# 基于稳态方法的对流换热系数传感器研制

全永凯 徐国强 罗 翔 丁水汀

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室，北京 100191)

**摘 要**：基于稳态方法研制出一种对流换热系数传感器.在研究中引入一个标定端，并分析其精度，与经典的经验公式进行了对比.通过标定实验验证了此传感器的可行性，得到修正系数值 $K$，修正后传感器测量值与标准值的相对误差范围为 0.4%～1.7%，不同传感器的 $K$ 值不同.

**关 键 词**：稳态；对流换热系数；传感器

**中图分类号**：V 231

**文献标识码**：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)12-1413-04

# Development of kind of heat transfer coefficient sensor based on steady method

Quan Yongkai Xu Guoqiang Luo Xiang Ding Shuiting

(National Key Laboratory on Aero-Engines, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract**: A kind of heat transfer coefficient sensor based on steady state method was developed. A calibration terminal was pulled. The precision was analyzed and the results were compared with the values calculated from the classics empirical equation. The heat transfer coefficient obtained from the calibration terminal and the empirical equation is in a good agreement. The results shows that the calibration method is reasonable. The feasibility of the sensor is proved by the calibration experiment and the modified coefficient $K$ is obtained. The relative error range is from 0.4% to 1.7% between the measured values and standard values. The values of $K$ of separate sensors are different.

**Key words**: steady state; heat transfer coefficient; sensor

对流换热作为传热学的一个重要组成部分，在动力、核能、航空航天和机械制造等领域都有广泛的应用，是一门十分活跃的工程基础学科.对流换热系数是衡量对流换热强弱的重要参数，也是计算对流换热问题的基本数据.大多数情况下，对流换热系数数据是通过实验间接获得的，但是在某些特定的场合(如发动机涡轮盘腔中的对流换热问题)，间接获取对流换热系数是非常困难的.

文献[1]介绍了一种测量局部换热系数的传感器.虽然获得了较好的精度，但在具体应用中还需要在结构和稳定性方面做进一步的改进.文献[2]通过引进一个简单的数值模型，对热流计的瞬态传热进行研究，阐述了其中的瞬态换热机理.文献[3]使用热流计测量了搅拌容器内的瞬态对流换热系数，并与用间接方法得到的对流换热系数值进行了比较.文献[4]用热流计结合温度测量装置测量了冷冻机床中的对流换热系数，并研究了其中的换热机理.文献[5]利用一种瞬态测试方法研制了瞬态对流换热系数传感器.

从上面可以看出，现在国内外对于对流换热系数传感器的研制还主要集中在瞬态方面.而本文首次设计了一种基于稳态方法的对流换热系数传感器，并通过实验进行了验证.

## 1 稳态方法测量对流换热系数的原理

本对流换热系数传感器是基于传热学中的牛顿冷却公式研制而成的.牛顿冷却公式为

$$\phi = hA(T_w - T_f) \tag{1}$$

**收稿日期**：2008-11-07

**作者简介**：全永凯(1983－)，男，黑龙江哈尔滨人，博士生，quanyongkai@126.com.

式中，$\phi$ 为表面的热流量，W；$h$ 为对流换热系数，W/(m² · ℃)；$A$ 为换热面积，m²；$T_w$ 为壁面温度，℃；$T_f$ 为流体的参考温度，℃。

当测得 $\phi$，$T_w$，$T_f$ 时，可由公式 $h=\phi/A(T_w-T_f)$ 得出对流换热系数.

传感器的核心元件是加热片，加热的功率可以由公式 $\phi_{加热}=U\cdot I$ 得出，在绝热条件良好的情况下，可以认为对流换热导出的热量 $\phi=\phi_{加热}$，于是对流换热系数：

$$h=\phi/A(T_w-T_f)=U\cdot I/A(T_w-T_f) \quad (2)$$

式中，加热的电压 $U$、电流 $I$ 可以测出；$(T_w-T_f)$ 由温差热电偶测得；$T_f$ 为冷气的进口温度.

## 2 传感器结构

传感器结构如图1所示.

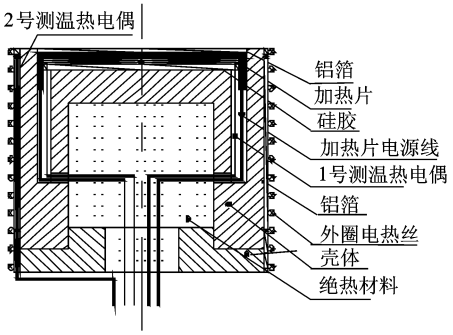



图1 传感器结构示意图

传感器整体外形是一个直径 $\Phi=10$ mm、高10 mm的圆柱体，主要由壳体、加热膜、铝箔、电热丝、1号测温热电偶、2号测温热电偶以及绝热材料组成. 壳体是由绝热性能较好的聚四氟乙烯制成的，作为传感器核心部件的加热膜则采用的是由金属铂丝绕在聚酰亚胺膜片上而成的电热膜，其温度均匀性比较好，材质也较柔韧. 加热膜的温度由埋在下面的1号热电偶测出. 为了降低加热膜的热损失，采取了以下3种措施：①加热膜上方贴了一层铝箔，以此来降低辐射热损失；②在壳体的内部放入了导热系数较低的膨胀珍珠岩，来抑制加热膜向背面的导热；③受传感器尺寸的限制，侧面的绝热较难，而加热膜向侧面的导热又是整体热损失的主要来源，因此引入了一个辅助加热系统，即在壳体的外面缠绕了一层电热丝，为了保证加热的均匀性，在壳体与加热丝之间粘贴了一层铝箔，并埋放了2号测温热电偶，主要目的是为了监控壳体的温度. 实验时，通过调节电热丝的功率，使得2号测温热电偶与1号测温热电偶的温差小于1℃，来尽可能的减少向侧面的导热.

## 3 传感器的标定端

### 3.1 标定方法概述

衡量传感器的一个主要技术指标是精度，因此对研制出的传感器进行标定是十分必要的. 本文并没有直接采用传统的管内流动的经典经验公式，这主要是因为管内流动的经验公式本身就是通过大量的实验归纳总结出来的，同一个实验工况应用不同的经验公式或同一个经验公式应用于不同的实验工况都会存在一定的误差，而且误差也难于估计. 因此本实验创建了一个标定端，即：在实验管道的某一处开一个长方形窗口，用聚苯乙烯挤塑板做一个与窗口相配合的台阶形盖板，并在盖板上打磨出一个槽，用于放置炭浆加热膜，装配后整个标定端表面与管道表面相平，如图2所示. 正常工作时，给加热膜通以一定电压，待其稳定后用热电偶测得碳浆膜表面温度；同时根据测得的电压电流值计算出加热功率，再由公式(2)即可得到对流换热系数 $h$ 值，将该值作为标准值来标定传感器. 本文采用此种标定方法的原因是：传感器受自身尺寸的限制，难以做到良好的绝热，而对于测取标准值的碳浆加热膜部分，则无需考虑太多的尺寸问题，绝热效果更好，由此得到的对流系数也更加接近于真实值，精度更高.

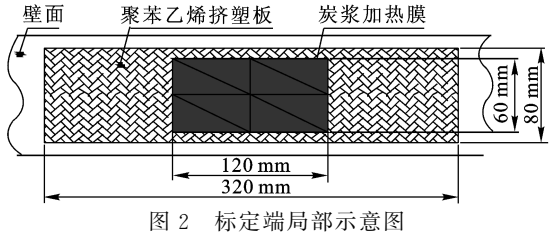



图2 标定端局部示意图

### 3.2 标定端误差分析

标定端局部示意图如图2所示. 炭浆加热膜的尺寸为 120 mm×60 mm×0.2 mm，聚苯乙烯挤塑板的尺寸为 320 mm×80 mm×100 mm，导热系数 $\lambda=0.028$ W/(m · ℃). 假设充分发展后管道的对流换热系数 $h=50$ W/(m² · ℃)，炭浆加热膜与冷气的温差 $t_w-t_f=10$℃，与管壁温差 $t_w-t_{壁}=9$℃(管壁露在空气中，温度比冷气高约1℃，与环境温度相同)，则

$$\frac{Q_{loss}}{Q_{总}}=\left(2\lambda A_1\frac{t_w-t_{壁}}{\delta_1}+2\lambda A_2\frac{t_w-t_{壁}}{\delta_2}+\lambda A_3\frac{t_w-t_{空}}{\delta_3}\right)\Big/\left(hA(t_w-t_f)+2\lambda A_1\frac{t_w-t_{壁}}{\delta_1}+2\lambda A_2\frac{t_w-t_{壁}}{\delta_2}+\lambda A_3\frac{t_w-t_{空}}{\delta_3}\right)=0.0849\% \quad (3)$$

对于炭浆加热膜:$Q_{总}=UI$,电压、电流都用 ESCORT3146A 型数字万用表测量,有:$dU/U=0.012\%$,$dI/I=0.2\%$.则

$$\frac{dQ_{总}}{Q_{总}}=\sqrt{\left(\frac{dU}{U}\right)^2+\left(\frac{dI}{I}\right)^2}=0.20\% \quad (4)$$

取 $dQ_{loss}/Q_{loss}=20\%$,则

$$\frac{d(Q_{总}-Q_{loss})}{Q_{总}-Q_{loss}}=$$

$$\sqrt{\left(\frac{dQ_{总}}{Q_{总}-Q_{loss}}\right)^2+\left(\frac{dQ_{loss}}{Q_{总}-Q_{loss}}\right)^2}=0.2\% \quad (5)$$

实验中使用的直径为 0.3 mm 的铜-康铜温差热电偶,有:$d(t_w-t_f)=0.3℃$.

取 $dA/A=1\%$,那么

$$\frac{dh}{h}=$$

$$\sqrt{\left(\frac{d(Q_{总}-Q_{loss})}{Q_{总}-Q_{loss}}\right)^2+\left(-\frac{dA}{A}\right)^2+\left(\frac{d(t_w-t_f)}{t_w-t_f}\right)^2}=$$

$$3.17\% \quad (6)$$

所以,标定端的对流换热系数的相对误差为 3.17%,将此值做为换热系数的标准值是合理的.

## 4　实验结果

### 4.1　标定端结果

标定系统如图 3 所示.

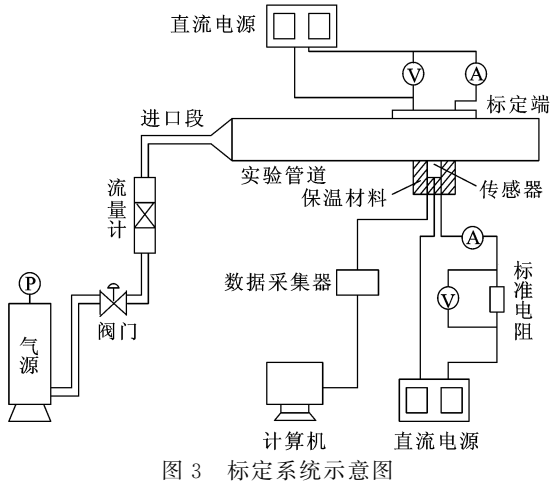



图 3　标定系统示意图

首先用标定端测得的对流换热系数值与管内流动的经典经验公式得到的值进行了对比.

采用的是圆管实验:管道内径 $R_{内}$ 为 48.3 mm,管道总长度 4 m,标定端中心距气流进口距离 3.5 m.管长与特征长度之比 $L/d=3.5/0.0483=73>60$,可以认为标定端处流动已充分发展为湍流.

实验在冷气进口雷诺数分别为 $Re=43\,400$ 和 $Re=56\,600$ 两种条件下进行.采用了两种常见的经验公式:Dittus-Boelter 公式以及 Gnielinski 公式进行验证.

Dittus-Boelter 公式:

$$Nu=0.023\times Re^{0.8}Pr^n \quad (7)$$

Gnielinski 公式:

$$Nu=\frac{(f/8)\cdot(Re-1\,000)\cdot Pr}{1+12.7\sqrt{f/8}(Pr^{2/3}-1)}\cdot[1+(d/L)^{2/3}]C_t \quad (8)$$

式中,$C_t=(T_f/T_w)^{0.45}$,$C_t$为变物性修正系数;$T_f/T_w=0.5\sim1.5$;$T_f$是来流温度;$T_w$是壁温;摩擦因数 $f=(1.82\lg Re-1.64)^{-2}$,$2\,300<Re<10^6$.

基于文章篇幅的限制,选取比较具有代表性的一组实验结果,如图 4、图 5 所示.

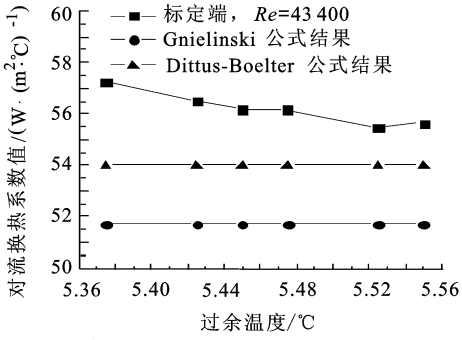



图 4　冷气进口雷诺数 $Re=43\,400$ 时对流换热系数

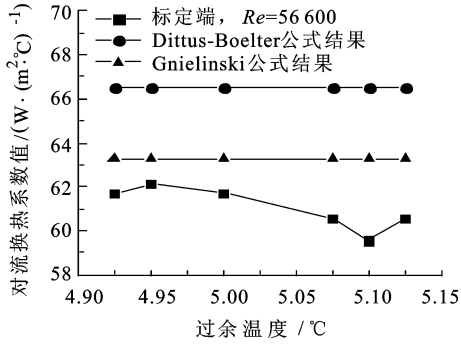



图 5　冷气进口雷诺数 $Re=56\,600$ 时对流换热系数

可知:冷气进口雷诺数为 $Re=43\,400$ 时,标定值与采用 Gnielinski 公式理论值的相对误差为 $\eta=|(\bar{h}_{标1}-\bar{h}_{理1})|/h_{理1}=8.5\%$;采用 Dittus-Boelter 公式理论值的相对误差为 $\eta=|(\bar{h}_{标1}-\bar{h}_{理1})|/h_{理1}=3.9\%$.冷气进口雷诺数为 $Re=56\,600$ 时,标定值与采用 Gnielinski 公式理论值的相对误差为 $\eta=|(\bar{h}_{标1}-\bar{h}_{理1})|/h_{理1}=3.8\%$,与采用 Dittus-Boelter 公式理论值的相对误差为 $\eta=|(\bar{h}_{标1}-\bar{h}_{理1})|/h_{理1}=8.4\%$.

经多组实验结果,得出:1)冷气进口雷诺数为 $Re=43\,400$ 时:采用 Gnielinski 公式时标定端与理论值的误差范围是 $\eta=4.6\%\sim8.5\%$;采用 Dittus-Boelter 公式时标定端与理论值误差范围

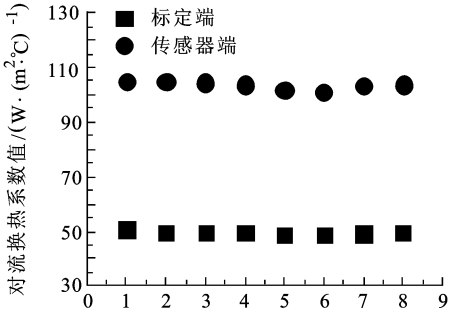
是 $\eta=2.8\%\sim6.0\%$. 2)冷气进口雷诺数为 $Re=56\,600$ 时,采用 Gnielinski 公式时标定端与理论值的误差范围是 $\eta=2.5\%\sim5.9\%$;采用 Dittus-Boelter 公式时标定端与理论值误差范围是 $\eta=7.5\%\sim8.9\%$.

实验结果表明:①通过与两个经典经验公式的对比,验证了此种标定方法的可行性;②对相同实验条件下的某一个具体工况,应用不同的经验公式得到的对流换热系数值会存在较大的差别,因此建立标定端是十分必要的,便于对传感器进行误差分析;③高进气雷诺数时采用 Gnielinski 公式计算的相对偏差较小;低进气雷诺数时采用 Dittus-Boelter 公式计算的相对偏差较小.

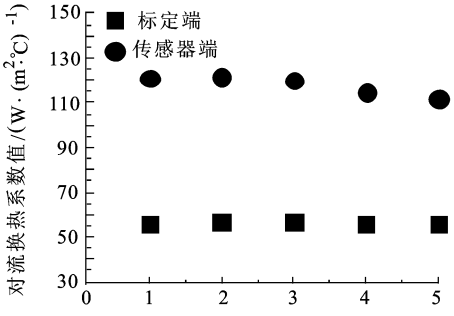
### 4.2 传感器的标定

传感器的标定也是在圆型管道内进行的. 将传感器安装在管道的 3.5 m 处,在相同实验条件下,与标定端的结果进行比较,实验系统见图 3.

经过多组反复实验,得到了较好的规律性,在此挑选几组比较典型的实验结果,如图 6 所示.




a 冷气进口雷诺数 $Re=43\,000$




b 冷气进口雷诺数 $Re=55\,800$

图 6 传感器端与标定端对比结果

定义比例系数 $K=\bar{h}_{传感器}/\bar{h}_{标定端}$,即传感器端与标定端的对流换热系数的比值. 以上两组实验中的 $K$ 值分别为 $K_1=\bar{h}_{传感器}/\bar{h}_{标定端}=2.0898$, $K_2=\bar{h}_{传感器}/\bar{h}_{标定端}=2.0977$.

通过多组实验结果,最终确定的传感器端与标定端的的比例系数为 $K=2.1$. 对修正后的结果进行分析,得出传感器端的测量值与标定端的测量值的相对误差范围为 0.4%~1.7%. 该结果表明本传感器可以满足多数情况下的使用要求. 经分析,$K$ 值的存在可能是由热损失引起的,传感器加热膜与辅助加热系统之间存在有 1℃的温差,必然会有一部分热量向侧面散失掉,而加热膜的电阻较小(约 3.5 Ω 左右),使得加热功率很小(约 1 W),导致较小的热损失也会引起较大的对流换热系数测量误差,这也为今后本传感器的改进提供了一个方向,即如何做到更好的绝热. 因此不同传感器的 $K$ 值不同,每一个传感器在使用前均需进行标定. 因为传感器中采用了辅助加热系统,所以实验管道的壁面温度以及环境温度对传感器的测量精度影响较小.

## 5 结 论

本实验通过稳态方法研制出一种对流换热系数传感器,并对其进行了标定,得到如下结论:①引入一个自制的传感器标定端,对其精度进行了分析,并将其测量值与传统的经验公式得到的对流换热系数值进行了对比. 结果验证了传感器的可行性. ②通过传感器端与标定端的标定实验,得到了修正系数值 $K=2.1$. 修正后,传感器端的测量值与标定端的测量值的误差范围为 0.4%~1.7%. ③传感器在使用前均需要进行标定,且不同传感器的修正系数 $K$ 值不同.

### 参考文献(References)

[1] Harris M B, Willix J, Lovatt S J. Development of a method for measuring local heat transfer coefficients on carcass shaped objects [C]//In Proceedings of the 21st International Congress of Refrigeration. Washington, DC: International Institute of Refrigeration, 2003

[2] Han Ilyoung, Kim Dongkwon, Kim Sungjin. Study on the transient characteristics of the sensor tube of A thermal mass flow meter [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48: 2583-2592

[3] Delaplace G, Demeyre J F. Determination of representative and instantaneous process side heat transfer coefficients in agitated vessel using heat flux sensors [J]. Chemical Engineering and Processing, 2005, 44: 993-998

[4] Amarante A, Lanoiselle J L. Heat transfer coefficients measurement in industrial reezing equipment by using heat flux sensors [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 66: 377-386

[5] 徐国强,陶智,丁水汀. 一种对流换热系数的测试方法及其对流换热系数传感器:中国, 200410074334. x[P]
Xu Guoqiang, Tao Zhi, Ding Shuiting. A test method of heat transfer coefficient and a kind of heat transfer coefficient sensor: China, 200410074334. x[P]

(编 辑:张 嵘)