

恒温式热线风速仪试制及试验验证

杜海^{1,2}, 陈朔³, 李正彬³

(1. 西华大学航空航天学院, 四川成都 610039; 2. 西华大学智能空地融合载具与管控教育部工程研究中心, 四川成都 610039;
3. 西华大学能源与动力工程学院, 四川成都 610039)

摘要: 热线风速仪是空气动力学领域常用的流体测速设备, 但是其受限于高昂的成本没有在国内得到广泛使用。为此, 文章基于对流换热理论, 设计了一种低成本的恒温式热线风速仪, 其动态响应频率高达 15 kHz 且平均测量误差低于 0.03%。通过对平板湍流度及边界层速度型的测量试验, 验证了该设计是可行的。

关键词: 热线风速仪; 风洞标定; 速度测量; 湍流度; 边界层

中图分类号: V211.72 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2023)06-0026-08

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.4977

Trial Production and Test Verification of Thermostatic Hot-wire Anemometers

DU Hai^{1,2}, CHEN Shuo³, LI Zhengbin³

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Xihua University, Chengdu 610039 China;

2. Engineering Research Center of Intelligent Air-Ground Integration Vehicle and Control (Xihua University), Ministry of Education, Chengdu 610039 China;

3. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 610039 China)

Abstract: Hot-wire anemometer is a commonly used to measure fluid velocity in the field of aerodynamics, but it is not widely used in China due to its high cost. Based on the theory of convective heat transfer, a low-cost constant temperature hotwire anemometer is designed in this paper. Its dynamic response frequency is as high as 15 kHz and the average measurement error is less than 0.03%. The feasibility of this design was verified by measuring the turbulence intensity and boundary layer velocity of the plate.

Keywords: hot-wire anemometer; wind tunnel calibration; speed measurement; turbulence; boundary layer

随着空气动力学的不断发展, 利用流动测量技术对复杂的流动现象进行流场分析已经变得越来越重要。在流体流速测量方面, 热线风速仪由于其具有高动态响应、高精度以及对流场干扰小等优点,

在湍流脉动测量等方面有着不可或缺的作用。

热线风速仪测量技术发展至今已有 100 多年的历史, 研究者对其进行不断地优化。Smits 等^[1]设计了一种用于测量湍流的热线风速仪反馈控制

收稿日期: 2023-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51806181); 翼型、叶栅空气动力学重点实验室基金项目(614220121030205)。

第一作者: 杜海(1985—)男, 副教授, 博士, 主要研究方向为流体机械工程、新概念飞行器设计、流体动力学等。

ORCID: 0000-0003-2282-8987 E-mail: duhai2017@163.com

引用格式: 杜海, 陈朔, 李正彬. 恒温式热线风速仪试制及试验验证[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2023, 42(6): 26-33.

DU Hai, CHEN Shuo, LI Zhengbin. Trial Production and Test Verification of Thermostatic Hot-wire Anemometers[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition), 2023, 42(6): 26-33.

器,并对恒温式热线风速仪线性反馈控制理论做了总结。Chen等^[2]在帕萨迪纳加州理工学院研究所研究的表面微机械、平面外热线风速计的基础上,设计一种新型热线风速计(HWA)。HWA采用了表面微加工和高效三维装配技术相结合的微加工工艺。李庆等^[3]研制了一部采用先进单片机控制与微机处理技术的脉冲热线风速仪。这部仪器与普通热线技术相比,最大优点在于能够判别流速的方向。陆青松等^[4]根据日本大学松本彰提供的热线工作原理图,对热线风速仪的制作和工作原理进行了相关研究,对松本彰设计的热线原理图进行优化,只保留工作原理图中的电桥、放大电路与控制电路部分,其余信号处理部分的电路设计均不采用,运用编程计算来完成大量的数据处理,避免了电子线路数据处理所带来的信号缺失问题。Sobczyk^[5]对常规热线风速仪探头附近的流场扰动进行了初步试验研究分析,用配有微透镜和常规2D粒子图像测速装置测量微观元件周围的宏观流动。Ligęza等^[6]对利用热线风速仪测量快速变化的风速波动时,如何减少电磁干扰进行了研究。

随着研究人员对热线风速仪的不断优化,其在流动测量领域的应用也越发广泛。然而由于其成本高昂,热线风速仪在国内尚未得到广泛使用。为此,本文结合前人研究,试制一台具有低成本、高精度、高动态响应频率等特点的热线风速仪,以满足试验测量需求。

1 热线风速仪的设计制作

1.1 热线风速仪的工作原理

热线风速仪工作时,影响热线温度变化的因素主要有热线与运动流体间的对流换热、热线与金属叉杆之间的热传导以及热线本身与流体之间的热辐射3种。由于热线的热传导,热辐射部分所占热量交换的比重较小,在使用热线时主要考虑热线与流体之间的热量交换。对流换热的过程如图1所示。

根据热平衡理论,在忽略热辐射部分的前提下,热丝置于流场中产生的热量应该与其耗散的热量相等,即

$$Q_t = \alpha S(T_w - T_f) \quad (1)$$

式中: Q_t 为热丝被带走的热能; α 为对流换热系数; S 为热线与流体接触面积; T_w 为热线的表面温度;

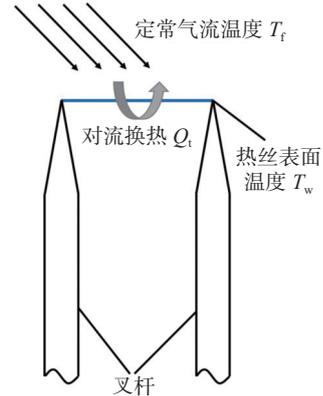


图1 热线对流换热示意图

Fig. 1 Convective heat transfer diagram of hot wire

T_f 为流体的温度。

根据King公式^[3],可以得到努塞尔数与雷诺数之间的近似关系,为

$$Nu = A_1 + B_1 Re^{0.5} \quad (2)$$

式中:努塞尔数 $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$, d 为热丝的直径, λ 为流体的导热系数, α 为对流换热系数; Re 为雷诺数; A_1 和 B_1 为试验测定的常系数。由式(2)可知,只要知道换热系数,就可以得出流经热丝处的流场速度及方向。

对于不可压的流体,Perry提出了一个经验公式^[7],为

$$Nu = 0.42Pr^{0.26} + 0.57Pr^{0.33}Re^{0.5} \quad (3)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad (4)$$

式中: Pr 为普朗特数; c_p 为气体的定压比热。式(3)、式(4)的适用范围为: $0.71 \leq Pr \leq 525$; $2 \leq Nu \leq 20$; $0.01 \leq Re \leq 10^5$ 。

由于热线热丝的电阻会随温度的变化而变化,故设热丝电阻与温度的关系为

$$r_w = r_0[1 + \alpha(T - T_1) + \beta(T - T_1)^2 + \dots] \quad (5)$$

式中: r_w 为热丝温度为 T 时的电阻; r_0 为热丝在参考温度为 T_1 时的电阻; α 和 β 为热丝的电阻温度系数。忽略式中高阶项可得

$$(T - T_1) = \frac{r_w - r_0}{\alpha r_0} \quad (6)$$

将式(6)代入式(1),可得

$$Q_t = \alpha S \left(\frac{r_w - r_0}{\alpha r_0} \right) \quad (7)$$

将式(4)与式(7)相乘并简化,得

$$Q_t = (r_w - r_0)(X + Y\sqrt{v}) \quad (8)$$

式(8)中, X 、 Y 在温度恒定时为常数,其表达式为:

$$X = \frac{0.42S\lambda}{\alpha dr_0} \left(\frac{\mu c_p}{\lambda} \right)^{0.26} \quad (9)$$

$$Y = \frac{0.57S\lambda}{\alpha dr_0} \left(\frac{\mu c_p}{\lambda} \right)^{0.33} \left(\frac{\rho d}{\mu} \right)^{0.5} \quad (10)$$

在稳态情况下,热线内部由电流加热的能量可以近似看成流体对流换热带走的热量,从而达到热平衡状态。电流在单位时间内加热的热丝热量为

$$Q_w = I_w^2 r_w = Q_t \quad (11)$$

将式(8)代入式(11),可得

$$\frac{I_w^2 r_w}{r_w - r_0} = (X + Y \sqrt{v}) \quad (12)$$

式(12)为热线的平衡方程,在热平衡状态下 r_0 为定值,当 I_w 恒定时, r_w 与流场的流速 v 有对应的关系。当电阻 r_w 为定值时(热线表面的温度 T 为定值),就可以得到电流 I_w 与流场流速 v 的对应关系。

根据式(12)可知,热线风速仪的测量原理分为恒温式(r_w 为定值)及恒流式(I_w 为定值)。考虑到恒流式热线风速仪在不同工作地点需要手动调节补偿网络来获得较高的通频带,过程繁琐且不适用于流场动态特性变化很大的情形^[8],因此,本文选择基于恒温式测量原理进行热线风速仪的试制。

1.2 恒温式热线风速仪的试制

本文试制的热线风速仪如图2所示,主要由热线风速仪箱体及测量探头构成。热线风速仪的输入端接入热线探头进行风速测量,输出端连接示波器或采集卡进行数据读取。



图2 热线风速仪测量系统
Fig. 2 Hot-wire anemometer measurement system

1.2.1 恒温式热线风速仪的电路设计

恒温式热线风速仪的电路原理如图3所示。测量探头上的热丝为惠斯通电桥的一臂。将探头置于流场中,流场与热丝之间发生热流交换,导致

热丝温度降低,电阻值 R_w 减小。由于惠斯通电桥的特性使 R_w 恒等于 r_s ,为了维持电桥平衡,反馈放大电路为 R_w 进行电压补偿,使热丝温度回升,实现了热丝的温度恒定。由此可知,通过测量补偿电压值可以得出流场风速数据。

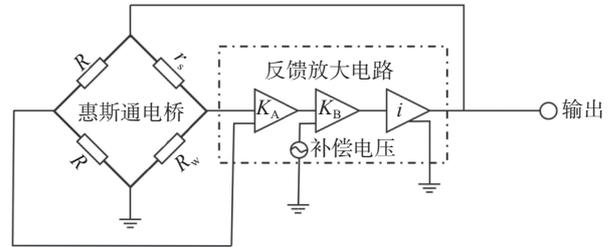


图3 恒温式热线风速仪电路原理图
Fig. 3 Circuit schematic diagram of constant temperature hot wire anemometer

1.2.2 热线风速仪探头的选择

热线风速仪所使用的探头种类多样,按照构造可以分为:热线探头如,图4所示;热膜探头,如图5所示。热线探头根据不同用途可分为:单丝、双丝、三丝、斜丝及V型、X型探头等。

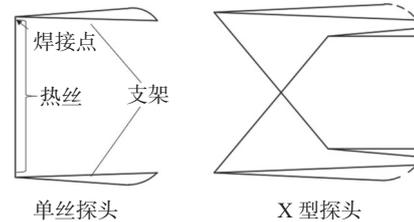


图4 热线探头
Fig. 4 Hot-wire probe

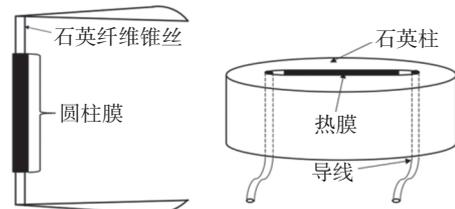


图5 热膜探头
Fig. 5 Thermal film probe

探头适用的范围和领域各不相同。单丝探头具有尺寸小、空间分辨率高、容易修复等特点。X型探头可以测量二维流场,但是双热线会影响测量精度。热线探头在使用时对流场的环境要求较高,因此,在流场品质不佳的情况下,通常会使用热膜探头。热膜探头在测量精度方面有所欠缺,并且无法测量温度过高的流场。本文试验是在风洞中开展,其流场品质较高,考虑到试验的精度要求,故

采用单丝探头作为测量元件。

由图 6 可知,热丝作为热线风速仪的测量元件,热丝的尺寸及材料决定了探头的灵敏度、空间分辨率以及热丝强度。探头的热丝一般选择钨丝、铂丝及相应的合金材料,且其线径只有 5 μm。

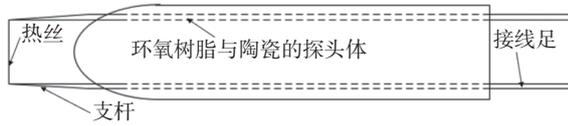


图 6 热线探头结构

Fig. 6 Hot-wire probe structure

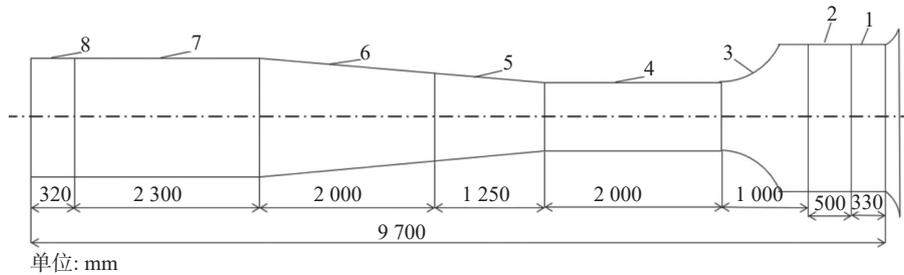
2 热线风速仪风洞验证试验

为验证热线风速仪设计的可行性,本文在风洞

中开展平板湍流度及湍流边界层速度型测量试验。

2.1 试验设备

本试验在西华大学流体机械及教育部重点实验室的低湍流度小型直流式风洞中开展。该风洞分为扩散段、稳定段、试验段和收缩段。风洞总长为 9.7 m,试验段尺寸为 2000 mm×300 mm×500 mm,收缩比为 4,入口段安装有对边距离 20 mm、长 50 mm 的正六边形蜂窝器和 5 层 24 目/寸阻尼网,风洞 4 个拐角分别安装 8 片导流片。风洞动力段风扇直径为 0.8 m,由 8 个叶片组成,11 kW 的可变频调速电机驱动,电机的额定转速为 986 r/min,设计风速范围为 5~25 m/s。风洞的整体结构图如图 7 所示。



1—进口口; 2—整流段; 3—收缩段; 4—试验段; 5—方圆收缩段; 6—扩散段; 7—动力段; 8—出口口。

图 7 风洞结构图

Fig. 7 Wind tunnel structure diagram

2.2 热线风速仪的动态响应测试

动态响应频率是热线风速仪中一个重要的参数指标。由于采用理论计算的方法难以获得动态响应数据^[8],因此,通过风洞试验测试热线风速仪是否达到设计要求。

在试验风洞进行动态响应测试,通过对热线风速仪偏置电压端加载方波信号,使热线风速仪响应输出,通过示波器读取动态响应曲线如图 8 所示。由文献 [8] 可知,动态响应的计算公式为

$$f_c = \frac{1}{1.3\Delta t} \quad (13)$$

式中: f_c 为动态响应频率; Δt 为信号响应时间。

由图 8 可知, $\Delta t \approx 50 \mu s$,计算可得试制的热线风速仪的动态响应频率约为 15 kHz。

2.3 热线风速仪的精度测试

热线风速仪校准试验采用 1210 型标准直线探头,如图 9 所示,选择 5 μm 的钨丝作为热丝材料。

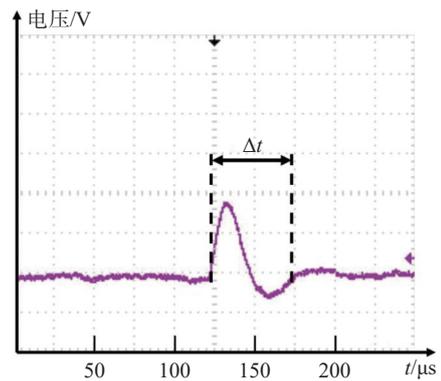


图 8 动态响应曲线

Fig. 8 Dynamic response curve



图 9 1210 型标准直线探头

Fig. 9 1210 standard linear probe

在试验准备阶段,先对风洞的风速进行标定,得到电机频率与风洞试验段风速的线性关系,再分

别采用皮托管与 TSI 手持式热线风速仪进行校准, 试验数据如表 1 所示。

表 1 电机频率与风速关系

Tab. 1 Relationship between motor frequency and wind speed

电机频率/Hz	皮托管/(m/s)		TSI 热线风速仪/(m/s)	平均速度/(m/s)
	试验一	试验二		
4.5	2.3	2.4	2.3	2.33
7.5	4.1	4.2	4.03	4.11
10.5	5.9	6.1	5.85	5.95
13.5	7.8	8.0	7.7	7.83
15.0	8.7	9.0	8.75	8.82
16.5	9.6	9.9	9.7	9.73
19.5	11.5	11.8	11.5	11.60
22.5	13.3	13.6	13.35	13.42
25.5	15.2	15.6	15.25	15.35

由表 1 可知, 在相同的电机频率下的稳态流场风洞流速测试中, 皮托管和 TSI 热线风速仪的测量值误差较小。平均速度与电机频率的关系如图 10 所示。

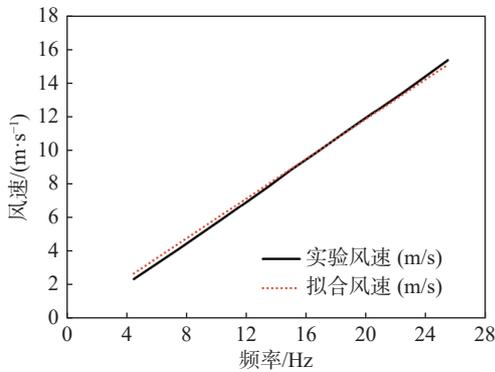


图 10 平均风速与电机的频率的关系

Fig. 10 Relationship between average wind speed and frequency of motor

经过风洞标定, 得出来流风速与电机频率的函数关系, 选取不同风速对热线风速仪进行标定, 数据如表 2 所示。

热线测速静态校准表达式为

$$e^2 = A + B \sqrt{v} \quad (14)$$

式中: e 为热线探头电压值; v 为试验风速; A 、 B 为系数。

将表 2 采集的风速与热线电压数据代入式 (14), 计算得到热线电压与风洞流速多项式关系为

表 2 热线风速仪标定数据

Tab. 2 Hot-wire anemometer calibration experimental data

电机频率/Hz	风速/(m/s)	热线电压/V
0.00	0	0.231
3.40	2	0.735
6.75	4	1.003
10.00	6	1.192
13.50	8	1.350
16.90	10	1.475
20.25	12	1.585
25.35	15	1.724

$$e = -7 \times 10^{-5} v^4 + 0.0027 v^3 - 0.0383 v^2 + 0.3098 v + 0.2349 \quad (15)$$

图 11 为单丝热线探头多项式拟合曲线。由图可知, 拟合曲线与试验曲线一致性良好。具体数据如表 3。

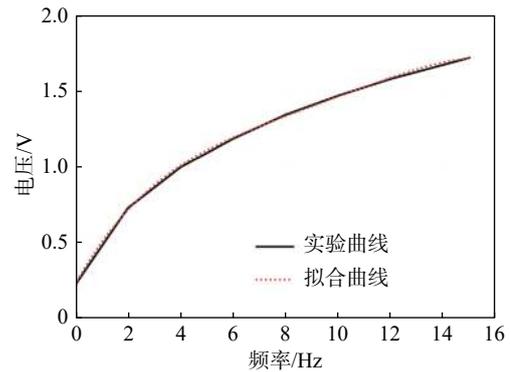


图 11 单丝热线探头多项式拟合曲线

Fig. 11 Polynomial fitting curve of single-wire hot-wire probe fitting curve

表 3 校准误差验算

Tab. 3 Calibration error verification

风速 v /(m/s)	多项式拟合值/V	误差/%	实测电压/V
0	0.2349	1.82	0.231
2	0.7218	-1.84	0.735
4	1.0162	1.29	1.003
6	1.2074	1.3	1.192
8	1.3578	0.6	1.350
10	1.5029	1.91	1.475
12	1.6514	4.21	1.585
15	1.8332	6.31	1.724
平均值		1.95	

由表 3 可知, 采用多项式拟合的函数值与实测电压值的最大误差为 6.31%, 平均误差为 1.95%。

本次试验的多项式拟合的函数为

$$e^2 = -0.2998 + 0.7764 \sqrt{v} \quad (16)$$

表 4 为同频率下热线风速仪多项式拟合结果与标准风洞风速的误差对比。由此可知,热线风速仪的最大误差不超过 0.6%,其平均误差低于 0.03%,本文试制的热线风速仪精度较高,满足试验需求。

表 4 同电机频率下热线风速仪对比标准风速
Tab. 4 Comparison of hot-wire anemometer with motor frequency

电机频率/Hz	热线风速仪测量风速/(m/s)	标准风速/(m/s)	误差/%
0.00	0	0	0
3.40	2	2.011 86	0.59
6.75	4	3.994 13	-0.15
10.00	6	5.977 23	-0.38
13.50	8	7.988 26	-0.15
16.90	10	10.000 12	0.001
20.25	12	11.982 39	-0.15
25.35	15	15.000 17	0.001

2.4 平板湍流边界层湍流度与速度型测量

湍流度是指在风洞试验段中任何一点的风速存在的高频脉动程度。恒温式热线风速仪在精细化流动测量方面具有较强的优势。为验证试制的热线风速仪具备研究湍流流动的能力,使用试验风洞来开展平板的湍流流动试验。

本次试验采用 1218 型附面层探头,如图 12 所示,选择 5 μm 的钨丝作为热丝材料。

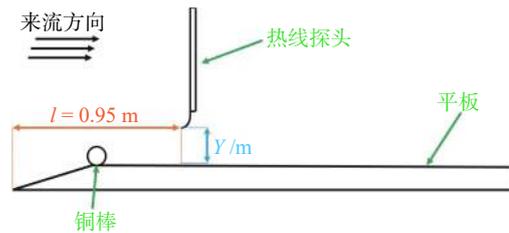


图 12 1218 型附面层探头
Fig. 12 1218 boundary layer probe

经过多次测量试验,确定测点与平板前端距离 $l=0.95$ m 时试验效果最为明显。平板实验选择来流风速 $v=6$ m/s 以及 $v=10$ m/s 作为试验工况,2 种工况流动状态均为湍流,在平板前方加装铜棒,使层流流动提前转捩。如图 13 所示,开展平板试验时,在距平板前端位置 0.95 m 处垂直移动热线探头,测量距平板不同法向位置的速度。 Y 为热线探头距离平板法向方向的距离。



(a) 平板前端实物图



(b) 平板示意图

图 13 试验示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the test

湍流度定义为脉动速度的均方根与平均速度的比值^[9],其公式为

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})}}{\sqrt{\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}}} \quad (17)$$

式中: ε 表示湍流度; $\overline{u'}$ 、 $\overline{v'}$ 、 $\overline{w'}$ 表示 3 个方向的脉动量; \overline{u} 、 \overline{v} 、 \overline{w} 表示 3 个方向的平均量。在距离平板前端 0.95 m 的位置,测量了不同风速下的湍流度,得到的曲线变化关系如图 14 所示。

由图 14 可知,在平板垂直方向,越靠近平板壁面的位置,湍流度越大,越远离平板壁面的位置,湍流度的值越小,最后无限趋近于 0。该湍流度的曲线变化趋势与姜楠等^[10] 编著的《工程中的流动测试技术及应用》的趋势相同。

在进行平板湍流边界层速度型测量试验时,为了避免热线探头触碰平板导致热丝断开,将热线探头与平板的最小距离控制在 3 mm。

沿平板边界层法向方向的速度变化关系如图 15 所示。通常把流速 $v = 0.99v_\infty$ 处定义为边界层的外层。当来流速度 $v_\infty = 6$ m/s 时,热线探头测量的脉动速度为 5.96 m/s,则该工况下把风速为 5.90 m/s 处视为边界层外层。当来流速度 $v_\infty = 10$ m/s 时,热线探头测量的脉动速度为 9.60 m/s,该工况下 9.50 m/s 处为边界层外层。由表 5 可知:当 $v_\infty = 6$ m/s

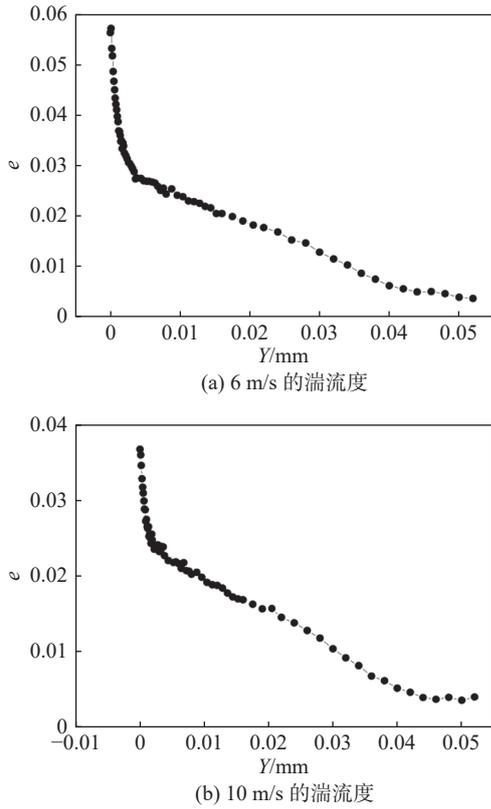


图 14 湍流度沿平板法向的变化关系

Fig. 14 The variation of turbulence intensity along the normal direction of the plate

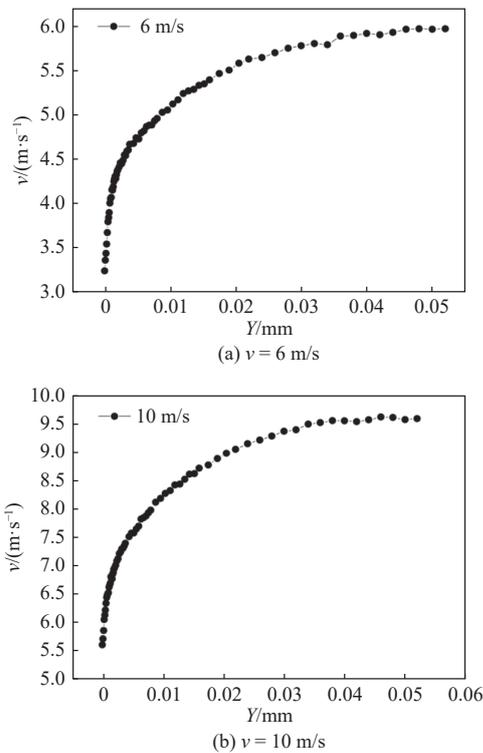


图 15 平板湍流边界层速度型

Fig. 15 Plate turbulent boundary layer velocity type

时, 该位置的边界层厚度为 $\delta_1 = 4.2 \text{ cm}$; 当 $v_\infty = 10 \text{ m/s}$ 时, 该位置的边界层厚度为 $\delta_2 = 3.7 \text{ cm}$ 。

表 5 平板湍流边界层的速度分布数据
Tab. 5 Velocity distribution data of turbulent boundary layer on flat plate

探针与平板的距离 Y/m	$v_\infty = 6 \text{ m/s}$	$v_\infty = 10 \text{ m/s}$
0	3.241 5	5.617 1
0.000 1	3.362 7	5.722 3
0.000 2	3.440 3	5.867 9
0.000 3	3.545 4	6.063 0
...
0.034 0	5.788 4	9.506 5
0.036 0	5.886 5	9.531 2
0.038 0	5.892 8	9.567 3
0.040 0	5.916 6	9.565 8
0.042 0	5.901 2	9.550 4
0.044 0	5.927 4	9.581 4
0.046 0	5.962 5	9.631 2
0.048 0	5.968 4	9.623 1
0.050 0	5.962 8	9.586 0
0.052 0	5.968 3	9.603 4

通过对平板边界层湍流流动试验测量, 验证了试制的热线风速仪具备研究湍流流动的功能。

3 结论

本文基于对流换热理论, 设计了一种低成本的恒温式热线风速仪, 其动态响应频率高达 15 kHz 且平均误差低于 0.03% 。通过对平板湍流度及边界层速度型的测量试验, 验证了本设计是可行的。本文的主要结论如下。

1) 采用多项式曲线进行数据拟合, 其吻合性高, 最大测量误差低于 0.6% , 平均测量误差低于 0.03% 。

2) 用热线风速仪对 2 种流速下的边界层湍流度进行初步测量, 得到湍流度曲线的变化趋势很好。通过湍流度能很好地反映黏性流体在边界层速度脉动量的变化趋势。

3) 运用热线风速仪对平板边界层速度型的测量, 在距离平板前端 0.95 m 的位置测了 2 组不同流速的速度型: 当设置来流风速为 6 m/s 时, 获得的边界层厚度 $\delta_1 = 4.2 \text{ cm}$; 当设置来流风速为 10 m/s 时, 获得的边界层厚度 $\delta_2 = 3.7 \text{ cm}$ 。

4) 本文所试制的低成本热线风速仪的精确度及实用性良好。

参 考 文 献

- [1] SMITS A J, MUCK K C. Constant temperature hot-wire anemometer practice in supersonic flows[J]. *Experiments in Fluids*, 1984, 2(1): 33 – 41.
- [2] CHEN J, LIU C. Development and characterization of surface micromachined, out-of-plan hot-wire anemometer[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems: A Joint IEEE and ASME Publication on Microstructures, Microactuators, Microsensors, and Microsystems*, 2003, 12(6): 979 – 988.
- [3] 李庆, 马大为, 乐贵高. 脉冲热线风速仪的研制[J]. 南京理工大学, 1996, 10(4): 62 – 69.
- LI Q, MA D W, LE G G. Development of a pulsed hot-wire anemometer[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 1996, 10(4): 62 – 69.
- [4] 陆青松, 王元. 热线风速仪制作的初步研究[J]. 南京建筑工程学院学报, 2002(3): 62 – 66.
- LU Q S, WANG Y. The primary research on making hot wire anemometer[J]. *Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute*, 2002(3): 62 – 66.
- [5] SOBCZYK J. Experimental study of the flow field disturbance in the vicinity of single sensor hot-wire anemometer[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2018, 180: 02094.
- [6] LIGEZA P, JAMRÓZ P, OSTROGÓRSKI P. Reduction of electromagnetic interferences in measurements of fast-changing air velocity fluctuations by means of hot-wire anemometer[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2021, 79: 101945.
- [7] PERRY A E, LIBBY P A. Hot-wire anemometry[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1983, 50(1): 237 – 238.
- [8] 钟志鹏. 基于 STM32 高频响热线风速仪的研制[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- ZHONG Z P. Development of high frequency hot wire anemometer based on STM32[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [9] 李奇轩. 不同压力梯度下多孔介质壁湍流的减阻特性研究[D]. 成都: 西华大学, 2022.
- LI Q X. Study on drag reduction characteristics of turbulent flow in porous media wall under different pressure gradients[D]. Chengdu: Xihua University, 2022.
- [10] 姜楠, 田砚, 唐湛棋. 工程中的流动测试技术及应用[M]. 天津: 天津大学出版社, 2018.
- JIANG N, TIAN Y, TANG Z Q. Flow test technology and its application in engineering[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2018.
- (编校: 饶莉)
-
- (上接第 18 页)
- [8] 王嫒嫒. 三相四桥臂的光伏并网逆变器的研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.
- WANG Y Y. Research on the control of photovoltaic grid-connected three-phase four-leg inverter[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.
- [9] 肖芳飞. 基于三电平 NPC 逆变器的 SVPWM 算法及中点电压平衡策略研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2017.
- XIAO F F. Research on SVPWM algorithm and neutral point voltage balance strategy based on three level NPC inverter[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2017.
- [10] 王位权. 不平衡负载下五相双级矩阵变换器载波 PWM 策略的研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2018.
- WANG W Q. Research on carrier-based pulse-width modulation strategy of five-phase two-stage matrix converter under unbalanced load[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2018.
- [11] BELLINI A, BIFARETTI S. A simple control technique for three-phase four-leg inverters[C]//International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Taormina, Italy: IEEE, 2006: 1143 – 1148.
- [12] KIM J H, SUL S K. A carrier-based PWM method for three-phase four-leg voltage source converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, 19(1): 66 – 75.
- [13] WANG J P, GAO Y, JIANG W D. A carrier-based implementation of virtual space vector modulation for neutral-point-clamped three-level inverter[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(12): 9580 – 9586.
- [14] WANG R T, AI L, LIU C. A novel three-phase dual-output neutral-point-clamped three-level inverter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(7): 7576 – 7586.
- [15] WANG R T, LI C C, LIU C, et al. Control strategy for four-leg nine-switch inverter under unbalanced loads[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 50377 – 50389.
- (编校: 饶莉)