

文章编号: 1672-9897(2010)03-0087-05

# 高压交变流动下热线风速仪标定方法研究

论立勇<sup>1,2</sup>, 陈厚磊<sup>1</sup>, 蔡京辉<sup>1</sup>

(1. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**热线风速仪是重要的测速手段之一,但在高压交变流动条件下缺乏有效的标定方法。提出了一种通过测量气库内压力变化并按绝热热力学过程计算出气库气体流速从而标定热线风速仪的方法。为了对该标定方案的误差进行分析,建立了该标定方案的数值模型,运用 CFD 软件 FLUENT 对该方案气库壁面分别设为绝热和等温边界条件时的热力过程进行了数值模拟,结果表明标定方案中采用绝热物理模型所引起的误差最大不超过 2%。由于在热线探针两侧布置了一定量丝网作为均流元件,热线探针所测速度与管路截面平均速度误差不超过 1.4%。该标定方法总误差不超过 3.37%。

**关键词:**交变流动;热线风速仪;标定;CFD;FLUENT

**中图分类号:**V211.752 **文献标识码:**A

## Investigation on calibration method of hot-wire anemometer in high pressure reciprocating flow

LUN Li-yong<sup>1,2</sup>, CHEN Hou-lei<sup>1</sup>, CAI Jing-hui<sup>1</sup>

(1. Technical Institute of Physics and Chemistry of CAS, Beijing 100190, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Hot-wire anemometer is one of the most important velocity measuring device, but there is no good calibrating method in reciprocating flow. A calibrating method is presented when a hot-wire anemometer is used in reciprocating flow by measuring the pressure of the gas reservoir. Thermal process of the gas in the reservoir is assumed to be adiabatic process. In order to analyze the error of the presented calibrating method, a numerical simulation was carried out by the CFD software FLUENT at the adiabatic and isothermal boundary conditions respectively. The numerical results show the error of the usage of adiabatic physical model in the calibrating method is smaller than 2%. Because of the arrangement of stainless-steel woven wire screens at two sides of the hot wire probe, the difference of the velocity measured by hot-wire anemometer and the average velocity of the cross section of the tube is less than 1.4%. The total error of the calibration system is smaller than 3.37%.

**Key words:** reciprocating flow; hot-wire anemometer; calibration; CFD; FLUENT

### 主要符号表

$V$	气库容积( $\text{m}^3$ )	$p_j, T_j, h_j$	进入气库气体压力、温度、比焓
$Q_{cv}$	单位时间进入控制体的热量(W)	$p, T, h$	气库内气体压力、温度、比焓
$W_{cv}$	控制体单位时间内对外作的功(W)	$U$	热力学能(J)
$h$	工质比焓(kJ/kg)	$u$	工质流速(m/s)
$g$	重力加速度( $\text{m/s}^2$ )	$z$	高度(m)
$q_{m,i}$	流入控制体的瞬时质量流量(kg/s)	$q_{m,o}$	流出控制体的瞬时质量流量(kg/s)
$c_p$	定压比热容( $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ )	$c_v$	定容比热容( $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ )
$m$	质量(kg)	$\dot{m}$	质量流率(kg/s)
$\omega$	角频率(rad/s)	$\rho$	密度( $\text{kg/m}^3$ )
$\mu$	动力粘度( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	$d$	直径(m)
$t$	时间(s)	$f$	频率(Hz)

收稿日期: 2009-04-15; 修订日期: 2009-06-11  
基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50890181)

## 0 引言

热线测速技术是一种非常重要的测量流体速度与方向的技术,已经有 100 多年的历史,它为流体速度的测量做出了巨大的贡献,并且在 20 世纪 60 年代以后几乎垄断了湍流脉动测速领域<sup>[1]</sup>。由于每个热线探针的性能随着制造工艺和金属材料的不同而存在差异,另外其性能还与流体的温度、密度、速度等外在情况有关,因此在实际测量当中,要想获得比较准确的测量结果,必须对每一条热线进行标定。

交变流动是指流体在流动过程中流动参数随时间作周期性振荡的一种物理现象。通常的交变流动 (oscillating flow) 可分成脉动流 (pulsating flow) 和往复流 (reciprocating flow)<sup>[2]</sup>。往复流的脉动速度的幅值大于时间平均值,流动方向发生周期性变化,回热式制冷机中蓄冷器内部的流动就是这种情况。将热线风速仪用于交变流动测量时,需要在交变流动状态下对热线进行标定。实验中使用的是丹麦 DANTEC 公司的热线风速仪,该套装置随机附带了一套标定装置,但只可以在室温和常压状态下对热线探针进行标定,如果要在高压交变流动中使用热线风速仪测量流速,该套标定装置无法达到要求。因此,提出了一种高压交变流动状态下热线风速仪的标定方法,并采用数值计算方法对标定误差进行了分析。

## 1 标定原理

标定原理图如图 1 所示,标定系统包括:线性压缩机、测量单元,热线风速仪,压力传感器,气库。线性压缩机产生交变正弦压力波;测量单元放置热线风速仪探针,保证探针位于管路中心位置,测量单元两侧填有一定数量丝网,起到均流作用;压力传感器测量气库内压力波动;气库是只有一个出口的圆柱状铝制空体积。压缩机活塞周期性往复运行,驱动工质在测量单元形成方向和幅值均发生周期性变化的交变流动,在封闭气库中形成周期性压力波动。进出气库的气体流量与气库内压力变化存在一定关系,根据气库内压力变化可以求得气体流量,然后与热线输出电压按 King 公式对热线进行标定。

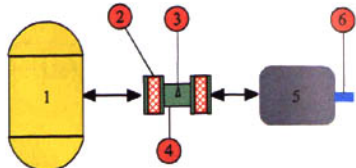
以图 1 中气库作为控制体,控制体模型如图 2 所示。

根据变质量热力学原理,气库内气体进出过程可以视为刚性容器绝热充气、放气过程<sup>[3]</sup>。

已知变质量热力学能量方程为

$$Q_w = \frac{dU}{dt} + (h + \frac{u^2}{2} + gz)_o q_{m,o} -$$

$$(h + \frac{u^2}{2} + gz)_i q_{m,i} + W_w$$



1 压缩机 2 丝网 3 热线探针 4 测量单元 5 气库 6 压力传感器  
图 1 标定原理示意图

Fig. 1 Schematic drawing of calibrating system

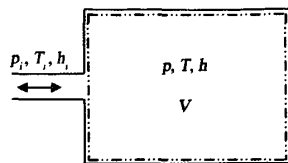


图 2 绝热充气放气模型

Fig. 2 Adiabatic gas charging and bleeding model

以充气过程为例,因为气库容积  $V$  不变,所以边界功  $\delta W = 0$ 。又控制容积只有一个入口,故  $\delta q_{m,o} = 0$ ,  $d_m = \delta q_{m,i}$ 。因为充气过程进行很快,可认为  $\delta Q = 0$ ,假设充入气体的动能和位能可忽略,则该过程的能量方程可写为

$$h_i dm = dU$$

利用理想气体性质,上式写成

$$c_p T_i dm = d(mu) = mdu + udm = c_v m dT + c_v T dm$$

因而  $\frac{dm}{m} = \frac{dT}{kT_i - T}$ , 其中  $k = \frac{c_p}{c_v}$ , 由  $\frac{dp}{p} + \frac{dV}{V} -$

$$\frac{dm}{m} - \frac{dT}{T} = 0 \text{ 和 } dV = 0 \text{ 得}$$

$$\frac{dp}{p} = \frac{kT_i}{(kT_i - T)T} dT$$

$$\text{结合上面两式得 } \frac{dm}{m} = \frac{T}{kT_i} \frac{dp}{p}.$$

用  $m = \frac{pV}{RT}$  代入得

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m} = \frac{V}{kRT_i} \frac{dp}{dt} \quad (1)$$

描述热线风速仪工作原理的 King 公式为  $N_u = A + B \cdot Re^n$  (King 推荐  $n = 0.5$ ),  $A$  和  $B$  都是常数,努塞尔数  $N_u$  正比于热线与周围气体的换热量  $Q$ ,也正比于补偿电压  $E$  的平方,而雷诺数  $Re = \frac{\rho u d}{\mu}$

正比于气体在单位流通面积上的质量流量  $\dot{m}$ ,里面包含了压力的因素,King 公式可写成  $E^2 = A' + B' \cdot (|\dot{m}|)^n$ ,  $A'$ 、 $B'$  为常数。

将式(1)代入得

$$E^2 = A' + B' \cdot \left( \left| \frac{V}{kRT} \frac{dp}{dt} \right| \right)^n \quad (2)$$

指数  $n$  在一定的质量流率范围内恒定, 在大范围内随质量流率变化。代入实验数据可以拟合出  $E$  和  $\dot{m}$  的关系曲线, 得到  $A'$ 、 $B'$  和  $n$  的值。

根据  $|\dot{m}| = \rho A u$  获得  $p$  和  $u$  的关系, 代入式(2)可以得到  $E$  和  $u$  的关系式。代入实验数据可以拟合出  $E$  和  $u$  的关系曲线  $E^2 = A' + B' u^n$ 。

## 2 实验装置与测试过程

实验装置包括: 变压变频电源(ELGAR SW1750A)、线性压缩机、压力传感器(Kistler 601A)、热线风速仪(Dantec 90N10, 使用 55P11 探针, 最大频率为 250kHz)、同步采样数据采集卡(NI-DAQmx6143, 8 通道 16 位同步采样, 最高采样频率是 250kS/s)、气库(容积 32ml)和抽真空系统, 如图 3 所示。该套实验系统采用先进仪器测量, 精度比较高。

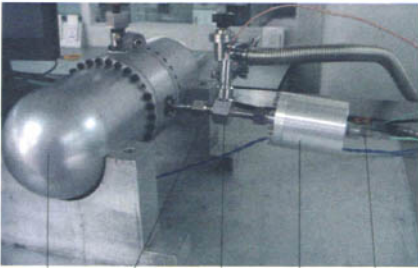


图 3 试验台图片

Fig. 3 Picture of the experimental apparatus

实验操作过程如下: 首先将压缩机、测量单元和气库组成的实验系统抽真空, 然后充入  $p_0 = 2\text{MPa}$  高纯度氮气, 待压力稳定以后启动压缩机在 50Hz 工作, 以一定速度增加压缩机输入功率, 同时采集并记录不同功率下压力波峰值及对应热线风速仪电压, 采集程序采样频率 12kHz, 采样点数 1024。

## 3 数据处理及分析

### 3.1 数据处理

随着压缩机活塞的运动, 气库内压力呈现正弦波动, 可以用表达式  $p = p_0 + |p| \sin(\omega t)$  表示,  $p_0$  为充气压力, 代入式(2)可得:

$$E^2 = A' + B' \cdot \left( \frac{V}{kRT} \cdot \omega \cdot |p| \cos(\omega t) \right)^n$$

取质量流量正峰值时进行标定, 由上式当  $\cos(\omega t) = 1$  时  $\dot{m}$  达到正值最大  $|\dot{m}|$ , 则  $E^2$  的最大值为

$$E^2 = A' + B' \cdot \left( \frac{V}{kRT} \cdot \omega \cdot |p| \right)^n \quad (3)$$

因此可以建立不同功率下热线风速仪电压值与气库压力幅值之间的关系式。

由式  $|\dot{m}| = \frac{V}{kRT} \cdot \omega \cdot |p| = \rho u A$  代入数据可得  $u = 24.287 |p|$ , 代入式(3), 根据实验参数计算得到热线风速仪电压与流速之间的关系。

$$E^2 = A' + B' \cdot \left( \frac{V}{kRT} \cdot \omega \cdot \frac{u}{24.287} \right)^n$$

$$\Rightarrow E^2 = A' + B' \cdot u^n$$

电压与速度拟合式为

$$E^2 = A' + B' \cdot u^n \Rightarrow E^2 = 4.57579 + 3.44065 u^{0.38326}$$

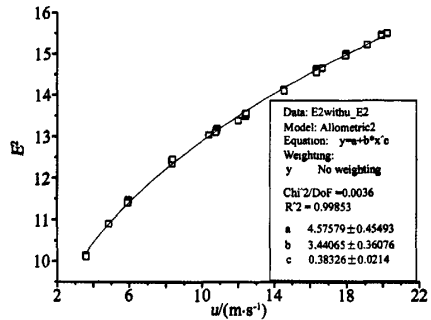


图 4 电压与速度拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of voltage and velocity

### 3.2 标定方案误差

在数据处理过程中, 对气库内气体采用绝热热力学过程计算, 但实际实验中, 气库放置在室温环境中, 由于内部气体波动, 气库壁面与环境存在热量交换。为确定计算中对气库内气体采用绝热模型造成的误差, 采用 FLUENT 对气库壁面边界条件分别设为等温和绝热两种情况进行数值模拟, 得到气库内温度波动和气库进出质量流量的大小, 通过比较两组数值模拟的结果和按绝热模型计算的结果, 分析误差的大小。下面分析以压力波动  $\pm 0.05\text{MPa}$  为例进行。

#### (1) 按绝热压缩模型计算

实验测量过程中气体由于压缩膨胀会引起一定的温度波动, 如果按绝热过程计算, 则

由气体方程

$$\frac{pV}{T} = mR$$

和过程方程

$$\frac{pV^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}}{m^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} e^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} = \text{const}$$

可得充气前后温度变化与压力关系

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

当充气压力 2MPa, 压力波动  $\pm 0.05\text{MPa}$  时, 温

度波动±2.98K。

质量流由公式  $\frac{dm}{dt} = \dot{m} = \frac{V}{kRT} \frac{dp}{dt}$  得到。

由  $p = p_0 + |p| \sin(\omega t)$ , 则  $\frac{dp}{dt} = |p| \omega \cos(\omega t)$ , 可得

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m} = \frac{V}{kRT_i} \frac{dp}{dt} = \frac{V}{kRT_i} |p| \omega \cos(\omega t)$$

当  $\cos(\omega t) = 1$  时,  $|\dot{m}|$  最大为 0.000769 kg/s。

## (2) 数值模拟分析

数值分析采用 CFD 软件包 FLUENT 进行计算。网格由 FLUENT 前处理软件 GMBIT 生成。采用前处理软件 GMBIT 建立二维轴对称模型, 计算域网格划分如图 5。



图 5 计算域网格划分  
Fig. 5 Grid of computational domain

在 Fluent 计算中, 充气压力 2MPa, 压力波动±0.05MPa, 故输入压力波为  $p = 2 \times 10^6 + 50000 \times \sin(2\pi ft)$ , 运行频率为 50Hz, 故每个周期 0.02s。将该压力波设为气库入口边界条件, 其它壁面分别设为绝热条件和等温条件, 采用非耦合隐式算法, 计算时间步长 0.0001s, 每时间步长迭代 300 次, 其它选项按默认设置。计算域入口压力波如图 6。

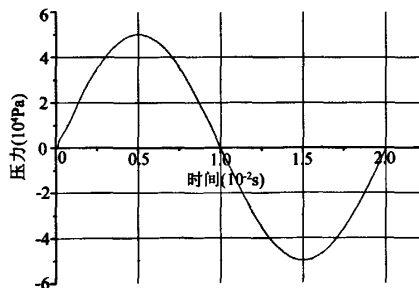


图 6 计算域入口压力波  
Fig. 6 Pressure wave at the inlet of the computational domain

交变流动经若干周期稳定后, 结果在同一张图上显示。在靠近气库边界处某一点, FLUENT 中用绝热和等温边界条件以及按绝热模型计算的温度波动结果见图 7。从图 7 可以看出, 对气库壁面采用等温和绝热边界条件, 计算出的温度波动结果差别很小。

在同一张图上显示 FLUENT 中用绝热和等温边界条件以及按绝热模型计算的气库进出质量流量结果如图 8 所示。从图 8 结果可以看出, 3 条曲线基本重合在一起。

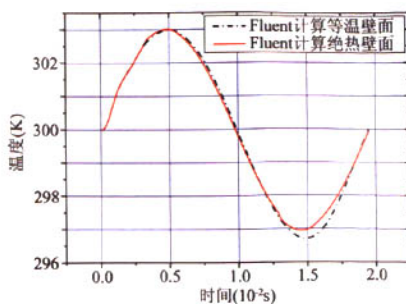


图 7 绝热和等温边界条件下温度波动对比图  
Fig. 7 Comparison of temperature wave at adiabatic and isothermal boundary condition

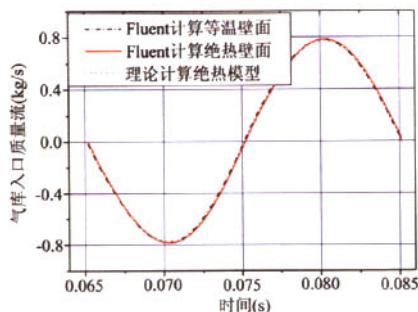


图 8 绝热和等温边界条件下气库质量流波动对比图  
Fig. 8 Comparison of inlet mass flow wave at adiabatic and isothermal boundary condition

从图 7、8 和表 1 可以看出, 数值模拟中气库内壁面的边界条件分别设为绝热和等温两种情况时, 内部气体的温度波动与质量流量的结果非常接近, 且与绝热压缩模型的计算结果吻合。因此标定方法中按绝热过程计算引起误差最大不超过 2%。

表 1 计算值与模拟值对比分析表  
Table 1 Contrast table of calculation and simulation results

项目	计算值	绝热边界条件模拟值	误差	等温边界条件模拟值	误差
温度幅值	2.98K	3.00K	0.67%	2.99K	0.34%
质量流量幅值	0.000769	0.000783kg/s	1.82%	0.000779kg/s	1.3%

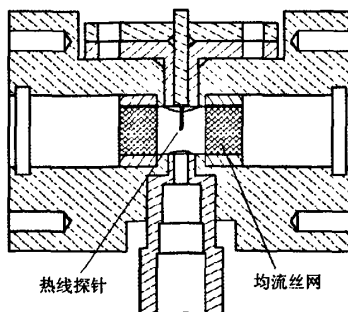


图 9 测量单元剖面图  
Fig. 9 Sectional view of the measuring unit

对于本实验,由于在测量单元中热线探针两侧均布置了一定量丝网作为均流元件,如图9所示,丝网数量可以通过数值方法进行优化,从而保证通过热线探针管段的气体流动均匀性,该流动状态下用管段截面某一点速度替代截面平均流速误差不超过1.4%<sup>[5]</sup>。

## 4 结 论

介绍了一种在高压交变流动条件下标定热线风速仪的方法。该方法是通过压力传感器测量气库内压力变化,假设气库内气体热力过程为绝热过程,根据压力变化计算进出气库气体流量从而标定热线。运用数值模拟软件 FLUENT 对标定方案所采用绝热物理模型引起的误差进行了分析,通过分析发现壁面设为绝热和等温边界条件时,数值计算结果非常接近,因此标定方法中采用绝热物理模型准确度很高,所引起误差最大不超过2%。在测量单元中热线探针两侧布置了一定量丝网作为均流元件,使通过热线

探针管段的气体流动均匀,该流动状态下用管段截面某一点速度替代截面平均流速误差不超过1.4%。该标定方法总误差不超过3.37%。

### 参考文献:

- [1] 盛森芝,沈熊,舒炜. 流速测量技术[M]. 北京:北京大学出版社,1987.
- [2] ZHAO T S, CHENG P. Heat transfer in oscillatory flows. Annual review of heat transfer, Volume IX[M]. New York: Begell House Inc., 1998.
- [3] 吴沛宜,马元. 变质量系统热力学及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,1982.
- [4] 刘志昌,王松岭等. 工程流体力学[M]. 天津:天津科学技术出版社,1995.
- [5] 陈厚磊. 高频微型脉冲管制冷机内部气体交变流动特性及制冷机样机的研究[D]. 北京:中国科学院理化技术研究所,2008.

### 作者简介:



论立勇(1979-),男,河北冀州人,博士生。研究方向:热力系统节能及低温制冷机。通信地址:北京市中国科学院理化技术研究所(100190)。联系电话:13001961066; Email: lunliyong@126.com。