



全国高等农业院校教材
全国高等农业院校教学指导委员会审定

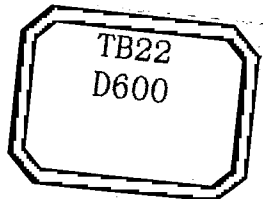
工程测试技术

丁至成 王书茂 杨世凤 主编



中国农业出版社

TB22
D600



全国高等农业院校教材
全国高等农业院校教学指导委员会审定

工程测试技术

丁至成 王书茂 杨世凤 主编

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程测试技术 / 丁志成, 王书茂, 杨世凤主编. —北京: 中国农业出版社, 2004.6

全国高等农业院校教材

ISBN 7-109-09005-1

I. 工... II. ①丁...②王...③杨... III. 工程测量—高等学校—教材 IV. TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 024864 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100026)

出版人: 傅玉祥

责任编辑 彭明喜

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×960mm 1/16 印张: 25.25

字数: 449 千字

定价: 30.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

内 容 摘 要

本教材是全国高等农业院校“十五”规划教材，是根据教育部农业工程类工程测试技术课程教学的基本要求而编写的。

全书共八章，前四章介绍工程测试必备的基础知识，主要内容包括测试系统及其基本特性，测量误差分析，传感器技术，信号的调理、记录和传输，信号分析与处理；第五、六、七章分别讲述机械工程、食品工程和环境工程典型参数的测量技术、方法和仪器，是前四章基础知识的应用和深化，可供不同专业选用；第八章扼要介绍工程测试技术的新发展，反映当代测试技术的最新成果和发展动向。

本教材可作为机械设计制造及其自动化、农业机械化及自动化、车辆工程、交通运输、热能与动力工程、农业工程、食品科学与工程、环境工程、测控技术与仪器等专业的测试技术课程的教材，也可供相关专业的研究生、教师和工程技术人员参考。

前 言

科学技术的进步将人类社会推向了信息时代。测试技术作为获取信息的重要手段，渗透到社会的各行各业，在很大程度上反映着一个国家的经济和科学技术的发展水平，因而受到国内外教育部门的普遍重视，将其定为研究生和大学生乃至科技人员必须掌握的一项基本技能。以非电量的电测量为核心的测试技术涉及到近代科学的广泛知识，是一门综合性的应用学科。实践表明，将测试技术列为研究生的学位课程和本科教学的主干课程，对于培养现代化的建设人才十分必要。

本书是由全国高等农业院校教学指导委员会农业工程学科组审议推荐，在参考原《农机测试技术》统编教材的基础上重新编写的，定名为“工程测试技术”，是全国高等农业院校农业工程类专业“十五”规划教材，也适用于其他相关专业。课程性质定位为专业基础课。

全书共分八章，前四章介绍工程测试必备的基础知识，主要内容包括测试系统及其基本特性，测量误差分析，传感器技术，信号的调理、记录和传输，信号分析与处理；第五、六、七章分别讲述机械工程、食品工程和环境工程典型参数的测量技术、方法和仪器，是前四章基础知识的应用和深化，可供不同专业选用；第八章扼要介绍工程测试技术的新发展，反映当代测试技术的最新成果和发展动向。

考虑到我国农业工程类专业近年来经历了重大调整，专业重组和口径拓宽，各学科间进一步相互渗透融合，以及现有农业工程类某些专业尚缺乏对口测试技术教材的状况，本教材在专业覆盖面方面适当扩宽，除原有机械工程测试外，增加了食品工程和环境工程测试的内容，测试理论也趋向实用化。

为适应我国现代化农业工程教育的需要,本着教育面向未来的宗旨,对1983年出版的《农机测试技术》的陈旧内容进行了全面的、大量的删节和修改,同时增添了许多新内容,例如第二章的生物与仿生传感器;第三章的恒流源电桥和信号变换,数字记录技术;第四章的小波分析理论;第五章的振动诊断技术;第六章的食品成分快速检测技术;第七章的环境工程检测技术;第八章的虚拟仪器、精确农业和图像处理技术等内容,以适应现代测试技术发展的需求。

本教材由中国农业大学、天津科技大学、西南农业大学、西北农林科技大学、清华大学等五院校联合编写。其中绪论、第一章、第五章和第八章的第三节由中国农业大学王书茂教授编写;第二章和第八章的第一、二节由天津科技大学杨世凤教授编写;第三章由中国农业大学丁至成教授编写;第四章由清华大学王波高级工程师编写;第六章由西北农林科技大学郭康权教授编写;第七章由中国农业大学丁至成教授和西南农业大学陈贤源副教授编写;清华大学陆秋海副教授参编了第四章的第六节;西南农业大学祝诗平博士参编了第六章的第五节。

本教材的编写大纲是在中国工程院汪懋华院士指导和亲自参与下制订的。

本书由北京航空航天大学樊尚春教授主审。

本教材在编写过程中,参考、引用了许多专家学者的论著和教材;西北农林科技大学邵维民教授和清华大学程建刚教授对教材的编写大纲及具体内容提出了许多宝贵的意见;中国农业大学博士生赵颖参与了部分文稿的录入工作;作者在此一并深表感谢。

由于水平所限,教材中的错误与不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2004年3月

目 录

前言

绪论	1
一、测试技术及其发展	1
二、测试系统的组成	2
三、学科特点和重点内容	3
第一章 测试系统的基本特性	5
第一节 线性系统的基本特性	5
第二节 测量装置的静态特性	6
一、灵敏度	6
二、分辨力与分辨率	7
三、线性度	7
四、回程误差	8
五、稳定性和漂移	8
第三节 测量装置的动态特性	9
一、传递函数	9
二、频率响应函数	10
三、脉冲响应函数	11
四、环节的串联和并联	11
五、一阶、二阶系统的特性	13
第四节 测量装置的响应	18
一、系统对任意输入的响应	18
二、系统对单位阶跃输入的响应	19
第五节 测量装置的不失真测试	21
一、失真测试的原因	21
二、实现不失真测试的条件	22
三、测试系统的不失真设计	23

第六节 测量装置动态特性的测试方法	23
一、频率响应法	24
二、阶跃响应法	25
第七节 测试系统误差分析	27
一、测量误差的基本概念	27
二、误差的分类	28
三、随机误差	29
四、系统误差	33
五、粗大误差	36
六、测量结果的处理步骤	39
第二章 传感器	41
第一节 概述	41
第二节 电阻式传感器	42
一、电位器式传感器	42
二、电阻应变片式传感器	43
三、压阻式传感器	46
第三节 电感式传感器	46
一、自感式传感器	47
二、互感式传感器(差动变压器)	48
三、电涡流式传感器	50
第四节 电容式传感器	52
一、工作原理和主要类型	52
二、电容式传感器的测量电路	54
三、电容式传感器的应用	55
第五节 磁电式传感器	57
一、磁电感应式传感器	57
二、霍尔式传感器	59
第六节 压电式传感器	62
一、工作原理	62
二、压电材料	63
三、压电式传感器的等效电路及负载特性	63
第七节 光电式传感器	64
一、光电效应	64

二、光电传感元件	65
三、光电传感器的检测电路及其应用	68
第八节 热电式传感器	69
一、金属热电阻	70
二、半导体热敏电阻	70
三、热电偶	73
第九节 半导体式传感器	77
一、湿敏式传感器	78
二、气敏式传感器	79
三、色敏式传感器	79
四、CCD 图像传感器	81
第十节 生物传感器	83
一、生物传感器概述	83
二、生物活性物质固化技术与测量方式	85
三、酶传感器	88
四、微生物传感器	88
五、免疫传感器	89
六、生物传感器的应用及发展方向	90
第十一节 传感器的选用原则	91
第三章 信号调理、记录和传输	94
第一节 电桥电路	94
一、直流电桥及其平衡条件	94
二、交流电桥及其平衡条件	96
三、电感电桥和电容电桥	97
四、恒流源电桥	99
五、等臂电桥的加减特性	99
六、不等臂对称电桥的特性	102
七、多个电桥的串、并联	104
八、电桥的非线性误差	105
九、电桥的读数方法	105
第二节 信号的放大	106
一、测量放大器	107
二、载波放大器	111

三、电荷放大器	116
第三节 信号的变换与滤波	119
一、信号变换	119
二、信号滤波	124
第四节 信号的记录	130
一、磁带记录器	130
二、磁盘记录与光盘记录	134
三、光线示波器	141
四、笔记录仪	141
第五节 测量信号的传输	142
一、测量信号的长线传输	142
二、测量信号的无线传输	145
三、回转工作部件测量信号的传输——集流环	150
第四章 信号分析与处理	154
第一节 信号的基本特征	154
一、信号分类	154
二、周期信号	155
三、瞬态信号	157
四、随机信号	159
第二节 信号的频域特性分析	161
一、周期信号的频谱	161
二、傅里叶变换	164
三、非周期信号的频谱	165
四、自功率谱、自功率谱密度、自能量谱密度	167
五、信号的互功率谱	169
六、频响函数、相干函数和脉冲响应函数	171
第三节 信号的相关分析	173
一、相关概念	173
二、自相关函数	174
三、互相关函数	176
第四节 信号的幅值域分析	177
一、概率密度函数	178
二、概率分布函数	178

三、高斯过程	179
四、概率密度函数与信号特征参数的关系	180
第五节 信号处理技术基础	180
一、数字信号分析仪的一般原理	181
二、模/数和数/模转换	181
三、采样定理及抗混滤波器	184
四、加窗、能量泄漏及栅栏效应	186
五、数字信号分析仪中的平均处理	190
第六节 小波变换简介	192
一、连续小波变换	192
二、小波变换的性质	193
三、小波逆变换(反演)	194
四、几种常见的的基本小波	194
第五章 机械工程典型参数测量技术	197
第一节 力和转矩的测量	197
一、力的测量	197
二、转矩测量	215
第二节 位移测量	218
一、变阻式位移测量原理	219
二、应变片式位移测量原理	221
三、电感式位移测量原理	223
四、磁敏式位移测量原理	225
五、超声式位移测量原理	226
六、光栅式数字位移测量原理	227
第三节 速度测量	230
一、角速度测量	230
二、线速度测量	235
第四节 振动测量	242
一、常用测振传感器的原理与特点	242
二、惯性式传感器的测振原理	244
三、压电式加速度传感器的结构与安装	246
四、振动的激励	249
五、振动参数的测试方法	254

六、测振装置的标定	257
第五节 噪声测量	260
一、声学的基本概念	260
二、声级计	264
三、噪声的测量方法	266
四、测量数据处理	269
第六节 机械故障的振动诊断方法	273
一、机械故障诊断概述	273
二、机械故障的振动诊断技术	275
三、典型零部件的故障特征与诊断	279
第六章 食品工程典型参数测量技术	284
第一节 食品工程测量概述	284
第二节 温度测量	285
一、温度标准	285
二、温度测量方法	286
三、热流测量	292
第三节 压力、流速、流量测量	294
一、压力测量	294
二、真空测量	298
三、流速测量	301
四、流量测量	303
五、压力和流量测量装置的标定	307
第四节 湿度、含水量的测量	309
一、湿度测量	309
二、含水量测量	314
第五节 食品成分的快速检测技术	316
一、近红外光谱吸收法快速、无损检测食品成分	317
二、基于水果声学特性的无损检测技术	321
三、基于 X 射线分析的无损检测技术	322
四、基于水果电、磁特性的无损检测技术	322
第七章 环境工程典型参数测量技术	325
第一节 环境污染	325

一、水污染	325
二、大气污染	327
三、土壤污染	327
四、放射性污染	328
五、噪声污染	328
六、环境生物污染	328
第二节 环境工程监测中常用的几种仪器及其分析方法	328
一、仪器分析方法的分类	329
二、环境污染物质的分析监测方法或仪器	329
第三节 分光光度法	333
一、光的吸收定律(朗伯—比尔定律)	333
二、吸收光谱曲线	333
三、紫外可见分光光度计	334
四、红外分光光度计	336
五、原子吸收分光光度计	339
第四节 色谱分析法	341
一、气相色谱法	341
二、气相色谱仪	342
三、高效液相色谱法	346
四、高效液相色谱仪	347
第五节 电位分析法	347
一、参比电极	348
二、指示电极	348
三、电位分析法的应用	348
第六节 物理分析法	351
一、废气成分分析	351
二、CO ₂ 气体传感器及其应用	353
三、颗粒污染物质——飘尘的测定	355
四、放射性剂量的测量	355
第七节 人工气候环境的监测与控制	357
一、人工气候室环境因素的监测	357
二、人工气候室的环境控制	358

第八章 工程测试技术的新发展	361
第一节 虚拟仪器技术	361
一、虚拟仪器概述	361
二、虚拟仪器的构成与特点	362
三、虚拟仪器开发平台简介	364
四、虚拟仪器的发展	371
第二节 精确农业中的测试技术	371
一、精确农业概述	371
二、GPS 定位组成、定位原理和特点	372
三、作物产量分布图的生成	377
四、农业生物信息采集技术	380
第三节 图像处理在农业中的应用	381
一、图像处理技术概述	381
二、计算机图像处理系统	381
三、数字图像处理的基本内容	382
四、图像处理在农业中的应用	383
主要参考文献	387

绪 论

一、测试技术及其发展

测试是测量与试验（实验）的简称。工程测试技术是基于测试理论，着重实际的一门应用性学科。

测试借助于专门的仪器设备，通过适当的实验方法与必需的信号分析及数据处理，得到研究对象的有关信息，提供给观察者或用于系统控制。因此，测试技术属于信息科学范畴，是信息技术三大支柱（测试控制技术、计算机技术和通讯技术）之一。

测试具有试验性质，这是基于人们对未知对象的研究过程需要试验，并且针对不同对象的检测方法本身也需要研究。理论指导试验，试验翻过来验证和修正理论。

测试是人类认识客观世界的手段，是科学研究的基本方法。测试技术的发展推动了科学技术的进步，翻过来科学技术的进步又为测试技术的发展奠定了基础。一般认为，测量测试仪器发展至今，大致可分为四个阶段：

第一阶段：从 17 世纪工业革命到 20 世纪中叶，是基于物理定律的模拟仪表。典型的仪表如伏特表、安培表、电能表、压力表、温度表等，进而又发明了电桥电位差计等磁电式模拟仪表、机械式记录仪器等。这些仪表基本上解决了当时很多物理量的测量问题。

第二阶段：当 20 世纪 50 年代出现了电子管、60 年代发明了晶体管后，便产生了以电子管或晶体管为基础的分立元件式仪表。如以应变仪、放大器、示波器等为代表的电子仪器。同时测试理论也有了长足的发展，它与电子仪器的有机结合，使测试技术产生了质的飞跃。

第三阶段：20 世纪 70 年代出现的集成电路，将数字技术成功地运用到测量仪器。这一阶段开始，才使得电子技术、控制技术、集成电路和计算机技术真正融为一体，形成现代测试技术的雏形。目前使用的测试仪器大多属于起始于这一阶段的产物。

第四阶段：从 20 世纪 80 年代开始，以微处理器为中心的智能型仪表相继

问世，成为现代测试技术的发展时期。如从传感器、信号条理、结果显示以及到对外控制等，都可以做到一体化、智能化。测试仪器之间的通讯也实现了标准化和数字化。

近年来，随着数字信号处理技术（Digital Single Processor, DSP）、系统辨识技术、计算机技术等分支学科的飞速发展，测试技术与计算机深层次的结合，正引起测试仪器领域一场新的革命，一种全新的仪器结构概念导致新一代仪器——虚拟仪器的出现，进而产生集成仪器，由单一功能仪器向多功能组合仪器和智能化仪器系统的方向发展。

在科学技术与社会生产高度发达的今天，要求与之适应的测试仪器与系统错综复杂，被测对象的跨度既广泛又居多样性，但是将测试技术的任务归纳起来主要有以下几个方面：

- (1) 能够对被测量进行有效的转换，使之适宜测量；
- (2) 对被测量进行适当的调理，强化有用信息，使之易于传输；
- (3) 测量结果能够被人们所接受，或用于控制环节；
- (4) 对动态信号能够进行不失真的实时动态测量；
- (5) 实现信号分析，从复杂的信号中分离和计算出所需要的参数。

二、测试系统的组成

测试系统（图 0-1）通常包括：传感器、信号调理、显示、记录以及信号分析与处理等。根据不同的测试目的，组成测试系统的功能单元可多可少，可以是单台仪器、也可以是多台仪器的组合。

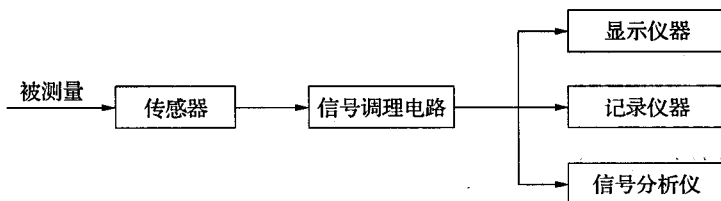


图 0-1 测试系统组成

传感器感受被测量（如位移、速度、加速度、压力、温度和流量等），并将其转换为与被测量有一定函数关系的另一种物理量，一般为电量。显然，传感器获得信息的正确与否，将关系到整个测试系统的精度。如果传感器的误差很大，后面的信号调理、显示、记录环节的精度再高也难以提高整个测试系统

的精度。所以传感器是测试系统的首要环节，也是最重要的环节。

信号调理的作用是对传感器的输出电信号进行有效变换，使之适宜传输、显示、记录或信号处理等。由于传感器的种类很多，其输出信号的类型、特点不同，信号调理的内容和内部电路差异也很大，常见的有电桥电路、滤波电路、放大电路、阻抗变换电路、调制解调电路、数字化处理电路等。

显示仪器是将测试信号以某种形式显示出来，提供给观察者以直观的结果或变化趋势。常用的显示方法有模拟显示、数字显示和图形显示三种。模拟显示是利用指针的位置对应预标的刻度来表示测量结果；数字显示是将测试信号转换成数字直接显示测量结果；图形显示是利用屏幕显示测试信号的变化曲线。

记录仪器是将测量结果以某种形式记录下来，供观察者查看或供其他系统进行二次处理，常分为显式记录和隐式记录两种。显式记录直接将测试结果记录在纸上，如笔式记录仪和光线示波器等；隐式记录直接记录测试结果的电信号，如磁带记录器和计算机的磁盘、光盘记录器等。

信号分析仪在对测试结果进行预处理的基础上，首先将模拟的电信号转变成数字信号，然后再进行数字滤波、数学运算和特征提取等，最终以数据、曲线或图像形式输出特定的测试结果。信号分析仪多为专用仪器，也可利用计算机扩展的数模转换功能和信号分析软件来实现。

三、学科特点和重点内容

测试技术是一门边缘的信息学科、涉及的学科既广泛又发展迅速。虽然学科之间的专业差异造就了测试技术的专业化分工，但学科之间的相互借鉴和渗透，又形成了共同的基本的测试系统，专业差异仅表现在传感器的差异和应用对象不同的参数要求。所以，本教材仅涉及这一学科主要的、有代表性的方面及其发展方向，形成系统的内容。从基本的测量原理入手，较详细讲述测试系统、典型参数的测量方法以及数据处理和信号分析的方法。

从进行工程测试所必备的基本条件出发，学生在学完本门课程后应掌握以下几个方面的知识：

1. 掌握工程测试必备的基础知识 这部分主要是原理性的内容，包括测试系统及其基本特性，传感器技术，信号的调理、记录和传输等。有此基础便能够设计基本的测试系统，实现基本工程物理量的测试。

2. 掌握数据处理与信号分析的方法 这部分主要是物理概念性的内容，包括测量误差分析、信号分析与处理等。主要涉及测量数据的处理和信号特征