



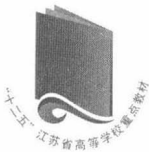
“十二五”江苏省高等学校重点教材

能源与动力工程 测试技术

康 灿 代 翠 梅冠华 吴贤芳 编著



科学出版社



“十二五”江苏省高等学校重点教材
重点教材编号：2015-2-097

江苏高校品牌专业建设工程资助项目

能源与动力工程测试技术

康 灿 代 翠 梅冠华 吴贤芳 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了与能源动力类专业相关的测试技术、原理及仪器。全书的主要内容分为九个部分：测试技术的基本概念，误差分析与数据处理，温度测量，压力测量，流速测量，流量测量，转速、转矩与功率测量，振动与噪声测量，测试规范与测试平台。

本书可作为高等学校能源动力类专业本科生的教材，亦可供从事动力工程及工程热物理学相关研究工作的科技人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

能源与动力工程测试技术/康灿等编著. —北京: 科学出版社, 2016.12

“十二五”江苏省高等学校重点教材

ISBN 978-7-03-050941-3

I. ①能… II. ①康… III. ①能源-测试技术-高等学校-教材 ②动力工程-测试技术-高等学校-教材 IV. ①TK

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 283351 号

责任编辑: 胡 凯 李涪汁 丁丽丽 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 12 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2016 年 12 月第一次印刷 印张: 17 3/4

字数: 345 000

定价: **59.00 元**

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着工程教育认证、卓越工程师教育培养计划的纵深推进,我国的高等工程教育已经步入了一个新的时期。教材一直是工科学生能力培养的重要保障条件之一。能源与动力工程专业与国家重点发展的支柱产业紧密相关,为社会输送了大批优秀人才,他们在各自的岗位上发挥着关键作用。

实验是发现和验证科学理论的重要手段之一。测试技术发展迅速,以流体速度测量为例,从传统的皮托管测速到目前得到成功应用的激光多普勒测速和粒子图像测速技术,测量的精度得到大幅提升。目前,能源与动力工程测试技术的发展向着高精度、高时空分辨率、智能化、集成化等方向发展,作为接受高等工程教育的大学生,有必要对实验原理和相关的实验方法进行系统性的了解与针对性的掌握。

本书围绕若干知识点,以达成学生的能力培养为目标。书中对测量仪器的基本原理、误差分析、数据处理方法、流量测量、压力测量、速度测量、转速转矩测量、振动噪声测量等进行了系统性的阐述,同时注重实验原理和规范。考虑到其他教材上的相关内容和测量技术的更新,本书简化了一些内容,诸如传感器的基本原理、液柱式压力计等,对目前常用的电磁流量计、光学测量方法等进行了重点介绍,并突出了实验标准在测试技术中的指导意义。另外,书中对于关键术语附上了对应的英文名称,这些术语是构成本教材内容体系的关键,也为读者查找相关的英文资料提供关键词。

本书的内容组织考虑到大多数读者的接受能力和教学法的实施,不在超出本科学生专业能力之外开展过多讨论,如果读者对于书中的某些专题感兴趣,可以参考相关的资料。从每一章课后的习题可以对该章内容的知识点进行概括,也可以在此基础上进行拓展。同时建议学生带着问题去学习知识。

本书共9章,其中,第1、2章由康灿编写;第3章由梅冠华编写;第4、5章由康灿编写;第6、7章由康灿和代翠共同编写;第8章由代翠编写;第9章由吴贤芳编写;全书由康灿统稿。

编著者感谢江苏高校品牌专业一期建设工程项目(编号:PPZY2015A029)对本书的资助。限于作者的水平,书中难免出现一些错误和不当之处,欢迎广大读者批评指正,编著者的电子邮箱:cankangujs@126.com。

编著者

2016年5月19日

常用符号表

一、英文字母符号

符号	名称	单位	符号	名称	单位
A	面积	m^2	Nu	努塞尔数	
a	加速度	m/s^2	n	旋转速度	$s^{-1}, r/min$
c	声速	m/s	P	总压力	Pa
C	阻尼系数			功率	W
C_f	摩擦阻力系数			动量	$kg \cdot m/s$
	压力系数, 压强		Pr	普朗特数	
	阻力系数		p	压强	Pa
D, d	直径	m	Q	热量	J
	电位差		q_m	质量流量	kg/s
Eu	欧拉数		q_v	体积流量	m^3/s
F	力	N	R	电阻	Ω
Fr	弗劳德数		R, r	半径	m
f	频率	Hz	Re	雷诺数	
f	透镜焦距	m	S	面积	m^2
G	重力	N	Sr	斯特劳哈尔数	
g	重力加速度	m/s^2	S	位移	m
H, h	水头 (能头), 水深	m		灵敏度	
h	厚度	m		周期	s
I	惯性矩	m^4	T	热力学温度	K
I	电流	A		摄氏温度	$^{\circ}C$
J	比例系数		t	时间	s
K	系统的灵敏度		U	电压	V
	灵敏系数		$u(v, w)$	速度	m/s
L, l	长度	m	V	体积	$m^3, L(1)$
M	力矩, 转矩	$N \cdot m$		平均速度	m/s
Ma	马赫数		z	位置水头	m
m	质量	kg			

二、希腊文字母符号

符号	名称	单位	符号	名称	单位
α	流动方向角	(°)	λ	沿程阻力系数	
α_v	(叶片) 安放角	(°)		热导率	W/(m·K)
β	切应变	m		波长	m
Γ	绝对粗糙度	m		流量系数	
Δ	线应变	m	μ	动力黏度	Pa·s
δ	介电常数		ν	运动黏度	m ² /s
ε	允许应变	F/m	ρ	密度	kg/m ³
	阻尼比			电阻率	Ω
[ε]	效率		τ	切应力	Pa
ζ	体应变		Φ	相位角差	(°)
η	中心角	rad	ω	角速度	s ⁻¹ , r/min
θ	精度参数		ω_n	固有频率	Hz
σ	标准误差				
π_c	压阻效应系数				
	射流特性系数				
	(体积) 压缩率	Pa ⁻¹			

三、下角标符号

下角标符号	含义	下角标符号	含义
n	法向的	x, y, z	直角坐标
τ	切向的	r, θ, z	柱坐标
s	沿弧长的	R, θ, β	球坐标

目 录

前言

常用符号表

第 1 章 测试技术基本知识	1
1.1 课程概述	1
1.2 测量的基本知识	2
1.3 测量系统的特性	7
思考题与习题	21
第 2 章 误差分析与数据处理	22
2.1 误差的基本概念	22
2.2 系统误差分析	24
2.3 随机误差分析	25
2.4 异常数据的剔除	29
2.5 误差计算	31
2.6 测量数据的处理方法	35
思考题与习题	45
第 3 章 温度测量	46
3.1 温度的基本概念	46
3.2 接触式温度计	48
3.3 非接触式温度计	59
3.4 红外技术在温度测量中的应用	63
思考题与习题	66
第 4 章 压力测量	67
4.1 压力的基本概念	67
4.2 稳态压力的测量	68
4.3 稳态压力指示仪表	77
4.4 动态压力测量	82
4.5 压力传感器及压力测量系统的标定	89
思考题与习题	92

第 5 章 流速测量	93
5.1 流体速度大小的测量	93
5.2 流动方向的测量	94
5.3 三维流场中流向的测量	102
5.4 热线风速仪	108
5.5 激光多普勒测速技术	114
5.6 粒子图像测速技术	130
思考题与习题	134
第 6 章 流量测量	135
6.1 流量测量方法概述	135
6.2 节流式流量计	136
6.3 涡轮流量计	146
6.4 电磁流量计	150
6.5 浮子流量计与涡街流量计	153
6.6 容积式流量计	159
6.7 超声波流量计	161
6.8 质量流量计	163
思考题与习题	165
第 7 章 转速、转矩与功率测量	166
7.1 概述	166
7.2 功率测量概述	173
7.3 转矩的测量	175
7.4 测功器	179
思考题与习题	184
第 8 章 振动与噪声测量	185
8.1 机械振动概述	185
8.2 振动传感器	187
8.3 振动分析仪器与共振法测频系统	196
8.4 振动测量及其应用实例	199
8.5 噪声概述	200
8.6 噪声的物理度量	203
8.7 噪声的评价	210
8.8 传声器与噪声测量方法	215

8.9 噪声测量实例	229
思考题与习题	236
第 9 章 测试规范与测试平台	237
9.1 试验规范	237
9.2 试验方法	253
9.3 正交试验设计与分析	262
9.4 测试平台简介	268
思考题与习题	272
主要参考文献	273

第1章 测试技术基本知识

测试 (measurement and test) 是人们认识客观事物的方法, 是具有试验性质的测量, 可以看作是测量和试验的统称。测量是以确定被测对象的属性的量值为目的而进行的实验过程, 测量的过程是将被测量的值与既定标准量比较的过程, 测量离不开测量仪器和测量过程。能源动力类的本科专业以动力工程及工程热物理学科为支撑, 试验是该学科科学研究工作的重要方法之一, 也是验证新的设计方法与思路的重要手段之一。

在能源与动力工程 (energy and power engineering) 专业中, 一般意义的测量是指用仪器直接获得被测数据, 比如用尺子测量一段管段的长度; 而测试则更贴近工程应用, 是指采用简单或系统的方法检查被测对象的运行性能, 例如测试一台泵的能量性能是否达标等。测量的结果多为数据, 而测试的结果则更多地是评价。实施测量的过程一般为“实验”, 而实施测试的过程则多为“试验”。在英文注解中, 通常用 experiment 和 measurement 两个单词分别用来表达实验和测量。在本书的后续部分并不对这些词进行严格的区分。

1.1 课程概述

1.1.1 测试技术的重要性

测试技术获得的结果对于提炼科学规律和构建科学理论具有重要意义, 同时, 测试技术还可被用来检验科学理论和规律。测试技术是科学研究的基础。与能源动力工程相关的技术领域更离不开测试技术, 相关的产品开发、产品制造、质量控制、产品性能测试、产品运行故障诊断、工程管理等均需要测试技术。近年来, 核电站、火力发电厂、风力发电站、泵站等单位已将测试技术与过程控制和管理成功地结合在一起, 有效提升了能源与动力工程装置运行的可靠性和稳定性。

测试技术是科学技术先进程度的重要标志, 随着机器人、无人机、GPS 等技术的进步, 测试技术的智能化不断提高, 应用领域不断延伸, 发挥的作用越来越突出。

1.1.2 本课程的主要内容与学习要求

能源与动力工程测试技术课程是一门技术基础课, 课程内容主要是与能源动力产业领域相关的测量原理 (measurement principles)、测量方法 (measurement ap-

proaches)、测量仪器 (measurement instruments) 与测量系统 (measurement systems)。通过本课程的学习, 学生应重点解决测量的目的、测量的内容、如何实施测量、测量结果如何处理与分析 4 方面的问题, 并掌握相关的知识与技能, 为解决本领域内的复杂工程问题打下基础。

在学习本课程中, 学生应以下列 6 个方面为学习重点:

- (1) 掌握测试装置的基本原理、测量系统的特性和测量结果误差分析方法;
- (2) 掌握温度、压力和流速三个重要物理量的测量原理与常用的测量方法;
- (3) 掌握常用压力表和压力传感器、测速仪器、流量计的测量原理与使用方法;
- (4) 了解力矩、功率、振动、噪声的测量原理、方法与仪器;
- (5) 了解激光多普勒测速和粒子图像测速的原理与仪器;
- (6) 了解能源动力类专业的测试平台与测试规范。

能源与动力工程测试技术课程尽管针对能源动力类专业, 但是属于多学科交叉的课程。学习该课程需要综合运用多种学科知识。本课程的学习涉及高等数学、概率论、流体力学、传热学、计算机科学、机械振动、声学等多方面的知识, 还有相关的国家标准和国际标准, 所以本课程对于构建学生的专业知识体系具有很好的促进作用。同时, 本课程具有很强的实践性, 是一门实战课程, 在学习中将知识与仪器和测量系统密切结合, 既消化了知识, 又拓宽了视野。最为重要的是, 本课程为创新能力的培养提供了优秀的平台, 基于诸多有形的仪器设备和实际工程问题, 有所侧重地构思基于本专业实际问题的创新性思路, 并通过实实在在的测试数据校验创新性的思路, 真正达到工程能力培养和创新能力培养的目标。

国外很多高校并不设置能源与动力工程专业, 相关的专业模块多归入机械工程 (mechanical engineering) 大类专业中, 所以能源与动力工程测试技术与机械工程测试技术有交叉, 在本书中也体现了这一点。在此基础上, 结合能源动力类专业的特点, 本书突出三个方面的内容, 一是测试技术的原理与方法, 明确测试的要求; 二是测试的规范与标准, 测量仪器的选用、测试装置设计和测量数据的处理要符合相关的规范; 三是思维的拓延与知识的融合, 在理论与实际结合的过程中不断总结与提炼, 提升专业能力。

1.2 测量的基本知识

1.2.1 测量的定义

如前所述, 测量实际上是从物理世界获取被测量 (measurand) 的信息, 并与共同遵守的标准相比较的过程, 在这一过程中, 人们借助工具, 通过获取和处理实验数据, 获得被测量的值和相关特征, 从而认识被测量和其遵循的规律。一个完整

的测量过程离不开测量对象与被测量、测量资源 (测试仪器与辅助设施、测量方法等)、计量单位、测量结果 (包括误差与误差分析方法)、测量环境 5 个要素。

根据被测量在测量过程中是否发生变化, 可将测量过程分为静态测量 (static measurement) 和动态测量 (dynamic measurement) 两类。静态测量是指被测量在整个测量过程中不随时间变化而变化的测量, 被测量可视为恒定量, 如某一定常流动 (steady flow) 中的一个观测点上的静压强 (static pressure)。动态测量是指被测量在测量过程中随时间变化而变化, 例如泵启动过程中的转速 (rotational speed) 和轴承温度。动态测量的过程是获取被测量的瞬时值 (instantaneous value) 的过程, 对测量工具、测量方法和数据处理的要求较高。

1.2.2 获取测量值的方法

根据工程中常用的获取测量值的方法可以将测量分为直接测量 (direct measurement) 和间接测量 (indirect measurement)。

1. 直接测量

将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表进行测量, 从而直接求得被测量数值的测量方法称为直接测量。被测量的数值可直接从测量仪表上获得。在直接测量中又可分为两种获取结果方式, 一种为直接从仪表上读数, 如水银体温计; 另一种方式是借助标准量具获得测量结果。直接测量方法又可进一步分为零值法、差值法和代替法。

(1) 零值法: 被测量的作用与已知量的作用相互抵消, 总效应为零, 这样被测量就等于已知量。例如采用电位差计可测量热电偶在测量温度时产生的热电势的大小。

(2) 差值法: 从仪表上读出的值为待测量与某已知量之差。例如采用 U 形差压计测量压强时, 其两边液柱的高差代表了待测压强与已知压强的差。

(3) 代替法: 用已知量代替被测量, 使已知量与被测量产生的效应相同。例如用天平称量物体的质量时, 用标准砝码的质量代替被测物体的质量。

直接测量按测量条件不同又可分为等精度测量和非等精度测量。前者指的是对同一量进行多次测量, 每次测量的仪器、环境、测量方法和人员都保持一致, 否则为非等精度测量。

2. 间接测量

在被测量无法直接从测量仪器上读出时, 需要通过直接测量与被测量有一定函数关系的量, 而后通过关系式获得被测量的数值, 这种测量方法称为间接测量。

间接测量中的未知量 Y 可表示为

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots) \quad (1-1)$$

式中, X_1, X_2, X_3, \dots 为可以由直接测量测得的物理量。例如叶片泵的输入功率可由下述关系式得出:

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

式中, T 为转矩, 单位为 $\text{N}\cdot\text{m}$; n 为转速, 单位为 r/min ; P 为功率, 单位为 kW 。借助转速转矩仪测出 T 与 n , 则 P 可由式 (1-2) 得出。

再以气流速度的测量为例, 在没有风速计的情况下欲获得气流的速度也并非完全不可能。如果有一个转速表和一个风车, 可以测得气流吹动风车时风车的转速, 进而可通过风车转速与气流速度之间的关系来计算气流速度。

还有的教材上介绍了直接测量和间接测量之外的一种组合测量方法, 该方法的前提是被测量与待求量之间存在着一定的函数关系, 通过测得的被测量的值求解该函数关系式, 从而获得待求量。

1.2.3 量与量纲 (quantities and dimensions)

量是指现象、物体或物质可定性区别和定量确定的一种属性。不同的量之间可以定性区别, 如长度和温度是不同类的量。同一类中的量之间以量值大小来区别。

1. 量值

量值用数值和计量单位 (unit) 的组合来表示。量值被用来定量地表达被测对象相应属性的大小, 如 1.8 kg , 25°C , 12 s 等, 其中 1.8 、 25 、 12 是量值的数值。

2. 基本量和导出量

选取某些量作为基本量 (base quantity), 基本量之间相互独立; 其他量作为基本量的导出量 (derived quantity), 导出量与基本量之间存在着一定的函数关系。

3. 量纲和量的单位

量纲代表一个被测量的确定特征, 而量纲单位则是该被测量得以量化的基础。例如, 质量是一个量纲, 而千克是质量的一个单位; 长度是一个量纲, 英寸是长度的一个单位。一个量纲是惟一的, 但量纲可以用不同的单位来测量。世界上不同国家所使用的单位制 (system of units) 可能不同, 所以不同的单位制有必要被标准化, 单位制之间的转换也必须遵守共同认同的规则。

本书中的量纲和单位遵守国际单位制 (International System of Units, SI) 的规定, 基本物理量有 7 个, 分别为: 长度 (length)、质量 (mass)、时间 (time)、电流 (electric current)、热力学温度 (thermodynamic temperature)、物质的量 (amount of sub-

stance) 和发光强度 (luminous intensity)。这 7 个量的量纲分别用 L、M、T、I、 Θ 、N 和 J 表示。导出量的量纲可以用基本量的量纲表示。例如,速度的量纲为 LT^{-1} , 涡量的量纲为 T^{-1} , 功率的量纲可表示为 ML^2T^{-3} 。无量纲量中的量纲幂次均为零, 无量纲量实际上是一个数。

4. 法定计量单位

法定计量单位是各个行业必须遵守并执行的单位。我国的法定计量单位以国际单位制为基础, 选用了少数其他单位制的计量单位。

国际单位制中规定的 7 个基本物理量的单位分别为: 长度 —— 米 (m)、质量 —— 千克 (kg)、时间 —— 秒 (s)、电流 —— 安培 (A)、热力学温度 —— 开 [尔文](K)、物质的量 —— 摩 [尔](mol)、发光强度 —— 坎 [德拉](cd), 上述括号内为对应的单位符号。

测量必须有基准, 该基准可以确保量值的统一和准确。测量工具也必须经过检定和校准, 且检定和校准需由法定或授权的检定机构进行实施。

1.2.4 测量系统

测量离不开测量系统。目前测量系统的应用已从一般实验室、工业产品、工业流程一直延伸到复杂环境中, 如核反应器和宇宙空间站内部的环境。测量系统可能是一个简单的仪表, 也可能是一个由多个传感器和数据采集模块构成的复杂系统。测量的目的、要求和内容随着场合的不同可能存在很大的差别, 但一个完整的测量系统应该包含三类基本部件: 感受部件、信号传递和处理部件、信号显示和记录部件。有的测量系统还要求有激励装置, 当被测对象受到激励后才能产生便于测量的输出信号, 测量系统组成示意图, 如图 1-1 所示。有的测量系统还要求配带自标定装置。

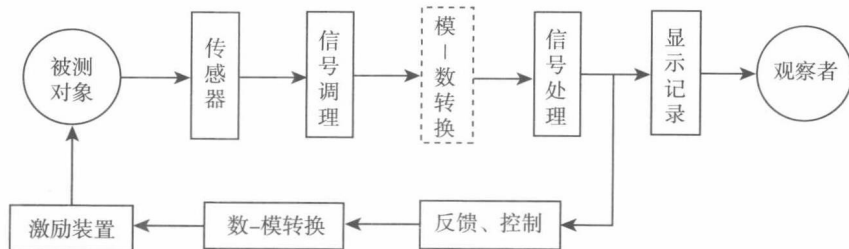


图 1-1 测量系统组成示意图

1. 感受部件

感受部件 (sensing part, sensor) 直接与被测对象发生作用, 它的作用是感受被测量的变化, 随后其内部发生变化并向外发出相应的信号。汽车车灯控制器中采用

的电阻值随环境光强度改变而改变的光敏元件 (photosensitive element) 就属于感受部件。感受部件需满足下列条件:

- (1) 只能感受被测量的变化而发出相应的信号, 其他量变化时感受部件不应发出同类信号。
- (2) 感受部件发出的信号与被测量之间应呈单值函数关系, 即两者一一对应。
- (3) 感受部件对被测量的扰动应尽量小。

在实际应用中, 经常出现感受部件在非被测量变化时也产生内部变化的现象, 在无法回避的情况下, 尽量限制无用信号的量级, 使其远远小于有用信号。在使用金属热电阻测量温度时, 压力同样对电阻产生影响, 这时有必要采用引入修正系数或增加补偿装置的方法消除附加因素的影响。

现代测量系统中的感受部件即传感器。在国家标准 GB/T 7665—2005 中, 传感器的定义为能够感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件和装置, 通常由敏感元件 (sensing element) 和转换元件 (transducing element) 组成, 如图 1-2 所示。传感器中的敏感元件能直接感受和响应被测量, 而转换元件能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适合于传输和测量的电信号如电阻、电容、电感。电信号易于处理、显示、存储和传输。此时传感器扮演的角色不单单是感受部件。

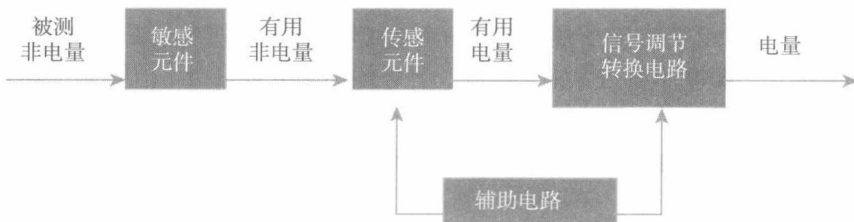


图 1-2 传感器的典型组成

2. 信号传递和处理部件

信号传递和处理部件 (signal transmission and processing element) 的功能是对感受部件发出的信号进行加工或转换后传递给信号显示和记录部件, 这种转换多是电信号之间的转换。例如电阻应变片在工作时发出的是电阻变化值, 它通过电桥转变为电压信号。信号传递和处理部件有时需要对感受部件发出的信号进行各种运算、滤波和分析, 以满足信号显示和记录部件对信号的要求。

单从功能的角度来看, 在采用传统的静压探针进行压强测量时, 若探针和排管之间采用橡皮管进行连接, 则橡皮管就是该测量系统的传递部件。这种传递部件只能在探针和排管之间的距离较短时使用, 并不利于信号的远传。如果距离较远, 则

多采用将压强改变为其他类信号如电信号的方式进行传输、转换和显示。

3. 信号显示和记录部件

信号显示和记录部件 (signal display and recording element) 根据信号传递和处理部件传来的信号显示出被测量的大小及变化。信号显示方式可大致分为指示式、记录式和数字式三种。

(1) 指示式是指以标尺刻度、指针的周向位置、液面位置等显示被测量的数值, 例如波登管式压力表就利用指针的周向位置显示压强大小。指示式的缺点是不能显示被测量的动态变化。

(2) 记录式仪表则可以动态地记录被测量随时间的变化, 如传统测量中采用的磁带记录仪等。

(3) 数字式仪表将模拟量通过模数转换、译码等方法进行转换, 在显示面板上展现出被测量的数值, 如数字式记数器等。由于数字化技术和硬件技术的发展, 目前数字式仪表已成为测量仪表的主流之一。

目前信号的记录多采用计算机系统的数据存储器——硬盘 (hard disk) 来实现, 硬盘中常用的为机械硬盘和固态硬盘。相对于机械硬盘, 固态硬盘的读写速度快、功耗低、防震能力强、工作温度范围宽, 缺点是固态硬盘的最大存储容量较小, 售价较高。

1.3 测量系统的特性

1.3.1 测量系统的基本特性

并不存在针对所有被测量都适用的测量系统。根据被测量的特点、测量的精度要求及其他因素, 需选用合适的测量系统, 测量系统的基本特性要能够使输入的被测量在要求的精度范围内得到体现。一般将外界对系统的作用称为系统的输入 (input) 或激励 (excitation), 而将系统受到这种作用时的输出称为系统的输出 (output) 或响应 (response)。测量系统的功能框图如图 1-3 所示。其中, $x(t)$ 为测量系统的输入, $y(t)$ 为测量系统的对应输出。

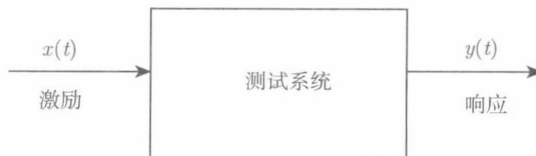


图 1-3 测量系统的功能框图

输出量 $y(t)$ 是否能正确地反映输入量 $x(t)$ 与测量系统本身的特性有着紧密关联。测量系统的特性指的是传输特性,即系统受到的激励与其做出的响应之间的关系。测量系统的特性可分为静态特性 (static characteristics) 和动态特性 (dynamic characteristics)。对于被测量不变或变化极缓慢的情况,静态参数即可表达测量系统的特性,而对于被测量快速变化的情况,则要求测量系统对被测量的变化迅速做出响应,此时必须采用动态参数表达测量系统的特性。尽管此处以被测量定义测量系统的静态特性与动态特性,但对于一个测量系统,其静态特性与动态特性是相关的。从便于分析的角度出发,通常将测量系统的静态特性与动态特性分开考虑,将诱发非线性的因素作为静态特性处理。

理想的测量系统应有单值的、确定的输入-输出关系,其中以输入与输出呈线性关系为最佳。实际的测量系统往往无法满足线性关系。若系统的输入 $x(t)$ 与输出 $y(t)$ 之间的关系可用线性微分方程描述,则称该测量系统为线性系统 (linear system),其方程可以写为

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (1-3)$$

将方程中最高微分阶 n 称为系统的阶; a_n 、 a_{n-1} 、 \cdots 、 a_0 和 b_m 、 b_{m-1} 、 \cdots 、 b_0 分别为系统的结构特性参数。

如果系统的结构特性参数均不随时间和输入量的变化而变化,则该方程为常数微分方程,所描述的系统为线性定常系统或线性时不变系统。实际的测量系统中,结构特性参数或多或少会发生变化,但若设置足够的精确度,忽略非线性和时变因素,则可将多数系统作为线性时不变系统处理。

1.3.2 测量系统的静态特性参数

1. 量程

量程 (span) 是指测量系统能够测量的输入量的最大值与最小值之间的范围,也称为可测范围。在选择测量系统时,量程是首先要考虑的参数。超量程使用仪表可能会造成仪表损坏。一般认为,在选择仪表量程前要对被测量的值进行估计,被测量较稳定时,其最大值不宜超过仪表满量程的 $\frac{3}{4}$;若被测量的值波动较大,则最大值不宜超过仪表满量程的 $\frac{2}{3}$,且最小值不宜低于满量程的 $\frac{1}{3}$,在此两个条件中,优先满足前者。被测量的值接近测量系统可测量的上限时易损坏测量系统的部件,而被测量的值接近测量系统可测量值的下限时又会造成测量精度下降。