

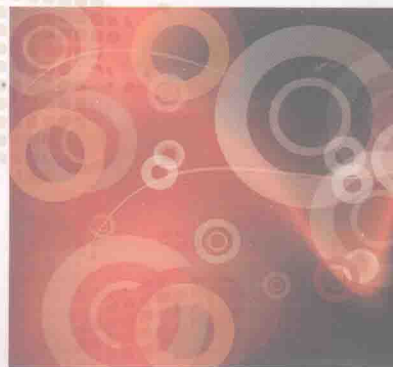


远程教育“十二五”规划教材

测试技术基础

CESHI JISHU JICHU

张洪亭 王明赞 编



東北大學出版社
Northeastern University Press

“十二五”规划教材

测试技术基础

张洪亭 王明赞 编

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 张洪亭 王明赞 2013

图书在版编目 (CIP) 数据

测试技术基础 / 张洪亭, 王明赞编. — 沈阳: 东北大学出版社, 2013. 12
ISBN 978 - 7 - 5517 - 0479 - 3

I. ①测… II. ①张… ②王… III. ①测试技术—成人高等教育—教材 IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 294737 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了测试技术的基本理论与机械量的测试方法。基础部分包括信号的分类与描述、信号的分析及应用、测试系统的基本特性、传感器原理、信号的调理与记录、计算机数据采集与分析系统; 测试技术的应用部分包括应力、应变、力、压力、位移、振动、噪声、流量等参数的测试技术。

本书可作为高等学校本专科机械类专业测试技术基础、传感器与测试技术、机械工程测试技术课程的教材。对工厂、研究院以及其他从事机械工程性能试验和机电一体化产品设计、开发的工程技术人员也有参考价值。各部分自成体系, 可满足不同层次学生的需求和章节选用; 教材结构除教学内容外, 增加了章导学、备有答案的章习题和模拟试题。

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress. com

http: // www. neupress. com

印 刷 者: 抚顺光辉彩色广告印刷有限公司

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 20. 25

字 数: 499 千字

出版时间: 2013 年 12 月第 1 版

印刷时间: 2013 年 12 月第 1 次印刷

责任编辑: 刘 莹

封面设计: 刘江旸

责任校对: 辛 思

责任出版: 唐敏智

ISBN 978 - 7 - 5517 - 0479 - 3

定 价: 39. 50 元

远程教育“十二五”规划教材建设指导委员会

主 任 姜茂发

常务副主任 卢俊杰 刘常升

委 员 (以姓氏笔画为序)

于天彪 马 明 吕文慧 孙新波

巩亚东 宋叔尼 李鸿儒 李 晶

杜宝贵 陈国秋 周成利 赵 文

徐文清 栗 志 黄卫祖 蒋 敏

总 序

2010年，党中央、国务院召开了新世纪第一次全国教育工作会议，发布了《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020年）》。纲要中明确指出：“加快发展继续教育。更新继续教育观念，加大投入力度，加快各类学习型组织建设，基本形成全民学习、终身学习的学习型社会。”“大力发展现代远程教育……为学习者提供方便、灵活、个性化的学习条件。”《纲要》指明了教育事业科学发展的方向，描绘了教育改革发展的宏伟蓝图。

2012年6月，教育部颁布了《国家教育事业第十二个五年规划》，对我国未来五年继续教育体系建设做出了科学规划。强调要发挥现代信息技术在继续教育中的作用，把发展现代远程教育作为建设学习型社会的重要战略举措。

自教育部1999年3月批准现代远程教育第一批试点高校以来，已有68所高校开展了远程教育的试点工作。到2010年年底，远程教育在校本专科学生数已达到453万人，占当年全国继续教育人数的35%（数据来源：教育部网站）。远程教育已经成为继续教育体系中的重要组成部分。

教材是与远程学习者关系最为密切的一个要素，是资源建设的一个重要组成部分。随着试点工作的不断深入，各高校在人才培养模式、资源建设、学习支持服务等方面开展了积极的探索与实践，远程教育教材建设工作越来越为各试点高校所重视。开发建设适合远程教育学习的教材，直接影响学习者的学习成效，关系到远程教育的质量。

在十几年来远程教育试点工作经验基础上，针对远程教育的特点及学生的实际情况，我们开发了“远程教育‘十二五’规划教材”。在教材开发过程中，从教材建设指导委员会到每一位编著者，都对远程教育的现状与特点做了认真研究；教材编著者都是远程教育的课程主讲教师，熟悉远程教育教学模式，了解学生实际情况及

需求，保证了教材具有较强的先进性、针对性和实用性。

教材是远程教育资源的重要组成部分，教材建设工作是一项长期而艰巨的任务。符合远程教育实际，能够满足学生实际需求的教材，对于提高学生学习效率，构建学生自主学习环境具有重要意义。我们希望通过“远程教育‘十二五’规划教材”的建设工作，探索出一条教材建设工作的新思路、新方法，为我国远程教育事业的发展起到积极的推动作用。

(东北大学) 远程教育“十二五”规划教材建设指导委员会

2012 年 11 月 18 日



前

言

测试技术是人类认识客观世界的手段，是科学研究的基本方法。在工程实际中，无论是工程研究、产品开发，还是质量监控、性能试验等，都离不开测试技术。测试技术属于信息科学的范畴，与计算机技术、自动控制技术、通信技术构成完整的信息技术学科。在大学的机械类各专业里，测试技术已经是研究生、本专科生的必修课程。

本书着重介绍测试技术基础中常用的基本理论及其应用。为适应当前科研及生产发展的需要，本书除对静态测量有一定的描述外，着重介绍动态测量系统、测试方法、信号分析理论及应用，参数测试部分的编写特点是力求自成系统，以便学习各章节后，有一个完整的概念。

全书共分 12 章，前 6 章为基础部分，介绍信号的分类与描述、信号的分析与处理、测量系统的特性、常用传感器的变换原理、信号的调理与记录、计算机数据采集与分析系统；后 6 章为测试技术的应用部分，介绍常用机械参数的测试，包括力和扭矩的测量、机械振动测试、噪声的测量、位移的测量、温度的测量、流体参数的测量等。书后给出了计算类型习题的答案，还给出了模拟试题及答案，书中一些名词术语后面标注了英语词汇，仅供参考。

实验是本课程极其重要的环节，为了保证教学质量，必须进行适量的实验。动手实验在实验室进行，仿真多媒体实验可以参考与本书配套的教育部新世纪网络课程教材《机械工程测试技术》。

本书是根据东北大学张洪亨、王明赞主编的《测试技术》重新修改而成的。为了满足机械类各层次学生的需要以及各专业的特点及课时要求，对原书进行了删减改编处理。

由于编者水平所限，书中难免存在错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2013 年 6 月

目

录

0	绪 论	1
0.1	测试技术的内容和任务	1
0.2	测试系统的组成	2
0.3	测试技术的发展动向	3
0.4	测试技术基础课程的学习要求	4
1	信号的分类和描述	6
1.1	信号及其分类	6
1.2	周期信号	8
1.3	瞬变信号	12
1.4	随机信号	21
2	信号的分析与处理	26
2.1	信号的时域分析	26
2.2	信号的相关分析	32
2.3	信号的频域分析	40
3	测量系统的特性	51
3.1	测量误差和准确度的基本概念	51
3.2	测量系统及其主要性质	53
3.3	测量系统的静态特性	55
3.4	测量系统的动态特性	58
3.5	测量系统在典型输入下的响应	66
3.6	实现不失真测试的条件	68
3.7	测量系统特性参数的测定	70
4	常用传感器的变换原理	76
4.1	概 述	76
4.2	电阻式传感器	80

4.3	电感传感器	85
4.4	电容传感器	92
4.5	压电传感器	97
4.6	磁电和霍耳传感器	100
4.7	光电传感器	103
4.8	光纤传感器	107
4.9	其他类型传感器	108

5 信号的调理与记录 111

5.1	电 桥	111
5.2	信号的放大与衰减	116
5.3	调制与解调	120
5.4	滤波器	125
5.5	信号指示和记录装置	132

6 计算机数据采集与分析系统 144

6.1	数据采集与分析系统的构成	144
6.2	信号数字化处理中的主要问题	145
6.3	快速傅立叶变换原理	154
6.4	数据采集元件	160
6.5	虚拟仪器	171
6.6	基于计算机的数据采集系统设计	172

7 力和扭矩的测量 175

7.1	电阻应变计的应用	176
7.2	应力测量	180
7.3	扭矩测量	197

8 机械振动测试 202

8.1	概 述	202
8.3	测振传感器	204
8.4	常用的测振放大器	215
8.5	振动的激励与激振器	219

9 噪声的测量 224

9.1	噪声测量的主要参数	225
-----	-----------------	-----

9.2	噪声的分析方法与评价	228
9.3	噪声测量仪器	233
9.4	噪声测量及其应用	236
10	位移的测量	241
10.1	常用位移传感器	241
10.2	光栅式传感器	242
10.3	光电盘和编码盘	249
10.4	磁 尺	254
10.5	激 光	257
10.6	位移测量实例	260
11	温度的测量	265
11.1	温度标准与测量方法	265
11.2	常用的测温传感器	267
11.3	辐射测温	275
11.4	常见的温度测量误差	280
12	压力、流量和流速的测量	283
12.1	压力的测量	283
12.2	流量的测量	288
12.3	流速测量系统	297
模 拟 试 题		305
参 考 答 案		308
参 考 文 献		311

0 绪 论

导

学

测试技术是含有试验性质的测量技术，包括测量和试验两个方面。通过学习，达到如下目标。

- ① 了解测试技术的基本概念、主要用途和本课程将介绍的测量参数。
- ② 掌握测试系统的结构和各基本环节的作用。
- ③ 了解测试技术的发展动向和本课程的基本要求。

0.1 测试技术的内容和任务

测试技术(Technique of Measurement and Test)是具有试验性质的测量技术，包括测量和试验两个方面。测量指确定被测对象属性量值的全部操作，试验指的是在科学研究和工程实际中进行的测量。例如，测量轧钢机在轧制过程中轧件的厚度、轧制力和传动轴的扭矩。测试技术通过技术手段获取研究对象的状态信息，以一定的准确度描述和分析其运动状态，是科学研究的基本方法。它的范围非常广泛，本课程主要介绍非电量电测技术，即把非电物理量转换成电流、电压等电量，通过处理电量，获取对象的信息。作为机械工程测试技术，本书讨论如下被测量参数：

- ① 运动参数，包括固体位移、速度、加速度和流体的流量、流速等；
- ② 力参数，包括应力、应变、力、扭矩和压力(压力均指流体压力)等；
- ③ 振动参数，包括固有频率、阻尼比、振型等，是反映物体振动特征的特殊参数；
- ④ 其他与设备状态密切相关的参数、温度和噪声等。

随着科学技术的发展，在生产实践和科学研究中，日益广泛地应用各种测试技术来研究和鉴定生产及实验中所发生的物理现象。测试技术已经发展成为一个领域相当宽广的学科，它促进了科学技术的进步和生产力的发展，而科学技术水平的提高，又为测试技术的创新、完善和发展创造了条件。

冶金、矿山、机械制造和生产过程中所使用的机械设备不仅运动规律及结构形状非常复杂，而且大多在重载、高温及多灰尘等恶劣环境中工作。对这些生产机械及其组成部件的运动情况、强度和变形等问题的分析与设计计算，单靠理论分析的方法是很难得到可靠结果的，必须以测试技术为手段，用实验研究的方法，对各种物理现象进行检测、分析和研究。与理论计算一样，实验研究是解决工程实际问题的有效途径。

例如，为了确定轧钢机的真实负荷水平和应力状态，以便评价设备的可靠程度、改进工艺和提高设备的生产能力，需要测定轧制力、传动轴扭矩等；为了研究汽车的载荷谱和车架的疲劳强度，需要测定汽车的随机载荷和车架的应力分布；为了研究飞机零部件的可

靠性和使用寿命,需要在试验场地进行风洞试验,对其强度、动负荷以及发动机的有关参数进行严格测试和分析;为了消除刀架系统的颤振,以保证机床的加工精度,必须测定机床的振动速度、加速度和机械阻抗等动态特性参数;板材轧机的颤振会使产品表面出现振纹,甚至损坏设备,为此,需要测量轧机的振动参数和工艺参数,分析振源,以便采取相应的措施;设备过度的振动和噪声会严重地降低工作效率及损害人们的身体健康。因此,有必要现场实测设备的振动和噪声,分析其传播途径,采取隔离、预防及监测等有效措施。

综上所述,测试技术的作用和任务主要有以下几个方面。

① 在设备设计中,通过对新旧产品的模型试验或现场实测,为产品质量和性能提供客观的评价,为技术参数的优化和效率的提高提供基础数据。

② 在设备改造中,为了挖掘设备的潜力,以便提高产量和质量,经常需要实测设备或零件的载荷、应力、工艺参数和电机参数,为设备强度校验和承载能力的提高提供依据。

③ 在工作和生活环境的净化及监测中,经常需要测量振动和噪声的强度及频谱,经过分析,找出振源,并采取相应的减振、防噪措施,改善劳动条件与工作环境,保证人们的身心健康。

④ 科学规律的发现和新的定律、公式的诞生都离不开测试技术。从实验中可以发现规律,验证理论研究结果,实验与理论可以相互促进,共同发展。

⑤ 在工业自动化生产中,通过对工艺参数的测试和数据采集,实现对设备的状态监测、质量控制和故障诊断。

测试技术研究的主要内容包括测量原理、测量方法、测量系统和数据处理四个方面。

测量原理指实现测量所依据的物理、化学、生物等现象及有关定律的总体。例如,用压电晶体测量振动加速度时依据的是压电效应;用电涡流位移传感器测量静态位移和振动位移时依据的是电磁效应;用热电偶测量温度时依据的是热电效应等。不同性质的被测对象可以用不同的原理测量,同一性质的被测对象也可用不同的原理去测量。

测量原理确定后,根据测量任务的具体要求和现场的实际情况,需要采用不同的测量方法,如直接测量法或间接测量法、电测法或非电测法、模拟量测量法或数字量测量法、等精度测量法或不等精度测量法等。

确定被测量的测量原理和测量方法以后,就要设计或选用装置,组成测量系统。

对实际测试得到的数据必须进行处理,才能得到正确、可靠的结果。

0.2 测试系统的组成

测试系统是由相关的器件、仪器和测试装置有机组合而成的具有获取某种信息之功能的整体,如图0.1所示。

测试对象的信息总是通过一定的物理量——信号——表现出来。信号通过不同的系统或环节传输,流入时被称为输入,流出时被称为输出。有些信息可以在测试对象处于自然状态时显现出来,而有些信息无法显现或不明显。在后一种情况下,需要通过激励装置作用于被测对象,使之产生便于测量的输出信号。

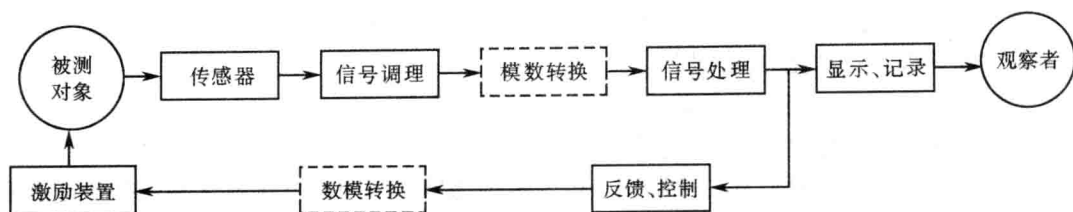


图 0.1 测试系统的组成

传感器是可将被测量转换成某种电信号的器件。它包括敏感器和转换器两部分。敏感器可以把温度、压力、位移、振动、噪声等被测量转换成某种物理量，然后通过转换器，把这些物理量转换成某种容易检测的电量，例如电阻、电容、电感的变化。一些传感器产品被称为变送器，其中包括变换电路，可输出标准范围的电压或电流信号（例如 $1 \sim 5\text{V}$ 或 $4 \sim 20\text{mA}$ ）。

信号的调理环节把传感器的输出信号转换成适合于进一步传输和处理的形式。这种信号的转换多数是电信号之间的转换，例如，把阻抗变化转换成电压变化，还有滤波、幅值放大或者把幅值的变化转换成频率的变化等。

信号处理环节对来自信号调理环节的信号进行各种运算、滤波和分析。

信号显示、记录环节将来自信号处理环节的信号，即测试的结果，以易于观察的形式显示或存储。

反馈、控制环节主要用于闭环控制系统中的测试系统。

图 0.1 中虚线框的模数(A/D)转换和数模(D/A)转换环节是在采用计算机、可编程控制器(PLC)等测试、控制系统时进行模拟信号与数字信号相互转换的环节。

需要指出的是，任何测量结果都存在误差，必须把误差限制在允许的范围内。为了准确获得被测对象的信息，要求测试系统中每一个环节的输出量与输入量之间必须具有一一对应关系，并且其输出的变化在给定的误差范围内反映其输入的变化，即实现不失真的测试。系统的传输特性确定了输出与输入之间的关系，若通过理论分析或测试确定了其中两者的数学描述，则可以求出第三者的数学描述。所以工程测试问题都可以归结为输入、输出和系统传输特性三者之间的关系问题。

0.3 测试技术的发展动向

测试技术的水平标志科学技术的发展水平，作为信息科学的重要组成部分，它与计算机技术、通讯技术和自动控制技术一起日新月异地发展和进步。从软件技术的角度，不断拓展新的测量原理和测试方法，开发新的信号分析理论。从硬件技术的角度，不断开发新型的、高性能的测量仪器和设备，其中传感器技术、测试信息处理技术占有极其重要的地位。测试系统的发展具体体现在以下几方面：

① 传感器朝新型、微型、智能型方向发展；

② 测试仪器朝高准确度、多功能、小型化、在线监测、性能标准化和低价格方向发展；

③ 参数测量与数据处理以计算机为核心,使测量、分析、处理、打印、绘图、状态显示及故障预报朝自动化方向发展。

就机械学科而言,测试技术需要在以下几个方面发展。

① 多传感器融合技术在制造现场中的应用。多传感器融合是测量过程中获取信息的新方法,它可以提高测量信息的准确性。由于多传感器以不同的方法或从不同的角度获取信息,因此,可以通过它们之间的信息融合,去伪存真,提高测量准确度。

② 柔性测试系统。采用积木式、组合式测量方法,实现不同层次、不同目标的测试目的。

③ 虚拟仪器。它是虚拟现实技术在精密测试领域的应用:一种是将多种数字化的测试仪器虚拟成一台以计算机为硬件支撑的数字式的智能化测试仪器;另一种是研究虚拟制造中的虚拟测量,如虚拟量块、虚拟坐标测量机等。

④ 智能结构。它属于结构检测与故障诊断,是融合智能技术、传感技术、信息技术、仿生技术、材料科学等的一门交叉学科,使监测的概念过渡到在线、动态、主动的实时监测与控制。

⑤ 视觉测试技术。它是建立在计算机视觉研究基础上的新兴测试技术。与计算机视觉研究的视觉模式识别、视觉理解等内容不同,它重点研究物体的几何尺寸及物体的位置测量,如三维面形的快速测量、大型工件同轴度测量、共面性测量等。它可以被广泛地应用于在线测量、逆向工程等主动、实时测量过程。

⑥ 大型设备的测试。国民经济的快速发展和迫切需要使得很多方面的生产与工程中测试的要求超过了人们所能测试的范围,例如飞机外形的测量、大型设备关键部件测量、高层建筑电梯导轨的校准测量、油罐车的现场校准等,都要求能进行大尺寸测量。为此,开发了便携式测量仪器,例如便携式光纤干涉测量仪、便携式大量程三维测量系统等,用于解决现场大尺寸的测量问题。

⑦ 微观系统的测试。大型设备测量的另一个极端就是对微机械的测试。近年来,微电子技术、生物技术的快速发展,对探索物质微观世界提出了迫切要求。为了提高测量准确度,又要求进行微米、纳米级的测试。

0.4 测试技术基础课程的学习要求

测试技术是一门综合性技术。现代测试系统常常是集机、电于一体,软、硬件相结合的自动化、智能化系统。它涉及传感技术、微电子技术、控制技术、计算机技术、信号处理技术、精密机械设计理论等众多技术领域。因此,要求测试工作者具有深厚的多学科(如力学、机械学、电学、信号处理、自动控制、机械振动、计算机、数学等)知识背景。

测试技术也是实验科学的分支,学习中,必须把理论学习与实验密切结合在一起,参加必要的实验,以便得到基本实验技能训练。

通过本课程的学习,要求学生能做到以下几点:

① 掌握测试技术的基本理论,包括信号的时域和频域的描述方法、频谱分析和相关分析的原理及应用、信号调理和信号处理的基本概念与方法;

② 熟练掌握常用传感器、记录仪器的基本原理及其适用范围;

③ 掌握常用机械参量的测量原理和方法，具有一定的测试系统机、电、计算机方面的设计能力；

④ 具有实验数据处理和误差分析能力。

习 题

0.1 判断下列陈述（正确的画√，错误的画×）：

① 测试技术与计算机技术、自动控制技术、通信技术不同，不属于信息科学的范畴；

② 模数转换和数模转换环节的功能是：在采用计算机、PLC 等测试控制时，进行模拟信号与数字信号相互转换；

③ 传感器的功能是将被测信息转换成某种电信号的器件，它包括敏感器和转换器两部分；

④ 信号处理环节的功能是对来自信号调理环节的信号进行各种运算、滤波和分析。

0.2 举例说明什么是测试。

0.3 测试技术的发展动向是什么？

0.4 以框图的形式说明测试系统的组成，简述主要部分的作用。

1 信号的分类和描述

导

学

本章对周期信号、瞬变信号和随机信号从时间域和频率域两方面进行描述与分析。介绍周期信号的三角函数展开式、复指数展开式，傅里叶变换及其性质，典型信号的频谱及其性质等。本章内容是测试技术课程的理论基础，学习好本章，将为传感器应用、信号分析和解决工程实际问题奠定基础。通过学习，达到如下目标。

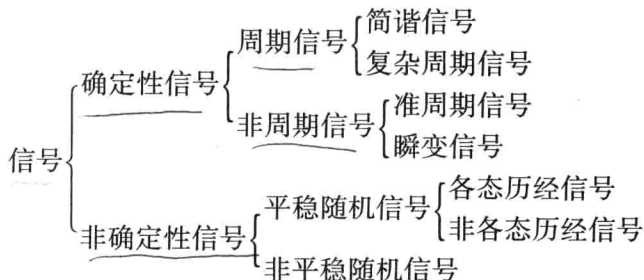
- ① 了解信号的分类和描述方法。
- ② 掌握周期性信号、瞬变信号和遍历性随机信号的性质、工程意义与数学描述。
- ③ 应用傅里叶变换，实现信号的时域描述和频域描述之间的转换，了解傅里叶变换的主要性质和卷积定理。
- ④ 掌握正弦函数、单位脉冲函数和单边指数函数典型信号的时域与频域特性。

1.1 信号及其分类

在生产实践和科学研究中，为了获取有用的、特定的信息，经常要测量各种物理量。信息指物体的存在和运动方式，它总是以某些物理量的形式表现出来，这些物理量就是信号。其中，电量较容易检测、处理和传输，在测试中，经常把各种非电量转换成电量，所以电信号的应用最广泛。信号是信息的载体，人们通过所测量的温度、声音、振动等变化的(数据形式或图像形式)信号，获取有关信息，测试过程就是信号的采集、分析、处理、显示和记录的过程。

根据考虑问题的角度不同，可以按照不同的方式对信号进行分类。

- ① 按照信号随着时间变化的规律，有



可以用明确的时间函数表示的信号称为确定性信号(Deterministic Signal)。例如集中参量的单自由度振动系统做无阻尼自由振动时的位移就是确定性信号。

周期信号(Periodic Signal)是其振幅按照一定时间间隔 T (周期)做有规则的连续变化的信号，可表示为

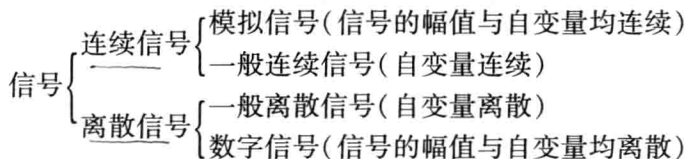
$$x(t) = x(t + T).$$

按照谐波成分多少, 周期信号分为简谐信号(Simple Harmonic Signal)和复杂周期信号。简谐信号为单一频率的正弦信号, 复杂周期信号是由两种以上的频率比为有理数的简谐信号合成的。

在非周期信号(Aperiodic Signal)中, 准周期信号(Quasi-Periodic Signal)也是由两种以上的简谐信号合成的, 但在其组成分量之间无法找到公共周期, 所以无法按照某一周期重复出现。瞬变信号(Transient Signal)是在一定时间区间内存在或者随着时间的增长而衰减至零的信号。例如有阻尼的集中参量的单自由度振动系统的位移是一种瞬变非周期信号。

非确定性信号又称为随机信号(Random Signal), 不能用准确的数学关系式来描述, 只能用概率统计方法估计其参数。

② 按照信号的取值特征, 有



若信号的自变量取值是连续的, 则称为连续信号(Continuous Signal); 若信号的自变量取值是离散的, 则称为离散信号(Discrete Signal)。如图 1.1 所示。信号幅值也可分为连续的和离散的两种, 若信号的幅值和自变量均连续, 则称为模拟信号(Analog Signal); 若信号幅值和自变量均离散, 则称为数字信号(Digital Signal)。计算机所使用的信号都是数字信号。

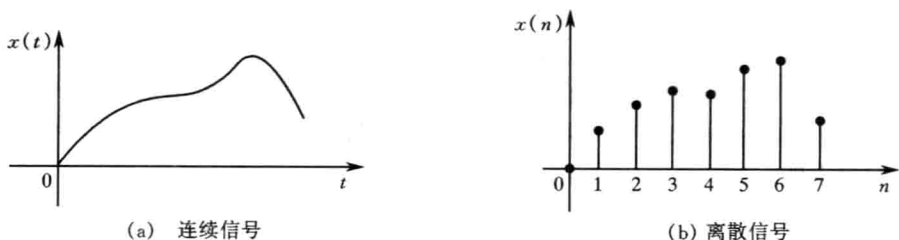


图 1.1 按照信号的取值特征进行分类

信号既可以在时域表示, 也可以在频域表示。时域表示(to Represent by Domain of Time)描述信号的幅值随时间的变化规律。频域表示(to Represent by Domain of Frequency)以频率为自变量, 描述信号中所含频率成分的幅值和相角。频域描述的结果是以频率为横坐标的各种物理量的谱线或曲线, 如幅值谱、相位谱和功率谱等。时域描述和频域描述为从不同角度观察、分析信号提供了方便。运用傅里叶级数、傅里叶变换及其反变换, 可以方便地实现信号的时域、频域转换。