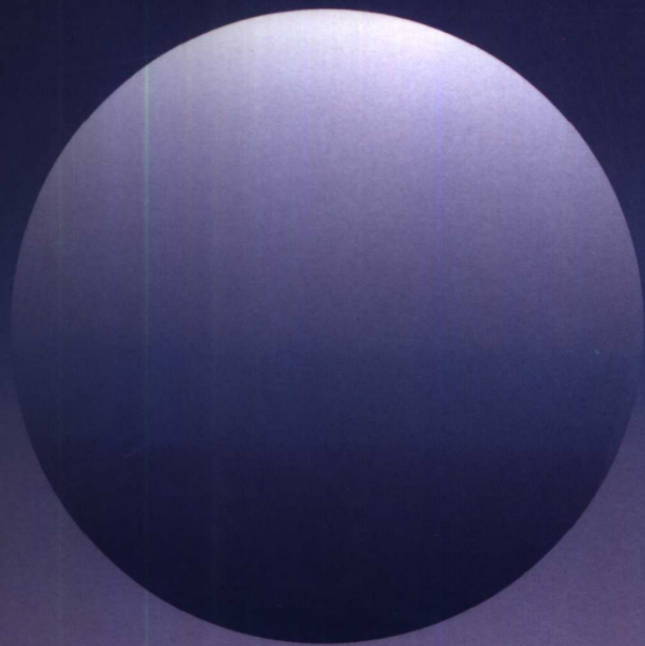


● 研 究 生 用 书 ● MODERN MEASURING TECHNIQUES
FOR POWER ENGINEERING

华中科技大学出版社



黄素逸 编著

动力工程现代测试技术

动力工程现代测试技术

黄素逸 编著

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

动力工程现代测试技术/黄素逸 编著
武汉:华中科技大学出版社,2001年4月
ISBN 7-5609-2378-X

I. 动…

II. 黄…

III. 动力工程-测试技术-高等学校教材

IV. TK0

动力工程现代测试技术

黄素逸 编著

责任编辑:佟文珍
责任校对:蔡晓瑚

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87545012

经 销:新华书店湖北发行所

录 排:华中科技大学出版社照排室
印 刷:中科院武汉分院科技印刷厂

开本:850×1168 1/32

印张:15.625 插页:2

字数:368 000

版次:2001年4月第1版

印次:2001年4月第1次印刷

印数:1—1 500

ISBN 7-5609-2378-X/TK·39

定价:24.80元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本书以动力工程中遇到的测试问题为对象,系统地介绍了有关温度场、速度场、浓度场及颗粒特性等热物理量的最新测试方法,特别是光学测试方法;而且对动力工程测试中普遍感兴趣的问题,如工程热物理的研究方法、测量系统的动态特性、流动显示技术、信号分析与处理及三维数据场的计算机可视化等进行了深入的讨论.本书既可作为高等学校相关学科本科生,特别是研究生的教材和教学参考书,也可供从事科学研究及测试工作的科技人员参考.

Abstract

This book provides an introduction to the most important measurement techniques applied to power engineering problems. In the book the new measuring methods of the temperature fields, velocity fields, density fields and the particle properties are presented systematically. The investigating methods of engineering thermophysics, dynamic properties of measurement system, flow visualization, signal analysis and processing, computer visualization of the three-dimensional data fields, which is interested measuring problems in power engineering, are described in detail. The book can serve as textbook or reference for graduate students. It can also be consulted by relevant teachers, researchers, natural scientists and engineers.

写在“研究生用书”出版 10 周年

在今天,面对科技的迅速发展,知识经济已见端倪,国际竞争也日趋激烈,显然,国家之间的竞争是国家综合实力的竞争,国家综合实力的竞争关键是经济实力的竞争,而经济实力的竞争关键又在于科技(特别是高科技)的竞争,科技(特别是高科技)的竞争归根结底是人才(特别是高层次人才)的竞争,而人才(特别是高层次人才)的竞争基础又在于教育。“百年大计,教育为本;国家兴亡,人才为基。”十六个字、四句话,确是极其深刻的论断。目前,国际形势清楚表明:我们国家的强大与民族的繁荣,主要立足于自己,以“自力更生”为主;把希望寄托于他人,只是一种不切实际的幻想。这里,我们决不是要再搞“闭关锁国”,搞“自我封闭”,因为那是没有出路的;我们强调的是要“自信,自尊,自立,自强”,要以“自力更生”为主,走自己发展的道路。

显然,知识经济最关键的是人才,是高层次人才的培养,而作为高层次人才培养的研究生教育就在一个国家的方方面面的工作中,占有十分重要的战略地位。可以说,没有研究生教育,就没有威伟雄壮的科技局面,就没有国家的强大实力,就没有国家在国际上的位置,就会挨打,就会受压,就会被淘汰,还说什么知识经济与国家强大?!

“工欲善其事，必先利其器。”教学用书是教学的重要基本工具与条件。这是所有从事教育的专家所熟知的事实。所以，正如许多专家所知，也正是原来的《“研究生用书”总序》中所指出，研究生教材建设是保证与提高研究生教学质量的重要环节，是一项具有战略性的基本建设。没有研究生的质量，就没有研究生教育的一切。

我校从 1978 年招收研究生以来，即着力从事于研究生教材与教学用书的建设。积十多年建设与实践的经验，我校从 1989 年起，正式分批出版“研究生用书”。第一任研究生院院长陈珏教授就为之写了《“研究生用书”总序》，表达了我校编写这套用书的指导思想与具体要求，“要力求‘研究生用书’具备科学性、系统性、先进性”。后三任研究生院院长，也就是各任校长黄树槐教授、我本人和周济教授完全赞同这一指导思想与具体要求，从多方面对这套用书加以关心与支持。

我是十分支持出版“研究生用书”的。早在 1988 年我在为列入这套书中的第一本，即《机械工程测试·信息·信号分析》写“代序”时就提出：“一个研究生应该博览群书，博采百家，思路开阔，有所创见。”但这不等于他在一切方面均能如此，有所不为才能有所为。如果一个研究生的主要兴趣与工作不在“这一特定方面”，他也可以选择一本有关的书作为了解与学习这方面专业知识的参考；如果一个研究生的主要兴趣在“这一特定方面”，他更应选择一本有关的书作为主要学习用书，寻觅主要学习线索，并缘此展开，博览群书。这就是我赞成为研究生编写系列教学用书的原因。

目前,这套书自第一本于1990年问世以来,已经度过了10个春秋,出版了8批共49种,初步形成规模,逐渐为更多读者所认可。在已出版的书中,有15种分获国家级、部省级图书奖,有16种一再重印,久销不衰。采用此套书的一些兄弟院校教师纷纷来信,赞誉此书为研究生培养与学科建设作出了贡献,解决了他们的“燃眉之急”。我们感谢这些赞誉与鼓励,并将这些作为对我们的鞭策与鼓励,“衷心藏之,何日忘之?!”

现在,正是江南春天,“最是一年春好处”。华工园内,红梅怒放,迎春盛开,柳枝油绿,梧叶含苞,松柏青翠,樟桂换新,如同我们的国家正在迅猛发展、欣欣向荣一样,一派盎然生机。尽管春天还有乍寒时候,我们国家在前进中还有种种困难与险阻,来自国内与来自国外的阻挠与干扰,有的还很严峻;但是,潮流是不可阻挡的,春意会越来越浓,国家发展会越来越好。我们教师所编的、所著的、所编著的这套教学用书,也会在解决前进中的种种问题中继续发展。然而,我们十分明白,这套书尽管包含了我们教师的辛勤的长期的教学与科研工作的劳动结晶,作为教学用书百花园中的一丛鲜花正在怒放,然而总会有这种或那种的不妥、错误与不足,我衷心希望在这美好的春日,广大的专家与读者,不吝拨冗相助,对这套教学用书提出批评建议,予以指教启迪,为这丛鲜花除害灭病,抗风防寒,以进一步提高质量,提高水平,更上一层楼,我们不胜感激。我们深知,“一个篱笆三个桩”,没有专家的指导与支持,没有读者的关心与帮助,也就没有这套教学用书的今天。我衷心祝愿在我们学校第三次大发展的今

天,在百年之交与千年之交的时候,这套教学用书会以更雄健的步伐,走向更美好的未来。

诗云:“嚶其鸣矣,求其友声。”这是我们的心声。

中国科学院院士
华中理工大学学术委员会主任

杨叔子

于华工园内

1999年5月15日

前 言

进入 21 世纪,随着信息时代的来临,科学技术的发展更加迅速.测试技术作为人们认识客观世界的一个重要手段也显得更加现代化.不但工业过程要依靠各种先进的测量方法来实现自动控制;各种更为复杂的科学实验要通过测量提供可靠的数据;即使在计算机和计算科学迅猛发展的今天,各种数学模型和数值计算的结果也需要测量验证.

步入新世纪,作为测试技术的一个重要分支——动力工程测试技术的内涵也发生了深刻的变化.首先在测试的范围上有了很大的扩展.随着动力工程和工程热物理学的发展,动力工程测试技术已由传统的热工量的测量拓宽到以热工量为主也包含电学量、力学量和光学量的测量.

其次测量的物理量的类型也有了很大的变化,即以测量工程量(如温度、压力、流量、流速、转速、功率、浓度、水位、料面、气体成分、噪声值、振动频率等)为主,发展到更多的物理量(如导热系数、粘性、热扩散系数、汽化热、融化热、凝固热、密度、膨胀系数、表面张力、润湿角、孔隙率、堆积角、折射率、发射率、吸收率、反射率、透射率等)和过程量(如传热系数、表面传热系数、阻力系数、空泡份额、滑移比等)的测量.

近代动力工程测试技术的发展呈现以下特点:

1. 在测试方法上,由接触测量向非接触测量发展.例如传统的测温、测速方法都是接触式的,而近代的激光测速、激光测温都是非接触式的,这种非接触式的测量方法,避免了传感器对被测物理量场的干扰,代表了当今测量技术的发展方向.

2. 在测量的时间域上,由热物理量的静态测量发展为热物理量的动态测量.

3. 在测量的空间域上,由被测物理量个别点的测量发展到整

个热物理量场的测量。

4. 在数据处理上,由被测数据的手工采集或仪表记录发展到计算机采集、储存与处理。

5. 在测量的功能上,由单纯的测量发展到测量与控制相结合,又进一步发展为测量、控制、诊断及图像显示相结合。

由于计算机、激光、红外技术、系统分析技术、信号处理技术、图像处理技术大量应用于动力工程测试技术,为热物理量测试开辟了许多新的领域,注入了大量新的内容。因此动力工程测试技术已经突破了传统热工测试的模式,成为一个集热工测量、光学理论、信号分析、图像处理和计算机可视化等多学科交叉的综合技术。

作者多年来一直从事热物理测试方面的科研和教学工作,并将许多近代测试方法应用于传热传质学、流体力学、燃烧学、多相流动之中。本书将以热工测量为重点全面阐述动力工程近代测试技术的内容,把工程热物理的研究方法,测试系统的动态特性,光学测温、测速,流动显示,信号分析、图像处理及计算机可视化等有机地糅合在一起,并力求反映国内外测试技术近几年的新成就、新发展和新动向。全书贯彻了高起点、多学科、少而精的原则,以利于扩大读者的知识面,开阔思路,提高解决实际测量问题的能力。本书既可作为研究生的教材,也可供从事测试的科技工作者参考。

本书中的有关内容还包含了作者的学生们在攻读博士期间所做的创造性的工作,特别是罗军博士、陈韶华博士、赵绪新博士、程刚博士等,在此作者对他们表示感谢。

作者在测试方面的研究工作还得到国家自然科学基金和教育部的支持,谨向国家自然科学基金委员会和教育部表示衷心的感谢。

鉴于作者的学识和水平有限,不妥之处,敬请指正。

黄素逸

2001年3月于华中科技大学

目 录

第一章 工程热物理研究方法

1-1 测量与误差分析	(1)
一、测量系统的组成	(1)
二、测量误差与测量精度	(3)
三、误差的分析与处理	(4)
1-2 相似模拟方法	(12)
一、相似理论	(12)
二、近似模拟方法	(15)
三、相似模拟应用举例	(18)
1-3 比拟模拟方法	(24)
一、直接比拟模拟	(25)
二、间接比拟模拟	(29)
1-4 数字模拟方法	(33)
一、数学模型的分类	(33)
二、数学模型的建立	(35)
三、数学模型的数字模拟方法	(36)
四、数字模拟方法的应用举例	(46)

第二章 测量系统特性

2-1 测量系统的静态特性	(50)
一、测量系统的基本静态特性	(50)
二、测量系统的静态性能指标	(51)
2-2 测量系统的动态特性	(55)

一、 动态测量系统的数学模型·····	(55)
二、 传递函数·····	(57)
三、 典型测量系统的动态特性·····	(60)
2-3 测量系统的瞬态响应·····	(63)
一、 脉冲响应特性·····	(64)
二、 阶跃响应特性·····	(64)
2-4 测量系统的频率响应·····	(69)
一、 频率特性·····	(69)
二、 一阶测量系统的频率响应·····	(71)
三、 二阶测量系统的频率响应·····	(72)
四、 线性测量系统的频率响应·····	(73)
2-5 测量系统动态特性的标定·····	(74)
一、 频率响应法·····	(74)
二、 阶跃响应法·····	(76)
2-6 测量系统动态性能改进方法·····	(78)
一、 改善一阶测量系统动态性能的方法·····	(79)
二、 改善二阶测量系统动态性能的方法·····	(80)
三、 动态补偿滤波器·····	(81)

第三章 传感器

3-1 温度传感器·····	(85)
一、 热电阻传感器·····	(85)
二、 热电偶传感器·····	(89)
三、 晶体管温度传感器·····	(92)
四、 石英晶体传感器·····	(94)
3-2 压力传感器·····	(95)
一、 电阻应变式压力传感器·····	(95)
二、 压阻式压力传感器·····	(98)
三、 压电式压力传感器·····	(100)

四、 电位器式压力传感器	(102)
五、 电容式压力传感器	(103)
3-3 湿度传感器	(104)
一、 氯化锂电阻式湿度传感器	(105)
二、 氯化锂露点式湿度传感器	(106)
三、 电容式湿度传感器	(107)
四、 Fe_3O_4 胶体湿度传感器	(108)
五、 $\text{MgCr}_2\text{O}_4\text{-TiO}_2$ 湿度传感器	(108)
3-4 浓度传感器	(110)
一、 热导式气体浓度传感器	(110)
二、 热磁式氧量传感器	(111)
三、 氧化锆氧量传感器	(114)
3-5 速度和流量传感器	(115)
一、 热线风速仪	(116)
二、 涡轮流量计	(119)
三、 涡街流量计	(121)
四、 电磁流量计	(122)
3-6 转换器	(124)
一、 模拟-数字(A/D)转换器	(125)
二、 数字-模拟(D/A)转换器	(130)

第四章 热成像探测技术

4-1 热辐射的基本知识	(134)
一、 电磁波谱	(134)
二、 发射率、吸收率、反射率、透射率	(136)
三、 辐射的基本定律	(138)
四、 辐射在大气中的传输	(140)
4-2 热成像系统	(142)
一、 热成像原理	(142)

二、热成像系统的类型	(143)
三、热成像系统的基本参数	(149)
4-3 成像探测器	(151)
一、成像探测器的类型	(152)
二、成像探测器的工作条件	(156)
三、成像探测器的性能参数	(157)
四、对成像探测器的要求	(160)
五、常用成像探测器	(160)
4-4 热成像测量物体表面温度	(163)
一、热成像测温的优点	(163)
二、被测物体发射率对测温的影响	(163)
三、背景对测温的影响	(168)
四、大气对测温的影响	(169)
五、工作波长的选择	(170)
六、红外热成像系统的温度标定	(171)
七、热成像系统的探测距离	(172)
八、红外探测器的致冷装置	(173)
九、红外热成像系统的测温应用	(173)

第五章 干涉测量技术

5-1 干涉测量的光学基础	(177)
一、几何光学的基本原理	(177)
二、光的干涉现象和相干条件	(183)
三、相干光的产生	(186)
四、光源的相干性	(190)
五、激光	(192)
5-2 经典干涉测量技术	(195)
一、迈克尔逊干涉仪	(195)
二、台曼干涉仪	(197)

三、 马赫-曾德干涉仪	(198)
四、 法布里-珀罗干涉仪	(204)
五、 双镜干涉仪	(206)
六、 瑞利干涉仪	(207)
5-3 现代干涉测量技术	(208)
一、 全息干涉测量	(209)
二、 散斑干涉测量	(230)
5-4 干涉图像的处理	(244)
一、 干涉条纹的前处理	(244)
二、 干涉条纹位移量的判读	(248)
5-5 三维流场的层析干涉测量	(252)
一、 三维流场多方向干涉数据获取方法	(253)
二、 三维流场层析干涉图像重建理论	(256)
三、 三维流场层析干涉的常用级数展开方法	(262)
四、 轴对称火焰温度场的实时干涉测量	(271)
5-6 用双激光全息干涉同时测量温度场和浓度场 ...	(276)
一、 测量原理	(277)
二、 光路系统	(278)
三、 理想双激光干涉的计算	(278)
四、 垂直平板周围温度场和浓度场的同时测量	(283)

第六章 激光测速技术

6-1 激光多普勒测速技术	(287)
一、 激光多普勒测速的基本原理	(287)
二、 激光多普勒测速的光学系统	(291)
三、 激光多普勒测速的信号处理系统	(297)
四、 激光多普勒测速技术的应用	(304)
6-2 激光双焦点测速技术	(314)
一、 激光双焦点测速的基本原理	(314)

二、激光双焦点测速的光学系统	(314)
三、激光双焦点测速的电子信号处理系统	(316)
四、激光双焦点测速的数据采集	(319)
五 激光双焦点测速技术的应用	(321)

第七章 颗粒特性的散射测量技术

7-1 颗粒散射的光学基础	(323)
一、光的散射	(324)
二、光的衍射	(326)
7-2 颗粒散射特性	(337)
一、颗粒散射的特点	(338)
二、单颗粒的散射和吸收特性参数	(340)
三、粒子云的辐射特性	(342)
7-3 颗粒散射理论	(344)
一、Mie 理论	(344)
二、颗粒吸收和散射的近似理论	(347)
三、均匀单颗粒散射特性的计算结果	(351)
7-4 粒子云的散射	(353)
一、颗粒尺寸分布曲线	(353)
二、颗粒尺寸分布函数	(354)
三、颗粒粒径分布对平均散射特性的影响	(357)
四 粒子云散射特性的极限情况	(357)
7-5 颗粒平均直径的激光散射测量技术	(358)
一、测量原理	(358)
二、测量系统	(362)
三、测量方法与数据处理	(362)
7-6 激光散射法测定颗粒的尺寸分布	(364)
一、测量原理	(364)
二、测量系统	(368)

三、 三维粒子动态分析仪简介	(369)
----------------------	-------

第八章 流动显示和观测技术

8-1 流动显示原理	(372)
一、 流动显示方法	(372)
二、 照明和记录	(374)
三、 流动图像的计算机显示	(377)
8-2 添加外来物的流动显示技术	(379)
一、 外加粒子的类型	(379)
二、 外加粒子的方法	(381)
三、 流动方向和流动轮廓的显示	(383)
四、 利用示踪粒子测量速度	(386)
五、 速度剖面显示	(387)
六、 表面流动显示	(389)
8-3 流动的光学显示	(392)
一、 概述	(392)
二、 光在非均匀密度场中的偏转	(395)
三、 阴影法	(396)
四、 纹影法	(399)
8-4 附加热或能量的流动显示技术	(402)
一、 引入能量人为地改变密度	(402)
二、 电火花示踪	(403)
三、 低密度流动的显示	(404)
四、 激光诱导荧光法	(405)

第九章 测量信号处理技术

9-1 信号处理基础	(408)
一、 概述	(408)
二、 时域分析和频域分析	(410)