



西安交通大学

XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



“十五”规划教材

热能与动力机械测试技术

主编 厉彦忠 吴筱敏



西安交通大学出版社

XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



西安交通大学“十五”规划教材

XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

责任编辑：李晶 装帧设计：周亮



ISBN 978-7-5605-2406-1



9 787560 524061 >

定价：23.00 元

TK

T393

UNIVERSITY PRESS



西安交通大学



“十五”规划教材

XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

热能与动力机械测试技术

主编 厉彦忠 吴筱敏

参编 王铭华 崔天生

陈花玲 张小栋



西安交通大学出版社

西安

内容简介

本书是西安交通大学“十五规划教材”,是根据国家对新世纪人才培养的要求,结合多年的教学实践经验编写而成。全书共9章分别介绍了热能与动力工程领域中常见物理参数的测量技术和常用仪表,其中绪论和第1章讲述的测量方法与误差分析中着重介绍了测量的相关知识、测量误差概念,第2~第8章分别介绍了力和压力测量、位移与液位测量、温度测量、转速与功率测量、振动与噪声测量、流速与流量测量、成份与微粒测量等,第9章介绍了最新测量技术及其进展。每章后面都给出了思考题与习题,以便于读者加深对内容的理解和掌握。

本书为热能与动力工程专业本科生教材,同样可作为过程装备、建筑环境与设备等相关专业的本科生教材,也可供相关专业的科研和工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

热能与动力机械测试技术/厉彦忠,吴筱敏主编.

—西安:西安交通大学出版社,2007.2

(西安交通大学“十五”规划教材)

ISBN 978-7-5605-2406-1

I. 热... II. ①厉...②吴... III. ①热能—
参数测量②动力机械—参数测量 IV. TK05 TK11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 022879 号

书 名:热能与动力机械测试技术
主 编:厉彦忠 吴筱敏
出版发行:西安交通大学出版社
地 址:西安市兴庆南路10号(邮编:710049)
电 话:(029)82668357 82667874(发行部)
(029)82668315 82669096(总编办)
印 刷:陕西江源印刷科技有限公司
字 数:318千字
开 本:727mm×960mm 1/16
印 张:17.625
版 次:2007年2月第1版 2007年2月第1次印刷
印 数:0 001~3 000
书 号:ISBN 978-7-5605-2406-1/TK·101
定 价:23.00元

版权所有 侵权必究

前 言

“热能与动力机械测试技术”是一门传统的工程类专业基础课,包含内容广泛,涉及领域宽广,它包括一般测量技术、工业检测技术和科学实验技术等综合实验知识,是工业生产及科学研究必不可少的重要内容。该课程具有授课面大、适用范围广、与工程实际结合密切、新的测试技术发展变化快等特点,在国内外众多高等院校中均作为必修课程。多年来,由于各专业所涉及的知识领域不同,所需要的测试仪器和仪表有所差异,因此各专业均采用独自授课,所用教材专业针对性强。为了改变过去狭窄的专业对口的教育观念,调整学生的知识结构,培养具有较宽知识结构和扎实理论基础的复合型人才,适应现代教学的要求,我们编写了这部教材。

1997 年根据教育部关于专业目录调整的精神以及颁布的新专业目录,西安交通大学在能源与动力各专业测试教材的基础上,改变了原先只讲授与本专业有关的实验仪表、实验手段和方法的教材结构,集中了具有普遍意义的基础内容,编写了“热能与动力工程测试技术”教材。

1999 年随着网络教学和多媒体教学的发展,我们在该教材的基础上又制作了适用于远程教育的网络版,同时对原教材进行了适当的补充,增加了新的测量方法和手段,并利用计算机的优势采用了大量的实物照片,用多媒体动画制作了传感器和测试系统的工作原理和工程应用等诸多实例,使其形式和内容都更加丰富多样,生动活泼。该电子版本在 2001 和 2002 年分别获得“全国第六届多媒体教育软件大奖赛优秀奖”和“陕西省教育厅现代教育技术成果一等奖”。

2002 年在学校教学改革项目的支持下,又对原教材进行了较大篇幅的更改,除了加强基础理论知识外,还融入了现代新技术成果,增加了新型测试技术以及各种工程测量的应用实例。其编写的基本定位是,适用热能与动力工程、建筑环境与设备工程本科生学习,注重拓宽基础知识,能够较全面反映当前热能与动力机械制造领域发展的新理论、新方法和新技术,加强工科背景和培养学生工程实践的能力。

本教材提供了文字版和电子版两种形式,其中多媒体电子版可以适用于课堂和网上的多媒体教学,是新一代的教学模式和教学方法,是现代教学的发展方向。其目标是有利于学生创新能力培养和更多、更快地掌握热能与动力机械测试技术和方法。希望该教材的出版能引起使用者的关注与帮

助,在实际使用中不断修订和完善,为我国高等教育事业和热能与动力机械类人才的培养不断做出贡献。

本教材除了可作为热能与动力工程、建筑环境与设备工程等专业的本科生、专科生的课堂教学和网络教学外,还可供工程技术人员及网大学员自学。本教材的建议学时数为 30~60 学时,教师可根据需要内容选择讲授并辅助以相应的实验教学环节。

本书由西安交通大学能源与动力工程学院的厉彦忠教授(绪论、第 1、3、4、9 章),吴筱敏副教授(第 2、5、6 章,参编第 8 章)和王铭华副教授(第 7 章、参编第 1、8 章)共同编写,崔天生副教授、陈花玲教授、张小栋副教授分别参编了第 5、6、9 章的部分内容。厉彦忠、吴筱敏共同担任本书的主编,完成了大纲的规划和全书的统稿。

编者对历年来讲授本课程以及对本教材做出贡献的王子延教授、单贵琴副教授、曹淑珍副教授表示深切的谢意。

编 者

2006 年 8 月于西安交通大学

绪 论

测试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的全过程。只有通过测量才能获得被测参数的未知信息。各行各业都有自己的测试技术问题。本教材专门介绍在热能与动力工程领域内,获得被测参数未知定量信息的专门性知识,作为从事该领域工作的科学技术工作者和工程技术人员必须具备的测试技术基本知识。

测试工作无论对于进行科学研究还是控制生产过程都是必不可少的。任何一项科学研究工作以及校核检定实验,最终必须通过测得一定量的未知信息,然后整理、分析和归纳,最后得出结论。实验参数测取的正确与否是导致结论正确与否的先决条件,对未知参数测取的准确程度决定了实验结论的可信度。在工程技术领域,测取工艺过程参数的信号是监督、调整和控制生产过程的依据,正确的测量是机器设备以及整套生产线正确运行的保证,是反映生产过程安全性及经济性指标的依赖基础。

在各种现代装备系统的制造与实际运行工作中,测量工作内容已占首位,测量系统的成本已达到装备系统总成本的 50%~70%,它是保证现代工程装备系统实际性能指标和正常工作的重要手段,是其先进性能及实用水平的重要标志。以电厂为例,为了实现安全高效供电,电厂除了实时监测电网电压、电流、功率因数进而检测频率、谐波分量等电气量外,还要实时监测发电机组各部位的振动(幅值、速度、加速度)以及压力、温度、流量、液位等多种非电量,并实时分析处理,判断决策,调节控制,以使系统处于最佳工作状态。如果测量系统不够完备,主汽温度测量值有+1%的偏差,则汽机高压缸效率减少 3.7%;若主汽流量测量值有-1%的测量偏差,则电站燃烧成本增加 1%。又如:为了对工件进行精密机械加工,需要在加工过程中对各种参数,如位移量、角度、圆度、孔径等直接相关量以及振动、温度、刀具磨损等间接相关参量进行实时监测,由计算机进行分析处理,然后由计算机实时地对执行机构给出进刀量、进刀速度等控制调节指令,才能保证预期高质量要求,否则得到的将是次品或废品。据有关资料统计:大型发电机组需要 3 000 多只传感器及其配套监测仪表;大型石油化工厂需要 6 000 多只传感器及其配套监测仪表;一个钢铁厂需要 20 000 多只传感器及其配套监测仪器;一辆汽车也需要 30~100 只传感器及其配套监测仪器。由此可见,测试技术在工程技术领域中的重要地位。随着机械设备向大容量、多参数方

向的日益发展,以及其自动化水平的日益提高,机械工程中各重要参数的测点数量会越来越多,而且对测量准确性、可靠性的要求也越来越高。

当今世界科学技术发展日新月异,自从 20 世纪 70 年代以大规模集成电路为基础的微机问世以来,使测试仪表产生了巨大变革,与计算机相配套的测量手段也逐渐普及,它具有自动反馈信息,自动调节,自动控制和自动记录的优越性,从而使测试技术前进了一大步。另一方面,测试技术的发展推动了科学研究的发展,科学技术的发展又对测试技术提出了新的要求。尤其在尖端学科、边缘学科和待开发领域,更是要求测试技术进一步发展来适应这些新的要求。可见,测试技术是一门发展中学科,它随着科学技术水平的提高而不断向高水平、高精度、现代化方向发展。

国民经济各部门的生产是各不相同的,但它们都离不开测试工作。根据各个生产部门不同的要求,我们可以把需要测量的参数大体归结为以下几类:有长度、时间、质量等基本量;有温度、热量等热学量,电流、电压、磁场强度等电磁量;有光学量、声学量以及化学成分等等。上述各种参数并无行业部门的界限,如“温度”在电力、化工、冶金、制冷、农业、航天、医药等部门中都是重要参数,所以通用性是测试技术的一大特点。另外,各类型的物理量之间也可以相互转化,如温度可以转化为压力测量,也可以转化为电磁量以及其它形式的量进行测量。同样,压力也可以转化为温度或另外形式的量进行测量。还有由于被测对象的不同,测量条件的不同和对测量结果要求的不同,尽管是同一种参数,其测量方法、设备和系统就可能完全不一样。如温度参数就可能属于物体表面温度、高速气流温度和颗粒状物体温度等不同的测量对象,有高温、中温、低温以及极低温等不同的测量范围,还有精密测量和一般测量这些不同的精度要求,等等。在实际测量工作中必须根据具体情况,具体分析,区别对待,以至选用不同的测量方法和测量设备。

本课程的主要任务是介绍如何正确测得在热能与动力工程领域中经常遇到的热工参数,包括测量基本理论与方法,所用传感器的原理和性能,仪表的选用和测点布置,测量系统的组成及误差分析,以及各类仪表的分度和校验等。由于测量仪表种类繁多,性能也不同,各相应章节中会选取一些最常用的且普及型的仪表介绍。

目 录

绪 论

第 1 章 测量方法与误差分析	(1)
1.1 测量的基本知识	(1)
1.1.1 测量的概念	(1)
1.1.2 测量基本方法	(1)
1.2 测试系统的组成	(3)
1.2.1 传统测试系统的组成	(3)
1.2.2 现代测试系统的组成	(4)
1.2.3 测试技术的发展	(5)
1.3 测量仪表的技术指标	(5)
1.3.1 仪表的使用性能	(5)
1.3.2 仪表的静态特性	(6)
1.3.3 仪表的动态特性	(8)
1.3.4 仪表的选用	(13)
1.4 测量误差及误差分类	(14)
1.4.1 测量误差基本概念	(14)
1.4.2 测量误差分类	(15)
1.4.3 测量的精确度与不确定度	(15)
1.5 随机误差分析	(17)
1.5.1 随机误差概率的概念	(17)
1.5.2 误差的估计和处理	(19)
1.5.3 测量结果的置信问题	(20)
1.5.4 异常数据处理	(21)
1.6 系统误差分析	(23)
1.6.1 系统误差的判断	(23)
1.6.2 系统误差的估计方法	(23)
1.6.3 系统误差的消除方法	(24)
1.7 测量误差的估计	(24)
1.7.1 直接测量结果的误差估计	(24)
1.7.2 间接测量结果的误差估计	(25)

1.8 测量结果的数据处理	(26)
1.8.1 最佳测量方案选择	(26)
1.8.2 测量结果的表示法	(26)
1.8.3 测量结果的曲线拟合	(27)
思考题与习题	(29)
第2章 力和压力测量	(31)
2.1 应变电阻效应及传感器	(31)
2.1.1 导电材料的应变电阻效应	(31)
2.1.2 应变片的种类	(33)
2.1.3 应变片的测量电路和温度补偿	(34)
2.1.4 应变式测力传感器	(36)
2.2 压电效应和压力传感器	(38)
2.2.1 压电效应	(38)
2.2.2 压电式压力传感器	(39)
2.2.3 压电式压力传感器的测量电路	(40)
2.2.4 压电式压力传感器应用中的一些问题	(43)
2.2.5 压力传感器的标定	(43)
2.3 液柱式压力计	(46)
2.3.1 U形管压力计	(46)
2.3.2 斜管微压计	(46)
2.3.3 液柱式压力计的误差	(47)
2.4 机械式压力计	(48)
2.4.1 弹簧管式压力计	(49)
2.4.2 薄膜式压力计	(50)
2.4.3 机械式压力计的误差和使用时应注意的问题	(50)
思考题与习题	(51)
第3章 位移与液位测量	(52)
3.1 电位计式位移传感器	(52)
3.2 电感式位移传感器	(53)
3.2.1 结构和工作原理	(53)
3.2.2 差动式电感位移传感器	(54)
3.2.3 差动变压器式位移传感器	(56)
3.3 电涡流式位移传感器	(57)

3.3.1	结构与工作原理	(57)
3.3.2	电涡流传感器测量系统	(58)
3.4	电容式位移传感器	(60)
3.4.1	结构与工作原理	(60)
3.4.2	电容式传感器的测量电路	(63)
3.4.3	电容式传感器的特点及应用	(64)
3.5	浮子式液位计	(64)
3.5.1	机械位移式液位计	(66)
3.5.2	电传位移式液位计	(67)
3.5.3	变浮力式液位计	(67)
3.6	差压式液位计	(68)
3.7	电阻式液位计	(70)
3.7.1	热线式液位计	(70)
3.7.2	碳电阻液位计	(71)
3.7.3	超导液位计	(71)
3.8	电容式液位计	(72)
	思考题与习题	(75)
第4章	温度测量	(77)
4.1	温度测量基础	(77)
4.1.1	温度概念	(77)
4.1.2	温度测量基本原理	(77)
4.1.3	常用温度计及其使用范围	(78)
4.1.4	温标及其传递关系	(78)
4.2	玻璃管式液体温度计	(83)
4.3	热电偶温度计	(84)
4.3.1	热电偶测温基本原理	(85)
4.3.2	热电偶的基本定律	(87)
4.3.3	热电偶参比端温度补偿	(88)
4.3.4	热电偶的分类	(90)
4.3.5	热电势的测量	(93)
4.3.6	热电偶测温技术	(97)
4.3.7	热电偶测温误差分析	(99)
4.4	电阻温度计	(101)
4.4.1	电阻法测温原理	(101)

4.4.2	热电阻材料选择	(102)
4.4.3	热电阻种类	(102)
4.4.4	热电阻阻值的测量	(107)
4.4.5	电阻温度计测温误差分析	(110)
4.5	其它温度计	(111)
4.5.1	二极管温度计	(111)
4.5.2	电容温度计	(112)
4.5.3	辐射高温计	(112)
4.6	温度仪表的标定	(114)
4.6.1	温度计标定的意义	(114)
4.6.2	温度计标定基本方法	(114)
	思考题与习题	(115)
第5章	转速与功率测量	(118)
5.1	转速测量	(118)
5.1.1	磁电式、光电式和霍尔式转速传感器	(118)
5.1.2	数字式频率计	(123)
5.1.3	闪光测速仪	(125)
5.1.4	机械式转速表	(126)
5.1.5	发电式转速表	(127)
5.2	功率测量	(128)
5.2.1	扭矩测量的一般概念	(128)
5.2.2	应变式扭矩传感器	(129)
5.2.3	相位差式扭矩仪	(132)
5.3	测功器在发动机功率测量中的应用	(133)
5.3.1	水力测功器	(133)
5.3.2	电力测功器	(135)
5.3.3	电涡流测功器	(137)
5.4	电动机输入功率的测量	(141)
5.4.1	基本工作原理	(141)
5.4.2	功率表的选择和正确使用	(142)
5.4.3	用功率表测量电动机的输入功率	(145)
	思考题与习题	(149)

第 6 章 振动与噪声测量	(151)
6.1 振动测量传感器	(151)
6.1.1 振动位移传感器	(151)
6.1.2 振动速度传感器	(152)
6.1.3 振动加速度传感器	(153)
6.1.4 振动传感器的校准	(155)
6.2 常用振动测量仪器	(156)
6.2.1 测振仪	(156)
6.2.2 频谱分析仪	(158)
6.3 动态特性测量系统	(159)
6.3.1 脉冲激励	(159)
6.3.2 稳态正弦激励与随机激励	(160)
6.4 噪声测量基础	(162)
6.4.1 噪声测量的主要物理参数	(162)
6.4.2 噪声级的合成	(163)
6.4.3 背景噪声的扣除	(164)
6.4.4 噪声的频谱测量	(165)
6.4.5 噪声的主观评价	(166)
6.5 噪声测量仪器	(167)
6.5.1 传声器	(167)
6.5.2 声级计	(169)
6.6 声功率与声强测量技术	(170)
6.6.1 声功率测量技术	(170)
6.6.2 声强测量技术	(171)
思考题与习题	(173)
第 7 章 流速与流量测量	(174)
7.1 流速测量	(174)
7.1.1 测压管测速原理	(174)
7.1.2 总压管和静压管	(175)
7.1.3 毕托管	(178)
7.1.4 圆柱形复合测压管	(179)
7.1.5 可压缩性流速测量	(181)
7.1.6 测压管标定	(182)
7.2 热线风速仪	(184)

7.2.1	热线风速仪探头	(184)
7.2.2	热线风速仪工作原理	(185)
7.2.3	热线风速仪的基本方程	(185)
7.2.4	热线风速仪的动态特性	(186)
7.2.5	热线风速仪的标定	(187)
7.3	流量测量方法	(188)
7.3.1	流量测量概述	(188)
7.3.2	容积式流量测量方法	(189)
7.3.3	速度式流量测量方法	(191)
7.3.4	质量流量计	(196)
7.4	节流式流量计	(197)
7.4.1	标准节流装置	197
7.4.2	标准节流装置流量公式	(200)
7.4.3	标准节流装置设计	(203)
7.5	流量计的标定	(206)
7.6	超声波测量	(208)
7.6.1	多普勒超声波流量计组成	(209)
7.6.2	超声波多普勒测量原理	(210)
7.6.3	超声波流量计的特点	(213)
思考题与习题		(213)
第8章 成分与微粒测量		(215)
8.1	热磁式氧量计	(215)
8.2	气体成分分析仪	(219)
8.2.1	热导式二氧化碳分析仪	(219)
8.2.2	红外线气体分析仪	(220)
8.2.3	气相色谱分析仪	(222)
8.3	碳烟测量	(225)
8.4	微粒测量	(229)
8.4.1	扫描电迁移率粒度谱仪	(230)
8.4.2	颗粒物空气动力学粒径谱仪	(232)
思考题与习题		(234)
第9章 最新测量技术及其进展		(236)
9.1	计算机测试系统	(236)

9.1.1 计算机测试系统的应用	(236)
9.1.2 计算机测试系统的组成	(237)
9.1.3 计算机数据采集技术	(240)
9.2 智能仪表	(244)
9.2.1 智能仪表的基本特征	(244)
9.2.2 智能仪表的结构类型	(245)
9.2.3 智能仪表的组成	(246)
9.3 虚拟仪器	(251)
9.3.1 概述	(251)
9.3.2 LabVIEW 虚拟仪器开发系统	(253)
9.3.3 虚拟仪器设计举例	(256)
9.4 现代测量技术	(258)
9.4.1 激光测量技术	(258)
9.4.2 红外测量技术	(261)
思考题与习题	(266)
参考文献	(267)

第 1 章

测量方法与误差分析

1.1 测量的基本知识

1.1.1 测量的概念

测量就是用专门的仪器和设备,靠实验和计算方法求得被测量的数值(包括大小和正负)。测量的目的是为了在限定的时间内尽可能正确地收集被测对象的未知信息,以便掌握被测对象的参数及控制生产过程。

被测量也叫被测参数。要知道某些热工参数的大小就要对其进行检测,这些待检测的量就叫被测量,如温度、压力等。在测量过程中,被测量可能是随时间而变化的,这种被测量是动态量,其变化规律可能是多种多样的。如果被测量不随时间变化就是静态量,严格地讲,不存在绝对的静态量。实际中,把某些随时间变化不大或相对测量时间变化不大的动态量当作静态量处理。

被测量与其单位用实验方法进行比较,需要一定的设备,它输入被测量,输出被测量与单位的比值。这种测量设备就叫测量仪表。

要知道被测量的值,必须利用测量仪表对其检测,被测参数通过仪表以能量形式的一次或多次转化和传递,最后显示出被测量的测量值,这一过程就叫测量过程。

测量、计量、测试是三个密切关联的技术术语。测量是以确定被测物属性量值为目的的全部操作;计量的内容包括了计量理论、计量技术与计量管理,并主要体现在:计量单位与单位制、计量器具,包括复现计量单位的计量基准、标准器具以及普通(工作)计量器具、量值传递、溯源与检定测试、计量管理等等;测试则是具有试验性质的测量,或者可理解为测量和试验的综合。测试技术是指测试过程中所涉及的测试理论、测试方法、测试设备等等,本课程的主要研究对象是测试技术。但是,由于测试与测量紧密相关,在实际使用中往往将测试与测量并不严格区分。

1.1.2 测量基本方法

测量方法就是如何实现被测量与单位比较的方法。对动态量和静态量的测量分别叫动态测量和静态测量。本教材主要介绍静态测量方法,同时也介绍一些变

化速度不大的动态测量问题。

测量方法的分类形式很多。例如根据在测量过程中,被测量是否随时间变化分为动态测量和静态测量;按测量结果与被测量的关系分为直接测量和间接测量;按测量原理分为偏差式测量和零位测量;按测量元件是否与被测介质接触分为接触式测量和非接触式测量;按测量系统是否向被测对象施加能量分为主动式测量和被动式测量等。

1. 直接测量和间接测量

(1) 直接测量

凡是用仪表直接测量出被测量的数值,无需经过函数关系再运算的测量方法叫直接测量。如压力表直接测出压力,温度计直接读出温度。

直接测量并不意味着就是用直读式仪表进行测量,许多仪表虽然不一定是直接从分度尺上获得被测量之值,但因参与测量的对象就是被测量本身,所以仍属于直接测量。如将压力、温度信号转化为电信号,通过对这些电信号的测量来反映压力和温度值仍属于直接测量。

直接测量的优点是测量过程简单而迅速,是工程技术中采用得比较广泛的测量方法。

(2) 间接测量

对一个或几个与被测量有确切函数关系的物理量进行直接测量,然后利用代表待确定量与这些直接测量量之间函数关系的公式、曲线或表格求出被测量的值,这类测量叫间接测量。例如已知一管道的横截面积为 F ,通过直接测量流体在管内的平均流速 V ,可以计算出流量 Q ,对于流量值来说就是间接测量。

间接测量手续较多,花费时间也较多,一般在直接测量很不方便,误差较大或不能进行直接测量等情况下才采用。

2. 接触式测量与非接触式测量

(1) 接触式测量

仪表的一部分(传感器)与被测对象接触,并承受对象参数的作用才能给出测量结果的测量方法叫接触式测量。如弹性压力计测介质压力,玻璃管液体温度计测介质温度等。

接触式测量方法的优点是测量系统结构简单,如果与被测介质达到热平衡,测量值便能准确反映介质的参数。

(2) 非接触式测量

仪表的敏感元件不必直接与被测对象接触而给出测量结果的测量方法叫非接触式测量。例如用光学高温计测量温度。