

高等院校教材

机械测试系统 原理与应用

秦树人 等 编著



科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书全面系统地论述了测试系统及其基本特性,测试系统中的传感器,测试系统中的数据采集,信号分析与数据处理,振动测试系统,噪声测试系统,应变测试系统,力、转速、转矩及功率测量系统,压力测量系统,流量测量系统。为了使读者对测试系统有一个“一体化”的了解,测量传感器分散在各测量系统中予以介绍。

本书可作为高等院校“机械工程及自动化”“机械设计”“机械电子工程”“车辆工程”“测试技术与仪器”“能源动力”和其他相近专业的教材,也可供从事测试技术的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械测试系统原理与应用/秦树人等 编著. —北京:科学出版社,2005

(高等院校教材)

ISBN 7-03-015824-5

I. 机… II. 秦… III. 机械工程-测试技术-高等学校-教材 IV. TG806

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 071801 号

责任编辑:段博原 贾瑞娜 / 责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年9月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2005年9月第一次印刷 印张:18 3/4

印数:1—4 000

字数:365 000

定价:25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

《机械测试系统原理与应用》

编委会

主 编	秦树人		
副主编	张明洪	余 愚	
编 委	汤宝平	田大庆	季 忠
	杨成银	郭祚达	罗德扬

前 言

“测试技术”自1978年被正式列为机械制造专业的教学大纲以来，目前已成为“机械自动化”、“机械设计”、“机械电子工程”、“车辆工程”等专业的主干课程。

测试技术是获取信息、分析和处理测量数据的关键技术与手段，是从事科学研究、产品质量检验与控制不可缺少的手段，可以说没有测试技术便没有科学研究今天的成就和明天的发展，而整个制造业则会因为没有测试技术而导致产品质量体系的彻底崩溃！因此测试技术是已经或将要从事科技与生产的人员必须学会，必须掌握的一门重要的专业基础课程。

目前与“机械测试”有关的教材和教学参考书已有多种，各种版本各有所长，各有所取。本教材追踪反映现代测试科学的最新成就和发展，并借鉴国内外现有各种先进的资料，自成体系撰写而成。

本书由重庆大学秦树人教授任主编并对全书进行统稿。西南石油学院张明洪教授、四川西华大学余愚副教授任副主编，重庆大学汤宝平教授、贵州工业大学杨成银副教授、四川大学田大庆副教授、重庆大学季忠副教授、四川大学郭祚达教授及昆明理工大学罗德扬教授任编委，全书是在以上各位老师的通力合作下完成的。

凡本教材参阅过的文献均一一列于每章的末尾，以备读者查阅。

由于编者水平所限，且成书时间仓促，书中定有不少纰漏，望读者指正。

秦树人

2005年7月

于重庆大学测试中心

目 录

前言

绪论	1
0.1 测试技术的任务和重要性	1
0.2 测试过程和测试系统的组成	3
0.3 课程的对象和要求	4
第1章 测试系统及其基本特性	7
1.1 测试系统的组成	7
1.2 测试系统的数学描述	10
1.3 线性系统的主要特性	12
1.4 测试系统的静态特性	13
1.4.1 静态传递方程与定度曲线	14
1.4.2 灵敏度	14
1.4.3 线性度	15
1.4.4 回程误差	15
1.4.5 稳定性	16
1.5 测试系统的动态特性	16
1.5.1 测试系统动态传递特性的频域描述	17
1.5.2 测试系统动态传递特性的时域描述	23
1.5.3 测试系统动态特性参数的识别	25
1.6 测试系统的级联	30
1.7 测试系统不失真传递信号的条件	31
习题	33
参考文献	34
第2章 测试系统中的信号分析	35
2.1 信号的分类	35
2.1.1 信号的概念及其描述方法	35
2.1.2 信号分类	36
2.1.3 信号分析中的常用函数	40

2.2 信号的时域统计分析	41
2.2.1 均值	42
2.2.2 均方值	42
2.2.3 方差	42
2.3 信号的幅值域分析	42
2.3.1 概率密度函数	42
2.3.2 概率分布函数	44
2.4 信号的频域分析	44
2.4.1 周期信号的频谱	45
2.4.2 非周期信号的频谱	50
2.4.3 随机信号的频谱	58
2.5 信号的相关分析	61
2.5.1 相关函数	61
2.5.2 相关函数的性质	62
2.5.3 随机信号的相关函数与其频谱的关系	65
2.6 卷积	66
2.6.1 含有单位脉冲函数 $\delta(t)$ 的卷积	67
2.6.2 时域卷积定理	67
2.6.3 频域卷积定理	69
2.6.4 卷积与相关之间的关系	70
习题	71
参考文献	72
第3章 测试系统中的数据采集与处理	73
3.1 数据采集原理	73
3.1.1 采样定理	74
3.1.2 量化	78
3.1.3 编码	80
3.2 数据采集系统	82
3.2.1 数据采集系统的基本组成	82
3.2.2 数据采集系统的主要性能指标	84
3.2.3 数据采集系统的结构形式	85

3.3 信号调理原理	89
3.3.1 放大	89
3.3.2 滤波	91
3.3.3 隔离	93
3.4 数字信号处理	94
3.4.1 离散傅里叶变换	94
3.4.2 快速傅里叶变换(FFT)	98
3.4.3 基于 DFT 的数字信号处理	99
3.4.4 FFT 分析仪简介	100
3.5 数字信号处理中的若干问题	102
3.5.1 FFT 的谱分析极限	102
3.5.2 频率混叠现象及其抑制	103
3.5.3 信号的截断与泄漏	105
3.5.4 常用窗函数及其特性	108
习题	110
参考文献	111
第4章 振动测试系统	112
4.1 测振传感器	112
4.1.1 压电式加速度传感器	112
4.1.2 电阻应变式与压阻式加速度传感器	117
4.1.3 磁电式速度传感器	118
4.1.4 涡流式位移传感器	119
4.2 振动测试系统	120
4.2.1 振动测试基本方法	120
4.2.2 测振系统的定度和校准	124
4.2.3 测试方案的制定和测试系统的选择	126
4.3 振动测试的应用	126
4.3.1 瞬态激振测试	126
4.3.2 机械阻抗测试	129
4.3.3 振动模态测试	133
习题	136

参考文献	138
第5章 噪声测试系统	139
5.1 声学基本概念	139
5.1.1 声波和噪声	139
5.1.2 噪声的物理度量	140
5.1.3 声压级的叠加、扣除和平均	143
5.2 噪声的频谱和频带	147
5.2.1 窄带频谱和声压谱级	148
5.2.2 频带声压级与倍频程频谱	148
5.3 噪声的主观评价	152
5.3.1 纯音的主观评价	152
5.3.2 宽度噪声的主观评价	153
5.4 声(压)级测量和常用仪器	156
5.4.1 测量传声器	157
5.4.2 声级计	160
5.4.3 工业噪声现场测量	163
5.5 声强测量	165
5.5.1 声强测量原理	165
5.5.2 声强测量仪器	167
5.5.3 声强测量的应用	170
习题	171
参考文献	172
第6章 应变测试系统	173
6.1 应变片及电阻应变式传感器	173
6.1.1 金属线材的应变效应	173
6.1.2 应变片的工作原理	174
6.1.3 应变片的主要参数及其选用	176
6.1.4 电阻应变式传感器	177
6.2 应变测量电路	180
6.2.1 直流电桥	180
6.2.2 交流电桥	182

6.2.3 调制与解调	183
6.3 布片与组桥	188
6.4 提高应变测量精度的措施	191
习题	194
参考文献	196
第7章 转速、转矩及功率测量系统	197
7.1 转速测量	197
7.1.1 离心式转速测量	197
7.1.2 磁性转速测量	197
7.1.3 测速发电机	198
7.1.4 频率输出的转速测量	201
7.2 转矩及功率测量	204
7.2.1 转矩测量传感器	204
7.2.2 转矩及功率测量系统	207
习题	209
参考文献	210
第8章 温度测量系统	211
8.1 热电偶测温系统	211
8.1.1 测温原理	211
8.1.2 系统结构	213
8.1.3 测温系统的正确使用	214
8.2 热电阻测温系统	215
8.2.1 测温原理	215
8.2.2 系统结构	219
8.2.3 系统的正确使用	220
8.3 其他接触式测温系统	221
8.3.1 数字式测温系统	221
8.3.2 膨胀式测温系统	222
8.4 非接触式测温系统	223
8.4.1 红外测温系统	223
8.5 半导体 PN 结测温系统	229

习题	230
参考文献	230
第9章 流量测量系统	232
9.1 流量测量的基本知识	232
9.1.1 流量测量基本概念	232
9.1.2 管内流动基本知识	233
9.2 流量测量仪表	237
9.2.1 流量测量仪表的分类	237
9.2.2 流量测量仪表的测量特性	237
9.2.3 靶式流量计	238
9.2.4 涡轮流量计	240
9.2.5 电磁流量计	242
9.2.6 旋涡流量计	245
9.3 流量仪器的标定	249
9.3.1 流量仪表的校验方法	249
9.3.2 流量标准装置的作用	251
9.3.3 液体流量标准装置	251
9.3.4 静态容积法液体流量计标定	252
9.3.5 标准流量计法	255
9.3.6 现场在线流量校验装置	255
习题	257
参考文献	257
第10章 力、压力测量系统	258
10.1 概述	258
10.1.1 力的基本概念	258
10.1.2 压力的基本概念	259
10.1.3 基本的力、压力测量系统	260
10.2 应变式力、压力测量系统	262
10.2.1 测力传感器弹性元件及计算公式	262
10.2.2 应变式测力传感器举例	264
10.2.3 应变式压力传感器	265

10.3 压电式力、压力测量系统	267
10.3.1 压电效应与压电材料	268
10.3.2 压电敏感元件	268
10.3.3 压电式传感器的等效电路和前置放大器	269
10.3.4 压电式力传感器与压力传感器	271
10.3.5 压电式力、压力测量系统构成与应用实例	274
10.4 压磁式测力系统	276
10.4.1 压磁效应与压磁元件	276
10.4.2 压磁式力传感器工作原理	277
10.4.3 压磁式力传感器结构	277
10.5 位移式测力系统	278
10.5.1 电容式压力传感器	278
10.5.2 电感式压力传感器	279
10.5.3 涡流式压力传感器	279
10.6 力、压力测量系统的标定	280
10.6.1 压力测量系统的静态标定	280
10.6.2 压力测量系统的动态标定	281
10.6.3 力测量系统的标定	285
习题	286

绪 论

0.1 测试技术的任务和重要性

测试是人们从客观事物中提取所需信息,借以认识客观事物,并掌握其客观规律的一种科学方法。在测试过程中,需要选用专门的仪器设备,设计合理的实验方法和进行必要的数据处理,从而获得被测对象有关信息及其量值。广义来看,测试属于信息科学的范畴。一般说来,信息的载体称为信号,信息则蕴涵于信号之中。信息总是通过某些物理量的形式表现出来的,这些物理量也就是信号。例如,单自由度质量-弹簧系统的动态特性可以通过质量块的位移-时间关系来描述,质量块位移的时间历程就是信号,它包含着该系统的固有频率和阻尼率等特征参数,也就是所需要的信息。分析采集到的这些信息,就掌握了这一系统的动态特性。

测试技术包含了测量(measurement)和试验(test)两方面的含义。其是指具有试验性质的测量,或测量与试验的综合。

机械工程测试的对象是机械系统(包括各种机械零件、机构和部件)及其组成部分(包括与机械系统有关的电路、电器等)。机械工程测试过程包括测量、试验、测试、计量、检验、故障诊断等过程。

测量的基本任务有两个:①提供被测对象(如产品)的质量依据;②提供机械工程设计、制造、研究所需的信息。因此,设计、工艺、测试三者共同构成了机械工程的三大技术支柱。

根据信号的物理性质,可以将其分为非电信号和电信号。例如,随时间变化的力、位移、速度、加速度、温度、应力等属于非电信号;而随时间变化的电流、电压则属于电信号。这两者可以借助于换能器装置相互转换。在测试过程中,常常将被测的非电信号通过相应的传感器转换成电信号,以便于传输、调理(放大、滤波)、分析处理和显示记录等。

被测信号中既包含着需要研究的有用信息,同时又不同程度地混入了无用信息(如噪声信号等)。各种电磁测量线路和测试装置在不同的环境下工作,不可避免地会受到噪声的干扰。噪声对被测信号所产生的影响,最终将以误差的形式表现出来,导致测试的精确度降低,甚至难以进行正常的测试工作。因此,如何在有噪声背景的情况下提取有用信息,是测试工作者的重要任务

之一。

具体到机械工程中,如一部机器或机构,从设计、制造、运行、维修到最终报废,都与机械测试与测量密不可分。现代机械设备的动态分析设计、过程检测控制、产品的质量检验、设备现代化管理、工况监测和故障诊断等,都离不开机械测试,都要依靠机械测试。机械测试是实现这些过程的技术基础。同时,测试技术还是进行科学探索、科学发现和技术发明的技术手段。

从机械结构动力学分析的角度看,测试技术的任务又可归结为研究系统的输入(激励)、输出(响应)以及系统本身的特性(系统函数或传递函数)和它们三者之间的相互关系:

1) 已知激励、响应,求系统的动态特性(传递函数),用以验证系统特性的数学模型。在工程模型试验方面,可进行产品的动态设计、结构参数设计和模型特征参数的研究等。

2) 已知系统的特性(传递函数)和响应(输出),求激励(输入),用以研究载荷或载荷谱。某些工程系统(如火箭、车辆、井下钻具等)的载荷(如阻力、风浪等)很难直接测得,设计这些系统时往往凭经验和假设,因此误差较大。采用参数识别的方法能准确地求得载荷。为此目的组成的测试系统称为载荷识别系统,它为产品的优化设计提供了依据。

3) 由已知的测量系统对被测系统的响应进行测量分析(即数据采集分析系统)。被测量可以是电量,也可以是非电量。该系统的功用是测量响应的大小、频率结构和能量分布等,也可用于计量、系统监测以及故障诊断等。

当系统响应超过其特定输出时,控制装置的功能将调整被测系统的参数,使响应(输出)改变,从而使系统工作在最佳响应状态或使系统按规定的指令工作。这种响应控制系统常用于参数的自动测量与控制。

随着科学技术水平的不断提高和生产技术的高速度发展,机械工程测试技术也随之向前迈进,卡式仪器、总线仪器、集成仪器、智能控件化虚拟仪器直至网络仪器等,不断地丰富、拓展着测试领域的测试手段。此外测试系统的体系结构、测试软件、人工智能测试技术等也有很大的发展。仪器与计算机技术的深层次结合产生了全新的测试仪器的概念和结构。近年来,计算机技术在现代测试系统中的地位显得越来越重要,软件技术已成为现代测试系统的重要组成部分。当然,计算机软件不可能完全取代测试系统的硬件。因此,现代测试技术要求从事测试科技的人员不仅要具备良好的计算机技术基础,更要求深入掌握测试技术的基本理论和方法。

在现代测试技术中,通用集成仪器平台的构成技术、数据采集、数字信号分析处理软件技术是决定现代测试仪器系统性能与功能的三大关键技术。以软件化的虚拟仪器和虚拟仪器库为代表的现代测试仪器系统与传统测试仪器相比较的最

大特点就在于：用户可在集成仪器平台上按自己的要求开发相应的应用软件，构成自己所需要的实用仪器和实用测试系统，其仪器和系统的功能不局限于厂家的束缚。特别是当测试仪器系统进一步实现了网络化以后，仪器资源将得到很大的延伸，其性能价格比将获更大的提高，机械工程测试领域将出现一个更加蓬勃发展的新局面。

0.2 测试过程和测试系统的组成

机械工程测试的最终目的是从机械设备的测试信号中提取所需的特征信息。对于机械系统，信息是其客观存在的静动态特征。信号中包含有大量的信息，根据不同的目的要求，信号中所包含的信息有的是有用信息，而另一些则为无用信息。无用信息通常称为噪声。信号也是多种多样的，按物理性质可分为非电信号和电信号。为便于拾取、传输、放大、分析处理和显示记录等，一般都需要将非电信号转换为电信号。

因此，机械工程测试过程一般包含了从被测对象拾取机械信号，再将非电性质的机械信号转换为电信号，信号经放大后输入后续信号处理设备进行分析处理。信号分析处理可采用模拟系统或数字分析处理系统。由于后者有高的性能价格比、高稳定性、高精度，故目前多采用数字分析处理系统。

为了从被测对象提取所需要的信息，需要采用适当的方式对被测对象实行激励，使其既能产生特征信息，同时又能产生便于检测的信号。例如，在测取机械系统的固有频率时，采用瞬态激振或稳态正弦扫描激振，激发该系统的振动响应，拾取其响应信号，通过分析便可求出系统固有频率。

测试系统由一个或若干个功能元件组成。广义地说，一个测试系统应具有以下的功能，即将被测对象置于预定状态下，并对被测对象所输出的特征信息进行拾取，变换放大，分析处理，判断，记录显示，最终获得测试目的所需要的信息。

(1) 试验装置

试验装置是使被测对象处于预定状态下，并将其有关方面的内在联系充分显露出来，以便进行有效测量的一种专门装置。测定结构的动力学参数时，所使用的激振系统就是一种试验装置，如图 0-1 所示。激振系统由虚拟仪器库中的信号发生器（也可以是单独的信号源）、功率放大器、激振器等组成。信号发生器提供频率在一定范围内可变的正弦信号，经功率放大后，驱动激振器。激振器便产生与信号发生器频率一致的交变激振力，此力作用于被测构件上，使构件处于该频率激振下的强迫振动状态。为保证试验进行所需的各种机械结构也属于试验装置。

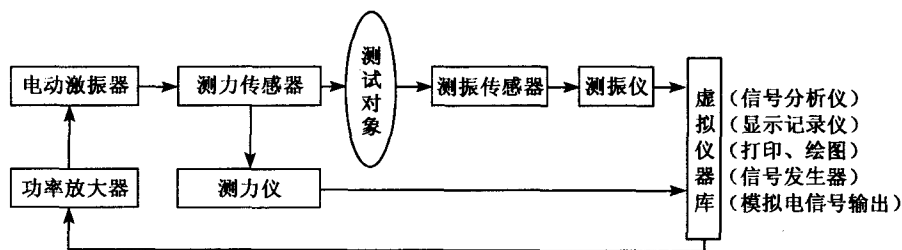


图 0-1 构建频率响应测试系统

(2) 测量装置

测量装置是把被测量（如激振力和振动所产生的位移）通过传感器变换成电信号，经过后接仪器的变换、放大、运算，变成易于处理和记录的信号。例如，在图 0-2 所示系统中，需要观察在各种频率正弦激振力的作用下，构件产生振动的位移幅值和激振力幅值之比，以及这两个信号相位差的变化情况。为此，采用测力传感器和测力仪组成力的测量装置；用测振传感器和测振仪组成振动位移的测量装置。被测的机械参量经过传感器变换成相应的电信号，然后再输入到后接仪器进行放大、运算等，变换成易于处理和记录的信号形式。所以，测量装置是根据不同的机械参量，选用不同的传感器和相应的后接仪器所组成的测量环节。不同的传感器要求的后接仪器也不相同。

(3) 数据处理装置

数据处理装置是将测量装置输出的信号进一步进行处理以排除干扰和噪声污染，并清楚地估计测量数据的可靠程度。在图 0-1 中，虚拟仪器库中的信号分析仪就是一台数据处理装置，它可以把被测对象的输入（力信号）与输出（构件的振动位移信号），通过相关的分析运算，得到这两个信号中不同频率成分的振动位移和激振力幅值之比及其相位差，并能有效地排除混杂在信号中的干扰信息（噪声），提高所获得信号（或数据）的置信度。

(4) 显示记录装置

显示记录装置是测试系统的输出环节，它可将所测得对被测对象有用的信号及其变化过程显示或记录（或存储）下来，数据显示可以用各种表盘、电子示波器和显示屏等来实现。数据记录则可采用模拟式的各种笔式记录仪、磁带记录仪或光线记录示波器等设备来实现，而在现代测试工作中，越来越多地采用虚拟仪器直接记录并存储在硬盘或软盘上。

0.3 课程的对象和要求

本课程的研究对象有以下几个：

1) 误差或不确定度测量与测试中最基本、最重要的参数。因此本课程第一个研究对象便是误差理论。

2) 本课程研究机械工程中常见物理量和几何量的测量与测试。例如,对机器及其零部件的长度、角度及其精度的测量;对机器设备的振动、噪声的测试;对机器设备的各种物理参量如应力应变、温度、力、压力、流量、扭矩、转速、功率的测量与测试以及对机器设备动、静平衡的测试等。通过以上的测量与测试对机器设备的质量进行评价和控制。

3) 研究测量测试的方法与系统特性(其内容参考图 0-1 和图 0-2),从而正确地设计测试方案,正确地使用仪器设备以及正确地进行测量测试结果的分析处理。

根据本门学科的对象和任务,对高等学校机械类各有关专业来说,“机械工程测试基础”是一门主干技术基础课。通过对本课程的学习,培养学生能合理地选用测试装置并初步掌握静、动态机械参量测试方法和常用工程试验所需的基本知识和技能,做到“选得准,用得好”,为在工程实际中完成对象测试任务打下必要的基础。

具体而言,学生在学完本门课程后应具备以下的知识和技能:

1) 对机械工程测试工作的概貌和思路有一个比较完整的概念。对机械工程测试系统及其各环节有一个比较清楚的认识。并能初步运用于机械工程中某些静、动态参量的测试和产品或结构的动态特性试验。

2) 了解常用传感器、中间转换放大器的工作原理和性能,并能依据测试工作的具体要求进行较为合理的选用。

3) 掌握测试装置静、动态特性的评价、测试方法,测试装置实现不失真测量的条件,并能正确地运用于测试装置的分析和选择。

4) 掌握信号在基本变换域的描述方法,信号模拟分析、信号数字分析的一些基本概念;掌握信号频谱分析、相关分析的基本原理和方法并对其延拓的其他分析方法有所了解。

5) 掌握虚拟仪器、虚拟测试系统和信号分析处理软件系统的基本原理和使用。

6) 通过本课程的学习和实践,应能对机械工程中某些静、动态参数的测试自行选择、设计测试仪器仪表、组建测试系统和确定测试方法,并能对测试结果进行必要的数据处理。

本课程具有很强的实践性。在教与学的过程中应紧密联系实际,既要注意掌握基本理论、弄清物理概念,同时,必须加强对学生动手能力的培养,必须通过教学实验和实践环节,使学生尽可能熟练地掌握有关的测试基本理论和测试技术方法,达到具有初步从事实际测试工作的能力。

由于本门课程综合应用了多学科的原理和技术，是多门学科的交叉，是数学、物理学、电工学、电子学、机械振动工程、自动控制工程及计算机技术的交叉融合。因此，为了学好本门课程，要求学生在学本课程之前，应当具备有关学科特别是电工学（含电子技术）和微机原理及应用等课程的基础。