

高等学校教材

机械工程

测试技术与信号分析

JIXIE GONGCHENG CESHI JISHU YU XINHAO FENXI

主编 黄惟公 曾盛梓



重庆大学出版社

机械工程测试技术与信号分析

主 编 摇黄惟公摇曾盛绰

重 庆 大 学 出 版 社

图书在版编目 (CIP)数据

机械工程测试技术与信号分析 黄惟公,曾盛绰主编

重庆:重庆大学出版社,2004

机械工程测试制造及其自动化本科系列教材

ISBN 7-5624-3111-1

I ①机... II ①黄...②曾... III ①机械...一测

试技术—高等学校—教材②机械...—信号分析—高等

学校—教材 IV ①TB

②TP

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004)第 044388 号

机械工程测试技术与信号分析

主编 黄惟公 曾盛绰

责任编辑 曾令维

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆华书书店印刷厂印刷

*

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 15.5 字数 380千字

2004年 11月第 1版 2004年 11月第 1次印刷

印数 1—5000

ISBN 7-5624-3111-1 定价: 23.00元

序

摇摇当今世界 ,科学技术突飞猛进 ,知识经济已见端倪 ,综合国力的竞争日趋激烈。国力的竞争 ,归根结底是科技与人才的竞争。邓小平同志早已明确指出 ,科技是现代化的关键 ,而教育是基础。毫无疑问 ,高等教育是科技发展的基础 ,是高级专门人才培养的摇篮。我国高等教育在振兴中华、科教兴国的伟大事业中担负着极其艰巨的任务。

为了适应社会主义现代化建设的需要 ,在 1985 年党中央、国务院颁布《中国教育改革和发展纲要》以后 ,原国家教委全面启动和实施《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》,有组织、有计划地在全国推进教学改革工程。其主要内容是 :改革教育体制、教育思想和教育观念 ;拓宽专业口径 ,调整专业目录 ,制定新的人才培养方案 ,改革课程体系、教学内容、教学方法和教学手段 ;实现课程结构和教学内容的整合与优化 ,编写、出版一批高水平、高质量的教材。

地处巴山蜀水的重庆大学 ,是驰名中外的我国重要高等学府。重庆大学出版社是一个重要的大学出版社 ,工作出色 ,一贯重视教材建设。从 1979 年代初期开始实施“立足西部 ,面向全国”的战略决策 ,针对当时国内专科教材匮乏的情况 ,组织西部地区近 100 所院校编写、出版机械类、电类专科系列教材 ,以后又推出计算机、建筑、会计类专科系列教材 ,得到原国家教委的肯定与支持。在 1985 年教育部颁布《普通高等学校本科专业目

录》之后,重庆大学出版社立即组织西部地区高校的数十名教学专家反复领会教学改革精神,认真学习全国的教育改革成果,充分交流各校的教学改革经验,制定机械设计制造及其自动化专业的教学计划和各门课程的教学大纲,并组织编写、出版机械类本科系列教材。为了确保教材的质量,重庆大学出版社采取了以下措施:

- 发挥教育理论与教育思想的指导作用,将教学改革思想和教学改革成果融入教材的编写之中。

- 根据人才培养计划中对学生知识和能力的要求,对课程体系和教学内容进行整合,不过分强调每门课程的系统性、完整性,重在实现系列教材的整体优化。

- 明确各门课程在专业培养方案中的地位和作用,理顺相关课程之间的关系。

- 精选教学内容,控制教学学时数,重视对学生自主学习能力、分析解决工程实际问题能力和创新能力的培养。

- 增强悦悦悦的内容,提高教材的先进性;尽可能运用悦悦悦等现代化教学手段,提高传授知识的效率。

- 实行专家审稿制度,聘请学术水平高、事业心强、长期活跃在教学改革第一线的专家审稿,重点审查书稿的学术质量和是否具有特色。

这套教材的编写符合教学改革的精神,遵循教学规律和人才培养规律,具有明显的特色。与出版单科教材相比,有计划地将教材成套推出,实现了整体优化,这富有远见。

经过几年的艰苦努力,这套机械类本科教材已陆续问世了。它反映了西部高校多年来教学改革与教学研究的成果,它的出版必将为繁荣我国高等学校的教材建设作出积极的贡献,特别是在西部大开发的战略行动中,起着十分重要的作用。

高等学校的教学改革和教材建设是一项长期而艰巨的工作,任重道远,不可能一蹴而就。我希望这套教材能够得到读者的关注与帮助,并通过教学实践与读者不吝指教,逐版加以修订,使之更加完善,在高等教育改革的百花园中齐花怒放!我深深为之祝愿。

中国科学院院士摇杨叔子摇摇

圆年源月圆日摇摇

第 1 章介绍了测试技术在自动检测、机械阻抗试验、故障监测等方面的典型应用。使学生对所学理论有一个综合认识,增强了对组成测试系统的整体理解,增加测试技术在工程应用方面的知识。这些内容所涉及的专业知识较多,我们的重点是使学生了解测试技术在工程中应用的基本原理和方法,开阔学生的眼界,深层次的内容请参考有关专著。

本教材增加了第 2 章若干节对象性测试的内容,但每节的内容大多数控制在 2 页左右。其目的一是增加学生的知识面,二是考虑到学生毕业后不一定专门从事动态测试的工作,但这些章节的内容有利于使学生在产品检验、生产过程监控等方面运用测试技术的基础理论。在学时不够时,这一章可留作学生自学。

本书定名为“机械工程测试技术与信号分析”,加“信号分析”是为了突出“动态测试”与传统的测试技术的区别,同时也是对“信号分析”在书中占较多篇幅的适当说明。信号分析和处理一般而言并没有明确的界线。通常把研究信号的构成和特征称为信号分析,把信号经过必要的变换以获得所需信息的过程称为信号处理。信号分析对信号本身的结构没有影响,而信号处理则可能改变信号本身的结构。考虑到本书未讲述“数字滤波”的内容,而主要是“频谱分析”的内容,所以采用“信号分析”为书名的一部分。

本书由黄惟公教授担任主编、曾盛绰副教授担任副主编。黄惟公主持制订大纲、负责全书的修改和统稿,并负责编写第 1 章;曾盛绰编写第 2 章;刘克福、张捷编写第 3 章;陈应舒编写第 4 章;郭渝编写第 5 章;李山编写第 6 章。

在编写过程中,曾参考了兄弟院校的教材和资料,得到许多同仁的关心和帮助,谨致谢意。限于时间、篇幅及编者的业务水平,在内容上有局限和欠妥之处,竭诚希望读者赐予宝贵的意见。

编 者

2008 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 动态测试	1
1.2 动态测试系统的组成	1
1.3 信号分析和处理在测试中的重要意义	1
1.4 测试技术在机械工程中的应用	1
1.5 学习本课程应注意的问题	1
第 2 章 确定性信号的频谱分析	2
2.1 信号的分类	2
2.2 周期信号的频域分析	2
2.3 非周期信号的频域分析	2
2.4 离散傅里叶变换	2
习题与思考题	2
第 3 章 测试系统的基本特性	3
3.1 概述	3
3.2 测试系统的静态特性	3
3.3 测试系统的动态特性	3
3.4 测试系统不失真测试条件	3
3.5 测试系统特性参数的测定方法	3
3.6 测试系统的负载效应和干扰	3
习题与思考题	3
第 4 章 常用传感器原理及其测量电路	4
4.1 传感器的分类	4
4.2 传感器常用测量电路	4
4.3 常用传感器	4
习题与思考题	4
第 5 章 记录仪器	5
5.1 电动圈式磁电指示机构	5
5.2 磁带记录仪	5
5.3 数字波形存储器	5
5.4 磁盘数据记录仪	5
第 6 章 信号的幅值、相关、功率谱分析	6
6.1 随机信号的基本概念	6
6.2 幅值域分析	6
6.3 相关分析	6
6.4 功率谱密度分析	6

远缘	其他信号分析技术简介	远缘
远缘	习题与思考题	远缘
第 苑章	计算机辅助测试系统	远缘
苑缘	数据采集装置	远缘
苑园	计算机辅助测试技术中的总线	远缘
苑员	数字信号分析仪	远缘
苑圆	虚拟仪器	远缘
苑猿	习题与思考题	远缘
第 愿章	测试技术在机械工程中的典型应用	远缘
愿缘	测试技术在检测技术中的应用	远缘
愿园	机械阻抗试验	远缘
愿员	测试技术在设备状态监测与故障诊断中的应用	远缘
第 怨章	常用参量的测量	远缘
怨缘	应变、力和扭矩的测量	远缘
怨园	流体参量的测量	远缘
怨员	温度的测量	远缘
参考文献	远缘

第 1 章 绪 论

1.1 动态测试

测量、计量和测试是三个密切关联的术语。测量是指以确定被测对象量值为目的而进行的试验过程。如果测量涉及实现单位统一和量值准确可靠则被称为计量。因此,研究测量、保证测量统一和准确的科学被称为计量学。而测试是测量和试验的综合。

根据被测量是否随时间变化,可将测试分为动态测试和静态测试。静态测试是指测量期间被测量值是静止不变或变化极其缓慢的测试;而动态测试是指对随时间变化较快的被测量所进行的测试。

一般来讲,人们提及机械量测试时大多是指静态测试,如对工件的直径、长度、角度等的测量。其被测量是不随时间变化的,所采用的测量仪器为卡尺、千分表、角度仪等,示值的读取主要靠操作者的肉眼。

随着测试技术的不断发展,工程中物理量的测量与数据处理,有许多已由静态发展到动态,从确定量发展到时变量,由单参数发展到多参数,由“离线”发展到“在线”,从单纯的对被测量值的估计发展到将估计、预测与控制相结合,并且将离散量与连续量的处理相联系。本课程的重点是研究机械工程中的动态测试技术的基本原理。应该指出,这些基本原理与静态测试是互相关联的。

动态测试中被测量是随时间变化的(或被认为是随时间变化的),如机械的振动、噪声、切削力、加工过程中的零件尺寸等。一般这些量变化速度快,精度要求高(如 μm 以下),用传统的静态测量仪器很难满足测试要求。因此,常采用非电量“电测法”解决此类问题。所谓“电测法”就是将被测量先转换成电量,对电量进行测量,从而间接地对被测量进行测量,如图 1-1 所示。

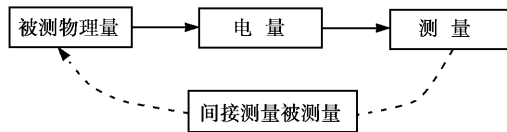


图 1-1 电测法

图 1-1 电测法动态测试系统的组成

为了对动态测试有一个初步认识,先看下面的一个工程例子:在高速旋转的情况下测量车床主轴的径向跳动。

在传统的车床主轴的径向跳动的静态测量中,常使用千分表测量。千分表是接触式测量仪表,当车床主轴高速旋转时,其指针会随着主轴的旋转不停地摆动,测量结果难以读取和记录。但使用电测法很容易解决这个问题,如图 1-1 所示就是这样一种测试系统。

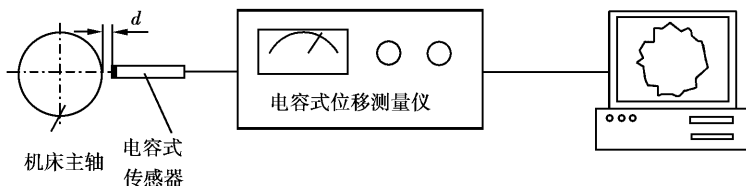


图 1-1 电测法动态测试系统的组成框图

电容式位移传感器是该测试系统的核心仪器。它被固定在车床的导轨上,与车床主轴有一个间隙 δ 。电容式传感器的头部实际是一个圆形铜片,直径约 ϕ 。由于车床主轴通过床身与大地连接,传感器头部的铜片与主轴之间就形成了一个空气电容,在主轴直径相对于电容式位移传感器铜片的直径较大的情况下,形成的电容量为:

$$C = \frac{\epsilon \phi}{\delta}$$

式中 C ——电容容量;

ϵ ——极板间(主轴表面与传感器头之间)介质的介电常数;

ϕ ——传感器头部铜片的表面积;

δ ——两极板之间的距离。

当机床主轴径向跳动时,相当于两极板间的极距 δ 发生变化,其电容也发生变化 (ΔC)。只要测得此电容的变化,就能间接知道车床主轴的径向跳动的量值。

电容式位移测量仪是将传感器测得的电容的变化转换为电压的变化,并进行滤波放大等处理。

计算机则通过 A/D 转换卡,将测得的电压转换为数字量,再经过分析处理后,将结果通过所需要的图形或文字显示出来,也可以打印出来。

由这个例子可以看出“电测法”进行测量的基本原理。一般测试工作的全过程包含: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。动态测试系统的大致框图可用图 1-2 来表示。

传感器直接作用于被测量,并能按照一定规律将被测量转换成同种或别种量值输出。这种输出通常是电信号。

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。传感器输出的信号不一定是电压或电流,也可能是电阻、电容、电感等其他信号。信号调理环节要将这

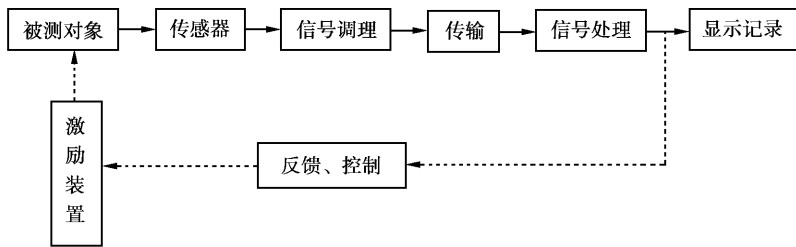


图 员猿 摇动态测试系统框图

些信号转换成统一的电压或电流信号,并进行放大、模拟滤波等等,如其后端连接的是计算机,还要进行 粤 转换。

信号处理环节是对信号进行各种分析,获取需要的信息。目前信号处理主要由计算机进行。

显示记录是将信号的波形和分析的结果存储、显示出来。

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不失真的关系,并必须尽可能地减少或消除各种干扰。

应当指出,并非所有的测试系统都具备图 员猿 中的所有环节,尤其是传输环节和虚线连接的反馈、控制、激励装置环节。实际上,环节与环节之间都存在着传输。图中的传输环节专指远距离的通讯传输。测试工作所希望获得的信息,有可能已载于某种可检测的信号中,也可能被测对象处于静止状态,无法产生载有其信息的信号。对于后者,要选用合适的方式激励被测对象,使其产生充分表征其有关信息又便于检测的信号。

员猿 摇信号分析和处理在测试中的重要意义

测试技术是人们借以认识客观对象的本质,并掌握其内在联系和变化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,设计合理的试验系统和进行必要的数据处理,从而获得被测对象的有关信息。

信号处理和分析并没有明确的界线,通常把研究信号的构成和特征称为信号分析,把信号经过必要的变换以获得所需信息的过程称为信号处理。信号分析对信号本身的结构没有影响,而信号处理则可能改变信号本身的结构。

信号是信息的载体。某些信息是可以直接检测的,而有些信息却是不容易直接检测的,只有通过信号的分析处理才能获得。例如,弹簧在外力作用下产生变形,其变形量是可以直接检测的。根据外力和变形,弹簧刚度也是容易计算的。但是,一个回转圆盘的不平衡量的大小及其分布却不易直接检测。利用不平衡圆盘在回转时其支承受到附加的动态力,用传感器检测支承的振动信号,对它进行分析处理就可以获得圆盘不平衡量的大小和角度位置的信息。

前面提到的测量机床主轴的径向跳动测试系统,可以获得主轴在某一方向径向跳动信息。但是,如果提出更深入的问题:主轴的径向跳动对工件的质量会产生怎样的影响呢?如果主轴的径向跳动超过了标准,是什么原因引起的呢?是主轴本身的弯曲引起的?是轴承的质量引起的?是轴承的外圈或内圈,还是轴承的滚珠引起的?诸如此类的问题,通过信号分析可以得

到解答。其道理与中医看病有类似之处。中医通过摸病人的“脉”可以获得人体健康状态的信息,人们也可以通过机床主轴的跳动、机床的噪声、机床的振动等信号获得机床运行状态的信息,诊断机床的故障原因。其方法是对机床的各种信号进行分析。可以形象地比喻为:机床的振动、噪声等信号就是机床的“脉”,检测这些信号的传感器就是医生摸脉的手,对这些信号进行分析处理的计算机就相当于医生的大脑。

信号分析工作是要用最简捷的方法获得研究对象的特定的信息,而不是企图获取该事物的全部信息。信息蕴涵于信号之中。要发现人们需要的特定信息仅仅进行简单的处理是困难的,信号分析就是通过对信号进行必要的数学变换,使蕴涵于信号中的信息显露出来。信号分析的理论和方法很多,有频谱分析、概率密度分析、相关分析、时间序列分析、小波分析等等。研究对象本身的特点不同,对分析方法的效果也不一样。有些问题用频谱分析更有效,而另一些问题可能用相关分析更有效。就像有些病可以通过心电图发现,有些病要通过载光透视才能发现一样。没有一种方法是万能的。随着科技的发展,还会出现新的信号分析理论和方法。

信号中虽然携带着信息,但是信号中既含有我们所需要的信息,也常常含有大量我们不感兴趣的其他信息,后者通称为干扰。信号也有“有用”信号和“干扰”信号的提法,但这是相对的。在一种场合中,我们认为是干扰的信号,在另一场合中却可能是有用的信号。例如齿轮噪声对工作环境是一种“污染”。但是齿轮噪声是齿轮副传动缺陷的一种表现,因此可以用来评价齿轮副的运行并用作齿轮的故障诊断信号。测试工作者的一个任务就是要从复杂的信号中排除干扰提取有用的信息,在这方面信号分析是有效的技术之一。

来源 测试技术在机械工程中的应用

测试的基本任务是获取有用信息,然后将其结果提供给观察者或输入给其他信息处理装置、控制系统。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、计算机技术和通讯技术)之一。

人类对客观世界的认识和改造活动是以测试工作为基础的。人类早期在从事生产活动时,就已经对长度(距离)、面积、时间和重量进行量测。在测试技术的发展史中,应该着重提一下伽利略的功绩。伽利略不满足古代思想家对宇宙进行哲理性的定性描述,他主张根据观测和试验,对自然界的现象和运动规律进行定量的描述。他开创了试验科学,从而开创了近代意义的自然科学。

工程技术中的研究对象往往十分复杂。有些问题至今还难以进行完整的理论分析和计算,必须依靠试验研究来解决实际问题。通过测试工作积累原始数据,是工程设计和研究中很艰巨的、也是很重要的一项工作。

在制造业中,自动控制技术的使用越来越广泛,但被控对象的状态、量值等参数必须通过测试装置,才能传递、反馈给控制器。测试装置是控制系统不可缺少的重要组成部分。

机械工程中测试技术的应用,比比皆是,但主要可划为三个领域:生产过程的自动监控、设备运行状态监测和故障诊断、试验模态分析。下面举几个典型的例子。

细长轴的加工是工艺中的一个难题。无论是车削或磨削加工,在切削力作用下,由于工件的弹性变形,使加工时工件的旋转轴线呈弓形弯曲,加工以后的工件略呈腰鼓状。一个简单的源

措施是采用辅助支承以减少工件的弹性变形,例如采用跟刀架。但是,由于在不同的加工位置,支承的条件(夹盘、顶尖和辅助支承)有所不同,支承的刚度在变化,加之热变形的影响,并不能完全抵消切削力造成的弯曲变形。如果能在加工过程中自动测量工件的直径,并将测量结果反馈给控制机床的进给机构,就提供了一种解决细长轴加工的工艺方法。类似地,在加工过程中自动检测工件的尺寸或其他工艺流程数据,实现自动控制,也成为现代机械制造中最广泛使用的手段。

随着现代化生产的发展和科学技术的进步,设备的结构越来越复杂,功能越来越完善,自动化程度越来越高。由于许多无法避免的因素的影响,有时设备会出现各种故障,降低或失去预定的功能,甚至造成严重的灾难性事故。因此,保证设备的安全运行,消除事故,是十分迫切的问题。如果对设备运转时的噪声、振动等各类参数进行测试,与设备正常运行时的参数进行比较分析,找出其特征,就可以监视设备的运行状态,消除故障隐患。目前,在航天航空、大型发电机组等重要设备中大都采用这种在线监测技术。

机械在动载荷下的特性与静载荷下的特性是不同的。动载荷下的机器固有频率、阻尼、振型、对某种激励的响应等动态特性虽然有理论分析方法,但研究对象复杂,边界条件难以确定,目前仍然要用试验的方法来研究,这就是试验模态分析。

以上三方面的应用,本书第 8 章有较详细的例子。

当然,测试技术在其他领域以及在人们的日常生活中(如家电、办公自动化)也有大量应用。

测试工作不仅能为产品的质量和性能提供客观的评价,为生产技术的合理改进提供基础数据,而且是进行一切探索性的、开发性的、创造性的科学发现和技术发明的手段。可以设想,如果没有材料试验数据,就不能充分合理和科学地进行强度计算;没有有效的参数测量和过程监测,就不能使设备高效率地运行;没有工艺流程数据的测试和采集,就无法实现任何自动化。所以测试技术是机械工业发展的一个重要基础技术。

猿缘 学习本课程应注意的问题

对高等学校机械工程有关专业,《机械工程测试技术与信号分析》是一门技术基础课。通过本课程的学习,培养学生能较正确地选用测试装置并初步掌握进行动态测试所需要的基本知识和技能,为学生进一步学习、研究和处理机械工程问题打下基础。

本课程的内容分两部分:基础理论部分和常见机械参量的测试方法与工程应用部分。

从进行动态测试工作所必备的基本理论出发,学生学完本课程应具有下列几方面的知识:
猿)掌握信号的时域和频域的基本分析方法,建立明确的信号的频谱概念,掌握频谱分析和相关分析的基本原理和方法,掌握功率谱分析原理,掌握数字信号分析的基本原理。

圆)掌握测试装置静、动态特性的评价方法和不失真测试条件,并能正确地应用于测试装置的分析 and 选择,理解一二阶系统动态特性的测定方法。

猿)掌握常用传感器、调理变换电路和记录仪器的工作原理和性能,并能较正确地选用。

源)了解测试技术在机械工程中的主要应用,理解这些应用的原理。

缘)对计算机组成的测试系统有一个完整的概念。

远)了解一些常用机械工程参量的测试方法。

本课程涉及的知识范围较广,需要高等数学、控制工程、电工、计算机以及机械工程专业的基本知识。特别是课程中涉及到的有关数学知识,使部分学生望而生畏。其实,课程中所涉及的高等数学知识是很简单的,只要学过(不一定学得很好)高等数学中的微积分、级数就可以学好本课程,千万不要被书中所引用的数学公式和符号所吓倒,应把精力放在对概念的理解上。

本课程具有很强的实践性。只有在学习过程中密切联系实际,加强实验,注意物理概念,才能真正掌握有关知识。学生必须参加必要的实验,才能受到应有的试验能力的训练,才能得到有关动态测试工作的完整概念,只有这样,才能初步具有处理实际测试工作的能力。

第 四章 确定性信号的频谱分析

生产实践和科学试验中,通过测量将获得大量被测对象的信号。这些信号常以随时间变化的波形表达出来。“信号是信息的载体”,这些信号中,包含着我们所需要的信息,但在大多数情况下,仅通过对这些波形的一般观察,是很难获取所需要的信息的。信号分析的目的在于:突出、识别、提取信号中的有用信息。信号的频谱分析,是最经典的信号分析技术之一。

4.1 信号的分类

对实际信号,可以从不同角度、不同特征以及不同的使用目的进行分类。在不引起混淆的情况下,本书在讨论与信号有关的问题时,“信号”与“函数”不加区分。

4.1.1 确定性信号

能用确定的数学关系式表达的信号称为确定性信号。确定性信号可分为周期信号和非周期信号。

(1) 周期信号

一个随时间变化的信号 $x(t)$,当满足关系式 $x(t) = x(t + nT)$ 时,称 $x(t)$ 为周期信号。其中 T 为周期信号的周期,单位:秒(s);

n 为周期信号的整周期数, $n = 1, 2, 3, \dots$ 。

(2) 非周期信号

能用确定的数学关系式表达,其值不具有周期性的信号称为非周期信号。指数信号、阶跃信号等都是非周期信号。

4.1.2 非确定性信号(随机信号)

不能用确定的数学关系式来表达的信号称为非确定性信号。例如汽车在行使过程中的振动,随风摆动树叶的位移,海浪的高低等,其幅值的大小、最大幅值出现的精确时间,均无法由公式来表达,实际测量的结果每次也不尽相同,这种性质称为“随机性”。因此,非确定性信号也称为随机信号。随机信号要用概率统计的方法来描述。

4.1.3 模拟信号与数字信号

与计算机技术的应用相关,也可以从另一个角度把信号分为模拟信号和数字信号。

若信号在时域的数学表达式中的自变量(时间)取值是连续的,则称为连续信号。如果信号中的时间取离散值,则称为离散信号,如图 4.1 所示。离散信号可以用离散图形表示,也可以用数字序列表示。离散信号的幅值可以是连续的,也可以是离散的。时间和幅值均为连续

的信号称为模拟信号。若信号的时间是离散的而幅值取连续值的，称为采样信号。若信号的时间和幅值都取离散值的，称为数字信号，这时“数据”与“信号”可以通用。计算机的输入、输出信号都是数字信号。

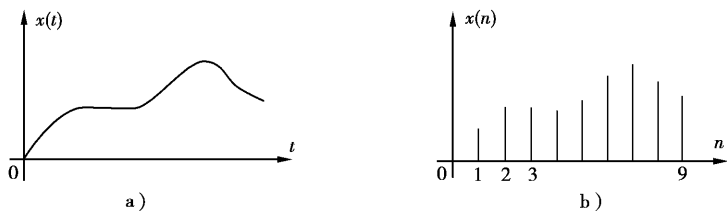


图 1.1 连续信号与离散信号

图 1.2 对时域的模拟信号进行了进一步的划分，其中本节未提到的内容将在有关的章节中解释。

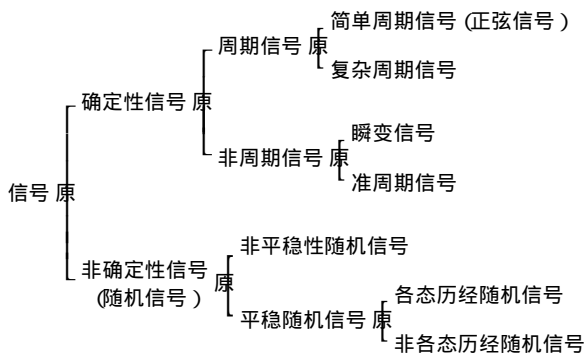


图 1.2 信号的分类

周期信号的频域分析

傅里叶级数与周期信号的频谱

最简单的周期信号是正弦信号

$$x(t) = A \cos(\omega t + \theta)$$

其中 A ——正弦信号的幅值；

ω ——正弦信号的圆频率 (单位: rad/s)；

f ——频率 (单位: Hz)；

θ ——正弦信号的相位 (也称相角或初相角, 单位: rad)。

如果正弦信号的周期为 T 则它们之间的关系为：

$$f = \frac{1}{T}, \quad \omega = 2\pi f$$

幅值、频率、相位是正弦信号的三要素，三者惟一地确定了正弦信号的形式。余弦信号