

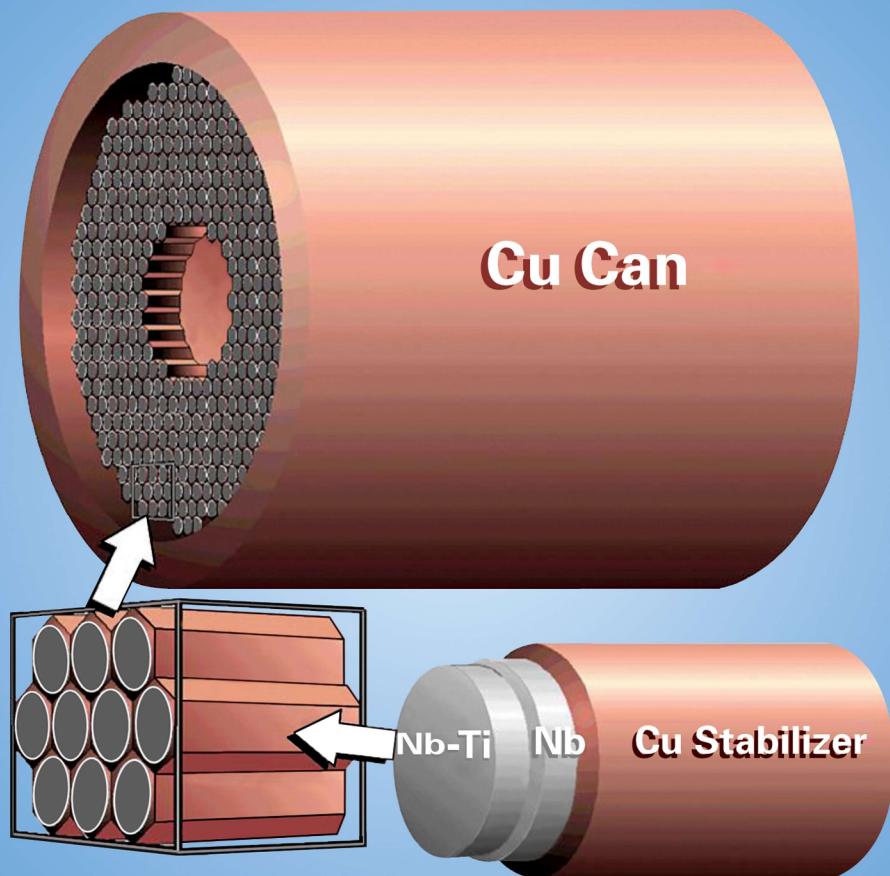


· 教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会委托  
· 吉林化工学院主办

ISSN 1007-2934

# 大学物理实验

PHYSICAL EXPERIMENT OF COLLEGE



ISSN 1007-2934



9 771007 293108

双月刊 3 第33卷 第3期(总第142期)  
2020年 Vol.33 No.3(serial No.142)

# 目录

## 大学物理实验

第 33 卷

2020 年第 3 期

(总第一四二期)

双月刊

ISSN1007-2934  
CN22-1228/O<sub>4</sub>

广告经营许可证: 220200100029

主办单位: 吉林化工学院

出版单位: 《大学物理实验》编辑部

地 址: 吉林市承德街 45 号

邮 编: 132022

电 话: 0432-63083137

网 址: <http://dawushiyian.jlict.edu.cn/>  
CN/1007-2934/home.shtml

电子信箱: dws@chinajournal.net.cn

印 刷: 吉林市华祥彩印包装有限公司

出版日期: 2020 年 6 月 26 日

声明: 本刊已许可中国学术期刊(光盘版)

电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付(已在论文发表版面费中扣除)。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我社上述声明。

## 编辑部

主 编: 王显德

本期责任编辑: 王长昊 王常春 王海燕

宋乐乐 陈殿伟 梁红静

中文编辑: 张国范

英文编辑: 杨 雪

## PHYSICAL EXPERIMENT OF COLLEGE

教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会委托吉林化工学院主办

### 实验研究

- 基于 FORTRAN 的组合圆偏振激光场下电子动量分布仿真 ..... 韩斯宇, 于伟威, 纪 磊, 等 (1)  
基于微分变换法的变截面梁振动研究及有限元数值模拟 ..... 李 伟, 管鱼龙, 谢 浩, 等 (5)  
X 射线衍射物相分析虚拟仿真实验的设计与教学实践 ..... 李 钰, 董锡杰, 王 聰, 等 (10)  
基于纹影法的水平圆管自然对流换热系数测量 ..... 彭 力, 林斯龄, 黄玉如, 等 (15)  
光学元件表面缺陷干涉检测的定量分析拓展 ..... 张 磊, 孙静静, 周 胜, 等 (22)  
莫尔条纹测量金属线膨胀系数 ..... 马欣宇, 赵晨旭, 王欣悦, 等 (27)  
杯中吸管实验研究 ..... 杨 雪, 徐恒通, 张 跃, 等 (30)  
蹦极跳与蹦极秋千的模拟探究 ..... 赵炳炎, 李清流, 陈宗华 (35)  
基于 NI ELVIS II 心电信号处理电路协同仿真 ..... 李新梅, 汪荣榕, 丁家峰 (40)  
声速测量拓展实验的教学研究 ..... 赵西梅, 王锦辉, 沈学浩, 等 (44)  
霍尔效应及应用实验设计与实现 ..... 罗志高 (48)  
利用洛埃镜制作高频全息光栅的教学拓展实验 ..... 刘 影, 李司未, 王 徐, 等 (53)  
空气阻力与速度平方成正比的抛体运动研究 ..... 易小爱, 凌晓菲, 张振美, 等 (57)  
RLC 串联暂态过程中时间常数的一种修正 ..... 张力月, 张钰新, 金泓君, 等 (61)  
手动自动相结合测量永磁材料磁性能的实验教学探索 ..... 吕庆荣, 冯双久, 杨玉杰, 等 (64)  
提高斯特林热机效率实验探索分析 ..... 周广刚, 张 晓, 张其星, 等 (68)

### 仪器制作与改进

- 一种角动量守恒演示仪的设计 ..... 姬洪伟, 包 敏, 吴 鹏, 等 (72)  
成套集装非集成型电磁学实验仪器设计 ..... 张海军, 王 震, 庞 华, 等 (75)  
基于机械传动结构的太阳跟踪器 ..... 林春丹, 李秋真, 张万松, 等 (79)  
基于电磁耦合的无线充电小车续航装置设计与测试 ..... 杨 爽 (82)  
液晶盒的制备、液晶电光效应实验仪制作及性能测试 ..... 郝 爽, 王 旗 (86)

### 计算机应用

- 基于 Unity3D 的旋光仪虚拟实验设计与实现 ..... 陈昭喜, 余展孝 (94)  
基于 LabVIEW 的振动叠加现象仿真设计 ..... 郝军华, 王云峰, 王玉芳 (99)

### 误差与数据处理

- 非线性拟合在物理实验设计和数据处理中的应用 ..... 付全红, 邢 凯, 樊元成, 等 (104)

### 教学改革

- 多平台并用促进大学物理实验线上教学 ..... 倪燕茹 (107)  
翻转课堂在大学物理实验教学中的尝试 ..... 朱 楠, 王 英 (111)  
新时代物理实验教学模式改革的探讨 ..... 吕 刚, 张 红, 高 峰, 等 (114)  
以物理学术竞赛为依托 培养高素质人才  
——以沈阳航空航天大学为例 ..... 王 琦, 徐世峰, 王利岩, 等 (118)  
国家级物理实验教学示范中心信息化教学平台建设与实践 ..... 袁吉仁, 胡 萍, 黄伟军, 等 (122)  
浅析“双一流”建设背景下大学物理实验教学改革的现实挑战与措施 ..... 王 栋 (127)  
基于大学生物理学术竞赛的公安院校创新人才培养模式探索与实践 ..... 郭晓春, 张振兴 (130)  
大类招生背景下农业院校大学物理实验教学改革研究 ..... 樊娟娟, 潘振东, 于秀玲 (134)  
战“疫”背景下大学物理实验课线上教学方案设计  
——以“DIY 单摆运动实验”为例 ..... 张晓鹏, 韩仁学 (137)  
基于“互联网+”大学物理实验教学模式研究 ..... 郑君刚, 杨大方, 刘 悅, 等 (141)  
基于翻转课堂的探究型演示实验微课探讨 ..... 吴学荣 (144)

期刊基本参数: CN22-1228/O<sub>4</sub>\* 1987\* b\* A4\* 146\* zh\* P\* ￥15.00\* 1200\* 35\* 2020-06

## CONTENTS

Electronic Momentum Distribution Simulation Based on FORTRAN by Combined Circular Polarization Laser Field .....	HAN Siyu, YU Weiwei, JI Lei, et al ( 1 )
Vibration Research and Finite Element Numerical Simulation of Variable Section Beam Based on Differential Transformation Method .....	LI Wei, GUAN Yulong, XIE Hao, et al ( 5 )
Design and Teaching Practice on Virtual Simulation Experiment of X-ray Diffraction Phase Analysis .....	LI Yu, DONG Xijie, WANG Cong, et al ( 10 )
A Measurement for Natural Convection Heat Transfer Coefficient about Horizontal Cylinders Based on Schlieren Method .....	PENG Li, LIN Siling, HUANG Yuru, et al ( 15 )
Quantitative Analysis and Expansion of Optical Element Surface Defect Interference Detection .....	ZHANG Lei, SUN Jingjing, ZHOU Sheng, et al ( 22 )
Measuring Thermal Expansion of Metal by Using Moire Fringe .....	MA Xinyu, ZHAO Chenxu, WANG Xinyue, et al ( 27 )
Experimental Study on Pipette in Cup .....	YANG Xue, XU Hengtong, ZHANG Yue, et al ( 30 )
Numerical Simulation of Bungee Jumping and Bungee Swing .....	ZHAO Bingyan, LI Qingliu, CHEN Zonghua ( 35 )
Co-simulation Based on NI ELVIS II ECG Signal Processing Circuit .....	LI Xinmei, WANG Rongrong, DING Jiafeng ( 40 )
The Teaching Research of Expanding Experiments of Sound Velocity Measurement .....	ZHAO Ximei, WANG Jinhui, SHEN Xuehao, et al ( 44 )
Design and Implementation of Hall Effect and Its Application Experiment .....	LUO Zhigao ( 48 )
Teaching Extension Experiment of Fabricating High Frequency Holographic Grating with Lloyd Mirror .....	LIU Ying, LI Siwei, WANG Xu, et al ( 53 )
Research on Projectile Motion with Air Resistance Proportional to the Square of Velocity .....	YI Xiaoxai, LING Xiaofei, ZHANG Zhenmei, et al ( 57 )
A Correction of Time Constant of RLC Series Circuit in Transient Process .....	ZHANG Liyue, ZHANG Yuxin, JIN Hongjun, et al ( 61 )
Experimental Teaching Exploration Manual and Automatic Measurement of Permanent Magnet Materials Magnetic Properties .....	LV Qingrong, FENG Shuangjiu, YANG Yujie, et al ( 64 )
Experiment to Improve the Efficiency of Stirling .....	ZHOU Guanggang, ZHANG Xiao, ZHANG Qixing, et al ( 68 )
Design of a Demonstrator for Conservation of Angular Momentum .....	JI Hongwei, BAO Min, WU Peng, et al ( 72 )
The Design of a Complete-Set-of-Non-Integrated Electromagnetic Experimental Instrument .....	ZHANG Haijun, WANG Zhen, PANG Hua, et al ( 75 )
Sun Tracker Based on Mechanical Transmission Structure .....	LIN Chundan, LI Qiuzhen, ZHANG Wansong, et al ( 79 )
Design and Test of Wireless Charging Vehicle Endurance Device Based on Electromagnetic Coupling .....	YANG Shuang ( 82 )
Liquid Crystal Cell Preparation Process, LCD Electro-Optic Effect Experiment Instrument and Performance Test .....	HAO Shuang, WANG Qi ( 86 )
Design and Implementation in Virtual Experiment of Polarimeter Based on Unity3D .....	CHEN Zhaoxi, YU Zhanxiao ( 94 )
Simulation Design of Vibration Superposition Phenomenon Based on LabVIEW .....	HAO Junhua, WANG Yunfeng, WANG Yufang ( 99 )
Application of Nonlinear Fitting to the Design and Data Processing of Physical Experiments .....	FU Quanhong, XING Kai, FAN Yuancheng, et al ( 104 )
Promoting Online Teaching of College Physics Experiment by Multi Platform .....	NI Yanru ( 107 )
The Attempt of Flipping Classroom in College Physics Experiment Teaching .....	ZHU Nan, WANG Ying ( 111 )
Discussion on the Reform of Physics Experiment Teaching Mode in the New Era .....	LV Gang, ZHANG Hong, GAO Feng, et al ( 114 )
Cultivation of High-Quality Talent Based on China Undergraduate Physicists' Tournament ——Shenyang Aerospace University As an Example .....	WANG Heng, XU Shifeng, WANG Liyan, et al ( 118 )
Construction and Practice of Informatization Teaching Platform of the National-Level Physics Experiment Teaching Demonstration Center .....	YUAN Jiren, HU Ping, HUANG Weijun, et al ( 122 )
A Brief Analysis of the Realistic Challenges and Countermeasures of the Reform of University Physics Experiment Teaching under the Background of "Double First-Class" Construction .....	WANG Dong ( 127 )
Exploration and Practice of Innovative Talent Training Model in the Public Security Colleges Based on Undergraduate Physics Tournament .....	GUO Xiaochun, ZHANG Zhenxing ( 130 )
Research on the Teaching Reform of College Physics Experiment in Agricultural Colleges under the Background of College Enrollment in General Categories .....	FAN Juanjuan, PAN Zhendong, YU Xiuling ( 134 )
The Design of Online Teaching Scheme of College Physics Experiments Course under the Background of Fighting the 'Epidemic' ——Take "DIY Single Pendulum Motion Experiment" As an Example .....	ZHANG Xiaopeng, HAN Renxue ( 137 )
The Study of College Physics Experiment Teaching Model Based on "Internet +" .....	ZHENG Jungang, YANG Dafang, LIU Yue, et al ( 141 )
Discussion on Inquiry-Based Demonstration Experiment Microlesson Based on Flipped Classroom .....	WU Xuerong ( 144 )

- 《中国学术期刊(光盘版)》全文收录期刊
- 《中国期刊网》全文收录期刊
- “万方数据(China Info)系统科技期刊群”上网期刊
- 《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊
- 《中国学术期刊综合评价数据库》源刊
- 《中国科技期刊综合评价指标数据库》源刊
- 《中国物理文摘》收录期刊
- 《中国终身教育学术研究数据库》全文收录期刊
- 《超星期刊域出版平台》全文收录期刊

## 大学物理实验

双月刊

第33卷 第3期  
(总第142期)

2020年6月26日出版

主管单位：吉林化工学院

主办单位：吉林化工学院

出版单位：《大学物理实验》编辑部

吉林市承德街45号(132022)

网 址：<http://dwsl.chinajournal.net.cn>

电子信箱：[dwsl@chinajournal.net.cn](mailto:dwsl@chinajournal.net.cn)

主 编：王显德

印 刷：吉林市华祥彩印包装有限公司

发 行：《大学物理实验》编辑部

文章编号: 1007-2934(2020) 03-0015-07

# 基于纹影法的水平圆管自然对流换热系数测量

彭 力 林斯龄 黄玉如 纪煜宇 肖晓玲 林家骏

(华南师范大学 物理与电信工程学院 广东 广州 510006)

**摘要:** 对流换热系数是工业设备温度场分布计算中必不可少的参数之一。本文提出基于纹影图像研究测量水平圆管自然对流换热系数的一种新方法。该方法利用“z”反射式纹影仪系统,实现大视场下的密度梯度和温度梯度的可视化,并由此通过图像分析和数值计算相结合的方法计算对流换热系数。结果显示,纹影法是测量水平圆管对流换热系数的一种简单、可行的方法。

**关键词:** 对流换热系数; 纹影; 水平圆管

中图分类号: TK 124 文献标志码: A DOI: 10.14139/j.cnki.cn22-1228.2020.03.004



对流换热是指流体流过固体壁面时所发生的热量交换,是工业系统散逸热量的主要形式。大空间水平加热圆管的自然对流问题在工业应用中有着广泛的研究,其中对流换热的计算采用的是牛顿冷却公式,其关键在于确定对流换热系数<sup>[1]</sup>。对流换热系数与换热过程中流体的物性条件、换热表面的几何因素等相关,如何测量精确的对流换热系数是相关工程设计的难点。

目前,水平圆管对流换热系数的测量方法主要有三种:一是实验法;二是直接求解N-S方程和能量方程的数值解法;三是利用近似方法求解边界层方程的分析解<sup>[2]</sup>。在传热学中计算对流换热系数,其实质是求壁面附近处温度梯度,因此在工业上对流换热系数主要靠实验获得。

光学测量由于具有非接触、快速、实时等优点,因此在对流换热系数的测量方面也得到了广泛的应用<sup>[3]</sup>。1995年罗耀明等<sup>[4]</sup>采用激光实时全息检测装置对水平圆管外的自然对流换热进行研究;2011年朱进容<sup>[2]</sup>采用激光横向剪切干涉测试装置对不同壁温水平圆管的自然对流现象进行实验研究。以上两者都采用光学的方法进行测量,但其缺点是光路较为复杂,使用的光学仪器昂贵,而且对实验环境要求高,使其难以推广应用。

本文结合了一种更为简易的反射式纹影仪装

置,利用纹影法实现了大视场下水平圆管壁面温度梯度、密度梯度的可视化,采用MATLAB分析计算不同壁温下水平圆管表面的对流换热系数。

## 1 测量原理

### 1.1 反射式纹影仪测量原理

如图1所示,我们采用的是“z”字形纹影仪来进行实验。

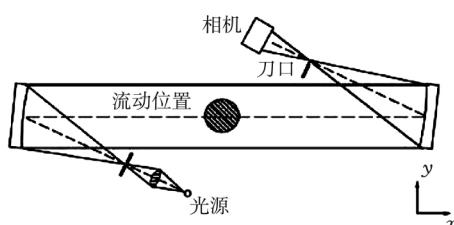


图1 反射式纹影仪原理

在“z”字形纹影仪中,点光源发出的光线经过透镜后在第一面球面反射镜形成平行光,由于流场密度的不均匀,平行光经过流场后发生偏转。偏转后的光线经过第二面球面反射镜,在刀口处聚焦。由于刀口的存在,偏向于刀口处的光线被阻挡,最终在相机上呈现有明暗变化的纹影图像,以对比度的形式反映被测流场的特征,包括密度、

折射率、温度等。

## 1.2 对流换热系数测量原理

光线在通过密度各异的流场区域中时,不同区域密度互异使得相应位置的折射率也互异。光线穿过时在不同区域产生不同程度的偏折,由于刀口的遮挡使得在成像面上接收的光强不均。因此通过测量成像面各点的光强变化和刀口遮挡量,即可了解流场内密度信息,从而导出该流场的温度信息。其中成像面各点光强变化体现为纹影图像的灰度值变化,光强越强,图像的灰度值也就越大<sup>[5]</sup>。

如上所述,对流换热系数测量原理可总结为如下步骤:

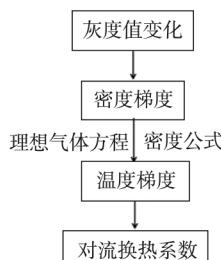


图 2 对流换热系数测量流程图

下面对各步骤进行详细的公式推导。

### 1.2.1 灰度值与密度梯度的关系

在这里假设沿光线传播方向,即 $\vec{z}$ 方向,折射率是均匀不变的,而由于管壁温度变化导致在圆管 $\vec{y}$ 方向上空气层密度变化,因此通过相机可以得到可视化纹影图像,再利用计算机进行解析处理得到纹影图像中圆管沿 $\vec{y}$ 方向的一系列灰度值。装置中的方向及所得纹影图像示意图如图3所示。

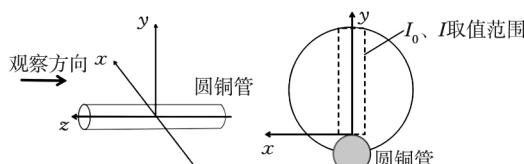
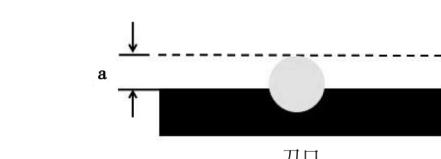


图 3 测试区域及纹影图拍摄方向示意图



(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

灰度变化反映的是测试区域流场密度梯度变化情况。其对应关系为<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\Delta I}{I_0} = \frac{Kf}{a} \int_{z_1}^{z_2} \sigma(z) \frac{\partial \rho}{\partial y} dz \quad (1)$$

其中  $\Delta I = I - I_0$  表示因为测试区域流场因密度梯度引起的像面光的强度变化,即为流场建立前后纹影图像在沿 $\vec{y}$ 方向的取值区域内每一行的平均灰度变化值; $I_0$  为流场建立前纹影图像在沿 $\vec{y}$ 方向的取值区域内每一行的平均灰度值,如图3; $K$  为格拉斯通-戴尔常数; $a$  为未被刀口切取的光源像高度,如图4; $f$  为成像系统中球面反射镜焦距,两面球面反射镜焦距相同; $z$  为光束穿过测试区域长度; $\vec{y}$  为垂直于圆管的方向; $\sigma(z)$  为扩展函数。由于实验采用普通纹影仪,则  $\sigma(z)$  取值为 1<sup>[6]</sup>。

对(1)式进行整理,可得密度梯度为

$$\frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{a \Delta I}{I_0 K f z} \quad (2)$$

### 1.2.2 密度梯度与温度梯度的关系

由于  $\frac{\Delta I}{I_0}$  为  $y$  的函数, 经过大实验, 本实验系

统纹影图像在 100 ~ 350 °C 间成像清晰, 分析数据得到在不同温度下水平圆管上方 1 cm 到 2.3 cm 之间区域与  $y$  存在一定规律, 如图 5 所示。

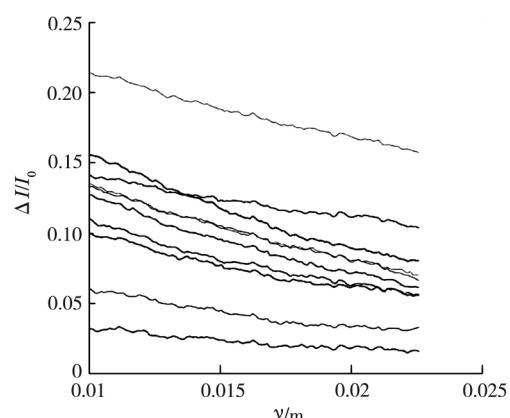


图 5  $\Delta I/I_0$  与水平圆管上方距离关系

观察该区域  $\frac{\Delta I}{I_0}$  与  $y$  的关系, 分别对不同温度下的曲线进行二次函数拟合, 得到函数式形式如下:

$$\frac{\Delta I}{I_0} = b_1 y^2 + b_2 y + b_3 \quad (3)$$

$$(b_1, b_2, b_3 \text{ 为常数}) \quad (3)$$

在不同温度下函数式形式相同, 系数  $b_i$  不同。

对(2)式进行积分得密度为

$$\rho = \frac{a}{Kfz} \cdot \int_{y_1}^{y_2} \frac{\Delta I}{I_0} dy + \rho_w y \in [0.010, 0.023] \quad (4)$$

其中  $\rho_w$  为管壁处空气密度, 由管壁温度查表可得。再结合理想气体方程及密度公式。

$$\begin{cases} PV = nRT \\ \rho = \frac{m}{V} \\ n = \frac{m}{M} \end{cases} \quad (5)$$

由(4)得试验区物体上表面温度表达式为

$$T = \frac{PM}{\rho R} \quad (6)$$

其中(5)式中 M 为空气摩尔质量 29, 压强 P 取标况下大气压强 101.325 kPa, R 为气体常量, 取 8.314 4 J/mol · K。联立(4)(6)式并令 T 对 y 求偏导, 则得沿 y 方向温度梯度为

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{-P Ma}{RKfz} \cdot \frac{\Delta I}{I_0} \cdot \left( \frac{a}{Kfz} \cdot \int_{y_1}^{y_2} \frac{\Delta I}{I_0} dy + \rho_w \right)^{-2} \quad (7)$$

由于高温下水平圆管表面温度梯度高, 仪器分辨率不高以及壁面阴影效应<sup>[2]</sup>, 导致纹影图像壁面灰度值难以准确测量, 本文拟用距离水平圆管上方 0.01 m 到 0.023 m 区域内的温度梯度公式推得圆管表面处的温度梯度值, 即将  $y = 0$  代入

(7) 式, 得到水平圆管管壁处的温度梯度  $\frac{\partial T}{\partial y}$ 。

### 1.2.3 温度梯度与对流换热系数的关系

本文采用水平圆管为例, 得到水平圆管表面的法向温度梯度, 进而算出水平圆管表面的局部热交换系数, 即努塞尓系数  $Nu$ , 温度梯度与  $Nu$  的关系如下

$$Nu = \frac{hD}{k_1} = \frac{-D}{T_w - T_0} \cdot \frac{\partial T'}{\partial y} \quad (8)$$

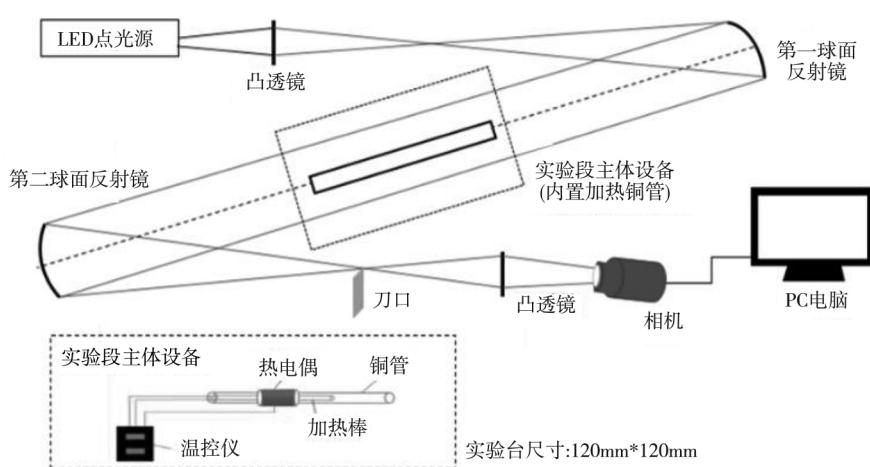
式中  $h$  是局部对流换热系数  $k_1$  是空气的导热系数  $D$  是圆管直径  $T_w$  为圆管表面温度  $T_0$  是环境空气温度。由于在不同铜管壁温下, 对于大空间而言周围空气温度变化极小。且随管壁温度越大, 管壁温度与周围空气温差也越大, 因此不同管壁温度下周围空气温度变化可以忽略, 即对于本实验而言可近似将环境空气温度视为常数。对流换热系数  $h$  如下

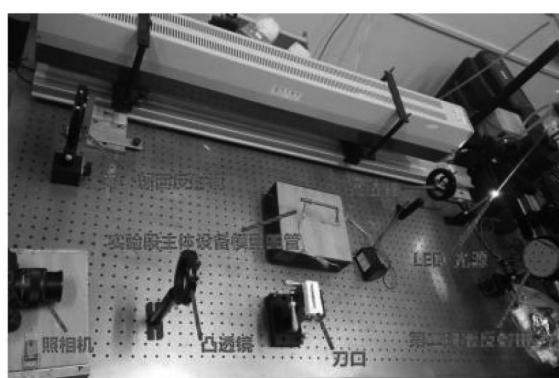
$$h = \frac{-k_1}{T_w - T_0} \cdot \frac{\partial T'}{\partial y} \quad (9)$$

利用温度传感器在圆管壁设置不同温度进行实验, 得到多个对流换热系数值, 将其绘制成曲线, 即为该水平圆管的表面散热特性。另外在同一温度下重复多次实验, 得到水平圆铜管的平均对流换热系数, 确保实验结果的准确性。

## 2 测量系统装置搭建

本实验测定一外径为 7 mm, 内径为 6 mm, 长为 100 mm 的纯铜制圆铜管在多个管壁温度下的对流换热系数。实验装置如图所示。





(b) 反射式纹影仪实验装置

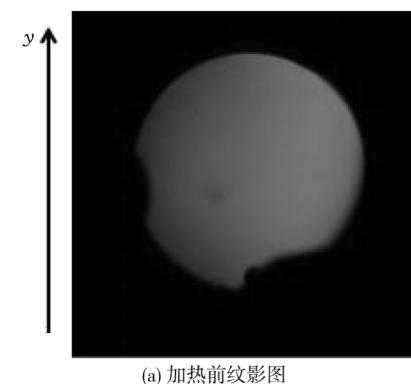
图 6 实验装置图

整套实验装置系统置于精密隔振平台上。LED 点光源所发出的光线经过凸透镜的汇聚, 将形成一点光源处于第一面球面反射镜焦点处。光线经过第一球面反射镜反射形成平行光, 通过放置有钢管的封闭实验箱进入第二球面反射镜, 其中温控仪可从 100 ℃ 至 350 ℃ 任意调节钢管温度。光线经过第二球面反射镜反射之后聚一焦点光斑在刀口处, 再通过另一透镜投射到相机中。密度大的区域由于偏折程度大被刀口挡住, 在屏幕上出现暗纹, 而密度小的区域由于偏折小未被挡住, 在屏幕上呈现亮纹, 密度的不均匀造成屏幕上亮暗不均的纹影图像。最后利用计算机连接相机, 实现实时拍摄记录纹影图像并进行数据处理。

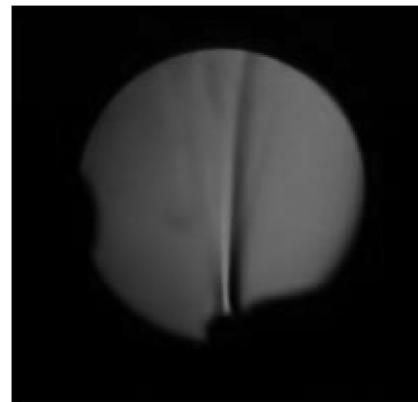
该实验测量过程如下: 拍摄置于常温空气下的水平圆钢管纹影图, 然后由小到大依次调节温控仪使加热棒升温至一个固定的温度, 在每个温度维持 10 s 以保证流场的稳定, 捕捉对应温度下的纹影图。考虑到电加热管可能存在加热不均匀的情况, 本实验采用包围式热电偶, 紧贴钢管壁, 具体结构如图 5 所示。最后根据获得的纹影图再进行图像研究及数值分析, 获得不同温度下的对流换热系数。

### 3 实验结果

下面以管壁温度 310 ℃ 为例, 计算该温度下水平圆钢管表面对流换热系数<sup>[7]</sup>。其中  $K$  为 0.002 25 m<sup>3</sup>/kg·f,  $f$  为 850 mm,  $z$  为 120 mm,  $a$  为 2 mm,  $D$  为 7 mm,  $T_0$  为环境温度 25 ℃。计算机采集到的加热前后纹影图像如图 7 所示。



(a) 加热前纹影图



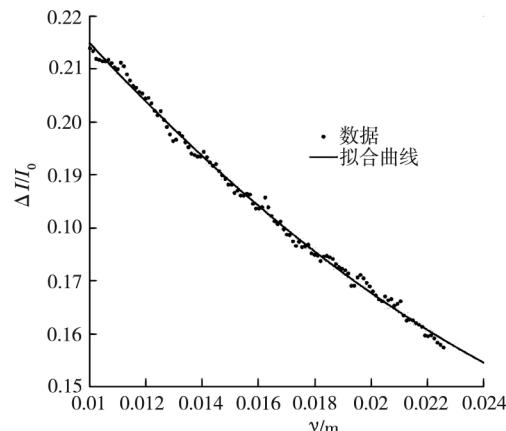
(b) 加热后纹影图

图 7 加热前后纹影图像示意图

根据图 3 取  $y$  为自变量, 通过 MATLAB 图像处理分析拟合在钢管上方沿  $y$  轴方向 0.01 m 到 0.023 m 的  $\frac{\Delta I}{I_0}(y)$  情况及拟合函数, 如图 8 所示。

(10) 式为 310 度  $\frac{\Delta I}{I_0}(y)$  拟合函数式。

$$\frac{\Delta I}{I_0}(y) = 117.3x^2 - 7.264x + 0.2865 \quad (10)$$

图 8  $\frac{\Delta I}{I_0}(y)$  曲线及拟合函数曲线

利用密度分布公式(4)探究圆管沿 $y$ 轴方向的空气密度分布情况如图9所示,再结合公式(6)可以从密度分布中得到沿 $y$ 轴方向的温度分布情况,如图10所示。由图9可知,圆管壁面处空气密度很小。远离管壁,空气密度值逐步增大,并且最终会与常温下的空气密度值接近。如图10所示,圆铜管随着离管壁的距离增加温度逐渐下降,最终将等于环境温度。

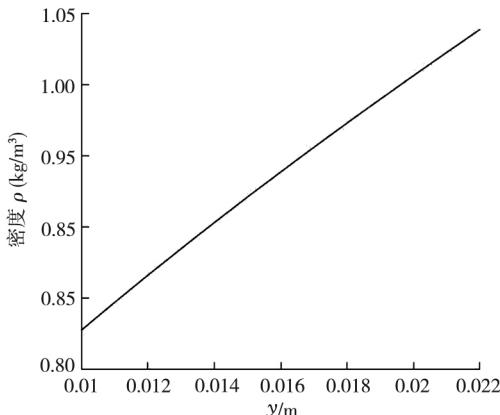


图9 300 °C时密度分布曲线

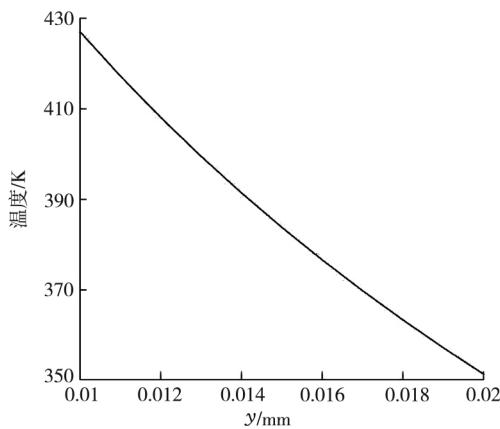


图10 300 °C时温度分布曲线

结合公式(4)和公式(6)可以由MATLAB计算得出温度梯度值。实验中多次采集同一个温度下的纹影图像,拟合出 $\frac{\Delta I}{I_0}(y)$ 函数,代入公式(7),得到在该温度下管壁处,即 $y=0$ 的温度梯度值 $\frac{\partial T}{\partial y}$ ;把温度梯度值代入公式(9)中即可得到该温度下对应的对流换热系数 $h$ ,最终算出310 °C下的对流换热系数为3.960 W/(m<sup>2</sup>·K)。

按照同样的方法,测量不同圆管管壁温度下的对流换热系数,结果如表1所示。

表1 不同温度下的对流换热系数

$T/\text{°C}$	117	138	169	187	197	221
$h/\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	0.916	4.525	2.700	2.231	1.545	2.558
$T/\text{°C}$	232	250	268	289	310	
$h/\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	3.492	2.488	2.501	2.923	2.960	

参考不同文献<sup>[1-8]</sup>,其采用不同方法得到对流换热系数的经验公式。以310度为例,计算过程如下。

空气边界层平均温度

$$t_m = \frac{t_w + t_0}{2} = \frac{310 + 25}{2} = 167.5 \text{ °C}$$

根据边界层平均温度查表,采用插值法计算可知空气的导热系数 $\lambda = 3.6935 \times 10^{-2} \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 、运动粘度 $\gamma = 30.99 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 、普朗特准则 $P_r = 0.6816$ 。

热膨胀系数为

$$\beta = \frac{1}{T_m} = \frac{1}{(167.5 + 273)} = 2.27 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

则格拉晓夫准则为

$$G_r = \frac{g\beta\Delta t D^3}{\gamma^2} \\ = \frac{9.8 \times 2.27 \times 10^{-3} \times (310 - 25) \times 0.007^3}{(30.99 \times 10^{-6})^2} \\ = 2.264 \times 10^3$$

用经验公式<sup>[1]</sup>计算对流换热系数 $h_1$ 。

$$h_1 = 0.53 \times (Pr \cdot Gr)^{\frac{1}{4}} \cdot \frac{\lambda}{D} \\ = 0.53 \times (0.6816 \times 2.264 \times 10^3)^{\frac{1}{4}} \times \frac{3.6935 \times 10^{-2}}{0.007} \\ = 17.523 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K})$$

由文献<sup>[1]</sup>  $Nu = 0.48 (G_r \cdot P_r)^{\frac{1}{4}}$ 得出

$$h_2 = 0.48 \times (Pr \cdot Gr)^{\frac{1}{4}} \cdot \frac{\lambda}{D} \\ = 0.48 \times (0.674 \times 2.264 \times 10^3)^{\frac{1}{4}} \times \frac{3.6935 \times 10^{-2}}{0.007} \\ = 15.87 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K})$$

文献<sup>[8]</sup>是另一种形式的关联式,关联式如下。

$$h_3 = (0.36 + 0.363 G_r^{\frac{1}{6}} + 0.0914 G_r^{\frac{1}{3}}) \cdot \frac{\lambda}{D} \\ = (0.36 + 0.363 \times (2.264 \times 10^3)^{\frac{1}{6}} + 0.0914 \times (2.264 \times 10^3)^{\frac{1}{3}}) \times \frac{0.036935}{0.007} = 15.17 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K})$$

对于本实验水平圆管,不同方法得到的标准对流换热系数与实验值相比较,如图11所示。

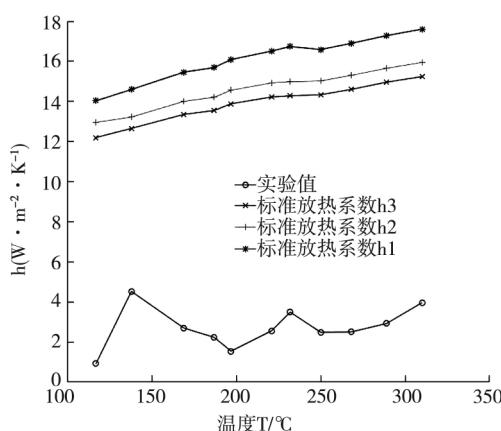


图 11 空气的自然对流换热系数随管壁温度变化曲线

参考李远涛<sup>[9]</sup>的实验结果，实验采用管径 40 mm 的水平圆管，温差比  $\frac{T_w}{T_\infty}$  范围为 1.05~1.18，实验值与标准对流换热系数的比较结果如图 12。

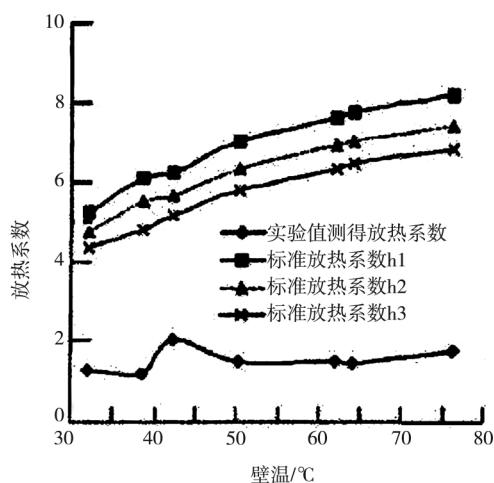


图 12 文献[9]标准对流换热系数与实验值相比较

比较图 11 与图 12，可以发现实验值与理论值之间存在一定的差别。理论计算值与实验值产生差别的误差分析有以下两点。一是纹影图像分析测量圆管壁面局部对流换热系数需要壁面处的温度梯度值，而紧邻圆管壁面会产生阴影效应以及热流对固体边界比较敏感，直接测量壁面处的温度分布是比较困难的，因此通过分析圆管上方 1 cm~2.3 cm 处的温度分布，合理外推至壁面温度分布，得到壁面温度梯度值，这种引入二次拟合的数学处理计算方法会导致测量出现误差；二是标准对流换热系数的计算式只讨论了管径大小对结果的影响，而圆管长度直径比值、圆管壁厚度不能保持绝对一致以及圆管上部羽状区流体的流动对温度场的干扰等都会造成解的不一致<sup>[2]</sup>。

理论计算结果与实验值在数值上有一定的差

别，因此采取比较理论计算值与实验值的标准化值。标准化值即将来自不同均值和标准差总体的个体数据转化为同一规格、尺度的数据，从而来进行趋势对比<sup>[10]</sup>。

根据实验数据拟合得到了如图 13 所示曲线。

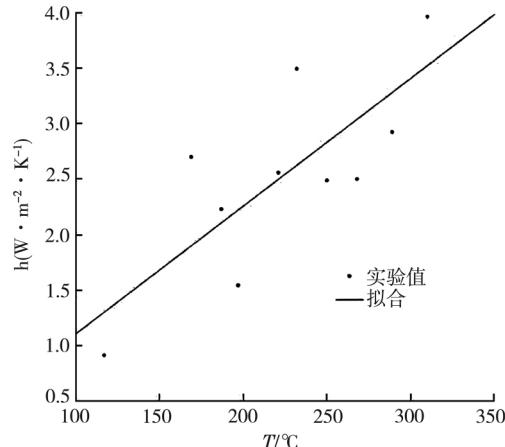


图 13 对流换热系数拟合曲线

表 2 拟合结果参数

SSE	11.78	R-square	0.8949
RMSE	0.9173	Adjusted R-square	0.8874

表 2 中 SSE：拟合曲线的误差平方和；R-square：拟合的确定系数；Adjusted R-square：调整自由度以后的残差的平方；RMSE：均方根误差。由上表可知，相关系数为：

$$R = \sqrt{0.5176} = 0.7194 \quad (11)$$

标准化值的计算公式如下：

$$h'_i = \frac{h_i - h_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}} \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (12)$$

其中  $h'_i$  为不同温度下对流换热系数标准值； $h_i$  为不同温度下对流换热系数。代入本实验条件数据后绘制图线对相对对流换热系数进行趋势对比，如图 14 所示。

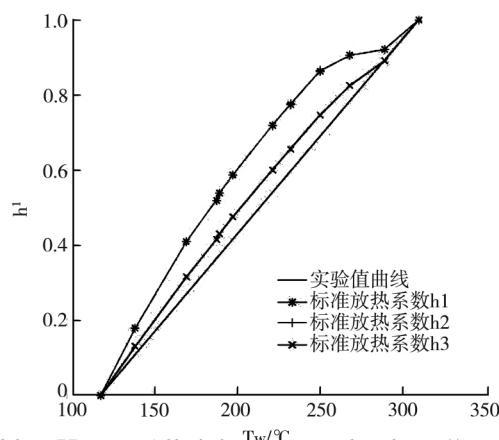


图 14 结果比较

对比发现 本实验得到的大空间水平圆管自然对流换热系数计算式同文献相比 ,其代入数据后绘制的图线趋势大致相同 ,因此可以认为本实验采用的测量方法是可行的。

## 4 结 论

本文提出了利用纹影图像测量大空间中水平圆铜管自然对流换热系数的一种简便、可靠、有效的新方法。利用灰度值与测试区域流场密度梯度变化关系 通过 MATLAB 计算可得具体情况下的努塞尔系数值 进而导出对流换热系数  $h$  的表达式。由于本文利用光学原理对不同温度场下的表面对流换热系数进行非接触式测量 装置搭建简易 因此在生产生活上 特别是工业检测中有较为广泛的应用。

本文提出的方法仍存在一些不足之处 ,如实验中忽略水平圆管端部效应、辐射的影响以及壁面温度值的数学处理计算不够准确等。另外由于本文的理论推导采用了理想气体状态方程 ,虽然该方程可用于大空间中相关问题的计算 ,但在计算结果上会有些许偏差。为了能更加准确测量出水平圆管的自然对流换热系数 ,未来的研究应着眼于在大空间中进行实验 ,并对数据进行对比分析 ,考虑干扰因素的影响。

## 参考文献:

- [1] 杨世铭 谭文铨.传热学 [J].高等教育出版社 ,1998.
- [2] 朱进容.水平圆管自然对流换热的剪切干涉测温数值和实验研究 [D].华中科技大学 ,2011.
- [3] 章熙民 李惟毅 李汛.高温水平圆管表面自然对流换热的研究 [J].工程热物理学报 ,1990( 1 ) : 56-61.
- [4] 罗耀明 陈晓祥 张秋香.水平圆管外自然对流传热的实时全息观测 [J].华东理工大学学报 ,1995( 1 ) : 17-22.
- [5] 王晓云.自然对流状态下横圆管管壁温度圆周方向分布 [J].哈尔滨工业大学学报 ,2004 ( 9 ) : 1282-1284.
- [6] 徐翔 谢爱民 吕治国.聚焦纹影显示技术在激波风洞的初步应用 [J].实验流体力学 ,2009 ,23 ( 3 ) : 75-79.
- [7] 丁玉栋 王强 王宏.工业设备及管道绝热结构外表面对流换热系数取值的探讨 [J].化工设计 ,2011 ,21 ( 4 ) : 37-45.
- [8] T F Fric ,A Roshko.Vortical structure in the wake of a transverse jet [J].Fluid Mech. ,1994 ,279: 1-47.
- [9] 李远涛.横管表面自然对流传热特性的实验分析和数值模拟 [J].长春工程学院学报( 自然科学版 ) ,2010 ,11( 1 ) : 64-67.
- [10] 于莉莉 胡涛平 ,喻孜.强制对流条件下侧面散热对导热系数测量的影响 [J].大学物理实验 ,2018 ,31 ( 3 ) : 11-14.

## A Measurement for Natural Convection Heat Transfer Coefficient about Horizontal Cylinders Based on Schlieren Method

PENG Li ,LIN Siling ,HUANG Yuru ,JI Yuyu ,XIAO Xiaoling ,LIN Jiajun

( College of Physics and Telecommunications Engineering ,South China Normal University ,Guangzhou 510006 ,China)

**Abstract:** The convection heat transfer coefficient is an important parameter of Industrial equipment temperature field distribution calculation. A new method for measuring the natural convection heat transfer coefficient about horizontal cylinders based on schlieren have been introduced. The method utilizes the “z” reflective schlieren system to visualize the density gradient and temperature gradient over a large field of view. The convection heat transfer coefficient have been calculated via a combination of image analysis and numerical calculation. The results show that the schlieren method is a simple and feasible method for measuring the convection heat transfer coefficient about horizontal cylinders.

**Key words:** convection heat transfer coefficient; schlieren method; horizontal cylinders