

# 自然对流与强制对流换热特性测量 实验指导书



机械与动力工程学院

基础实验与创新实践教学中心

2025年

# 自然对流与强制对流换热特性测量实验

具有初始温度  $T$  的物体，被突然置于有确定温度的流场中，该物体与流场构成一个非稳态的换热体系。在这个非稳态换热体系中，包含着 2 个传热环节：一个是物体内部的导热；另一个是流体与物体边界的对流换热。其中，影响对流换热的关键参数就是对流换热系数。

目前，在本科传热学实验中，通常采用稳态法测量对流换热系数。然而，稳态法对实验条件要求苛刻，需要长时间加热达到稳态，实验周期较长，对于实验教学不很友好。在该实验中，我们采用的是非稳态法，基于集中参数法模型，通过测量实验对象在一定时间内的温降来求得对流换热系数。

## 一、实验目的及要求

本实验的主要目的是学习横置圆柱与周围空气之间的自然对流、强制对流换热特性，理解对流换热系数的计算和非稳态导热过程的特点。重点考察如下问题：

- (1) 计算平均对流换热系数；
- (2) 了解非稳态能量平衡，考察集中参数法是否适用于实验条件下的非稳态导热；
- (3) 测试风速对平均对流换热系数的影响；
- (4) 计算强制对流换热的无量纲参数表征。

## 二、基本原理

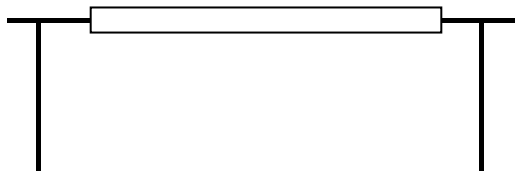


图 1 对流实验示意图

采用非稳态法进行对流换热系数的测量，在毕渥数  $B_i < 0.1$  时可以由集中参数法得到

$$hA(t - t_\infty) = -\rho CV \frac{dt}{d\tau} \quad (1)$$

式中：

$h$ ：为换热系数，如果考虑辐射损失，需要计算辐射等效换热系数  $\bar{h}_{\text{rad}}$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]。

$A$ ：圆柱表面积

$t_{\infty}$ : 为环境温度

$\rho$ : 圆柱密度

$C$ : 圆柱比热

$V$ : 为圆柱体积

可以得到圆柱温度随时间的变化规律:

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \left( \frac{t - t_{\infty}}{t_0 - t_{\infty}} \right) = e^{-\frac{hA}{\rho CV} \tau} \quad (2)$$

通过记录壁面温度的变化, 便可根据上式计算得到表面的换热系数。


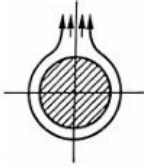
加热圆柱在外部静止空气下进行自然对流冷却, 大空间自然对流实验关联式参考以下公式形式。:

$$Nu_m = C(Gr Pr)_m^n \quad (3)$$

式中,  $Nu_m$  为由平均表面传热系数组成的  $Nu$ , 下角标  $m$  表示定性温度采用边界层的算数平均温度  $t_m = (t_{\infty} + t_w)/2$ 。  $Gr$  数中的  $\Delta t$  为  $t_w$  与  $t_{\infty}$  之差, 体胀系数  $\alpha_v = 1/T$ 。

式 (3) 中的常数  $C$  与系数  $n$  由实验确定, 它们与换热面的形状和位置、热边界条件以及流态都有关系。表 1 为由大量实验数据确定的  $C$  和  $n$  的值, 需要注意的是, 需要先计算  $Gr$  的大小, 才能选定合适的  $C$  和  $n$  的值。

表 1 式 (3) 中的常数值

加热表面形状与位置	流动情况示意	流 态	系数 $C$ 及指数 $n$		$Gr$ 数适用范围
			$C$	$n$	
竖平板及竖圆柱		层流过渡湍流	0.59	1/4	$1.43 \times 10^4 \sim 3 \times 10^9$ $3 \times 10^9 \sim 2 \times 10^{10}$ $> 2 \times 10^{10}$
			0.029 2	0.39	
			0.11	1/3	
横圆柱		层流过渡湍流	0.48	1/4	$1.43 \times 10^4 \sim 5.76 \times 10^8$ $5.76 \times 10^8 \sim 4.65 \times 10^9$ $> 4.65 \times 10^9$
			0.016 5	0.42	
			0.11	1/3	

在强制对流时，流体横掠圆管的平均表面换热系数可以根据下式进行计算：

$$\overline{Nu}_D \approx \frac{\overline{h}D}{k} = C Re_D^m Pr^{1/3} \quad (4)$$

式中：C 和 n 的值如表 2 所示；定性温度为  $(t_w + t_\infty)/2$ ；D 为特征长度，对于横置圆管，特征长度为管的外径。

表 2 式 (4) 中的常数值

$Re$	$C$	$n$
0.4~4	0.989	0.330
4~40	0.911	0.385
40~4 000	0.683	0.466
4 000~40 000	0.193	0.618
40 000~400 000	0.026 6	0.805

### 三、实验平台介绍

该实验平台为模块化设计，实验装置主要包括风源系统、加热系统、数据采集系统三大模块，实验对象为铝棒或不锈钢棒（表面均被抛光）。风源系统为一个具有一定整流功能的风洞，可以提供速度小于 10m/s 的气流。加热系统主要是恒温干燥箱，可以均匀加热实验对象。数据采集系统包括温度传感器（学生自制并经过校验的热电偶）、NI 数据采集仪、LabVIEW 软件。建议 2-3 人为一个小组，学生需要根据实验要求和内容自行设计并搭建实验系统。

每个圆柱在恒温干燥箱里进行加热，然后放置在支架上，与周围空气进行对流换热。支架和圆柱的接触点采取了绝热措施，因此可忽略导热。强制对流实验时，圆柱与空气采用叉流方式，可通过调节风源系统改变气流速度重复实验（气流速度以实测为准）。在每个圆柱上安装热电偶，记录热电偶指示温度随时间的变化关系，平均对流换热系数即可确定。

圆柱在外部空气的自然对流或强制对流作用下进行冷却，温度由 70°C 左右降到 50°C 左右，保证 20°C 的温降范围即可。外部空气的温度  $t_\infty$  为环境实测温度。

### 四、注意事项\*

- (1) 恒温干燥箱的温度需控制在 100°C 以下，以免烫伤；
- (2) 取放圆柱切记佩戴隔热手套；
- (3) 试件放好后，应先连接和打开数据采集系统，然后再开启风洞。

## 五、实验步骤

每个小组只测量一种圆柱（同材料同尺寸）的数据。降温过程 20K 左右即可。圆柱的物性参数可依据中间温度进行选取。在表面温度  $t_w$  变化只有  $\pm 10\text{K}$  的条件下，可认为平均换热系数  $\bar{h}$  的值为一定值。具体的实验过程参考如下。

- (1) 将 3 根热电偶的冷端连接在 NI 数据采集仪上，打开电脑中的 LabVIEW 数据采集软件，调整软件设置，并进行试运行，确保数据采集系统正常，同时读取热电偶采集到的环境温度；
- (2) 用隔热手套从恒温加热炉中取出加热后的圆柱，并搁置在支架上（支架与圆柱接触的部分做了绝热处理）；
- (3) 将热电偶的热端通过耐高温绝缘胶带粘贴在圆柱表面；
- (4) 首先进行自然对流换热，通过 LabVIEW 数据采集软件观察圆柱的温度降到  $50^\circ\text{C}$  以下，保存实验数据；
- (5) 对于强制对流换热，利用叶轮式风速仪，将风洞的速度分别设置约为 6 和 4 m/s（以实测为准）；
- (6) 取出重新加热后的圆柱，搁置在支架上（支架靠近出风口）并在表面粘贴好热电偶，观察圆柱的温度降到  $50^\circ\text{C}$  以下，保存实验数据；
- (7) 待被测圆柱冷却后，利用工具（直尺、游标卡尺）测量其长度和直径。
- (8) 切断相关设备电源，整理实验台，实验结束。

## 六、实验数据的计算与整理

记录  $\frac{\theta}{\theta_0} = \left(\frac{t-t_\infty}{t_0-t_\infty}\right)$  随时间变化曲线，及  $\ln \frac{\theta}{\theta_0}$  随时间变化的曲线。计算得到的数据整理成无量纲量，并和经验公式进行对比。

## 七、实验报告要求

实验报告需包含以下内容：

- (1) 详细描述根据温度数据得到平均换热系数  $\bar{h}$  的计算过程。
- (2) 画图表示圆柱温度随时间的变化关系。
- (3) 讨论实验过程中观察到的几个重要现象。比如，对比强制对流气流速度对圆柱温度变化速率  $dt/d\tau$  的影响。
- (4) 根据流体横掠单管的实验关联式（见公式 3、4）分别计算自然对流和强制对流换热中的  $\overline{\text{Nu}}_D$ ，进而得到  $\bar{h}_{\text{conv}}$  值，并与实验值进行比较和分析。
- (5) 分析实验中的误差来源，以及它们对实验结果的影响。
- (6) 分析讨论实验过程中的热平衡。

- (7) 计算分析在实验数据处理中忽略热辐射的原因。
- (8) 根据得到的平均对流换热系数，反向验证集中参数法模型是否适用。

**附加题：**

运用 Simdroid 等软件对本实验进行模拟计算分析，封装成 APP，在 [www.simapps.com](http://www.simapps.com) 中进入用户中心“APP 管理”，上传 APP。

软件下载：<https://www.simapps.com/page/flow.html>

软件激活：<https://www.simapps.com/v/29572.html>

APP 上传：<https://www.simapps.com/v/29863.html>

学习帮助：软件中“帮助”或 <https://www.simapps.com/l/268.html>