

高等学校“十一五”规划教材(机械类)

王琨琦 王芳 主编
王丽 侯志敏 副主编

工程测试技术

GONGCHENG CESHU JISHU

兵器工业出版社

高等学校“十一五”规划教材(机械类)

工程测试技术

王琨琦 王芳 主编
王丽 侯志敏 副主编

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书是重庆理工大学物理实验中心的教师在多年的物理实验教学实践的基础上编写而成。内容涉及力学、热学、电磁学、光学和近代物理多方面的内容, 共计 82 个实验项目。每个实验项目由实验目的、实验原理、实验仪器、实验内容及步骤、思考题和附录等组成, 编写过程中尽量做到通俗易懂, 注重对实际操作和实验数据处理能力的培养。

本书可作为大学本科、理工科专业学生物理实验教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

工程测试技术/王琨琦, 王芳主编. —北京: 兵器工业出版社, 2009. 8

ISBN 978 - 7 - 80248 - 379 - 8

I. 工… II. ①王…②王… 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 (2009) 第 121746 号

出版发行: 兵器工业出版社
发行电话: 010 - 68962596, 68962591
邮 编: 100089
社 址: 北京市海淀区车道沟 10 号
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京市北中印刷厂
版 次: 2009 年 8 月第 1 版第 1 次印刷
印 数: 1—1050

责任编辑: 张小洁
封面设计: 李 晖
责任校对: 郭 芳
责任印制: 赵春云
开 本: 787 × 1092 1/16
印 张: 17
字 数: 432 千字
定 价: 27.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

前 言

“工程测试技术”是高等院校机械电子工程专业学生必修的技术基础课。我们根据多年的教学实践，参考兄弟院校的教学大纲，多次制定了自己的教学大纲，并在教学中不断完善，由王琨琦和王芳于1997年编写出“机电工程测试技术”讲义。本次教材版是在该讲义的基础上经过教学改革，按照新的教学体系和案例式教学方法，重新编写而成。

本书包含测试技术的三大部分，即传感器、工程测试方法和信号处理技术，以机械量的测试为主，试图把测试技术中的机械结构和电子技术有机结合在一起，以期贯彻“以机械为基础，以电子技术为主导的机电结合”的专业方针。

书中内容的选取是以测试技术的基础理论为先导，以案例教学为方法，由浅入深地介绍各种物理量的测试方法，并努力反映国内外测试技术的新成就。

本书除测试技术基础外，以被测物理量为主线分章，各章又以传感器原理或测试方法为辅线分节，期望以两条线分章节的方法编写本书，既突出实用性，又使读者容易学习掌握。这样，可以使本教材不但适用于机电工程的学生，还适用于机械类各专业或其他专业的学生。同时，它还可作为各工程领域技术人员的参考书或工具书。

为了帮助学生和读者进一步理解、深化和巩固所学内容，本书编写有习题、例题集和实验指导书。为了形象地展现传感器、测试技术和信号处理的内容，我们还编写出版了《传感器原理及其应用》电视教学片，并制作了“机电工程测试技术”网络教学精品课课件，带有网络实验和网上互动教学，如果结合使用，可达到更好的效果。

全书共9章，由王琨琦和王芳任主编，王丽和侯志敏任副主编。王琨琦编写了绪论和所有各章的工程案例，侯志敏参加了第1~第3章的编写，王丽参加了第4~第6章的编写，王芳参加了第7~第9章的编写，全书由王琨琦进行统稿，并作了较大的修改。贾建军、王鹏、王雅楠和沈海鸣也参加了编写、录制与校对工作。

白万民教授主审了本书，并对初稿提出了许多宝贵意见。在此，谨向他表示衷心感谢。

由于编者水平有限，错误与不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者
2008年10月

目 录

第0章 绪论	1
0.1 测试技术与科学技术	1
0.2 工程测试技术与机电工程	1
0.3 本课程的研究对象、性质和特点	4
第1章 信号与测试系统的分类与描述	5
1.1 信号的分类与描述	5
1.1.1 信号的定义	5
1.1.2 信号的分类	5
1.1.3 信号的时域和频域描述方法	12
1.2 信号的频谱分析	13
1.2.1 周期信号的频域描述	13
1.2.2 非周期信号的频域描述	18
1.3 随机信号	30
1.3.1 随机信号的描述	30
1.3.2 随机过程的主要特征参数	31
1.4 测试系统特性分析	34
1.4.1 概述	34
1.4.2 测试系统的静态特性	34
1.4.3 测试系统的动态特性	35
1.4.4 实现不失真测试的条件	43
1.5 工程案例分析	44
1.5.1 案例1	45
1.5.2 案例2	46
习题	47
第2章 模拟信号处理	49
2.1 电桥	49
2.1.1 直流电桥	49
2.1.2 交流电桥	51
2.2 调制与解调	52

2.2.1	幅值调制与解调	52
2.2.2	频率调制与解调	56
2.3	滤波	58
2.3.1	概述	58
2.3.2	理想滤波器与实际滤波器	59
2.3.3	RC 模拟式滤波器分析	60
2.4	信号的相关分析	63
2.4.1	相关的概念	63
2.4.2	自相关函数	63
2.4.3	互相关函数	65
2.5	信号的功率谱分析	67
2.5.1	自功率谱密度函数	68
2.5.2	巴塞伐尔 (Parseval) 定理	68
2.5.3	互功率谱密度函数	69
2.5.4	自谱和互谱的估计	69
2.5.5	功率谱和频率响应函数的关系	70
2.6	工程案例分析	70
2.6.1	案例 1	70
2.6.2	案例 2	72
	习题	73
第 3 章	数字信号处理	75
3.1	数字信号处理的步骤	75
3.2	信号数字处理中的几个关键问题	76
3.2.1	采样、混叠和采样定理	76
3.2.2	截断、泄漏和窗函数	78
3.3	离散傅立叶变换 (DFT)	79
3.3.1	信号的时域采样和频域采样	79
3.3.2	离散傅立叶级数 (DFS)	81
3.3.3	离散傅立叶变换 (DFT)	82
3.4	快速傅立叶变换 (FFT)	83
3.4.1	FFT 算法的基本原理	83
3.4.2	FFT 算法	84
3.6	工程案例分析	86
	案例	86
	习题	88
第 4 章	模拟量位移传感器与位移的测量	90
4.1	位移测试概述	90

4.1.1	位移测量的基本概念和分类方法	90
4.1.2	传感器概述	90
4.2	电阻式传感器与位移的测量	93
4.2.1	电位器原理与位移测量	93
4.2.2	电阻应变式传感器与位移测量	95
4.3	电感式传感器与位移的测量	99
4.3.1	自感式传感器与位移的测量	99
4.3.2	电涡流式传感器与位移的测量	102
4.3.3	互感式传感器与位移的测量	105
4.4	电容式传感器与位移的测量	110
4.4.1	间隙变化型	110
4.4.2	面积变化型	111
4.4.3	介质变化型	113
4.4.4	电容式传感器位移测量电路	114
4.5	霍尔传感器与位移的测量	120
4.5.1	霍尔效应	120
4.5.2	霍尔元件与位移的测量	121
4.6	其他模拟量的位移测试方法	122
4.6.1	光电传感器的位移测量	122
4.6.2	光电位置传感器	123
4.6.3	光纤位移传感器	126
4.6.4	光图像位移传感器	128
4.6.5	旋转变压器式角位移传感器	129
4.6.6	微动同步器式角位移传感器	131
4.7	工程案例分析	131
4.7.1	案例1	132
4.7.2	案例2	134
4.7.3	案例3	134
	习题	134
第5章	数字量位移传感器与位移的测量	137
5.1	光电编码器与角位移测量	137
5.1.1	增量式光电编码器的结构与工作原理	137
5.1.2	绝对式编码器	138
5.2	光栅位移传感器	140
5.2.1	光栅的结构和类型	140
5.2.2	光栅传感器位移测量的工作原理	141
5.3	磁栅式位移传感器	144
5.3.1	磁栅传感器的组成及类型	144

5.3.2	磁栅传感器位移测量的工作原理	145
5.3.3	磁栅传感器位移测量的应用	147
5.4	容栅式传感器与位移测量	148
5.4.1	容栅位移传感器的工作原理及信号处理方式	148
5.4.2	容栅传感器的位移测量	149
5.5	感应同步器与位移测量	149
5.5.1	感应同步器的结构与分类	149
5.5.2	感应同步器位移测量的工作原理	150
5.6	激光位移测量装置	153
5.7	工程案例分析	155
	习题	156
第6章	力与压力的测量	158
6.1	力的测量	158
6.1.1	应变式测力系统	158
6.1.2	位移式测力系统	163
6.1.3	压磁式测力传感器	163
6.2	压力的测量	165
6.2.1	概述	165
6.2.2	压力敏感元件	166
6.2.3	压阻式传感器测压力	168
6.2.4	应变式压力传感器	171
6.2.5	电容式压力传感器	174
6.2.6	电感式压力传感器	174
6.2.7	伺服式压力测量系统	175
6.2.8	谐振式压力传感器	177
6.3	工程案例分析	182
	案例	182
	习题	184
第7章	速度与加速度的测量	185
7.1	速度的测量	185
7.1.1	速度测量方法	185
7.1.2	磁电式速度传感器测速	187
7.1.3	光电式传感器测速	192
7.1.4	其他测速装置	195
7.2	加速度的测量	197
7.2.1	加速度测量方法	197
7.2.2	压电式传感器测量加速度	197

7.2.3 其他传感器测量加速度	205
7.3 工程案例分析	208
案例	208
习题	208
第8章 振动的测试	211
8.1 振动和振动测试系统概述	211
8.1.1 振动信号分类	211
8.1.2 振动测量方法	214
8.2 测振系统	216
8.2.1 测振系统的组成	216
8.2.2 测振传感器	217
8.2.3 测振放大器	218
8.3 振动系统动态特性测试	220
8.3.1 激励方式	220
8.3.2 激振器	222
8.3.3 相对振动与绝对振动的测试	225
8.3.4 振动位移的测试	227
8.3.5 振动速度的测量	228
8.3.6 振动加速度的测试	229
8.3.7 测振传感器的合理选择	230
8.4 振动的信号分析方法及分析仪器	231
8.4.1 模拟式频率分析仪	232
8.4.2 数字式分析仪器振动测试系统	232
8.4.3 振动信号的分析与处理	235
8.5 工程案例分析	236
8.5.1 案例1	236
8.5.2 案例2	237
习题	237
第9章 测试系统设计初步	239
9.1 现代测试系统的设计思想和方法	239
9.1.1 概述	239
9.1.2 组合化和开放式系统的设计思想	239
9.1.3 开放式系统的设计方法	240
9.2 测试系统的分类及其组成	242
9.2.1 测试系统的基本测试方法	242
9.2.2 测试系统的组成	245
9.2.3 测试系统的分类	247

9.3 测试系统设计关键技术——计算机及接口设计	250
9.4 现代测试系统的结构类型	253
9.4.1 智能仪表和变送器	253
9.4.2 基于现场总线的智能仪器	255
9.4.3 虚拟仪器	256
习题	259
参考文献	260

第0章 绪 论

0.1 测试技术与科学技术

测试就是测量与试验的有机结合。

测量是确定被测物属性的量值。试验或实验通常是与测量密不可分的。成功的科学实验或技术试验都是以测量为先导，经过多次的反复，最终以正确地测出被测量而结束。

科学的基本目的在于客观的认识和描述自然界。而测试则是人类认识自然界的手段。精确的测试是科学研究的基本方法。

纵观历史，科学技术的发展总是推动测试技术的进步，而测试技术的进步总是成为科学技术进一步发展的阶梯。广义地讲，科学技术的发展史甚至就是测试技术的发展史。无论是中国的指南针、地动仪，还是牛顿的力学实验、瓦特的蒸汽机实验，测量与实验总是推动着技术的进步；不管是伦琴发明 X 射线，还是麦克耳逊的干涉仪，科学家们在经过周密精细的实验测试成功后，都终于完成了他们不朽的佳作，创造出历史上一个又一个科学的奇迹。

0.2 工程测试技术与机电工程

工程测试是指工程技术方面的测试。工程测试的主要特点是对非电物理量的电测法，这种测量是通过一定的仪器和适当的方法，把各种非电物理量转换成电信号输出。这使测试的现代化、自动化和“实时”或“在线”测试成为可能，并为自动控制、计算机控制和远程控制创造了极好的条件。

机械电子工程是一门机电结合的工程技术，涉及机械、电子、计算机、材料、控制、信息等大多数工程学科和兵工、航空航天、机械、轻工、交通、纺织等非常广泛的工程技术领域，其共性关键技术包括检测传感技术、信息处理技术、伺服驱动技术、自动控制技术、精密机械技术及系统总体技术等。而测试技术就占了机电工程六大共性关键技术的前两项，是机电工程的支柱。

(1) 机电工程测试技术的基本内容

机电工程测试技术的基本内容，就是选择合理的测量和试验方法，并选择合适的传感器，把机电工程中的各种非电物理量（信号）转换成电信号，并采用相应的信号处理方法，以获取有用的信息。

在测试工作的许多场合中，并不考虑信号的具体物理性质，而是将其抽象为变量之间的函数关系，特别是时间函数、空间函数或频率函数，从数学上加以分析研究，从中得到一些具有普遍意义的理论。这些理论极大地发展了测试技术，并成为测试技术的重要组成部分。

这些理论就是信号的分析和处理技术。

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、计算机和通信技术）之一。

信息总是蕴涵在某些物理量之中，并依靠它们来传输的。这些物理量就是信号。就具体物理性质而言，信号有电信号、光信号、力信号等等。其中，电信号在变换、处理、传输和运用等方面，都有明显的优点，因而成为目前应用最广泛的信号。各种非电信号也往往被转换成电信号，而后传输、处理和运用。

一般说来测试工作的全过程包含着许多环节：以适当的方式激励被测对象、信号的检测和转换、信号的调理、分析与处理、显示与记录以及必要时以电量形式输出测量结果或反馈过来用于控制。因此，测试系统的大致框图可用图 0-1 来表示。

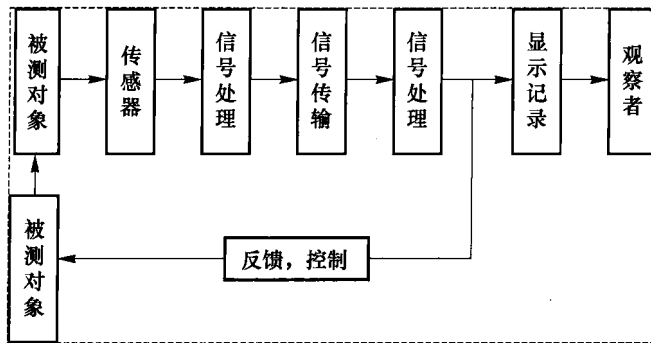


图 0-1 工程测试系统框图

客观事物是多样的。测试工作所希望获取的信息，有可能已载于某种可检测的信号中，也有可能尚未载于可检测的信号中。对于后者，测试工作就包含着选用合适的方式激励被测对象，使其产生既能充分表征其有关信息又便于检测的信号。事实上，许多系统的特性参量在系统的某些状态下，可能充分地显示出来；而在另一些状态下却可能没有显示出来，或者显示得很不明显，以至难于测量出来。因此，在后一种情况下，要测量这些特性参量时，就需要激励该系统，使其处于能够充分显示这些特性参量的状态中，以便有效地检测载有这些信息的信号。

传感器能按一定的规律将被测量转换成可用输出信号，这种信号通常是电信号。

信号调理环节把来自传感器的信号转换成更适合于进一步传输和处理的形式。这时的信号转换，在多数情况下是电信号之间的转换。例如，将幅值放大、进行幅值或频率调制，相敏检波，等等。

信号处理环节接受来自调理环节的信号，并进行各种运算、滤波、分析，将结果输至显示、记录或控制系统。

信号显示、记录环节以观察者易于认识的形式来显示测量的结果，或者将测量结果存储，供必要时使用。

在所有这些环节中，必须遵循的基本原则是各环节的输出量与输入量之间应保持一一对应和尽量不失真的关系，并必须尽可能地减小或消除各种干扰。

应当指出，并非所有的测试系统都具备图 0-1 中的所有环节，尤其是反馈控制环节和传输环节。实际上，环节与环节之间都存在着传输。图中的传输环节是指较远距离的通信

传输。

工程测试技术是一种综合性技术，对新技术特别敏感。要做好这项工作，需要综合运用各种学科的知识，注意新技术的运用。

(2) 机电工程测试技术的发展方向

现代测试技术，既是促进科技发展的重要技术，又是科学技术发展的结果。在现代科技发展的同时，测试技术迅速吸取和综合各个科技领域（如物理学、化学、生物学、材料科学、微电子学、计算机科学和工艺学等）的新成就，开发出新的方法和装置。

近年来，新技术的兴起使测试技术蓬勃发展，尤其在以下几个方面的发展最为突出：

1) 电路设计的改进

广泛采用运算放大器和各种集成电路，大大简化了测试系统，提高了系统特性。例如，有效地减小了负载效应、线性误差，等等。

2) 新型传感器层出不穷，可测量迅速增多

当今世界已拥有极高水平的各种电子设备和信息技术。传感器是信息之源头，只有拥有良好而多样的传感器，才能在非电量的自然界中有效地使用这些设备和技术。有人认为支配了传感技术，就能把握住新时代。能不能开发出上乘的测试装置，关键也在于传感器的开发和应用。

当今传感器开发中，下列三个方面的发展引人注目：

①物性型传感器大量涌现。物性型传感器是依靠敏感材料本身的物性随被测量的变化来实现信号的转换的。因此，这类传感器的开发实质上是新材料的开发。目前发展最迅速的新材料是半导体、陶瓷、光导纤维、磁性材料以及所谓的“智能材料”（如形状记忆合金、具有自增殖功能的生物体材料等）。这些材料的开发，不仅使可测量大量增多，使力、热、光、磁、温度、气体、离子等方面的一些参量的测量成为现实，也使集成化、小型化和高性能传感器的出现成为可能。此外，当前控制材料性能的技术已经取得长足的进步。这种技术一旦实现，将会完全改变原有敏感原件设计的概念：从根据材料特性来设计敏感元件，转变成按照传感要求来合成所需的材料。总之，传感器正经历着从结构型为主转向以物性型为主的过程。

②集成、智能化传感器的开发。微电子学、微细加工技术和集成化工艺等方面的进展，出现了多种集成化传感器。这类传感器，或是同一功能的多个敏感元件排列成线型、面型的传感器；或是多种不同功能的敏感元件集成一体，成为可同时进行多种参量测量的传感器；或是传感器集成一体，使传感器具有部分智能，成为智能化传感器。

③化学传感器的开发。近20年来，工农业生产、环境监测、医疗卫生和日常生活等领域，广泛应用化学传感器。化学传感器把化学量转换成电量。大部分化学传感器是在被测气体或溶液分子与敏感元件接触或被其吸附之后才开始感知的，而后产生相应的电流和电位。目前市场上供应的化学传感器以气体传感器、温度传感器、离子传感器和生物化学传感器为主。预计在未来一段时间内，化学传感器将会蓬勃发展，并将出现一些智能化学传感器。

3) 广泛应用信息技术

信息技术，特别是计算机技术和信息处理技术，使测试技术产生了巨大变化，大幅度地提高了测试系统的精确度、测量能力和工作效率；引进许多新的分析手段和方法，使测试系统具有实时分析、记忆、逻辑判断、自校、自适应控制和某些补偿能力，向着智能化发展。

4) 多参量测量系统的开发

由于出现各种廉价传感器和实时处理装置,为开发多传感器和多种参量测试系统提供了可能性。这种测量系统实现多自变量函数的测量,是自动控制系统必不可少的装置。它也广泛应用于设备的监测和组成线型或面型传感阵列进行图像或场量的测试。

5) 数字化信号处理方法的引入和提高

快速傅立叶变换、离散谱密度分析和数字个人计算机技术的提高,使数字化信号处理更加方便、廉价和微型化,使工程测试系统成为先进、有效的集成化系统。

0.3 本课程的研究对象、性质和特点

本课程的研究对象是机电工程中各种非电物理量的电测试技术,特别是动态测试技术。其主要包括各种物理量的测试用传感器的基本工作原理,测试系统的特性,测试信号的分析和各种处理方法,工程测试的各种方法。

本课程是高等院校机械电子类各专业的技术基础课。

本教材除前3章信号处理与信号分析外,其余结构上以被测物理量为主线分章,便于学生了解各种物理量的测试方法,同时便于工程技术人员节选其中内容,短时间掌握工程技术中所遇到的物理量的测量与试验方法;而每章中则是以传感器的原理或测量方法分节,使学生容易掌握基本原理。

在学习本教材中应注意掌握信号时域和频域的描述方法,特别是频域分析及其分析的原理和方法,熟悉模拟信号的处理方法和数字信号的处理方法;掌握一阶和二阶系统的动态特性及其分析方法,对动态测试有一个完整的概念,能初步运用于某些物理量的测试;掌握位移和振动的测试方法,熟悉其他物理量的测试方法,并对各种物理量的测试有一个简洁、清楚的小结。

本课程具有很强的技术性和实践性。学生要认真做好各个实验,特别是自选和开放性实验,从中体会各种物理概念,真正掌握测试理论。

第1章 信号与测试磁通的分类与描述修改部分

1.1 信号的分类与描述

1.1.1 信号的定义

信号是信号本身在其传输的起点到终点的过程中所携带的信息的物理表现。

例如，在研究一个质量弹簧系统在受到一个激励后的运动状况时，便可以通过系统质量块的位移时间关系来描述。反映质量块位移的时间变化过程的信号则包含了该系统的固有频率和阻尼比的信息。

在讲到信号时不能不提及噪声的概念。噪声也是一种信号，噪声的定义是：干扰对信号的感知和解释的现象称为噪声。“噪声”一词本来源于声学，意思也是指那些干扰对声音信号的感知和解释的声学效应。

信噪比是用来对信号被噪声所污染的程度的一种度量。信噪比 ξ 表达为信号功率 P_s 与噪声功率 P_n 之比：

$$\xi = P_s/P_n \quad (1-1)$$

通常将信噪比用分贝所测量的对数刻度来表示：

$$\xi_{dB} = 20\lg\xi \quad (1-2)$$

必须指出的是，信号与噪声的区别纯粹是人为的，且取决于使用者对两者的评价标准。某种场合中被认为是干扰的噪声信号，在另一种场合却可能是有用的信号。举例来说，齿轮噪声对工作环境来说是一种“污染”，但这种噪声也是齿轮传动缺陷的一种表现，因而可用来评价齿轮副的运动状态，并用它来对齿轮传动机构作故障诊断。从这个意义上来讲，它又是一个有用的信号。一个被干扰的信号仍然是一个信号，因此仍采用相同的模型来描述有用信号及其干扰，这样，信号理论也必须包括噪声理论。

1.1.2 信号的分类

为了深入了解信号的物理实质，将其分类研究是非常必要的。下面讨论几种比较常见的分类方法。

(1) 确定性信号与非确定性信号

1) 确定性信号

可以用明确的数学关系式描述的信号称为确定性信号。它可以进一步分为周期信号、非周期信号与准周期信号。

周期信号是经过一定时间可以重复出现的信号，满足条件：

$$x(t) = x(t + nT) \quad (1-3)$$

式中 T 表示周期， $T = 2\pi/\omega_0$ 。例如，机械系统中，回转体不平衡引起的振动，往往是一种周期性运动。

非周期信号往往具有瞬变性。例如，锤子的敲击力；承载缆绳断裂时的应力变化；热电偶插入加热炉中温度的变化过程等，如图 1-1 所示，这些信号都属于瞬变非周期信号，并且可用数学关系式描述。

图中： $F = \sin\omega t (0 < t < \tau)$ $\sigma = \sigma_k (0 < t < \tau)$ $T = T_s - (T_s - T_0)e^{-\frac{t}{\tau}} (0 < t < \infty)$

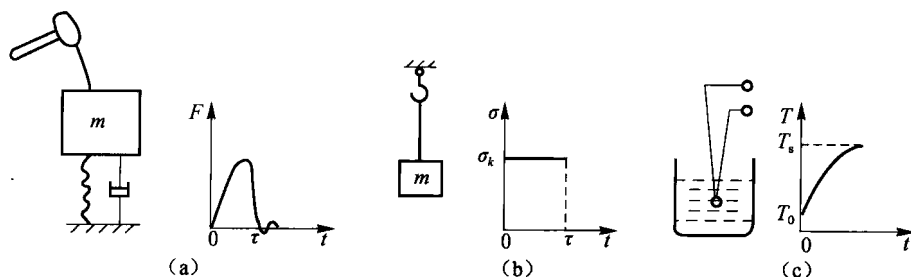


图 1-1 瞬变非周期信号

(a) 锤子敲击力；(b) 承载缆绳断裂时的应力；(c) 热电偶插入炉中时的温度变化

准周期信号是周期与非周期的边缘情况，是由有限个周期信号合成的，但各周期信号的频率相互间不是公倍关系，其合成信号不满足周期条件，例如：

$$x(t) = \sin t + \sin \sqrt{2}t$$

这是两个正弦信号的合成，其频率比 $\omega_1/\omega_2 = 1/\sqrt{2}$ ，不是有理数，不成谐波关系。这种信号往往出现在通信、振动系统，应用于机械转子振动分析、齿轮噪声分析、语音分析等。

2) 非确定性信号

非确定性信号不能用数学关系式描述，其幅值、相位变化是不可预知的，所描述的物理现象是一种随机过程。例如，汽车奔驰时所产生的振动；飞机在大气流中的浮动；树叶随风飘荡；环境噪声等。

然而，需要指出的是：实际物理过程往往是很复杂的，既无理想的确定性，也无理想的非确定性，而是相互掺杂的。

(2) 能量信号与功率信号

1) 能量信号

在所分析的区间 $(-\infty, +\infty)$ ，能量为有限值的信号称为能量信号，满足条件：

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^2(t) dt < \infty \quad (1-4)$$

关于信号的能量，可作如下解释：对于电信号，通常是电压或电流，电压在已知区间 (t_1, t_2) 内消耗在电阻上的能量：

$$E = \int_{t_1}^{t_2} \frac{U^2(t)}{R} dt \quad (1-5)$$

对于电流，能量：

$$E = \int_{t_1}^{t_2} Ri^2(t) dt \quad (1-6)$$

在上面每一种情况下，能量都是正比于信号平方的积分。讨论消耗在 1Ω 电阻上的能量往往是很方便的，因为当 $R=1\Omega$ 时，上述两式具有相同形式，采用这种规定时，就称方程

$$E = \int_{t_1}^{t_2} x^2(t) dt \quad (1-7)$$

为任意信号 $x(t)$ 的“能量”。但须注意到，这一关系式中包括了一个带有适当量纲的数“1”，通常定义，当区间 (t_1, t_2) 为 $(-\infty, +\infty)$ 时，能量为有限值的信号称为能量信号，或称为能量有限信号，例如，矩形脉冲 (t_1, t_2) 、减幅正弦波 $(0, \infty)$ 、衰减指数等信号。

2) 功率信号

有许多信号，如周期信号、随机信号等，它们在区间 $(-\infty, +\infty)$ 内能量不是有限值，在这种情况下，研究信号的平均功率更为合适。

在区间 (t_1, t_2) 内，信号的平均功率：

$$P = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} x^2(t) dt \quad (1-8)$$

若区间变为无穷大时，上式仍然大于零，那么信号具有有限的平均功率，称之为功率信号。具体讲，功率信号满足条件：

$$0 < \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2(t) dt < \infty \quad (1-9)$$

显而易见，一个能量信号具有零平均功率，而一个功率信号具有无限大能量。

(3) 时限与频限信号

时域有限信号是在有限区间 (t_1, t_2) 内定义，而其外恒等于零。例如，矩形脉冲、三角脉冲、余弦脉冲等。而周期信号、指数衰减信号、随机过程等，则称为时域无限信号。

频域有限信号是指信号经过傅立叶变换，在频域内占据一定带宽 (f_1, f_2) ，其外恒等于零。例如，正弦信号、 $\text{sinc}(t)$ 函数、限带白噪声等，为时域无限频域有限信号； δ 函数、白噪声、理想采样信号等，则为频域无限信号。

时域有限信号的频谱，在频率轴上可以延伸至无限远。由时、频域对称性可推论，一个具有有限带宽的信号，必然在时间轴上延伸至无限远处。显然，一个信号不能够在时域和频域都是有限的。这可阐述为如下定理：一个严格的频域有限信号，不能同时又是时间有限信号，反之亦然。

(4) 连续信号与离散信号

根据信号的幅值及其自变量（即时间）是连续的还是离散的，可分为连续信号与离散信号。

1) 连续信号

若自变量是连续的，则称该信号是连续信号。对连续信号来说，时间变量是连续的，而信号的幅值可以是连续的，也可以是离散的。时间变量和幅值均为连续的信号称为模拟信号，如图 1-2 (a) 所示。时间变量连续、但幅值离散的信号称为量化信号，如图 1-2 (b) 所示。