

卓越工程师
EXCELLENT ENGINEER

机械工程测试 技术基础

主 编 陈 超
副主编 李忠国 李 磊 钟 伟
主 审 张冰蔚

江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

机械工程测试 技术基础

JIXIE GONGCHENG CESHI
JISHU JICHU

主 编 陈 超
副主编 李忠国 李 磊 钟 伟
主 审 张冰蔚

图书在版编目(CIP)数据

机械工程测试技术基础 / 陈超主编. — 镇江: 江苏大学出版社, 2014. 8
ISBN 978-7-81130-751-1

I. ①机… II. ①陈… III. ①机械工程—测试技术—高等学校—教材 IV. ①TG806

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 180574 号

机械工程测试技术基础

主 编/陈 超
副 主 编/李忠国 李 磊 钟 伟
责任编辑/汪再非
出版发行/江苏大学出版社
地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)
电 话/0511-84446464(传真)
网 址/http://press. ujs. edu. cn
排 版/镇江文苑制版印刷有限责任公司
印 刷/句容市排印厂
经 销/江苏省新华书店
开 本/787 mm×1 092 mm 1/16
印 张/15.5
字 数/380 千字
版 次/2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷
书 号/ISBN 978-7-81130-751-1
定 价/34.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

前 言

现代机械工程设备尤其是机电一体化系统,大多为集机械、电子、信息以及控制技术为一体的复杂的机电系统,而传感器及其测试技术则是联系机械设备本体和电子控制系统之间不可或缺的中间环节,发挥着极为重要的作用。正因为如此,在机械工程类专业创新型人才培养体系中,如何实现知识应用、技能提升和思维创新的培养目标,测试技术课程承担着关键培养环节的角色。

测试技术是一门跨学科的课程,涉及学科门类较多,而且该课程还具有知识更新快、实践技能要求高的特点。本书在章节编排和内容组织上尽量考虑了课程的特点,但要展现整个测试技术课程的全部内容还是比较困难的。因此本书主要介绍面向机械工程行业的传感测试理论和技术,在内容上全书可以分为两大部分。第一部分为测试技术基础知识和传感器的原理与分类介绍,分4章按照信号的传输流程(信号的检出、传感器的基本工作机理、中间电路变换和信号的显示记录)来安排各章节内容,在绪论之后,各章分别介绍信号及其描述、测量系统的基本特性、各类传感器的技术原理和信号的调理与记录。通过第一部分的学习,读者可以了解和掌握测试技术的基础理论、一般技术和常用方法。第二部分为传感器和测试技术的应用部分,分5章详细介绍常见物理参量(力参量、振动参量、运动参量、温度参量和流体参量)的测量原理和测量方法。为使读者对相关内容有更为直观的认识,书中列举了许多机械行业中较为典型的测量实例和仪器实物。

本书适合于普通本科和专科院校机械工程类专业作为测试技术教材使用,也可作为测试工程技术人员的参考资料。本书作为教材时的课堂教学容量为64学时左右。根据编者多年的教学实践经验,不同学校不同专业的教学计划和教学要求有所不同,教学课时数和课程安排顺序也不尽相同,任课教师可以根据本校专业的特点、课时计划和先修课程的内容,适当调整、补充或删减书中的教学内容。

本书由江苏科技大学机械电子教研室老师根据多年的教学积累合力编写,由陈超担任主编,参加编写的老师有张冰蔚、李忠国、李磊和钟伟等同志,其中陈超完成第1,2,4,7,8章以及第3章3.1,3.8,3.9节的编写,李忠国完成第6章以及第3章3.4,3.5节的编写,李磊完成了第5章以及第3章3.2,3.3节的编写,钟伟完成第9章以及第3章3.6,3.7节的编写,张冰蔚负责本书绪论的撰写,并对全书内容进行审定。在教材编写过程中,张新慈、耿沛文、王若怡和张探等研究生参与了部分内容的录入工作,在此表示感谢。

鉴于我们的水平有限,书中难免有不妥甚至错误之处,敬请各位读者批评指正。

编 者

2014年7月



目 录

绪 论	(001)
0.1 测试技术的概念及功能	(001)
0.2 测试技术研究的主要内容	(002)
0.3 现代测试技术的发展趋势	(006)
0.4 测试技术课程的性质和任务	(008)
第 1 章 信号及其描述	(010)
1.1 信号的分类与描述	(010)
1.2 信号的时域与频域描述方法	(012)
1.3 周期信号频谱分析	(014)
1.4 非周期信号频谱分析	(017)
1.5 随机信号描述	(023)
第 2 章 测试系统的基本特性	(027)
2.1 概述	(027)
2.2 测试系统的静态特性	(029)
2.3 测试系统的动态特性	(031)
2.4 测试信号不失真的条件	(037)
2.5 测试装置基本特性的测试	(039)
2.6 测试系统的负载效应	(042)
第 3 章 传感器	(045)
3.1 概述	(045)
3.2 机械式传感器及仪器	(047)
3.3 电阻、电容与电感式传感器	(049)
3.4 压电、磁电与热电式传感器	(085)
3.5 光纤传感器与光电传感器	(097)
3.6 半导体传感器	(102)
3.7 激光与超声波传感器	(108)
3.8 机械类专业的常用传感器	(110)
3.9 传感器的选用原则	(117)



第 4 章 信号的调理与记录	(121)
4.1 电桥	(122)
4.2 调制与解调	(126)
4.3 滤波器	(132)
4.4 信号的放大	(141)
4.5 模数与数模转换器	(145)
4.6 测试信号的显示与记录	(156)
第 5 章 力参量的测量	(161)
5.1 应力状态与应力计算	(161)
5.2 测量力参量时贴片与接桥方法	(166)
5.3 影响力参量测量的因素及误差补偿	(168)
第 6 章 振动测量	(170)
6.1 振动测量传感器	(170)
6.2 振动测量系统及其标定	(178)
6.3 激振实验设备及振动信号	(181)
第 7 章 运动参量的测量	(184)
7.1 位移的测量	(184)
7.2 速度的测量	(191)
7.3 加速度的测量	(196)
第 8 章 温度的测量	(201)
8.1 概述	(201)
8.2 热电偶温度计	(203)
8.3 热电阻温度计	(211)
8.4 非接触式温度测量	(214)
第 9 章 流体参量的测量	(218)
9.1 流体压力的测量	(218)
9.2 流速的测量	(230)
9.3 流量的测量	(232)
参考文献	(241)



绪 论

0.1 测试技术的概念及功能

测试技术是信息科学(测控技术、计算机技术和通信技术)的重要分支,是人类认识和探索自然的重要手段,是科学研究的基本方法。著名科学家门捷列夫说过:“没有测量就没有科学”。测试是测量与试验(实验)的综合。试验离不开测量,测试中最基本的内容是测量。测量是利用各种装置对可观测量(或称被测参数)进行定性和定量的过程。

测试的基本任务是获取信息。信息一般可理解为消息、情报或知识,例如古代烽火是提示外敌入侵的信息。从物理学观点出发来考虑,信息不是物质,也不具备能量,但它却是物质所固有的,是其客观存在或运动状态的特征。因此,可以说信息是事物运动的状态和方式。

信号是物理性的,是物质,具有能量。人类获取信息需要借助信号的传播,信号的变化反映了其所携带信息的变化。

被测量信息往往隐含于自然界的物理量、化学量和生物量中,这些有价值的信息又随时间、空间或环境的状态变化而变化。由于信息本身不具备传输、交换的功能,只有通过信号才能实现这种功能。要想获得有用信息,首先要获得反映被测对象的信息载体——信号,通过对信号的分析处理最终得到所需要的信息。虽然获取被测量信息是测试的目的,但信号作为信息的载体在测试中具有更重要的地位。在机械工程应用领域被测量信息绝大多数蕴含在某些物理量中,并通过信号传输。常见的信号有电信号、光信号、声信号等,其中,电信号在变换、处理、传输和与计算机应用结合等方面具有特殊的优势,已成为目前应用最广泛的信号。其他非电信号可以通过各种物理效应转换成电信号进行传输、处理和应用。因此,测试技术与信号密切相关,以信号为主线,测试工作就是信号的获取、加工处理、显示记录及分析的过程。

实施测试需要有满足特定要求的测试设备,而测试系统是把被测参数自动转换成具有可直接观测的指示值或等效信息的测试设备,其中关键部件是传感器。传感器是由敏感元件直接感受被测量,并把被测量转变为可用电量(电信号)的一套完整的测量装置。因此,传感器属于测试系统。

人类的日常生活、生产活动和科学实验都离不开测试技术。从本质上说,测试的功能是人类五官感觉的替代和延伸。具体而言,测试具备三大功能:① 过程中的参数测量功能;② 过程中的参数监控功能;③ 科学实验中的测量分析功能。

0.2 测试技术研究的主要内容

测试技术研究的具体内容包括信号的描述、测量原理、测量方法、测量系统及其数据处理等。信号的描述揭示信号的组成及其内在变化规律,时域描述和频域描述及其相互变换和映射关系。傅里叶级数和傅里叶变换是测试技术研究信号的理论基础。

0.2.1 测量原理

测量原理是实现测试所依据的物理、化学、生物等现象相关的定律的总体。采用什么样的原理(依据什么效应)去测量(感受)被测量,实际上就是传感器的敏感原理。例如,利用压电晶体测量振动加速度所依据的原理是压电效应;电涡流位移传感器测量位移的原理是电涡流效应;热电偶测量温度所依据的是热电效应,等。不同性质的被测量可用不同的测量原理测量,同一性质的被测量亦可用不同的测量原理测量。例如,压力和温度性质不同,依据的测量原理就有所不同,压敏效应和热敏效应就不一样;同样是测量压力,可以分别应用弹性敏感元件的压力-位移特性、压力-集中力特性、压力-谐振频率特性等不同原理来测量。

由于被测量种类繁多,所依据的测量原理千差万别,随着科学技术的不断进步,新的原理会不断出现。合理选择测量原理要求从事测试技术研发的人员具有宽广的知识面、扎实的基础理论和专业知识。

0.2.2 测量方法

测量原理确定后,用什么方法去测量被测量,需根据实际情况选择测量方法。常用的方法有直接测量和间接测量两种。

① 直接测量:将被测量与同性质的标准量或用标准量转换的中间量(或检定合格的仪器)进行比较。实际测量时后者居多,如温度计测温度,卡尺量工件,电压表测电压等。温度计、卡尺、电压表都是经过与标准量比对(即转换和检定)的。

如图 0-1 所示,为了确定某人的身高(一个被测量),通常采用标准长度的米尺(一个预定标准)对其进行测量,通过被测量与预定标准之间的定量比较,从而得到此人实际的身高(被测对象的数值结果)。



图 0-1 直接测量原理图

比较的标准必须与被测量具有相同的特征,这些标准通常被法定的或被承认的机构或组织规定和确认,如国际标准化组织(ISO)或中国国家标准化管理委员会(SAC)。“米”(m)便是一个明确规定的长度计量标准。

在机械工程领域的测试工作中,大多数被测量为机械量。机械测量的范畴中除了长度、质量、时间等基本量之外,还包括温度、应力、应变、流量、声级,以及与力、力矩和运动(如位移、速度、加速度)有关的参数等。

② 间接测量:被测量不便于直接测量,而是通过直接测量与被测量有确定函数关系的相关量,然后经过计算得到被测量,这称为间接测量。如为测导线的电阻率 ρ ,根据电阻率公式有:

$$\rho = \frac{\pi d^2 R}{4L}$$

式中, L 为导线长度; R 为导线电阻; d 为导线直径。通过直接测量 L 、 d 和 R ,由公式计算得到 ρ 。不难看出,间接测量比直接测量复杂,引入的测量误差也较大。

测试往往伴随着试验,试验是对被研究的对象或系统进行试验性研究的过程,通常是将研究对象或系统置于某种特定的或人为构建的环境条件下,通过试验数据来探讨被研究对象的性能的过程。

图0-2所示为汽车乘坐舒适性的台架试验,是具有试验性质的测量,即测试。座椅处的加速度是衡量乘坐舒适性的指标之一,它由置于座椅处的加速度计测量,而液压振动台则提供汽车在颠簸道路上行驶的状态模拟,测量得到的加速度的试验数据反映了汽车乘坐舒适性的一个指标。

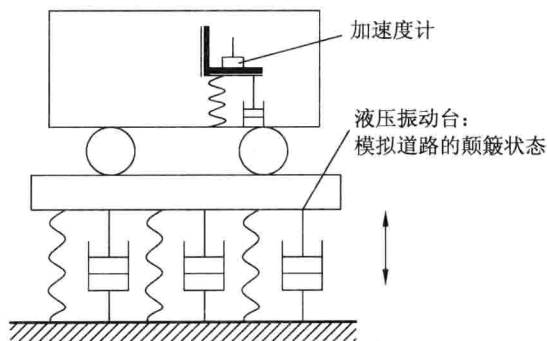


图 0-2 汽车乘坐舒适性的台架试验

0.2.3 测试系统

确定了测量原理和测量方法后,就可以设计构建或选用合适的装置组成测试系统,并对实测信号进行有效的处理,才能最终得到正确的测试结果。

1. 测试系统的分类

根据系统所处理信号类型的不同可分为模拟量和数字量两种测试系统。

(1) 模拟量测试系统

模拟量测量系统如图0-3所示。

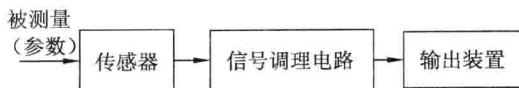


图 0-3 模拟量测试系统

传感器在系统中感受被测量(如力、位移、速度、加速度、温度、流量等),并将其转换成另外一种物理量,通常是转换成模拟信号的电量。

信号调理电路将传感器输出的电信号进行加工、变换和处理,例如将源信号放大、变换、调制、解调、滤波、线性化处理等(统称为信号的调理)。信号经调理后被转换成便于传输、显示、记录和输出的信号。

输出装置用来显示、记录被测量的大小,输出与被测量有关的控制信号,以供用户或其他系统使用。

模拟量测试系统所处理、传输和输出的都是模拟信号。

(2) 数字量测试系统

图 0-4 所示为多路输入/输出的多参数数字量测量系统。

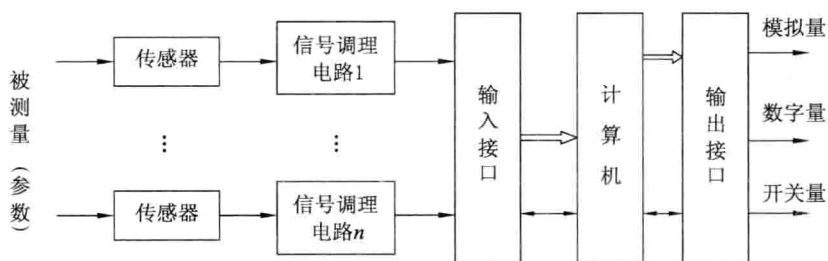


图 0-4 数字量测试系统

通常在数字量测试系统中,传感器和信号调理部分与模拟量测试系统基本相同(除非采用了数字式传感器),输入接口与输出接口之间的信号为数字信号。由于后续计算机只能处理数字信号,测试系统必须考虑后面输入接口的要求,通常需着重考虑两点:一是要将信号放大到与输入接口中的 A/D 的输入要求相匹配;二是要进行滤波,压缩频带宽度,抑制噪声或干扰中的高频分量,保证在满足采样定理的条件下,降低采样频率,以避免频谱的混叠现象。

输入接口将模拟信号转换为数字信号,一般通过数据采集卡中的 A/D 转换芯片实现。

计算机按设定的程序自动进行信号的采集与存储,数据的运算、分析与处理,并以友好的界面输出,显示测量结果。

输出接口将数字信号转换成外设所需的模拟量、数字量或开关量信号,便于显示、记录或使用。

数字量测试系统中传输的信号为数字信号,具有抗干扰、测量速度快、精度高、便于运算和处理等特点,还可在计算机中应用各种数字滤波算法进一步消除噪声和干扰。

2. 对测试系统的要求

根据测试任务的不同,对测试系统的要求也不一样,但在设计、构造和配置测试系统时,应考虑以下要求:

① 性能稳定:即系统的各个环节具有时间稳定性。

② 精度符合要求:精度主要取决于传感器、信号调理、数据采集模块 A/D 转换的精度等模拟变换部件。



③ 具有足够的动态响应性能:现代测试中,高频信号成分要求系统必须具有足够的动态响应能力。

④ 具有实时和事后数据处理能力:能在试验过程中处理数据,便于现场实时观察分析,及时判断试验对象的状态和性能。实时数据处理的目的是确保试验安全、加速试验进程和缩短试验周期。系统还必须有事后处理能力,待测试结束后能对全部测试数据进行完整、详尽的分析。

⑤ 具有开放性和兼容性:主要表现为测试设备的标准化,计算机和操作系统具有良好的开放性和兼容性,可以根据实际需要扩展系统硬件和软件,便于使用和维护。

随着相关技术的不断发展,测试系统已广泛采用标准化的模块结构,并应用高速总线技术和网络技术。计算机技术的发展促进了智能仪器和虚拟仪器的迅速发展与应用,并能同时传输测试数据、图像信息和语音信息等。测试系统正向着高速、高精度、多功能、大信息量、集成化和智能化的方向发展。

0.2.4 数据处理

构建了测试系统后,要保证测试的有效性,就需要对测试中得到的数据进行科学的处理,才能得到正确可信的测试结果,实现对被测参数实际值的最佳估计。

通过测试系统获得的信号是信息的载体,携带着有关被研究物理过程的信息。信号分析通常是指分析信号的类别、构成以及特征参数;信号处理是指对信号进行滤波变换、调制/解调、识别、估值等加工处理,以便排除或抑制信号中多余和无用分量并增强信号中有用分量,即提高信号的信噪比,将信号变换成某种更为有效的形式,提取需要的特征值,以便更加全面、准确地获取有用信息。

信号分为确定性信号与随机性信号两大类。确定性信号分析的理论基础是傅里叶变换,确定性信号分析方法主要是对模拟信号及数字信号进行分析处理。对模拟信号进行分析处理所采用的设备可以是机械的、光学的、电学的或混合式的,如模拟滤波器、模拟频谱分析仪、模拟相关分析仪等。若信号为数字信号,则可以直接通过计算机进行分析处理;若被处理的是模拟信号,则可以通过 A/D 转换器转换成数字信号,由计算机进行处理,这种方法是当前信号处理技术的主流。

随机性信号的分析理论基础是概率论、数理统计和傅里叶变换,通常采用统计平均方法,确定出有关的统计特征参数与函数,包括:

- ① 幅值域:方差、均方差、概率密度函数等;
- ② 时间域:自相关函数、互相关函数等;
- ③ 频率域:谱密度函数、相干函数等。

从被测对象获取的信号所包含的信息往往非常丰富,既有测试者所需要的有用信息,也含有大量与测试对象无关的其他信息,后者被称为干扰。相应地,对于信号也有有用信号和干扰信号的区分,但这种区分是相对的:在某些场合被认为是“干扰”信号,在另一些场合则可能是“有用”信号。例如,齿轮噪声信号对工作环境是一种“干扰”,但对于评价齿轮副的运行状态和进行故障诊断时,又成为“有用”信号了。测试工作的一个重要任务就是从复杂的信号中排除或抑制干扰信号,提取出有用信号,此过程称为信号的分析 and 处理。在特定被测量的测试系统中,应有效分辨出有用信号,极大地抑制无用的干

扰信号。

0.3 现代测试技术的发展趋势

以计算机(微处理机)为核心的测试系统是现代测试技术的重要特征,计算机技术、大规模集成电路技术和通信技术的迅速发展,促进了传感器技术、通信技术和计算机技术的结合,使测试技术发生了巨大变化,形成了测试与控制一体化的测控系统。

计算机技术与传感器结合,其结果产生了智能传感器,为传感器的发展开辟了广阔的发展空间。近年来,智能传感器技术在国内外高端测控领域扮演着日益重要的角色。

计算机与通信技术结合,其结果产生了计算机网络技术,为构建远程、复杂的网络化测试系统提供了强有力的支撑,对测试系统的空间拓展具有划时代的意义。

计算机网络技术与智能传感器结合,其结果产生了网络化智能传感器,造就了物联网技术,使传统的数据采集、数据处理等方式产生了质的飞跃——各种现场数据直接在网络上传输、发布和共享,而且使测控系统本身也发生了质的飞跃——可通过网络任何节点对现场传感器在线编程和组态,促进了测控系统的结构和功能发生了重大变革,为系统的扩充和维护提供了极大的便利。此外,随着科学技术的进步,各学科领域助推测试技术超前发展,为科学研究、探索自然、试验验证提供更先进的测试装备。

现代测试技术的发展趋势主要包括传感器技术的发展、测试手段的发展、信号处理技术的发展和开发平台的发展等几个方面。

0.3.1 传感器的发展

传感器是获取信息的源头,所有测试系统都离不开传感器,而传感器种类繁多,千变万化。目前传感器的发展主要表现在集成化、微型化、多功能化和智能化。

1. 智能化传感器

传感器与微处理器的结合产生了智能传感器,其具有采集、处理、交换信息的能力,是传感器集成化与微处理器相结合的产物。以机器人传感器应用为例,一般智能机器人的感觉系统由多个传感器集合而成,采集的信息需要计算机进行处理,而使用智能传感器就可将信息分散处理,从而降低成本。与一般传感器相比,智能传感器具有三个优点:通过软件技术可实现高精度的信息采集,而且成本低;具有一定的编程自动化能力;功能多样化。简而言之,智能传感器就是“信息识别+信息处理+信息储存+信息提取”一体化的传感器。

2. 多维传感器

近年来,传感器由一维向多维发展,如加速度传感器,原来只能测单一方向的加速度,现在已出现了可同时测出三维六向(X, Y, Z 轴的3个线加速度和绕三坐标轴的3个角加速度)多参量加速度传感器。只有传感器的精细化、集成化才能实现多维感测。

3. 多功能化和高精度化

现代传感技术的发展趋势之一是以传感器为核心,积极引入各种先进的技术和方法。如智能传感器可利用微处理器来提高传感器精度和线性度,修正温漂和时漂,提高



测试精度,除测量功能外,还具有选择、判断和计算等多种功能。

4. 传感器的融合

目前,传感器已经向着高精度化和微型化方向发展,但在总体融合方面,还不能像大多数生物体那样把监测、判断、控制、执行等实施到最佳状态。探索生物传感机理,实现传感器信息处理的工程应用,就是传感器融合的研究内容。今后把分离的微传感器的单一功能加以融合并得出综合的输出信息将变得日益重要。

0.3.2 测试手段的发展

20世纪90年代,出现了“PC机+仪器板卡+应用软件”构成的计算机虚拟仪器。虚拟仪器采用计算机开放体系结构来取代传统的单机测量仪器,将传统测量仪器中的公共部分(如电源、操作面板、显示屏幕、通信总线和CPU)与计算机共享,通过计算机、仪器扩展板卡和应用软件在计算机上构建多种物理仪器。虚拟仪器的突出优点是与计算机技术结合,共享计算机技术的高速发展成果和价格优势,具有硬件可升级、功能可拓展、开发便利等特点,除保留必要的接口硬件外,靠软件实现大部分传统硬件仪器的功能,将仪器功能由厂家定义转为由用户定义,用户可根据实际生产环境变化的需求,通过应用软件来拓展虚拟仪器的功能,适应实际科研和生产中的变化需要。此外,虚拟仪器能充分利用计算机技术,在实现网络化、数据库、海量存储等方面具有更加灵活的拓展空间,能够做到更迅速、更经济、更灵活地解决工业生产、新产品试验中的复杂测试问题。

测试手段与计算机技术同步发展,正向着多功能、集成化、智能化方向迈进。

1. 硬件功能软件化

随着微电子技术的飞速发展,微处理器的速度越来越快,价格越来越低,使得一些实时性要求很高、原本要由硬件完成的功能,可以通过软件实现,甚至一些原来采用硬件电路难以解决的问题也可以通过软件技术很好地加以解决。数字信号处理技术的发展和高速数字信号处理器的广泛应用,极大地增强了仪器的信号处理能力。数字滤波、FFT、相关、卷积等信号处理的常用方法,其共同的特点是主要算法由迭代式的乘法和加法组成,这些运算如果在通用计算机上由软件完成,耗时会较长,而数字信号处理器通过硬件完成运算,大大提高了仪器性能。

2. 集成化、模块化

大规模集成电路LSI技术的发展,大大提高了仪器系统的集成度。模块化功能硬件是现代仪器仪表的显著特征,它使得仪器的硬件组成更加简洁和灵活,软件调用硬件更加方便,做到真正意义上的即插即用。

测量仪器与计算机技术的深层次结合产生了全新的仪器结构,从卡式仪器、VXI、PXI总线发展到虚拟仪器。虚拟仪器利用计算机屏幕作为虚拟仪器面板,可实现硬件仪器的全部功能,并可方便地将多种仪器功能集成于一体,构建多功能集成仪器,实现“软件就是仪器”的概念。如对采集的数据通过测试软件进行标定和数据点的显示,就构成了数字式存储示波器;若对采集的数据利用软件进行FFT变换,则成了一台频谱分析仪。

3. 参数整定与修改实时化

随着各种现场可编程器件和在线编程技术的发展,测量仪器的参数甚至结构不必在

设计阶段确定,而是可以在仪器的使用中根据现场实际需要实时置入或修改。

4. 硬件平台通用化

现代仪器强调软件的应用,可以选择配置一个或多个具有共性的基本硬件组成通用的硬件平台,通过调用不同的软件来扩展组成多功能仪器系统。通常测试仪器由以下几部分组成:

- ① 数据的采集;
- ② 数据的分析与处理;
- ③ 存储、显示和输出。

传统的测量仪器将上述三个部分按功能固定方式组建,用户无法修改和扩展,虚拟仪器在通用硬件平台上通过软件可以构建任何仪器。

0.3.3 测量信号处理技术的发展

随着计算机技术的不断发展,基于网络平台的应用开发环境将形成主流,网络技术、虚拟现实技术、三维成像技术将成为新一代软件应用平台的新特点。流场测试、图像识别、远程测试、虚拟实验室、智能测控等将使传统测试系统产生重大变革。

在测试平台上,调用不同软件就可构成不同功能的测试仪器,软件在系统中占有十分重要的地位,也是未来技术发展和竞争的焦点。在进行信号分析与处理时要计算的诸如峰值、有效值、均值、均方值、方差、标准差等,若采用硬件电路计算将是非常复杂的,而像信号频谱、相关函数、概率密度函数等难以由硬件电路实现,即使是采用了微处理器的智能化仪器,如频谱分析仪、传递函数分析仪等,因其价格昂贵,使多数用户望而却步。而在现代测试平台上,通过软件实现信号数据特征的定义和运算则很容易,使得原来只有“贵族仪器”才具有的信号分析与测量功能得以在一般工程测量中应用,使信号分析与处理技术能够方便地为工程生产实践服务。

在现代测试技术中强调计算机技术和软件的重要性并不削弱测试技术本身的核心地位,因为计算机软件无法全部替代测试所必需的传感器和数据采集接口等硬件,而且不理解测试系统的基本原理就不能正确构建现代测试系统,也不可能在计算机上编制测试软件。因此,现代测试技术既要求测试人员熟练掌握计算机应用技术,又要求他们深入掌握测试技术的基本理论和方法。

0.4 测试技术课程的性质和任务

测试工作是一件非常复杂的工作,需要多学科知识的综合运用。从广义的角度来讲,测试工作涉及试验设计、模型理论、传感器、信号的加工与处理(传输、调理和分析、处理)、误差理论、控制工程、系统辨识和参数估计等内容。从狭义来讲,测试工作则是指在选定激励的方式下检测信号,进行信号的调理和分析,以便显示、记录或以电量输出信号、数据的工作。测试技术课程立足在有限的学时内,从狭义范畴来研究机械工程动态测试中常用的传感器、新型调理电路及记录仪器的工作原理,测试系统基本特性的评价方法,测试信号的分析 and 处理方法,以及常见物理量的测试方法。



测试系统已从模拟式进入数字式时代,不论是模拟式还是数字式测试系统,从信号在测试系统中的流程角度看,包括信号的获取(敏感),信号调理(放大、整流、滤波),信号调制,信号传输,信号的处理,信号的显示、记录和输出的整个过程。只有掌握对信号进行恰当处理的方法,才能明确提出对系统及相关环节的具体要求,确定合理的系统性能,构造性价比较高的测试系统。在整个测试过程中,根据具体情况,不论经过多少中间变换环节,都必须尽最大可能将反映被测参数有用信息的信号,由系统输入端不失真或基本不失真地传输到输出端,并对中间各环节所引入或产生的噪声以及电磁辐射加以抑制,使系统具有可靠地提取和辨识有用信号的能力。

在动态测试中,输出信号与输入信号或测试激励与响应具有动态对应关系,只有应用信号分析与处理的理论、方法和技術,才能可靠地获取有用信息,并加以准确地分析、判断,以此解释系统动态测试过程的现象、状态和特性。

对高等学校机械工程类专业来说,该课程是一门专业基础课。通过学习,学生应能掌握合理选用测试仪器、配置测试系统和进行动态测试所需要的基本知识和技能,为今后进一步学习、研究和处理机械工程中更复杂的测试技术问题打下基础。

从进行动态测试工作所必备的基本条件出发,学生在学完测试技术课程后应具有下列几方面的知识:

① 掌握信号的时域和频域的描述方法,形成明确的信号频谱结构的概念;掌握频谱分析和相关分析的基本原理和方法;掌握数字信号分析中一些最基本的概念和方法。

② 掌握测试系统基本特性的评价方法及不失真测试条件,并能正确地进行测试系统的分析和选择;掌握一阶和二阶系统的动态特性及其测定方法。

③ 了解常用传感器、常用信号调理电路及记录仪器的工作原理和性能,并能进行正确、合理的选用。

④ 对动态测试工作的基本问题有一个比较清晰和完整的概念,能初步掌握构建简单测试系统及装置的方法并对机械工程中常见的物理参数进行测试。

测试技术课程具有很强的实践性特征,只有在学习过程中紧密联系实际,注意深入理解物理概念,强化实验过程体验,才能逐步加深理解并掌握有关理论,具备一定的实践能力,获得关于动态测试系统的完整概念,初步具有处理实际测试问题的能力。

思考题



1. 简述测试技术的重要性。
2. 举例说明信息、信号和测试三者之间的关系。
3. 从测试系统构成来分析说明传感器是测试系统的关键组成部分。
4. 列举身边测试技术的应用实例。
5. 简要说明测试系统的主要组成,试以一具体的测试系统为例进行说明。
6. 应用测试系统时,应考虑那些主要因素?
7. 学习信号分析处理基础知识的基本目的是什么?
8. 测试技术研究的基本内容是什么?
9. 简要说明现代测试技术的发展趋势。
10. 简要说明测试与控制的关系。



第 1 章

信号及其描述

“信号是信息的载体”，在信号中包含着人们所需的信息，这些信号常以随时间变化的波形表达出来。但在大多数情况下，仅通过对这些波形的一般观察，很难获取所需要的信息。信号分析的目的是突出、识别、提取信号中的有用信息。

1.1 信号的分类与描述

1.1.1 信号

人类社会的发展过程离不开信号。信号是一类可以描述范围极为广泛的物理现象，它所含的信息总是寄寓在某种形式的波形之中。例如，人的声带系统所产生的语音信号就是一种声压的起伏变化；一幅黑白照片上各点的亮度变化波形构成了影像信息。在数学上，信号可以表示为一个或多个变量的函数，称为信号函数。

1.1.2 信号的分类

通常，信号分为静态和动态两类，前者的量值基本上不随时间变化或仅随时间发生很缓慢的变化；而后者则随时间变化而变动。测试技术中研究的信号主要是动态信号，本书中所提及的信号均指动态信号。对不同类型的动态信号，其处理方法有较大的差别，因此，有必要对动态信号进行分类。动态信号的分类方法有很多种：按表现形式，分为确定性信号和非确定性信号；按连续性，分为连续信号和离散信号；按幅值与能量，分为能量信号和功率信号。

1. 确定性信号和非确定性信号

(1) 确定性信号

能明确用数学关系式描述与时间变化的相互关系的信号称为确定性信号。这类信号的幅值与时间对应关系具有唯一性，可以用确定的图形（曲线）或解析式来描述其变化过程。若其为时间的一元函数，则对于指定的某一时刻，就可确定唯一相对应的函数值，因此也称其为规则信号。例如，集中质量的单自由度振动系统（如图 1-1 所示）做无阻尼运动时，其质点位移可表示为

$$x(t) = x_0 \sin \left(\sqrt{\frac{k}{m}} t + \varphi_0 \right)$$

式中, x_0 ——初始振幅;

k ——弹簧刚度;

m ——质量;

t ——时间;

φ_0 ——初始相位。

确定性信号按照其是否重复出现又分为周期信号和非周期信号。

① 周期信号:按一定时间间隔周而复始重复出现,无始无终的信号。

② 非周期信号:确定性信号中那些不具有周期重复性的信号称为非周期信号。

非周期信号有两种:准周期信号和瞬变非周期信号。准周期信号是由两种以上的周期信号合成的,但其组成分量间无法找到公共周期,因而无法按某一时间间隔周而复始重复出现。除准周期信号之外的其他非周期信号,是一些或在一定时间区间内存在,或随着时间的延续而衰减至零的信号,称为瞬变非周期信号。图 1-1 所示的振动系统中,若加上阻尼装置后,其质点位移可用下式表示:

$$x(t) = x_0 e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

其图形如图 1-2 所示,它是一种瞬变非周期信号,随着时间的无限增加而衰减至零。

(2) 非确定性信号(随机信号)

非确定性信号也称为随机信号,随机信号具有随机性特点,每次观测的结果都不相同,无法用精确的数学关系来描述,只能用概率统计的方法来描述它的规律。自然界和生活中有许多随机信号过程,例如汽车奔驰时产生的振动、环境噪声等。

2. 连续信号和离散信号

若信号数学表达式中的独立变量取值是连续的,则称为连续信号,用 $x(t)$ 表示(如图 1-3a 所示)。连续信号的幅值可以是连续的,也可以是离散的。时间和幅值都为连续的信号又称为模拟信号;自变量是连续的,但幅值为离散的信号称为量化信号。在实际应用中模拟信号和连续信号两名词往往不予区分。

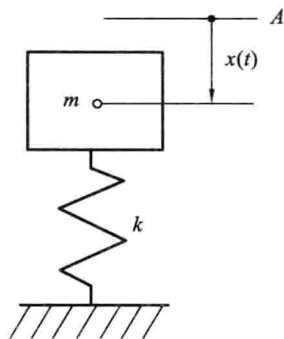


图 1-1 单自由度振动系统

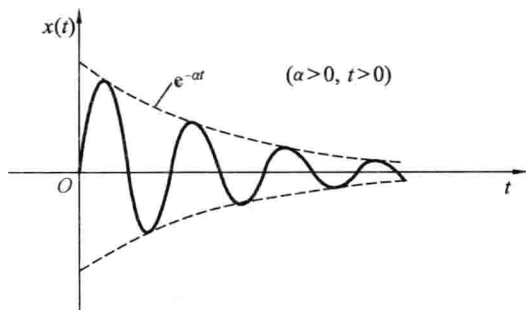


图 1-2 瞬变非周期信号(衰减振荡信号)

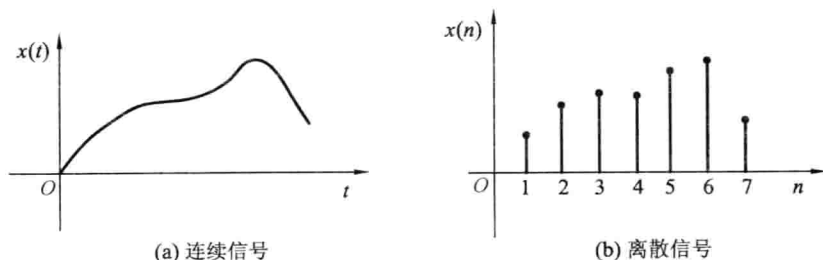


图 1-3 连续信号和离散信号