

机械工程测试原理与技术

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

重庆大学出版社

内 容 提 要

本教材吸收编者多年的教学经验和科研成果,同时借鉴了同类教材的相关内容,着重于物理概念和工程应用的阐述,重点突出,条理清晰,分析透彻,内容符合教学大纲的要求。

本教材共分12章,内容包括:测量误差的基本性质与处理,信号分析基础,测试系统的基本特性,模拟信号分析,信号采集与数字分析原理及技术,传感器原理与测量电路,机械工程几何量测量,振动测试,噪声测量,应变、应力测试,其他机械参量测量(力与扭矩的测量、温度的测量),虚拟测试仪器。不同的专业可根据自己的教学要求选择讲授有关章节。

本书可作为高等学校机械类及相关专业本科生的教材和硕士研究生的参考书,也可供从事机械工程测试工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程测试原理与技术/秦树人主编. —重庆:重庆大学出版社,2002.8

ISBN 7-5624-2663-5

.机... .秦... .机械工程—测试技术 .TG8

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第048573号

机械工程测试原理与技术

主 编 秦树人

副主编 张明洪 罗德扬

责任编辑:曾令维 版式设计:曾令维

责任校对:蓝安梅 责任印制:秦 梅

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鹤盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址: <http://www.cqup.com.cn>

邮箱: fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

自贡新华印刷厂印刷

*

开本:787×960 1/16 印张:26.5 字数:534千

2002年8月第1版 2005年6月第2次印刷

印数:5 001—8 000

ISBN 7-5624-2663-5/TH·96 定价:28.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换
版权所有,请勿擅自翻印和用本书
制作各类出版物及配套用书,违者必究。

前 言

“测试技术”自1978年被正式列入机械制造专业的教学课程以来,已成为“机械自动化”、“机械电子工程”、“车辆工程”等专业的主干课程。

测试技术与测试仪器是获取信息、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工具,可以说,没有测试技术和测试仪器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和测试仪器而导致产品质量体系的彻底崩溃!因此,测试技术与测试仪器的相关知识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知识。

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。本教材正是以现有的多种版本为借鉴,同时又紧扣时代脉搏,尽可能反映现代测试科学的最新发展撰写而成的。特别需要说明的是,为了弥补“公差与技术测量”课程在机械工程专业中的大幅削减,本教材以一定篇幅对这一测量技术中的重要内容予以反映。

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、昆明理工大学罗德扬教授任副主编,四川大学郭祚达副教授、重庆大学汤宝平副教授、四川工业学院余愚副教授、贵州工业大学周吉彬副教授、杨成银副教授以及四川大学田大庆讲师任编委,全书是在以上各位老师的通力合作下完成的。

重庆大学梁德沛教授担任本书主审。

重庆大学机械学院张承贵高工和博士生钟佑明、纪跃波、郭瑜、季忠、金涛、梁玉前、王见，硕士生谢亭亭、周传德、尹爱军参加了本教材的校对工作。

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，且成书时间稍嫌仓促，书中定有不少纰漏，望读者指正。

秦树人

2002年6月

于重庆大学机械学院测试中心

目 录

绪 论	1
0.1 测试技术的任务和重要性	2
0.2 测试过程和测试系统的组成	4
0.3 课程的对象和要求	6
第 1 章 测量误差的基本性质与处理	8
1.1 测量误差的基本概念	9
1.1.1 测量误差的定义	9
1.1.2 误差分类	10
1.1.3 测量结果的精度	11
1.1.4 测量不确定度	12
1.2 误差的基本性质与处理	12
1.2.1 随机误差的概率分布	12
1.2.2 随机误差的估计	15
1.2.3 系统误差的发现准则和减少消除方法	17
1.2.4 测量粗大误差的存在判定准则	21
1.3 测量系统的误差计算方法	23
1.4 测量系统最佳测量方案的确定	27
习题	33
第 2 章 信号分析基础	35
2.1 信号的分类及其基本参数	36
2.1.1 信号的概念及其描述方法	36
2.1.2 信号分类	37
2.1.3 信号分析中的常用函数	44
2.1.4 信号的时域统计分析	48
2.1.5 信号的幅值域分析	48
2.2 周期信号及其频谱	50
2.2.1 傅里叶级数与周期信号的分解	51
2.2.2 周期信号的频谱	53
2.3 非周期信号及其频谱	55

机械工程测试原理与技术

2.3.1	傅里叶变换与非周期信号的分解	55
2.3.2	非周期信号的频谱	59
2.3.3	傅里叶变换的主要性质	61
2.3.4	几种典型信号的频谱	63
2.4	随机信号的频谱	66
2.4.1	随机信号的自功率谱密度函数	66
2.4.2	两随机信号的互谱密度函数	68
2.4.3	相干函数与频率响应函数	69
2.5	信号的相关分析	69
2.5.1	相关系数与相关函数	69
2.5.2	相关函数的性质	72
2.5.3	随机信号的相关函数与其频谱的关系	74
2.6	卷积	76
2.6.1	含有单位脉冲函数 $\delta(t)$ 的卷积	76
2.6.2	时域卷积定理	77
2.6.3	频域卷积定理	78
2.6.4	卷积与相关之间的关系	79
2.7	时频分析	80
2.7.1	短时傅里叶变换	80
2.7.2	魏格纳分布	84
2.7.3	小波分析	88
	习题	94
第3章	测试系统的基本特性	97
3.1	测试系统概述	98
3.1.1	线性系统及其微分方程描述	98
3.1.2	线性系统的特性	100
3.2	测试系统的静态传递特性	101
3.2.1	静态传递方程与定度曲线	102
3.2.2	灵敏度	102
3.2.3	线性度	102
3.2.4	回程误差	103
3.2.5	稳定性	103
3.3	测试系统的动态传递特性	104
3.3.1	测试系统动态传递特性的频域描述	104
3.3.2	测试系统动态传递特性的时域描述	110

3.3.3	测试系统动态特性的识别	112
3.4	测试系统不失真传递信号的条件	116
	习题	118
第 4 章	模拟信号分析	119
4.1	调制与解调	120
4.1.1	幅值调制与解调原理	120
4.1.2	角度调制与解调原理	122
4.2	滤波器	124
4.2.1	滤波器分类	124
4.2.2	理想滤波器	124
4.2.3	实际滤波器	126
4.3	微分、积分与积分平均	130
4.3.1	微分器	130
4.3.2	积分器	130
4.3.3	积分平均	131
4.4	模拟信号分析技术应用举例	132
4.4.1	幅值调制在测试仪器中的应用	132
4.4.2	频率调制在工程测试中的应用	133
4.4.3	模拟滤波器的应用	134
4.4.4	模拟频谱分析	135
	习题	137
第 5 章	信号采集与数字分析原理及技术	138
5.1	信号数字分析的基本步骤	139
5.2	模拟—数字转换原理与采样定理	140
5.2.1	信号的离散采样与量化	140
5.2.2	采样定理	142
5.2.3	离散信号的频谱	147
5.2.4	频率混叠现象及其防止	149
5.2.5	离散采样的一般解释	152
5.3	信号的时域截断与泄漏	153
5.3.1	截断与泄漏	153
5.3.2	常用窗函数及其特性	156
5.4	离散傅里叶变换 DFT 及其快速算法 FFT	158
5.4.1	离散傅里叶变换原理	158
5.4.2	DFT 的周期性和共轭性	161

机械工程测试原理与技术

5.4.3	离散傅里叶变换对的说明	163
5.4.4	以 DFT 为基础的信号数字分析	164
5.4.5	快速傅里叶变换 FFT 简介	167
5.5	FFT 分析仪简介	168
	习题	170
第 6 章	传感器原理与测量电路	172
6.1	概述	173
6.2	电阻应变式传感器	174
6.2.1	金属应变片式传感器	174
6.2.2	压阻式传感器	176
6.2.3	应变式力传感器的应用	177
6.3	电感式传感器	180
6.3.1	自感式传感器	180
6.3.2	差动变压器式传感器	182
6.3.3	电涡流式传感器	184
6.4	电容式传感器	186
6.4.1	工作原理与特性	186
6.4.2	电容式传感器的应用	189
6.5	压电式传感器	191
6.5.1	压电效应及压电元件的结构	191
6.5.2	电荷放大器	193
6.5.3	压电式传感器的应用	194
6.6	磁电式传感器	196
6.6.1	磁电式速度传感器	197
6.6.2	感应同步器	198
6.6.3	磁栅式传感器	200
6.7	霍尔传感器	202
6.7.1	工作原理	202
6.7.2	测量电路	203
6.7.3	传感器的应用	203
6.8	光栅传感器	205
6.8.1	光栅与光栅传感器	205
6.8.2	莫尔条纹	205
6.8.3	辨向原理与辨向电路	207
6.8.4	细分技术	207

6.8.5	光栅传感器的应用	208
6.9	光纤传感器	209
6.9.1	光导纤维结构与传输原理	209
6.9.2	光纤传感器及其分类	210
6.9.3	光纤传感器的应用	211
第 7 章	机械工程几何量测量	214
7.1	几何量测量技术概况	215
7.1.1	几何量测量的概念	215
7.1.2	几何量测量的四大要素	215
7.1.3	几何量测量系统的组成	218
7.2	激光量块干涉仪计数法测量	219
7.3	激光光电光波比长仪线纹测量	222
7.4	DY—1 光栅式测量仪大尺寸测量	225
7.5	双频激光干涉法测量	226
7.6	圆分度误差自动测量	228
7.6.1	圆分度误差的评定指标	228
7.6.2	标准度盘平均瞄准法原理	229
7.6.3	光电式度盘自动测量仪	230
7.7	形位误差和表面粗糙度测量	232
7.7.1	直线度误差的测量	232
7.7.2	平面度误差的测量	234
7.7.3	圆度误差的测量	237
7.7.4	表面粗糙度的测量	240
7.8	丝杆螺旋线误差的测量	243
7.8.1	螺旋线误差形成原理	244
7.8.2	螺旋线误差的光栅激光动态测量	244
7.8.3	螺旋线误差曲线分析	246
7.9	三坐标测量机及其应用	247
7.9.1	三坐标测量机类型和组成	247
7.9.2	三坐标测量机的测量与应用	253
习题	257
第 8 章	振动测试	260
8.1	测振传感器	261
8.1.1	相对式测振传感器	261
8.1.2	绝对式测振传感器	261

机械工程测试原理与技术

8.2	典型测振传感器	265
8.2.1	磁电式速度传感器	265
8.2.2	压电式加速度传感器	266
8.2.3	电阻应变式、压阻式加速度传感器	268
8.2.4	伺服式加速度传感器	269
8.2.5	光导纤维传感器	270
8.3	振动测量与试验	271
8.3.1	振动测量的基本方法	271
8.3.2	机械阻抗的测量	283
8.3.3	测振系统的定度和校准	284
8.3.4	测试方案制定和测试系统的选择	289
8.3.5	振动测试应用实例	292
8.4	振动实验装置简介	293
8.4.1	实验装置的目的	293
8.4.2	实验装置的组成	294
8.4.3	激振信号源简介	296
8.4.4	测振仪简介	296
8.4.5	虚拟式测试仪器库简介	296
	习题	297
第9章	噪声测量	301
9.1	声学基本概念	302
9.1.1	声波和噪声	302
9.1.2	噪声的物理度量	303
9.1.3	噪声测量中的级与级的单位分贝(dB)	305
9.1.4	声压级的叠加、扣除和平均	306
9.2	噪声的频谱和频带	311
9.2.1	窄带频谱和声压谱级	311
9.2.2	频带声压级与倍频程频谱	311
9.3	噪声的主观评价	316
9.3.1	纯音的主观评价	316
9.3.2	宽度噪声的主观评价	318
9.4	噪声测量原理和常用仪器	321
9.4.1	测量传声器	322
9.4.2	声级计	325
9.5	工业噪声测量	328

9.5.1	一般现场测量	329
9.5.2	声强测量	330
习题	337
第 10 章	应变、应力测试	339
10.1	概述	340
10.2	应变片的选择	340
10.2.1	敏感栅材料的选择	340
10.2.2	底基材料的选择	341
10.2.3	栅长与栅厚的选择	342
10.2.4	灵敏系数的选择	342
10.2.5	测试环境的选择	342
10.2.6	在特殊条件下对应变片的选择	343
10.3	应变测量电路	344
10.3.1	直流电桥	344
10.3.2	交流电桥	347
10.3.3	放大电路	348
10.4	布片与组桥	350
10.4.1	布片的一般原则	350
10.4.2	组桥	350
10.4.3	典型应力状态的布片及主应力计算	352
10.5	保证应变测试精度的措施	354
10.5.1	减少贴片误差	354
10.5.2	克服附加电阻的影响	354
10.5.3	准确定度	355
10.5.4	温度补偿	355
10.5.5	其他措施	356
第 11 章	其他机械参量测量	357
11.1	力与扭矩的测量	358
11.1.1	力的测量	358
11.1.2	扭矩的测量	363
11.2	温度的测量	371
11.2.1	接触法测温	371
11.2.2	非接触法测温	379
第 12 章	虚拟测试仪器	383
12.1	导论	384

机械工程测试原理与技术

12.1.1	虚拟仪器的概念	384
12.1.2	虚拟仪器的产生和现状	385
12.1.3	虚拟仪器的硬件系统	386
12.1.4	虚拟仪器的软件系统	387
12.1.5	虚拟仪器的开发	388
12.1.6	基于 PC 平台的虚拟仪器的基本构成	389
12.1.7	虚拟仪器的形成	389
12.1.8	虚拟仪器的特点	391
12.1.9	虚拟仪器的发展	392
12.2	虚拟仪器的总线系统	393
12.2.1	概述	393
12.2.2	GPIB 总线系统	395
12.2.3	VXI 总线系统	397
12.2.4	PCI 总线系统	400
12.3	虚拟仪器开发系统	405
12.3.1	概述	405
12.3.2	“框架协议”开发系统简介	406

绪 论

0.1 测试技术的任务和重要性

没有测试就没有科学,科学始于测量。测试技术是科学研究工作者感官、思维的延拓和加深。测试技术包含了测量(Measurement)和试验(Test)两方面的含义,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、部件和整机)及其相关组成部分(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:一是提供被测对象(如产品)的质量依据;二是提供机械工程设计、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。

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,信息蕴涵于信号之中。信息是通过某些物理量的形式来表现的,而这些物理量的形式就是信号。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,这些特征参数就是所需要的信息。分析采集到这些信息,就掌握了这一系统的动态特性。

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变换成电信号,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,但也不同程度地混入了无用信息(例如噪声信号等),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,甚至难以正常进行测试工作。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,例如一部机器或机构,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,同时也是进行科学探索、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。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)发生相应的改变,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发展,机械工程测试技术也随之向前发展,卡式仪器、总线仪器直至集成仪器,近年出现的虚拟仪器和集成虚拟仪器库不断地丰富测试领域的手段。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

如前所述, 机械工程测试的主要任务就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状态特征。信号中包含有丰富的信息, 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, 故目前多采用数字式分析处理系统。

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。图 0.1 表示测试系统的构成。

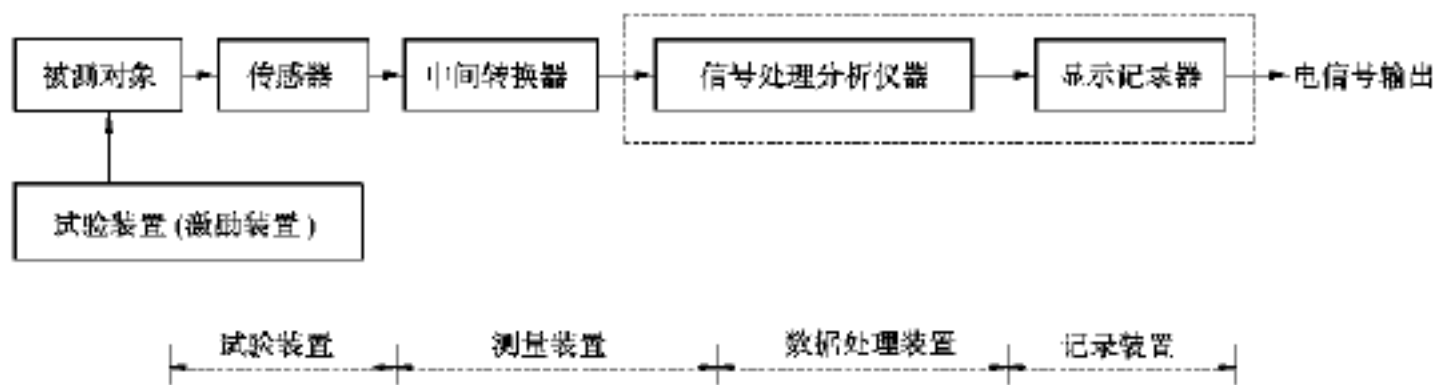


图 0.1 测试系统框图

由图 0.1 可见, 一个测试系统一般由试验装置、测量装置、数据处理装置和显示记录装置等所组成。

(1) 试验装置

试验装置是使被测对象处于预定的状态下, 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 0.2 所示。激振系统由虚拟仪器中的信号发生器

(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。

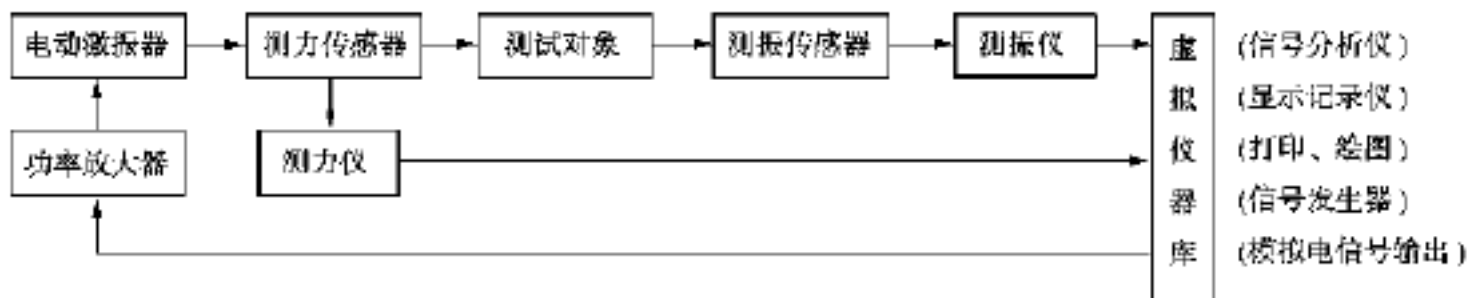


图 0.2 构建频率响应测试系统

(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)通过传感器转换成电信号,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转换成相应的电信号,然后再输入到后接仪器进行放大、运算等,转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。图 0.2 中,虚拟仪器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,它可将对被测对象所测得的有用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,越来越多的是采用虚拟仪器直接记录存储在硬盘或软盘上。