

一种利用通电线圈测量风速的方法

林品臻 江云坤 冯柏赫 黄碧华

(福州大学物理与信息工程学院, 福建 福州 350108)

摘要 当冷空气流过一个通电的发热线圈时,线圈的温度会降低,其最终的温度取决于空气流速。对一个钨线圈通以恒定电流,将其置于风场中,用台式万用表测量线圈两端电压而得到其电阻,再利用电阻-温度特性测得线圈温度,以此达到测量风速的目的。本文将详细探究这一物理过程,从实验进行验证,最终得到一种可靠的测量风速的方法。研究表明:该方法具有较高的测量精度和较短的响应时间,对流场干扰小。

关键词 强制对流;热传导;电阻温度特性;电流热效应;恒流法

A METHOD OF MEASURING WIND SPEED WITH ENERGIZED COIL

LIN Pinzhen HUANG Bihua FENG Baihe JIANG Yunkun

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108)

Abstract When cold air flows over an energized hot coil, the temperature of the coil will decrease, and the final temperature depends on the wind speed. Apply a constant current to a tungsten coil which is placed in the wind field, measure the voltage at both ends of the coil using a desktop multimeter to obtain its resistance, and then use the resistance temperature characteristic to measure the coil temperature, in order to achieve the purpose of measuring wind speed. This paper will explore this physical process in detail, validate it through experiments, and finally obtain a reliable method for measuring wind speed. The results show that this method has high measurement accuracy, short response time, and little convection field interference.

Key words forced convection; thermal conduction; temperature coefficient of resistance; thermal effect of electric current; constant current method

本文探究的问题源于 2021 年国际青年物理学家锦标赛第四题 Wind Speed: 当冷空气流过一个通电线圈时,线圈的温度会降低。探究风速如何影响温度的下降,以及该方法的测量精度。该赛题要求研究空气流动的散热机理,并且在数学

上给出线圈温度关于风速的表达式。

线圈的换热过程是一个强制对流换热过程。风速的变化引起表面换热系数的变化,从而导致线圈温度发生改变。而由金属的电阻温度特性,线圈的电阻会随着温度的改变而改变,因此,如果

收稿日期: 2022-04-25

基金项目: 福州大学大学生科研训练计划(No. 27180)

通讯作者: 黄碧华,女,讲师,研究领域为量子信息,hbh@fzu.edu.cn。

引文格式: 林品臻,江云坤,冯柏赫,等. 一种利用通电线圈测量风速的方法[J]. 物理与工程,2023,33(6):85-89.

Cite this article: LIN P Z, HUANG B H, FENG B H, et al. A method of measuring wind speed with energized coil[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(6): 85-89. (in Chinese)

设定流过线圈的电流不变,就可以通过测量线圈两端的电压而测得电阻,从而建立起电压与风速之间的关系,实现测量风速。整个模型建构和逻辑链条如图1、图2所示。

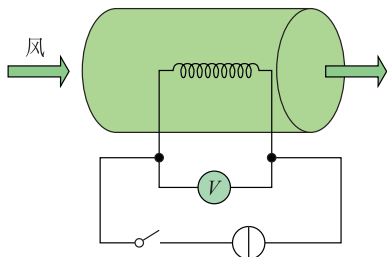


图1 示意图

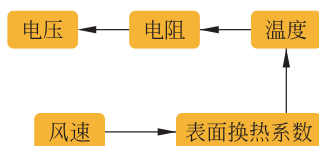


图2 测量逻辑图

本文的工作介绍了一种基于电学和传热学原理的风速测量方法,可以为本科阶段物理探究实验教学提供参考。

1 线圈测量风速原理

1.1 热平衡态下的换热原理

暴露在流场中的线圈与外界进行热交换包含四种形式:强制对流、自然对流、辐射散热以及线圈与固定支架之间的热传导。根据张云伟等^[1]的实验结果:在风场中,线圈的换热量几乎由强制对流贡献,所占比例在95%到99%之间,并且该比例随着空气流速的增大而增大,因此本研究中近似认为线圈的散热方式为强制对流。

强制对流引起的线圈散热量为

$$Q_f = hA_s(T - T_f) \quad (1)$$

其中, Q_f 是单位时间内热量损失, A_s 是线圈暴露在风场中的表面积, T_f 是空气温度, T 是线圈表面温度。 h 是表面换热系数,与空气流速有关。

由电流热效应引起的线圈发热功率为

$$P = I^2 R \quad (2)$$

若考虑到在温度不太高的情况下,线圈的电阻与温度呈线性关系,则线圈的发热功率为

$$P = I^2 R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (3)$$

其中, α 是电阻温度系数, T_0 是线圈未加热时的表面温度,等于空气温度 T_f 。 R_0 是初始温度下的电阻。

在热平衡状态下,空气带走的热量等于电流加热线圈所产生的热量,于是有

$$hA_s(T - T_f) = I^2 R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (4)$$

可解得热平衡下的线圈温度为

$$T = \frac{I^2 R_0}{hA_s - \alpha I^2 R_0} + T_0 \quad (5)$$

在式(5)中仅有表面换热系数 h 与风速有关。因此,我们需要给出表面换热系数与风速的关系。

如图3所示,将线圈摆放为:其轴方向沿着风速方向。空气流过多匝线圈,可看作多重的圆柱绕流。图4^[2]定性地展示了空气绕流过圆柱体的情况。空气会在圆柱体前半周形成层流边界层,而在后半周,由于惯性作用气体将脱离壁面,从而在圆柱体的后方形成湍流区^[3]。即线圈表面的一部分边界层里是层流,而一部分边界层里是湍流。通常,实际的流动情况是十分复杂的,难以从理论上求解得表面换热系数与风速的关系。因此研究者们往往采取更普遍的实验手段^[4-6]对表面换热系数进行求解。

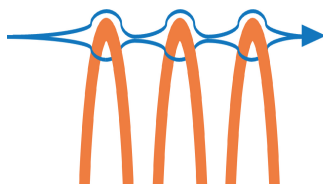


图3 空气绕流过线圈

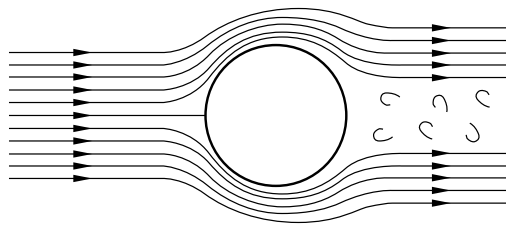


图4 圆柱绕流示意图

在对流换热的研究中,以某种幂函数形式处理实验数据的方法取得了很大的成功,这种幂函数也被称做换热准则关系式^[7]。它的形式为

$$Nu = cRe^n Pr^m \quad (6)$$

其中, Nu 是努塞尔数, Re 是雷诺数, Pr 是普朗特数。 c 和 n 是待定常数,由实验测定。 m 是与流体种类相关的系数,对于气体 m 一般取1/3。

将式(6)改写成有量纲的形式可得表面换热

系数与风速的关系为

$$h = \frac{c\lambda}{L^*} \left(\frac{L}{\nu} \right)^n u_f^n Pr^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

其中, λ 是空气导热系数, ν 是空气黏度, u_f 是风速。 L 和 L^* 分别是对应 Re 和 Nu 的特征长度。

实验的具体做法如下:改变风速,直接测得对应的线圈温度,进而计算出对应的换热系数,再通过定义算出此时的努塞尔数。而雷诺数可以由选定风速值换算得出。通过选取多个不同风速值,便可得到一组描述 Re 和 Nu 关系的散点图,从而得出待定参数 c 和 n 。最后联立式(7)和式(5)就可以得到线圈温度 T 与风速 u_f 的关系。

值得指出的是,式(7)中 u_f 的指数 n 反映了系统的换热剧烈程度。Incropera F P 等^[8]推导出,当速度边界层内为层流时 $n=0.5$ 。陶文铨^[9]指出当速度边界层内为湍流时 $n=0.8$ 。对绕流模型而言,壁面边界层中一般既有层流部分,又有湍流部分,由此可以预估实验测定的 n 值在 0.5~0.8 之间。

1.2 趋于热平衡态的响应时间

以上讨论的是线圈处于热平衡态下的情形。而实际上,当一阵风吹过线圈的时候,温度并非瞬间降低到预期值,线圈从静风下的热平衡态过渡到有风下的热平衡态需要一段时间。线圈温度随时间变化的微分方程可以表示为

$$Cm dT = [I^2 R(T - T_0) - hA_s(T - T_0)] dt \quad (8)$$

其中, C 是线圈比热容, m 是线圈质量。

求解式(8)可得

$$T = \frac{I^2 R_0}{hA_s - \alpha I^2 R_0} + T_0 + \frac{C_1 \cdot \exp \left[\left(\frac{\alpha I^2 R_0}{Cm} - \frac{hA_s}{Cm} \right) t \right]}{hA_s - \alpha I^2 R_0} \quad (9)$$

其中, C_1 是积分常数,与实验时线圈的初始温度有关。式(9)中的 h 是与风速 u_f 有关的函数,只要在实验上测得两者的关系,便可知道不同风速下系统的响应时间曲线。

2 实验装置与实验数据

2.1 实验装置

实验装置如图 5 所示,线圈置于一个持续通

着气流的圆管内。圆管由亚克力材料制成,导热性很差,可视为绝热圆管,因此排除了管外空气温度变化对实验的干扰。线圈与一个电流源(型号: ODP3303)串联,通入恒定的 3.000A 电流。线圈两端并联台式万用表(型号: 2000 MULTIMETER)。在线圈的选材上,被选金属应当具有较高的电阻率、较大的电阻温度系数和较大的刚度系数,并且不容易与空气发生反应。对参数进行综合评估后,一条长度为 762mm、直径为 0.4mm 的钨丝,被绕制成一个长度为 61mm、直径为 26mm 的 27 匝线圈。钨丝的直径为 0.4mm,直径很小,可忽略由金属丝中心到表面的温度梯度,故认为整个线圈温度处处相等。当线圈处于热平衡时,可以由台式万用表和已设定的电流算出线圈电阻,再根据电阻温度特性换算得到线圈温度。管中气流温度控制不变,气流速度可调节,并可由风速仪(型号: AS856)读出。

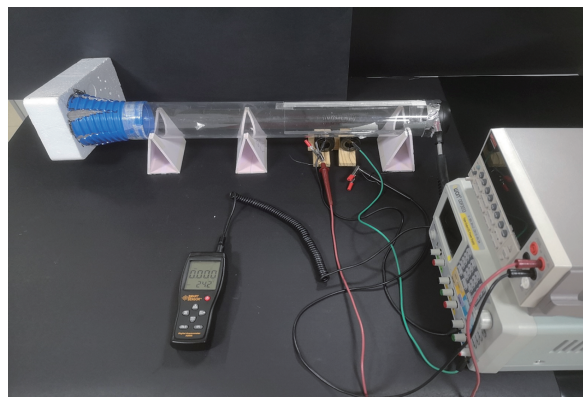


图 5 实验电路图

2.2 实验数据

实验开始前,已对风管进出口的风温进行测量,最大温差只在 0.1℃,因此风管中的温度波动可以忽略不计。

由上述原理测得的线圈温度随风速变化的原始数据如图 6 所示,由图 6 中的实验数据结合 Re 、 Nu 的定义,便可得到描述 Re 和 Nu 实验关系的图 7。这里 Re 和 Nu 中特征长度的取法如下:金属丝很细,其直径比风管的内径小了两个数量级,因此此时影响气流紊乱程度的主要因素是风管内径,故取风管的内径作为雷诺数中的特征长度。此外,因为亚克力管不参与传热过程,所以系统的换热能力只受线圈本身的参数影响,故取金属丝的长度(相当把于线圈撻直)作为努塞尔数

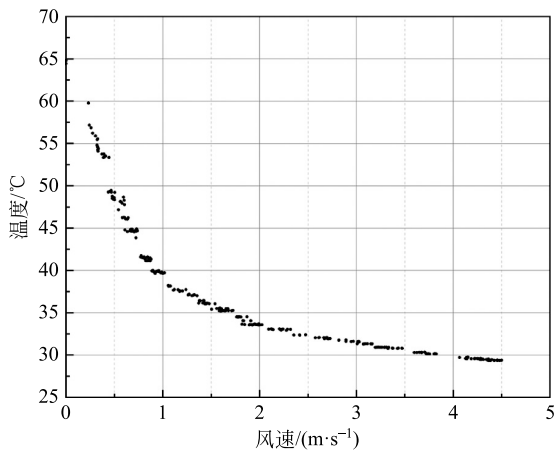


图6 温度-风速实验值

的特征长度。

通过查表^[10]可知实验中普朗特数取 0.703。结合式(6)和图 7,即可拟合得出常数 c 、 n ,从而可计算得到线圈表面换热系数随风速的变化关系

$$h = 222.503 \cdot u_f^{0.60} \quad (10)$$

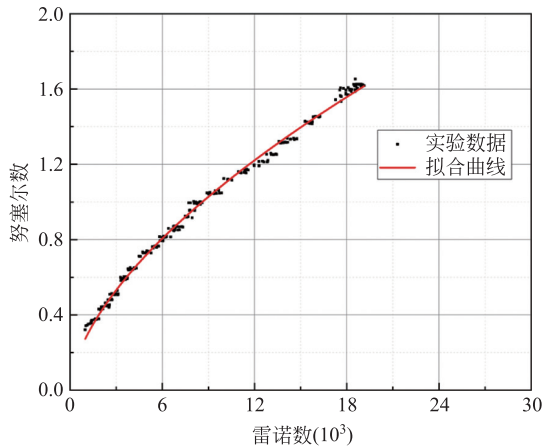


图7 努塞尔数-雷诺数实验值及拟合

由式(10)可知,实验测得的指数 n 值为 0.60。根据许国良等^[11]的研究,当 $10^3 < Re < 2 \times 10^5$ 时,绕流单圆柱体时 n 取 0.6,而绕流顺排圆柱管束时 n 取 0.63。可见本实验中的换热对象虽然为多匝线圈,但依然可视单圆柱体绕流来处理,即线圈之间的耦合作用可以忽略不计,线圈的绕制方式不影响换热。究其原因,是金属丝较细,对流场的扰动十分微弱,前一匝线圈对来流产生的影响很快消散,尚不足以传达到下一匝线圈。

将式(10)代入到式(5)中,可得温度随风速变

化的关系式(11),并与实验数值进行对比(图 8)

$$T = \frac{3.36}{0.21 \cdot u_f^{0.60} - 0.015} + 23 \quad (11)$$

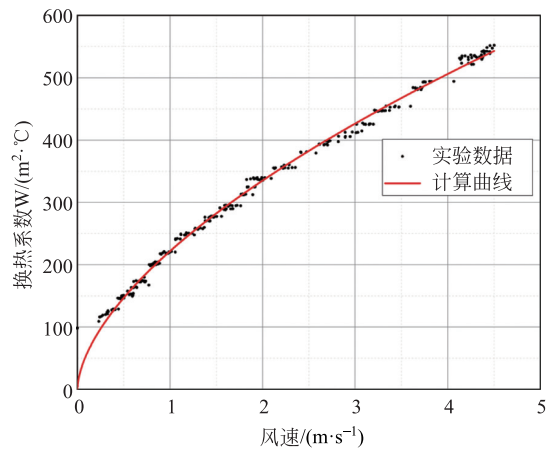


图8 换热系数-风速的实验值及理论计算曲线

由于式(11)是由图 6 中的数据($u_f < 5 \text{ m/s}$)整理而得。为了证明该计算结果的可靠性,我们用该计算曲线预测更大风速范围($u_f > 5 \text{ m/s}$)内的温度变化情况,并与测量的数据作对比。结果如下。

图 9 中浅色实心曲线是根据式(11)描绘出的温度-速度曲线。黑点为实验测量数据。从图 9 中深色线右侧可以看出,该温度-速度曲线所预测的结果与实验值符合的较好,最大误差仅为 2.4%。这说明理论模型合理,计算结果可靠。

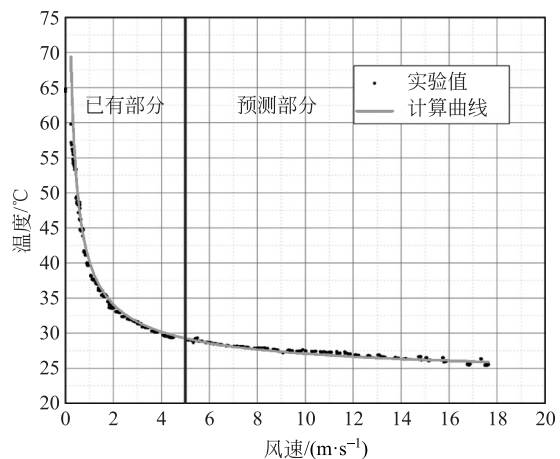


图9 温度-风速变化预测结果

2.3 电压与风速的关系

由于仪器直接读出的物理量是电压,因此只要建立起电压和风速的一一对应关系,就能实现利用通电线圈测量风速的目的。

最终的电压测量值与风速关系为

$$U = \frac{0.01774}{0.21 \cdot u_f^{0.60} - 0.015} + 1.093 \quad (12)$$

由式(12)所表示的数学形式和图 10 可知,在高风速的情形下,要想进一步降低线圈温度是很困难的,这使得电压传感器难以捕捉到微弱的电信号变化。从实验结果(图 10)来看,本实验中台式万用表的精度可以满足 18m/s 以下的风速测量要求。

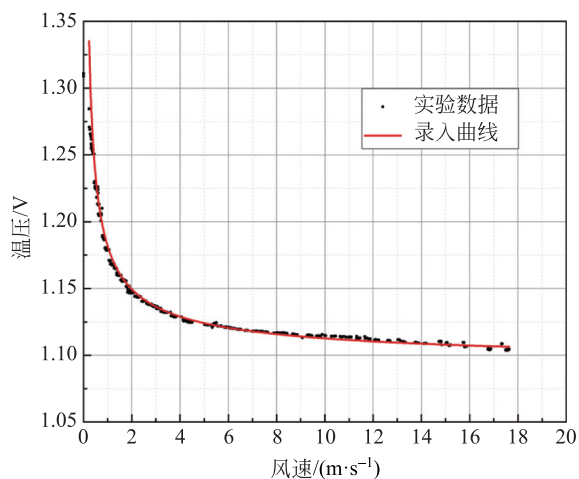


图 10 电压风速关系

2.4 不同风速下的响应时间

利用实验中测量得到的线圈表面换热系数与风速的关系式(10),结合式(9)便可得到不同风速下系统的响应时间曲线。风速的增大将使得线圈与空气的换热加剧,从而更快地达到热平衡,图 11 直观地展示了这些结果。

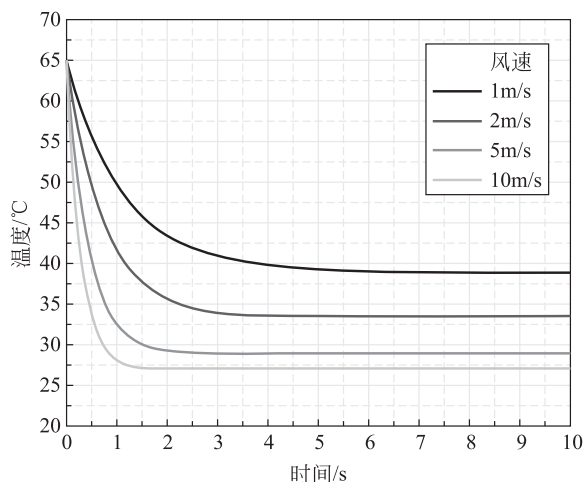


图 11 响应时间

由图 11 可知,虽然线圈到达热平衡需要一定时间,但总体响应时间都很短(3s 以下)。响应时

间不会直接带来误差,只要在等待一段时间后进行测量即可得到准确数值。响应时间是该模型固有的特征,不可消除,但可以通过改变线圈的物理特征和几何特征来减少。

3 结语

本文提出一种利用通电线圈来测量风速的方法。其基本原理是风速会引起线圈温度的变化,而温度的变化可以转换成电信号的变化,在恒流的条件下建立起风速和电压间的响应关系。研究表明:该方法具有较高的测量精度和较短的响应时间。此外,当金属丝较细时,各匝线圈之间的耦合作用可以忽略,流场中的多匝线圈绕流可等效于单圆柱体绕流模型。这也说明了该方法具有对流场干扰小的优点。

参 考 文 献

- [1] 张云伟,全永凯.热线风速仪非标定工况下测试修正方法研究[J].推进技术,2018,39(9):2049-2101.
- [2] 刘洪亮.一种基于圆柱绕流原理的烟气颗粒物捕集装置,CN209501052U[P]. 2019.
- [3] 陶文铨.传热学[Heat Transfer][M]. 5 版. 北京:高等教育出版社,2019:240-241.
- [4] 张军,张俊龙,雷红胜,等.基于隐式温度修正的二维热线风速仪校准方法[J].空气动力学学报,2020,38(1):43-47,65.
- [5] 关涛,刘晓燕,彭志刚.导热油管内强制对流换热系数的计算[J].工业锅炉,2002(6):9-11.
- [6] 曾敏,王秋旺,屈治国,等.波纹管管内强制对流换热与阻力特性的实验研究[J].西安交通大学学报,2002(3):237-240.
- [7] 许国良,等.工程传热学[M].北京:中国电力出版社,2005:74-79.
- [8] INCROPERA F P, DEWITT D P. Fundamentals of heat and mass transfer[M]. 5th ed. New York: John Wiley & Sons. , 2002: 389-395.
- [9] 陶文铨.传热学[Heat Transfer][M]. 5 版. 北京:高等教育出版社,2019:200-203.
- [10] 许国良,等.工程传热学[M].北京:中国电力出版社,2005:230.
- [11] 许国良,等.工程传热学[M].北京:中国电力出版社,2005:105-106.