

赵庆国 陈永昌 夏国栋 编

热能与动力工程

测试技术

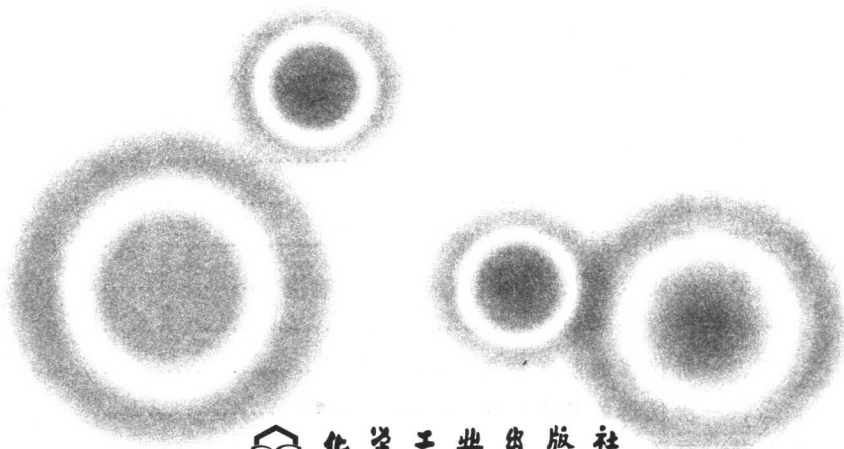


化学工业出版社
环境·能源出版中心

赵庆国 陈永昌 夏国栋 编

热能与动力工程

测试技术



化学工业出版社
环境·能源出版中心

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

热能与动力工程测试技术/赵庆国, 陈永昌, 夏国栋编. —北京: 化学工业出版社, 2006. 5

ISBN 7-5025-8654-7

I. 热… II. ①赵…②陈…③夏… III. ①热能-测试技术②动力工程-测试技术 IV. TK

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 044339 号

热能与动力工程测试技术
赵庆国 陈永昌 夏国栋 编
责任编辑: 戴燕红
文字编辑: 丁建华
责任校对: 蒋宇
封面设计: 胡艳玮

*

化学工业出版社 出版发行
环境·能源出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
化学工业出版社印刷厂印装
开本 850mm×1168mm 1/32 印张 8 $\frac{1}{4}$ 字数 215 千字
2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-8654-7
定 价: 18.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

测试技术是各种专业的工程技术人员在实际工程实践中必须面对的课题，由于现代科学知识的迅速发展，测试技术内容的更新速度也在加快，这就促使我们必须不断地学习、更新自己的知识。传统上，测试技术方面参考书的内容主要包括有传感器部分以及少量的显示仪表，其中对不同专业的工程技术人员来说，感兴趣的传感器内容也随之不同。

热能与动力工程类专业包括暖通与空调、制冷工程、家电、人工环境、动力工程与设备、内燃机、车辆工程等，在传感器方面，温度、热流量与热导率等热工参数的测量是其特有的内容。本书即是针对这些专业的工程技术人员、科研人员与高等院校的学生编写，在内容安排上尽量使其具有通用性与专业特色，其中第二章系统介绍了测试数据的误差分析与数据整理方面的内容，第三章介绍了测试系统方面的概念与测试信号的表征方法，第四至第六章为基本热工参数的测量，第七至第九章为特色热工参数的测定。为了展示一些实际的热工参数的测量系统与测量方法，第十章专门介绍了几种热工参数的实验系统，可作为教学实验使用也可供工程技术人员参考。

本书由北京工业大学环境与能源工程学院的教师根据长期的教学内容编写而成，其中第一至第六章由赵庆国副教授编写，第七至第九章由陈永昌副教授编写，第十章由夏国栋教授编写，全书由夏国栋教授统稿。

学无止境，当代的知识更新也非常快，由于作者的水平有限，书中难免存在错漏之处，作者恳切希望各位读者、专家、学者对书中的不当之处提出批评指正。

作者 2006. 4. 14

目 录

第一章 绪论	1
第一节 测试技术课程的作用与目的	1
第二节 测试技术课程的内容	2
一、测量原理	3
二、测量方法	4
三、测量系统	5
四、数据处理	8
第二章 误差分析和数据整理	9
第一节 误差分析中的基本概念	9
一、真值与误差	9
二、误差的分类	9
三、概率论中的几个基本概念	11
四、误差分析中经常用到的两种分布及其性质	13
第二节 多次直接测量结果的误差估计	18
一、平均值与方差	18
二、真值范围估计	22
三、可疑数据的弃取	24
四、等精度测量的数据整理与分析	29
第三节 间接测量时误差的估计	30
一、平均值	31
二、方差	32
三、误差范围及置信度的估计	33
第四节 测量过程随机误差的估计	34
第五节 有效数字	35
第六节 测量数据的方程表示方法	39

一、最小二乘法	40
二、任意给定 x_0 时所确定的 y_0 值的置信区间的估计	43
第三章 测量装置的静动态特性	46
第一节 仪器的静动态特性	46
一、误差与精度	46
二、静态灵敏度 K	47
三、线性	48
四、滞后和盲区	49
五、分辨率和起始灵敏限	50
第二节 仪器的静态标定	50
第三节 负载效应	54
一、输入阻抗与输出阻抗	54
二、输入导纳与输出导纳	56
三、输入刚度与输出刚度	57
四、输入柔度、输出柔度	60
第四节 动态特性的数学模型和各种传递函数	62
一、动态测量系统的一般数学模型	62
二、微分方程的算符解法	62
三、算符解法举例	63
四、拉普拉斯变换	64
五、正弦传递函数	65
第五节 零阶仪器及其响应情况	65
第六节 一阶仪器及其阶跃响应与频率响应	67
一、一阶仪器举例	67
二、一阶仪器的阶跃响应	69
三、一阶仪器的频率响应	70
第七节 二阶仪器及其阶跃响应与频率响应	73
一、举例	73
二、二阶仪器的通解及其分析	75
三、二阶仪器的频率响应	77

第四章 温度测量	81
第一节 概述	81
一、几种温标	81
二、温度计分类	83
三、选用温度计需要考虑的问题	85
四、温度计安装原则	85
第二节 热膨胀式温度计	85
一、双金属温度计	85
二、玻璃管液体温度计	87
三、压力计式温度计	88
第三节 热电阻温度计	88
一、铜热电阻	90
二、铂热电阻	91
第四节 热电偶温度计	91
一、热电偶测温原理	91
二、常用热电偶	95
三、补偿导线的使用	97
四、冷端温度的补偿	98
第五章 压力测量	101
第一节 概述	101
一、压力的概念	101
二、压力的单位	102
三、压力计的分类	103
第二节 弹性式压力计	105
一、弹簧管式压力计	106
二、膜式压力计	107
三、波纹管式压力计（记录仪）	109
第三节 电气式压力计	111
一、电阻式压力传感器	112

二、压阻式压力传感器	115
三、电容式压力传感器	116
四、电感式压力传感器	119
五、压电式压力传感器	121
第四节 压力变送器	124
一、霍尔式压力传感器	124
二、力平衡式压力传感器	126
第六章 流量测量	128
第一节 概述	128
一、流量的概念和单位	128
二、流量计的分类	129
第二节 孔板式流量计	131
一、测量原理	132
二、压差的测量与取压	134
三、对孔板安装的要求	135
第三节 转子流量计	136
一、测量原理	136
二、转子流量计的使用与换算	138
三、安装要求	139
第四节 靶式流量计	139
第五节 电磁流量计	140
第六节 其他流量计	141
一、涡轮流量计	141
二、椭圆齿轮流量计	142
第七章 热导率的测定	145
第一节 概述	145
第二节 基本原理	145
第三节 热导率的测定方法	148
一、稳态测量方法	149

二、非稳态（动态）测量方法	156
第八章 比热容的测量	158
第一节 基本原理	158
第二节 基本测量方法	159
一、固体比热容的测量	160
二、液体比热容的测量	164
三、气体比热容的测量	167
第九章 热流密度的测量	169
第一节 传导型热流计	169
一、辅壁式热流计	170
二、温差式热流计	175
三、探针式热流计	177
第二节 辐射式热流计	179
一、稳态辐射热流计	180
二、瞬态辐射热流计	183
三、辐射式热流计的标定	184
第十章 基本热工专业实验	186
第一节 恒热流准稳态平板法测定材料热物性实验 （热导率、比热容、热扩散率）	186
一、实验目的	186
二、实验原理	186
三、实验设备	187
四、实验步骤	188
五、试材热流密度 q_w 的计算	191
六、实验要求	191
七、实验数据记录和整理	192
八、思考题	192
第二节 稳态双平板法测定非金属材料的热导率	193
一、实验目的	193

二、实验原理	193
三、实验设备	194
四、实验步骤	195
五、基本参数及有关计算	196
六、实验要求	197
七、实验数据记录和整理	197
八、思考题	197
第三节 空气横掠圆柱体时局部换热系数的测定	198
一、实验目的	198
二、实验原理	198
三、实验设备	199
四、实验步骤	200
五、基本参数及有关计算	201
六、实验要求	202
七、实验数据记录和整理	202
八、注意事项	203
九、思考题	203
第四节 辐射换热角系数的测定	204
一、实验目的	204
二、实验原理	204
三、实验设备	206
四、实验步骤	206
五、实验数据记录和整理	207
六、思考题	207
第五节 绕圆柱体压力分布的测定	208
一、实验目的	208
二、实验原理	208
三、实验设备	209
四、实验步骤	210
五、实验数据记录和整理	210

六、思考题	211
第六节 空气绝热指数的测定	212
一、实验目的	212
二、实验原理	213
三、实验设备	214
四、实验步骤	215
五、基本参数及有关计算	215
六、实验要求	216
七、实验数据记录和整理	216
八、思考题	217
参考文献	218
附录	219
附录 1 标准正态分布的分布函数值表	219
附录 2 各种置信度下 t 分布的系数 t_0	220
附录 3 肖维勒纳准则中的系数 z_0	221
附录 4 各种置信度下格拉布斯方法取值范围系数表	221
附录 5 最小相关系数 γ_{\min}	222
附录 6 Cu100 铜热电阻分度表	222
附录 7 Cu50 铜热电阻分度表	223
附录 8 铜-铜镍合金 (康铜) 热电偶 (T 型) 分度表	224
附录 9 镍铬-镍硅热电偶 (K 型) 分度表	226
附录 10 镍铬-铜镍合金 (康铜) 热电偶 (E 型) 分度表	232
附录 11 铂铑 ₃₀ -铂铑 ₆ 热电偶 (B 型) 分度表	236
附录 12 常用热电偶材料	241
附录 13 金属材料的密度、比热容和热导率	242
附录 14 保温、建筑及其他材料的密度和热导率	244
附录 15 饱和水的热物理性质	245
附录 16 液态金属的热物理性质	247

第一章 绪 论

第一节 测试技术课程的作用与目的

长期以来, 热能与动力工程学科为本科生开设的三大专业基础课包括流体力学、工程热力学和传热学, 这三门课程相互独立, 每门课程以课堂讲授方式为主, 辅以适当的课程实验, 课程实验的学时数占课程总学时数的 10% 左右。这种传统的教学方式进行了多年, 根据教学经验, 这种教学方式暴露出明显的缺点, 主要表现是课程实验学时数的不足以及分散性不能满足培养学生动手能力的需求。为此, 经过分析与论证, 进行下列课程内容的调整: ① 将工程热力学与传热学中的课程实验内容与课程本身分开, 单独开设测试技术课程, 使实验内容与技能的训练具有一定的连续性、集中性; ② 扩充测试技术课程中的内容, 除了原有的工程热力学与传热学中的课程实验外, 还要系统学习通用测试技术如流量、温度、压力的测量等内容; ③ 将测试技术课程的内容系统化, 除了课程实验内容与基本传感器技术外, 还要系统学习误差分析与数据处理、数据拟合基本软件工具等。通过这样编排测试技术课的内容, 希望能达到下列目的: ① 能够从基本原理与动手实践的角度切实训练学生进行实验的基本能力, 使学生能知其然、也知其所以然; ② 使学生从实验设计、仪器选型、实验操作、数据提取与分析处理等各个环节能够训练出真正的实验技能, 能够完成合格的实验报告写作。

通过测试技术课程的学习, 可以了解对某个物理量的测量、工业生产与日常生活中参数的调节与控制等是如何进行的。在此基础上, 可能更好地进行好以后的设计工作; 另外, 所学习到的测试技术本身又是与科学技术的发展密切相关的, 科学技术的发展总是带

给人们新的测量方法与测量仪器，而新的测量方法与测量仪器又反过来促进了科学技术的发展，因此对这门课程的学习实质上也是在学习科学技术中常见的方法。

第二节 测试技术课程的内容

实验的目的包括对未知事物的探索、对某些可能要发生的现象的验证、对某些定性事物的定量化表示、对某些过程进行控制与调节等，不管这些实验是为了哪一种具体的目的，只要进行实验，一般都要包括如图 1-1 所示的实验过程。

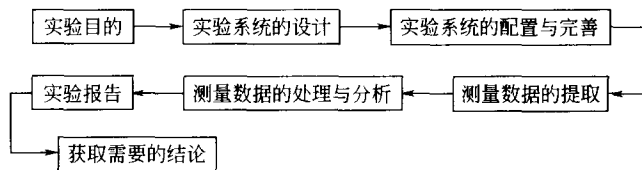


图 1-1 实验过程示意图

其中实验系统的设计是确定采用哪一种科学技术原理来实现实验目的。一个完整的实验系统中可能包含有几个子系统，每一个系统或子系统可能包含有一个以上的主要参数的测量部分。实验系统的配置与完善是指对设计的实验系统配置辅助性测量仪表、连接管路、控制与调节用阀门或电路以及为了完成主要的测试功能所需的其他装置，如在一般测量中为了使工质达到恒温而设置的恒温装置、在用水蒸气进行实验时设置的蒸汽发生装置等。测量数据的提取是指在整个实验装置中获取实测数据的过程，通常同一个实验过程中都要同时测取很多基本数据，根据这些基本数据之间的有机联系来寻求一些科学依据或科学规律。测量数据的处理与分析是指对提取的测量数据进行归纳、找出规律，同时发现各种可能因素对测量结果的影响，包括数据的误差分析与处理、参数影响分析、参数敏感性分析、数据可靠性分析等。在上面各个环节的基础上，就可以写出实验报告，通过实验报告来展示实测与分析结果，并为后人

的研究提供参考或接受后人进一步的实验验证。

上面所说是完成一个实验过程所需要的各个环节，归纳起来，为了能完成这种实验工作，要求实验人员具有下列基本技能：

a. 实验设计能力，即根据具体的实验目的、应用基本科学原理来设计实验系统，配制实验系统的各个环节及其功能；

b. 测试技术的训练，即根据所需测量的物理参数来选择合适的传感器、转换装置以及显示输出仪表；

c. 实验数据处理与整理的能力，对测取的数据进行分析、归纳，分辨好数据与坏数据，对好数据进行误差分析与数据拟合；对坏数据进行分析并找出造成坏数据的原因，消除这些因素，重新进行实验数据。

为了进行这些基本技能的学习，本课程将包括下列内容。

一、测量原理

所谓测量原理是指用什么科学技术原理去提取、接收或感知信号并对其进行加工处理，同一参数的测量可以采用不同的测量原理、同一测量原理也可以用于不同参数的测量，例如测量压力的传感器就有弹簧式压力计、电阻式压力计、压电式压力计等，它们就分别利用了弹簧元件在压力作用下发生弹性变形、电阻丝的阻值随电阻丝的伸缩而发生变化、压电材料在受压后会产生电荷等科学原理，但同样是“电阻丝的阻值随电阻丝的伸缩而发生变化”这一原理，可分别用于温度测量、压力测量、应力测量等多种参数的测量过程中。每一种测量原理即是测量仪器的一个信号（输出信号）随另一个参数（信号源的输入信号）之间的变换关系，这些对应变化的各个参数分属于不同的科学技术领域；如有的是电学量、电子学量、力学量等，有的是热学量、光学量、声学量、生物学量等，因此测量原理很多，要想较全面地了解这方面的内容，就需要有很宽的知识面，并且要有扎实的基础知识与专业知识。本课程中，主要介绍基本物理参数（温度、压力、流量）的常见测量原理以及热能工程学科基本热参数的测量原理。

二、测量方法

测量方法是指为了得到所需要的物理参数而用什么方法去获得，简单地说，也就是根据基本的测量原理，如何来实现对一个具体的物理量的测量，这部分内容将与测量原理一起分散在各部分章节中。

从测量系统的输入信号与所要知道的物理参数之间的关系来说，测量方法可分为以下两种。

(1) 直接测量法 是指借助于测量系统，将被测量转换成某一中间量，再将这个中间量同标准量比较，根据中间量与标准量之间的关系，就可知道被测量的大小。例如用玻璃管温度计测量温度时，被测量是温度，中间量是玻璃管内液体的高度，标准量就是经过标准化了的温标（摄氏温标、华氏温标或国际温标）。测量时，一定的液体高度对应确定的温度值，因此通过温度计上的刻度就可以直接读取被测的温度值。

直接测量法中，被测量与中间量之间的关系在理论上是确定的、而且是最直接的。一般、在直接测量法中，获得的读数就是所要得到的被测物理量的数值。

(2) 间接测量法 是对与被测量有确定函数关系的其他参数（原始参数）进行测量，然后再根据函数关系式将所需的被测量计算出来。例如在用应变片测量应力时，无法直接测量出应力的大小，但是却可以测量出应变值，通过广义虎克定律以及材料的性质（材料的弹性模量、泊松比）来计算出应力的大小。

从测量系统本身的输出显示方式上来看，测量方法可分为以下两类。

(1) 偏差测量法 在未接入被测信号前，仪表指针、刻度或显示数字为零；当接入被测信号后，仪表的指针、刻度或显示数字偏离零位而直接显示输出信号，这种测量方法称为偏差测量法。

(2) 零位测量法 在未接入被测信号前，仪表指针、刻度或显

示数字为零；当接入被测信号后，仪表的指针、刻度或显示数字偏离零位，此时调节其他装置的旋钮使仪表指针、刻度或显示数字重新回到零位，再根据旋钮调节的幅度来确定被测信号的大小，这种测量方法称为零位测量法。

零位测量法可以获得比较高的精度，因为这种测量方法避免了因负载效应（见第三章）而引起的系统误差。另外，零位测量法中显示用的仪表指针只是作为是否平衡的一种表针，因此指针的工作范围常在零位附近工作、可以将灵敏度做得比较高。

一般地说，在仪器的标定、校正时多用零位法，工程测量时在精度要求不是特别高的时候多用偏差法。原因是偏差法在读数时比较方便。

三、测量系统

即是对某一物理量进行测量的整套系统，第十章给出了几种常见热工参数的测量系统。从信息传输的方式上看，测量系统分为模拟式和数字式两种。

(1) 模拟式测量系统 是指用某一个物理参数作为模拟量来表示被测信号的输出的。例如用弹簧式压力表来测量压力时，被测压力通过压力表指针的转角来表示并输出；用热电偶测量温度时，被测温度用热电偶产生的热电势来表示并进行输出。像这种以一个物理参数来模拟另一个物理参数进行输出的测量系统统称为模拟系统。

模拟式测量系统中按照作用原理可分为三个组成部分，见图 1-2。

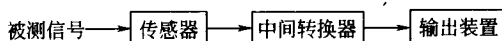


图 1-2 模拟式测量系统组成

a. 传感器 能感知并检测出被观测对象的信息的机器或装置。传感器是能够代替人的五官功能（视、听、嗅、味、触）来完成某些功能检测的机器，同时，人的五官所不能感知的信号如红外线、

电磁波、超声波等，利用传感器也都能检测出来。科学家预测，今后重要的技术开发都离不开传感器技术的发展，因此传感器技术已经作为一门独立的学科向着系列化的方向发展。

现在的多数传感器都是把非电量信号转换成电量信号进行输出，以便于进行信号的自动处理、转换与传输。

b. 中间转换器 是指将传感器感知出来的信号经过一定的装置、电路对其进行处理、以便于信号的最后输出的处理系统，这个系统可能由一台或几台仪器组成、也可能是某一台仪器的一部分功能。凡是具有这种功能的系统就称为中间转换器。常见的中间转换器的类型有以下几种。

① 放大器 这是最常见的形式，因为一般传感器感知的信号都是非常微弱的，如果不经过放大，几乎是无法输出的。放大器可能是对任何信号进行放大，如对力、力矩、转角、位移、电压、电流等信号的放大等。

② 电桥（信号形式转换器） 传感器感知并输出的信号可以是各种物理量，其中电压、电流是最便于仪器处理或输出的信号，电桥便是起这种作用的转换装置。例如用电阻应变片测量应变时，直接输出的信号是电阻阻值的变化量，而电阻阻值是无法直接输出并进行处理的，这时采用惠斯登电桥就可以将电阻阻值的变化转换成电压的变化量进行输出。

③ 滤波器 当所处理的信号中包括有不同频率的信号成分时，需要将不需要的频率成分清除掉而只输出所需要的那种频率的信号，起这种作用的中间转换器就称为滤波器。

④ 调制与解调 有些动态信号的频率很低，这种低频率的信号难以进行放大，所以需先将这种信号转换成具有便于处理的频率的信号，对其进行放大后再将其转换成原来的频率信号进行输出，这种对信号频率的调整与恢复的过程称为调制与解调。

⑤ 模数转换器 是指对数字量与模拟量进行转换的机器，见后面的数字式测量系统部分的内容。

c. 输出装置 包括显示、记录仪器以及控制器、调节器。显