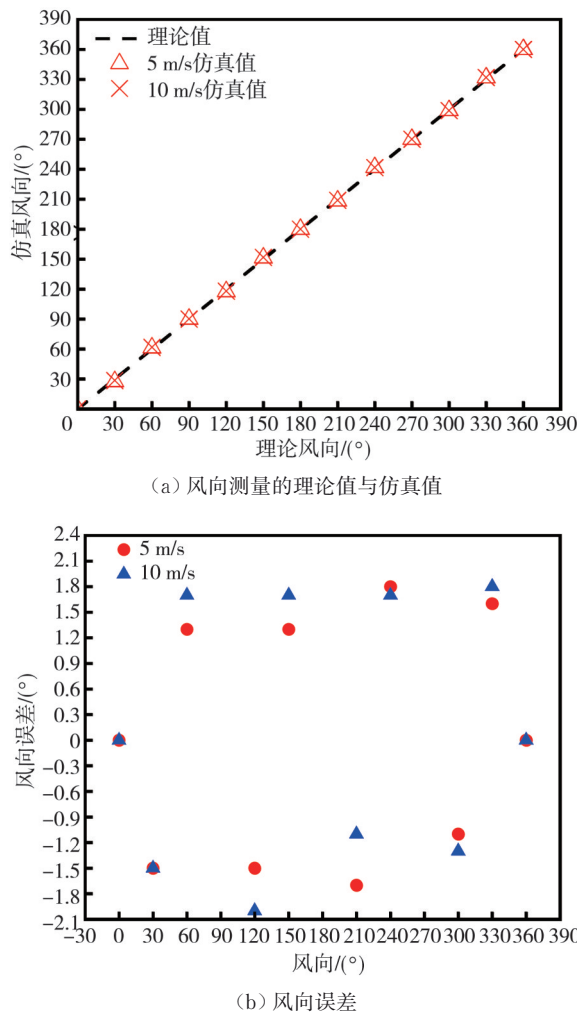


图 12 恒功率传感器的风向测试

Fig. 12 Wind direction test of the constant power sensor

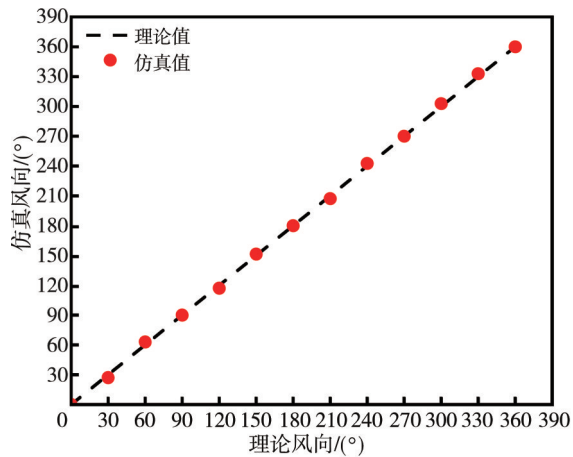
温度平衡 TWS 的风向测量精度如图 13 所示。图 13(a) 是风速为 8 m/s 时,风向测量的理论值与仿真值,图 13(b) 为风向误差。由图可知,传感器的风向误差为 $\pm 3^\circ$ 。

为了对仿真优化结果的可靠性进行验证,比较了不同文献中两种控制方式下 TWS 的性能,对其风速和风向的测量范围与误差进行了定量对比,结果如表 3 所示。

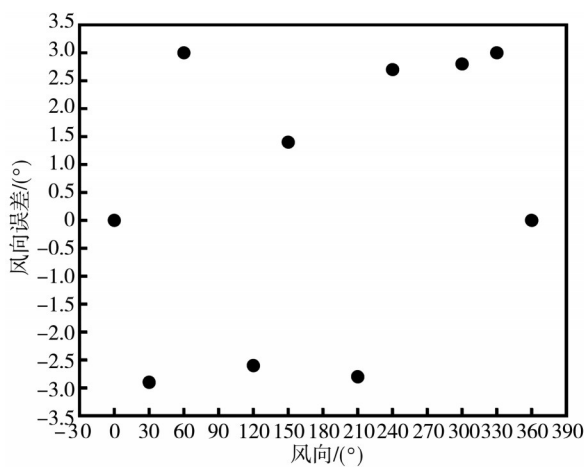
表 3 不同文献设计的传感器性能对比

Tab. 3 The proposed wind sensor performance compared with previously reported wind sensor

文献	控制方式	风速量程/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	风速误差/%	风向测量范围/($^\circ$)	风向误差/($^\circ$)
文献[11]	CP 模式	0~33	5	0~360	± 5
本文	CP 模式	0~15	10	0~360	± 2
文献[15]	TB 模式	0~40	10	0~360	± 2
本文	TB 模式	0~20	5	0~360	± 3



(a) 8 m/s时风向测量的理论值与仿真值



(b) 风向误差

图 13 温度平衡传感器的风向测试

Fig. 13 Wind direction test of the temperature balance sensor

4 结论

本文优化了热式风传感器在恒功率和温度平衡两种控制方式下仿真模型的结构尺寸,并对优化后传感器的风速和风向的测量结果进行了分析,得出了下结论:

1) 恒功率模式下,传感器的输出分别随着芯片边长、厚度和加热元件长度的增加而减小,随着加热元件和测温元件距离的增加而增大;温度平衡模式下,传感器的输出分别随着芯片边长和厚度、封装胶厚度、加热元件长度的增加而减小,随着加热元件和测温元件距离的增加而增大。在两种控制模式下,相同的特征尺寸参数对传感器输出的影响规律相同。

2) 恒功率模式下,经过有限元仿真优化,确定传感器的结构尺寸参数如下:芯片尺寸为 4.8 mm×4.8 mm×0.2 mm,加热电阻尺寸为

0.5 mm×0.2 mm×0.01 mm,加热元件与测温元件的距离为 0.2mm。仿真测试得到风向测量范围为 360°,误差小于±2°;风速量程为 0~15 m/s,误差小于 10%。

3) 温度平衡模式下,经过有限元仿真优化,确定传感器的结构尺寸参数如下:芯片尺寸为 4.5 mm×4.5 mm×0.18 mm,封装胶厚度为 1.5mm,加热电阻尺寸为 1 mm×0.2 mm×0.01 mm,加热元件与测温元件的距离为 0.2 mm。仿真测试得到风向测量范围为 0°~360°,误差为±3°;风速有效测量范围可达 0~20 m/s,误差小于 5%。

参考文献:

[1] 高慧珺. 硅热式风速传感器输出稳定性的研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.

[2] 苏玲. 低功耗MEMS热式风速传感器的研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.

[3] WANG F, QIN M. Development and test of software method to achieve constant-temperature-difference control for thermal wind sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(10): 1478-1482.

[4] YE Y Z, YI Z X, GAO S X, et al. DRIE trenches and full-bridges for improving sensitivity of 2-D micromachined silicon thermal wind sensor [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2017, 26(5): 1073-1081.

[5] YE Y Z, YI Z X, GAO S X, et al. Effect of insulation trenches on micromachined silicon thermal wind sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(24): 8324-8331.

[6] YE Y Z, YI Z X, GAO S X, et al. Octagon-shaped 2-D Micromachined thermal wind sensor for high-accurate applications [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2018, 27(4): 739-747.

[7] WANG Z J, YI Z X, QIN M, et al. Low-drift MEMS thermal wind sensor with symmetric packaging using plastic injection molding process [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 9507408.

[8] WANG S, YI Z X, QIN M, et al. A 2D wind sensor using the Δp thermal feedback control [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2018, 27 (3) : 377-379.

[9] WANG S, YI Z X, QIN M, et al. Modeling, simulation, and fabrication of a 2-D anemometer based on a temperature-balanced mode [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(13): 4796-4803.

- [10] WANG S, YI Z X, QIN M, et al. Temperature effects of a ceramic mems thermal wind sensor based on a temperature-balanced mode [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(17): 7254-7260.
- [11] 靳炜. 热式风速传感器设计[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- [12] 李东升. 低风高精度热式风速传感器设计[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
- [13] ZHU Y Q, QIN M, YE Y Z, et al. Modelling and characterization of a robust, low-power and wide-range thermal wind sensor[J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(12): 5571-5585.
- [14] TAIEDINEJAD E, GHASEMI K A, KOOHSORKHI J, et al. A four-wire micro anemometer in double cross shape with high mechanical stability for high sensitive air flow [J]. *Microelectronic Engineering*, 2022, 262: 111831.
- [15] ZHANG J Z, ZHOU Z F, QIN M, et al. An efficient macro model for CMOS-MEMS thermal wind speed sensor [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2020, 30(12): 125001.
- [16] TONG X, HAO B E, CHEN Z, et al. Thermal air-flow sensor design and temperature compensation research based on the thermostatic method [J]. *Sensor Review*, 2022, 42(5): 568-575.
- [17] ZHU Y Q, CHEN B, QIN M, et al. 2-D micromachined thermal wind sensors—a review[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2014, 1(3): 216-232.
- [18] 王尚. 温度平衡模式MEMS热式风速风向传感器的研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [19] 叶一舟. 高性能硅基MEMS热式风速传感器的研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [20] 蒋誉天. MEMS热式风速风向传感器的稳定性及可靠性研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [21] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.