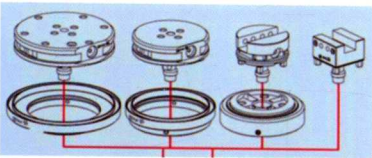




普通高等教育农业部“十二五”规划教材

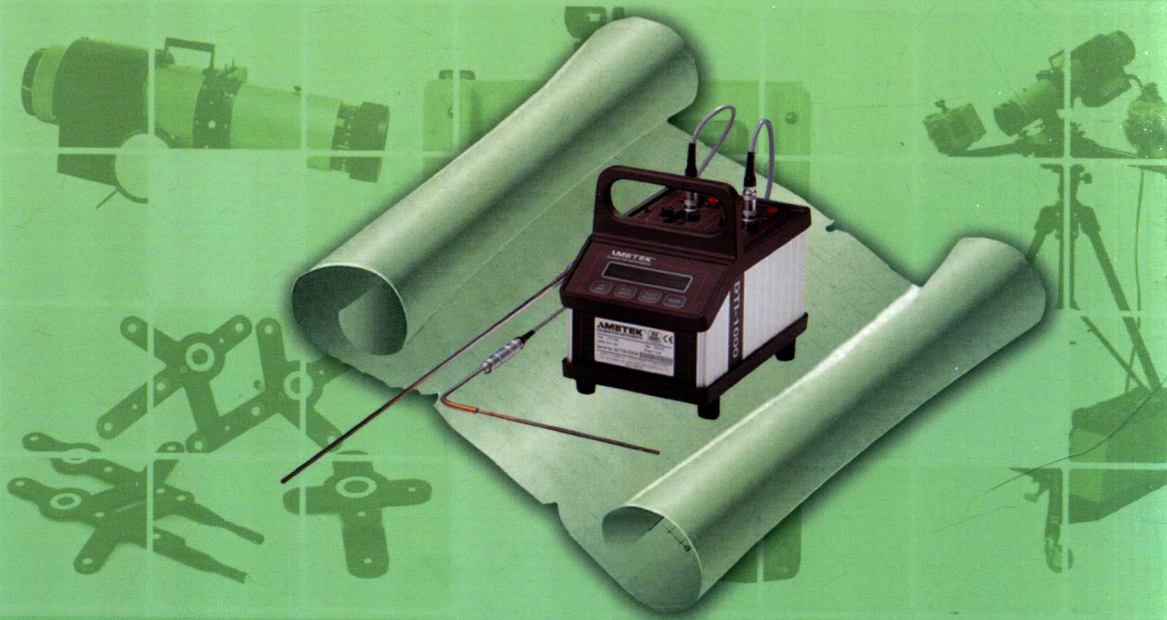
全国高等院校可再生能源工程系列教材



热工参数测量

Regong Canshu Celiang

易维明 主编



中国农业出版社

普通高等教育农业部“十二五”规划教材
全国高等院校可再生能源工程系列教材

热工参数测量

REGONG CANSHU CELIANG

易维明 主编

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

热工参数测量 / 易维明主编. —北京: 中国农业出版社, 2017. 3

普通高等教育农业部“十二五”规划教材 全国高等院校可再生能源工程系列教材

ISBN 978-7-109-17999-8

I. ①热… II. ①易… III. ①热工测量-高等学校-教材 IV. ①TK31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 306226 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区麦子店街 18 号楼)

(邮政编码 100125)

策划编辑 马颀晨

文字编辑 李兴旺

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2017 年 3 月第 1 版 2017 年 3 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 17

字数: 402 千字

定价: 39.50 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

全国高等院校可再生能源工程系列教材

编 审 委 员 会

主 任 李文哲 (东北农业大学)

副主任 张全国 (河南农业大学)

易维明 (山东理工大学)

夏朝凤 (云南师范大学)

委 员 (按姓名笔画排序)

王效华 (南京农业大学)

刘圣勇 (河南农业大学)

刘庆玉 (沈阳农业大学)

刘建禹 (东北农业大学)

刘荣厚 (上海交通大学)

李 明 (云南师范大学)

张衍林 (华中农业大学)

周福君 (东北农业大学)

柏雪源 (山东理工大学)

施正香 (中国农业大学)

秦京光 (农业部规划设计研究院)

郭康权 (西北农林科技大学)

董长青 (华北电力大学)

董良杰 (吉林农业大学)

编写人员名单

主 编 易维明

副主编 牛卫生 焦有宙 张影微 柏雪源

编 者 (按姓名拼音排序)

柏雪源 (山东理工大学)

蔡红珍 (山东理工大学)

付 鹏 (山东理工大学)

高 微 (沈阳农业大学)

贺 超 (河南农业大学)

焦有宙 (河南农业大学)

孔凡霞 (山东理工大学)

李志合 (山东理工大学)

牛卫生 (沈阳农业大学)

王丽红 (山东理工大学)

王娜娜 (山东理工大学)

易维明 (山东理工大学)

张春梅 (沈阳农业大学)

张影微 (东北农业大学)

审 稿 张全国 (河南农业大学)

刘庆玉 (沈阳农业大学)

李文志 (中国科技大学)

前 言



随着科技的迅速发展, 热工测量技术发生了巨大变化, 计算机、激光、红外、信号处理等技术的应用为热工参数测量开辟了许多新的领域。本书既保留了传统的热工参数基本测量技术, 又增加了现代测量技术, 是各类工程专业必不可少的专业基础课教材。通过对本书的学习, 读者能掌握必需的测量技术, 包括现代测量技术, 开阔思路, 提高解决问题的能力。

全书共十章, 包括绪论、误差分析和数据整理、测试系统的基本特性、温度测量、湿度测量、压力压差测量、流量测量、速度测量、气体成分测量、热值测量及现代测试系统等内容。本书由山东理工大学牵头, 河南农业大学、沈阳农业大学、东北农业大学等高等院校大力支持、通力合作完成。参加编写的人员有: 蔡红珍(第一章)、易维明(第二章第一节、第五章第一节、第六章第一节、第七章第一至第三节、第八章第一节、第十章第一节)、柏雪源(第二章第二节、第五章第二节、第六章第二节、第九章第一节)、孔凡霞(第二章第三节和第四节)、李志合(第二章第五节)、焦有宙(第三章第一节和第二节、第六章第三节、第十一章第一节和第二节)、张影微(第三章第三节和第四节、第十一章第三至第五节)、牛卫生(第四章第一至第五节)、张春梅(第四章第六节和第七节、第七章第六节)、高微(第五章第三节和第四节、第六章第四至第六节)、贺超(第五章第五节和第六节)、王娜娜(第七章第四节和第五节、第八章第二节)、王丽红(第九章第二节和第三节)、付鹏(第十章第二节和第三节)。全书由易维明任主编, 牛卫生、焦有宙、张影微、柏雪源任副主编。

本书素材的积累和正文的编著得到了同行的指导和帮助, 并综合分析了国内外大量的文献和专著, 经河南农业大学张全国教授、沈阳农业大学刘庆玉教授和中国科技大学李文志副教授等同志审阅, 提出了不少宝贵意见, 对

提高本书质量起到了积极的作用。

本书在编写过程中，参考了一些国内外有关资料，在此向各位作者表示深深谢意。由于书中内容涉及面广，编者水平有限，难免存在错误和不足之处，敬请读者和同行专家批评指正。

编者

2016年4月

目 录



前言

第一章 绪论	1
第一节 测量技术课程的作用与目的	1
第二节 测量技术课程的内容	1
一、测量原理	2
二、测量方法	2
三、测量分类	3
四、测量系统	4
第三节 测量技术的发展状况	5
一、传感器向着集成化、微型化和智能化方向发展	6
二、不断拓展测量范围,努力提高测量准确度和可靠性	6
三、测量原理和测量手段重大突破	6
复习思考题	7
参考文献	7
第二章 误差分析和数据整理	8
第一节 误差分析中的基本概念	8
一、真值与误差	8
二、误差的分类	8
三、概率论中的几个基本概念	9
四、误差分析中经常用到的两种分布及其性质	10
五、测量误差分析及测量仪器精度的选择	13
第二节 测量结果的误差估计	13
一、平均值与方差	13
二、真值范围估计	16
三、可疑数据的弃取	18
四、误差范围及置信度的估计	22
五、等精度测量的数据整理与分析	22
第三节 测量过程随机误差的估计	23

第四节 有效数字	24
第五节 测量数据的方程表示方法	25
一、最小二乘法	26
二、曲线拟合	29
三、置信区间的估计	29
复习思考题	30
参考文献	31
第三章 测试系统的基本特性	32
第一节 测试装置与线性系统	32
一、测试装置的基本要求	32
二、线性系统及其主要性质	33
第二节 测试系统的静态特性	34
第三节 测试系统的动态特性	36
一、测试系统动态特性的描述方法	37
二、测试系统的动态特性	39
三、测试系统动态特性的测定	45
四、测试环节的联结	47
第四节 实现不失真测试的条件	48
复习思考题	49
参考文献	50
第四章 温度测量	51
第一节 温度测量概述	51
一、温标	51
二、温度计分类	52
三、温度计的选择	54
第二节 膨胀式温度计	54
一、液体膨胀式温度计	54
二、固体膨胀式温度计	58
三、压力式温度计	58
第三节 热电阻温度计	59
一、金属热电阻温度计	60
二、金属热电阻温度计的引线及测量电路	63
三、半导体电阻温度计	65
四、热电阻的选择与误差分析	67
第四节 热电偶温度计	68
一、热电偶测温原理	69
二、热电偶的基本定律及其应用	71

三、常用热电偶材料和种类	73
四、热电偶的结构形式	76
五、热电偶的实用测温电路	77
六、热电偶参考端的温度处理	78
七、热电偶测温系统的误差分析	80
八、热电偶的分度与校准	81
九、电偶的选择、安装和使用	82
第五节 辐射温度计	84
一、热辐射的理论基础	84
二、全辐射高温计	86
三、单色辐射高温计	87
四、比色高温计	89
五、部分辐射高温计	90
六、辐射测温的干扰分析	93
第六节 光纤温度计	93
一、光纤温度传感器的原理	93
二、光纤辐射温度计	95
三、非功能型光纤温度计	98
四、功能型光纤温度计	101
五、分布式光纤测温系统	102
第七节 集成温度传感器	103
一、集成温度传感器的测温原理	103
二、模拟式集成温度传感器	104
三、智能集成式温度传感器	106
复习思考题	108
参考文献	109
第五章 湿度测量	110
第一节 空气湿度的表示方法	110
第二节 干湿球湿度计	111
一、干湿球湿度计的原理	111
二、普通干湿球湿度计	112
三、通风干湿球湿度计	113
四、电动干湿球湿度传感器	113
第三节 露点湿度计	114
一、露点法湿度测量原理	114
二、露点湿度计	115
三、光电式露点湿度计	115
第四节 电阻法湿度测量	116

一、氯化锂电阻式湿度传感器	116
二、高分子电阻式湿度传感器	117
三、金属氧化物湿度传感器	118
第五节 吸湿法湿度测量	119
一、电容式湿度传感器	119
二、毛发式湿度计	120
第六节 湿度传感器的选择与校准	121
一、湿度传感器的选择	121
二、对湿度传感器性能做初步判断的几种方法	122
三、湿度传感器的校准	123
复习思考题	124
参考文献	125
第六章 压力压差测量	126
第一节 概述	126
一、压力的概念	126
二、压力的单位	127
三、压力测量仪表的分类	127
第二节 液柱式压力计	128
一、U形管压力计	128
二、单管压力计	129
三、斜管压力计	129
四、液柱式压力计的误差分析	131
第三节 弹性式压力计	131
一、弹簧管式压力计	133
二、膜式压力计	134
三、波纹管式压力计	135
四、弹性式压力计的误差分析	135
第四节 电气式压力计	136
一、电阻式压力传感器	136
二、压阻式压力传感器	137
三、电容式压力传感器	139
四、压电式压力传感器	140
第五节 压力变送器	141
一、霍尔式压力变送器	142
二、力矩平衡式压力变送器	143
第六节 压力仪表的选择、安装与校准	143
一、压力仪表的选择	143
二、压力仪表的安装	144

三、压力仪表的校准	146
复习思考题	148
参考文献	148
第七章 流量测量	149
第一节 概述	149
一、流量的概念	149
二、流量计的分类	149
第二节 节流式差压流量计	150
一、标准节流装置	150
二、节流装置测量原理和流量方程	155
三、节流式差压流量计的选用和安装	158
第三节 皮托管和均速管流量计	161
一、皮托管	161
二、均速管流量计	162
第四节 转子流量计	162
一、测量原理	162
二、转子流量计的流量方程式与刻度换算	163
三、转子流量计的种类及特点	165
四、转子流量计的选用和安装	166
第五节 靶式流量计	167
一、工作原理	167
二、流量系数和压力损失	168
三、靶式流量计的安装与使用	168
第六节 其他流量计	168
一、电磁流量计	168
二、涡轮流量计	171
三、涡街流量计	173
四、椭圆齿轮流量计	175
五、超声波流量计	176
复习思考题	180
参考文献	181
第八章 速度测量	182
第一节 热线、热膜流速计	182
第二节 激光多普勒测速技术	184
第三节 粒子图像测速技术	190
一、粒子图像测速技术分类	190
二、粒子图像测速原理	191

三、设备组成	191
复习思考题	194
参考文献	194
第九章 气体成分测量	195
第一节 氧化锆氧量计	195
一、氧化锆测量原理	195
二、氧化锆氧量计的测量系统	197
第二节 红外气体分析仪	200
一、红外气体分析原理	200
二、红外气体分析仪工作原理	202
第三节 气相色谱分析仪	206
一、气相色谱分析仪工作原理	206
二、气相色谱分析仪结构及操作条件	208
三、气体的定性与定量分析	211
复习思考题	215
参考文献	216
第十章 热值测量	217
第一节 燃料热值的定义和表示方法	217
一、燃料热值的定义	217
二、燃料热值的表示方法	217
第二节 固体和液体燃料热值测量	218
一、氧弹式热量仪测定热值的基本原理	218
二、热值测定的工作过程	220
三、高位(总)热值的测量及修正	221
四、固体和液体燃料热值的估算	222
第三节 气体燃料热值测量	222
复习思考题	224
参考文献	224
第十一章 现代测试系统	225
第一节 计算机测试系统的组成	225
一、多路模拟开关	226
二、采样保持	227
三、D/A 转换技术	227
四、A/D 转换技术	229
第二节 数据采集装置及其选择	230
一、数据采集装置的基本类型	230

二、多路采集装置的通道设计方案	231
三、数据采集装置的选用	232
第三节 测试仪器总线与接口技术	233
一、接口和总线及其标准化	233
二、测试仪器内部总线	234
三、测试系统外部接口总线	237
四、现场总线技术	240
第四节 虚拟仪器系统	243
一、虚拟仪器的出现与特点	243
二、虚拟仪器的构成	245
三、Lab VIEW 虚拟仪器开发平台	246
四、虚拟仪器的发展趋势	248
第五节 网络化测试技术与仪器	249
一、网络化仪器的特点与发展	249
二、网络化测试系统的结构与实现	249
三、网络化测控系统的应用	250
复习思考题	251
参考文献	251
附录	252
附表 1 铂铑 10-铂热电偶分度表 (分度号: S, 参考端温度: 0 °C)	252
附表 2 铂铑 13-铂铑热电偶分度表 (分度号: R, 参考端温度: 0 °C)	253
附表 3 铂铑 30-铂铑 6 热电偶分度表 (分度号: B, 参考端温度: 0 °C)	254
附表 4 镍铬-镍硅热电偶分度表 (分度号: K, 参考端温度: 0 °C)	255
附表 5 镍铬硅-镍硅热电偶分度表 (分度号: N, 参考端温度: 0 °C)	256
附表 6 镍铬-康铜热电偶分度表 (分度号: E, 参考端温度: 0 °C)	256
附表 7 铜-康铜热电偶分度表 (分度号: T, 参考端温度: 0 °C)	257
附表 8 铁-康铜热电偶分度表 (分度号: J, 参考端温度: 0 °C)	257
附表 9 铂热电阻分度表 ($R_0=100 \Omega$, $\alpha=0.003851 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 分度号: Pt100)	258
附表 10 铜热电阻分度表 ($R_0=50 \Omega$, $\alpha=0.004280 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 分度号: Cu50)	258

第一章 绪 论

第一节 测量技术课程的作用与目的

测量是人类对自然界中客观事物取得数量观念的一种认识过程。在这一过程中，人们借助于专门工具，通过试验和对试验数据的分析计算，求得被测量的值，获得对于客观事物量的概念和内在规律的认识。因此可以说，测量就是为取得未知参数值而做的全部工作，包括测量的误差分析和数据处理等计算工作。

人类的知识许多是依靠测量得到的。在科学技术领域，许多新的发现、新的发明往往是以测量技术的发展为基础，测试技术的发展推动科学技术的前进。在生产活动中，新工艺、新设备的产生，也依赖于测量技术的发展水平，而且，可靠的测量技术对于生产过程自动化、设备安全以及经济运行都是必不可少的先决条件。无论是在科学实验中还是在生产过程中，一旦离开了测量，必然会给工作带来巨大的盲目性。只有经过可靠的测量，然后正确判断测量结果的意义，才有可能进一步解决自然科学和工程技术上提出的问题。

测量技术对自然科学、工程技术的重要作用愈来愈为人们所重视，它已逐步形成了一门完整、独立的学科。这门学科研究的主要是测量原理、测量方法、测量工具和测量数据处理。根据被测对象的差异，测量技术可分为若干分支，例如力学测量、电学测量、光学测量、热工测量等。测试技术的各个分支，有共同需要研究的问题，如测量系统分析、测量误差分析与数据处理理论；又有各自不同的特点，如各种不同物理参数的测量原理、测量方法和测量工具。

第二节 测量技术课程的内容

测量技术是指按照被测对象的特点，采用某种方法和仪器获取被测量数值的全过程。只有通过测量才能获得表征物理或化学现象和过程的定量信息，因此各行各业都有自己的测量技术问题。

测量是人类对自然界的客观事物取得数量观念的一种认识过程，也就是说测量是从客观事物中提取有关信息的认识过程，经整理后成为数据。具体地说，测量就是通过专门的技术工具，用试验和计算的方法把被测量与同性质的标准量（测量单位）进行比较，确定两者的比值，从而得到被测的量值。欲使测量结果有意义，测量必须满足以下要求：

- (1) 用来进行比较的标准量应该是国际上或国家所公认的，且性能稳定。
- (2) 进行比较所用的方法和仪器必须经过验证。根据上述测量的概念，被测量的值可表达为

$$X = aU \quad (1-1)$$

式中 X ——被测量；

U ——标准量（即选用的测量单位）；

a ——被测量与标准量的数字比值。

式(1-1)称为测量的基本方程式。

一、测量原理

测量原理是指采用什么样的原理(依据什么效应)去测量(感受)被测量,实质上就是传感器的敏感原理。不同性质的被测量用不同的原理去测量,同一性质的被测量也可用不同的原理去测量。例如:压力和温度的性质不同,依据的测量原理就有所不同,如压—敏效应和温—敏效应不同;同样是测量压力,可以分别应用弹性敏感元件的压力—位移特性、压力—集中力特性、压力—谐振频率特性等不同原理来测量。

由于被测的种类繁多,性质千差万别,因此,测量原理涉及的领域也非常广泛。随着科学技术的进步和发展,可以应用的新原理日益增多,要求的知识面也日益广泛。常用的测量原理就涉及物理学(热学、光学、声学)、化学、电子学、流体力学、生物学、材料学等领域。要确定一种被测量的测量原理,选择好传感器,往往需要对被测量及其相关量的特性变化规律、可测量范围、测量过程技术要求和外界环境条件等做充分了解和全面分析。

二、测量方法

测量方法是指测量原理确定后,用什么方法去测量被测量,或者说如何实现被测量与标准量(测量单位)比较的方法。测量方法很多,按测量结果产生的方式来分类,测量方法可分为直接测量法、间接测量法、组合测量法。

1. 直接测量法 使被测量直接与选用的标准量进行比较,或者用预先标定好的测量仪器进行测量,从而直接求得被测量数值的测量方法,称为直接测量法。例如:用水银温度计测量介质温度、用压力表测量容器介质压力等,都属于直接测量法。

2. 间接测量法 通过直接测量与被测量有某种确定函数关系的其他各个变量,然后将所测得的数值代入函数关系进行计算,从而求得被测量数值的方法,称为间接测量法。例如,测量透平机械轴功率 P 时,可借用关系式

$$P = \frac{Mn}{9549} \quad (1-2)$$

通过直接测量扭矩 M 和转速 n ,然后将测得的数值代入上式,可求得轴功率 P 。

该方法测量过程复杂费时,一般应用在以下情况:

- (1) 直接测量不方便时。
- (2) 间接测量比直接测量的结果更为准确。
- (3) 不能进行直接测量的场合。

3. 组合测量法 测量中使各个未知量以不同的形式出现(或改变测量条件以获得这种不同组合),根据直接测量或间接测量所获得的数据,通过解联立方程组以求得未知量的数值,这类测量称为组合测量。例如,用铂电阻温度计测量介质温度时,其电阻值 R 与温度 t 的关系如下:

$$R_t = R_0(1 + at + bt^2) \quad (1-3)$$

式中, R_0 为初始温度时的电阻值, R_t 为温度 t 时的电阻值。为了确定系数 a 、 b ,首先需要测得铂电阻在不同温度下的电阻值 R_t ,然后再建立联立方程求解,得到 a 、 b 的数值。

组合测量法在实验室和其他一些特殊场合的测量中使用较多,例如,建立测压管的方向特性、总压特性和速度特性曲线的经验关系式等。

注意:间接测量法和组合测量法的区别。

间接测量法的直接测量量和被测量之间具有确定的一个函数关系,通过直接测量量即可唯一确定被测量;而组合测量法被测量和直接测量量或间接测量量之间不是单一的一个函数关系,需要求解根据测量结果所建立的方程组来获得被测量。

三、测量分类

在测量活动中,为满足对各种被测对象的不同测量要求,依据不同的测量条件有着不同的测量方法。对测量方法可以从不同角度进行分类,除根据测量结果的获得方式或测量方法,把测量分为直接测量、间接测量和组合测量三种外,常见的分类方法有以下几种。

1. 静态测量和动态测量 根据被测对象在测量过程中所处的状态,可以把测量分为静态测量和动态测量。

静态测量是指在测量过程中被测量是固定不变的,因此不需要考虑时间因素对测量的影响。人们在日常测量中所接触的绝大多数是静态测量。对于静态测量,被测者和测量误差可以当作一种随机变量来处理。

动态测量是指被测量在测量期间随时间(或其他影响量)发生变化。如弹道轨迹的测量、环境噪声的测量等。对这类被测量的测量,需要当作一种随机过程的问题来处理。

实际上,绝对不随时间变化的量是不存在的,通常把那些变化速度相对于测量速度十分缓慢的量的测量,按静态测量来处理。相对于静态测量,动态测量更为困难。这不仅在于参数本身的变化可能是很复杂的,而且测量系统的动态特性对测量的影响也很复杂,因而测量数据的处理有着与静态测量不同的原理与方法。

2. 等精度测量和不等精度测量 根据测量条件是否发生变化,可以把对某测量对象进行的多次测量分为等精度测量与不等精度测量。

等精度测量是指在测试过程中,测量仪表、测量方法、测量条件或操作人员等都保持不变。因此,对同一被测量进行的多次测量结果,可认为具有相同的信赖程度,应按同等原则对待。

不等精度测量是指测量过程中,测量仪表、测量方法、测量条件或操作人员等中某一因素或某几个因素发生变化,使得测量结果的信赖程度不同。对不等精度测量的数据,应按不等精度原则进行处理。

3. 电量测量和非电量测量 根据被测量的属性,可以把测量分为电量测量和非电量测量。

电量测量是指电子学中有关量的测量,具体包括:

- (1) 表征电磁量的量,如电流、电压、功率、电子强度、噪声等。
- (2) 表征信号特征的量,如频率、相位、波形参数等。
- (3) 表征元件和电路参数的量,如电阻、电容、电感、介电常数等。
- (4) 表征网络特性的量,如带宽、增益、带内波动、带外衰减等。

非电量测量是指非电子学中量的测量。如温度、湿度、压力、气体浓度、机械力、材料光折射率等非电子学参数的测量。随着科学技术的进步,对测量精度、测量速度等提出了更