

普通高等教育机电类规划教材

测试技术

尤丽华 主编
高龙琴 林 晖 副主编



机械工业出版社
China Machine Press



普通高等教育机电类规划教材

测 试 技 术

主 编 尤丽华
副主编 高龙琴 林 晖
参 编 倪厚强
主 审 刘正勋



机 械 工 业 出 版 社

本教材能够贴近工程实际, 适合应用型人才的需求。全书共分七章, 其中四章讲解有关测试技术及测试装置的基础知识, 如测试系统常用传感器、信号调理与显示记录, 信号分析方法等, 测试技术概论中讲述信号及系统的数字模型以及测试系统基本特性。第七章以多个应用实例力图阐明一些典型参数的测试方法、传感器的选用以及测试系统的构成方法。第五章介绍了计算机辅助测试 (CAT) 技术, 并适当地引入了虚拟仪器的概念。第六章从宏观上阐述测试系统性能要素及提高性能的措施。

本书可作为本科机械工程及自动化专业教材, 也可供高职机械类专业使用, 还可作为工程技术参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

测试技术/尤丽华主编. —北京: 机械工业出版社,
2002. 6

普通高等教育机电类规划教材

ISBN 7-111-10005-0

I. 测… II. 尤… III. 测试技术-高等学校-教材
N. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 031134 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 高文龙 版式设计: 张世琴 责任校对: 姚培新

封面设计: 姚毅 责任印制: 闫焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·6 印张·230 千字

0 001—4 000 册

定价: 16.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527
封面防伪标均为盗版

普通高等教育机电类规划教材编审委员会

主任委员：邱坤荣

副主任委员：黄鹤汀

左健民 高文龙 章 跃

王晓天 蔡慧官 沈世德

秘 书：周骥平

委 员：(排名不分先后)

沈世德 周骥平

徐文宽 唐国兴

韩雪清 戴国洪

李纪明 吴建华

鲁屏宇 王 钧

赵连生

序

人类满怀激情地跨入了充满机遇与挑战的 21 世纪。这个世纪是经济全球化、科技创新国际化的世纪，是新经济占主导地位的世纪，是科学技术突飞猛进、不断取得新突破的世纪。这个世纪对高等教育办学理念、体制、模式、机制和人才培养等各个方面都提出了全新的要求，培养的人才必须具备新思想新观念、不断创新、善于经营和开拓市场、有团队精神等素质。

机械高等工程教育是我国高等教育的重要组成部分，21 世纪对它的挑战同样是严峻的。随着现代科学技术的迅猛发展，特别是微电子技术、信息技术的发展，它们与机械技术紧密结合，从而形成传统制造技术、信息技术、自动化技术、现代管理技术等相交融、渗透的先进制造技术，使制造业和制造技术的内涵发生了深刻的变化。面向 21 世纪的机械制造业正从以机器为特征的传统技术时代迈向以信息为特征的系统技术时代。制造技术继续沿着 20 世纪 90 年代展开的道路前进。制造技术和自动化水平的高低已成为一个国家或地区经济发展水平的重要标志。而目前我国制造技术与国际先进水平还有较大差距，亟需形成我国独立自主的现代制造技术体系。面对这一深刻的变化和严峻的形势，我们必须认真转变教育思想，坚持以邓小平同志提出的“三个面向”和江泽民同志提出的“四个统一”为指导，以持续发展为主题，以结构优化升级为主线，以改革开放为动力，以全面推进素质教育和改革人才培养模式为重点，以构建新的教学内容和课程体系，深化方法和手段改革为核心，努力培养素质高、应用能力与实践能力强、富有创新精神和特色的应用性的复合型人才。

基于上述时代背景和要求，由国家机械工业局教编室、机械工业出版社、江苏省教育厅（原江苏省教委）、江苏省以及部分省外高等工科院校成立了教材编审委员会，并组织编写了机械工程及自动化专业四个系列成套教材，首批 31 本，作为向新世纪的献礼。

这套教材力求具有以下特点：

(1) 科学定位。本套教材主要用于应用性本科人才的培养。

(2) 强调实际、实践、实用，体现“浅、宽、精、新、用”。所谓“浅”，就是要深浅适度；所谓“宽”，就是知识面要宽些；所谓“精”，就是要少而精，不繁琐；所谓“新”，就是要跟踪应用学科前沿，跟踪技术前沿，推陈出新，反映时代要求，反映新理论、新思想、新材料、新技术、新工艺；所谓“用”，就是要理论联系实际，学以致用。

(3) 强调特色。就是要体现一般工科院校的特点、特色,符合一般工科院校的实际教学要求,不盲目追求教材的系统性和完整性。

(4) 以学生为本。本套教材尽量体现以学生为本、以学生为中心的教育思想,不为教而教,要有利于培养学生自学能力和扩展、发展知识能力,为学生今后持续创造性学习打好基础。

当然,本套教材尽管主观上想以新思想、新体系、新面孔出现在读者面前,但由于是一种新的探索以及其它可能尚未认识到的因素,难免有这样那样的缺点甚至错误,敬请广大教师和学生以及其他读者不吝赐教,以便再版时修正和完善。

本套教材的编审和出版得到了国家机械工业局教编室、机械工业出版社、江苏省教育厅以及各主审、主编和参编学校的大力支持和配合,在此,一并表示衷心感谢。

普通高等教育机械工程及自动化专业机电类规划教材编审委员会

主任 邱坤荣

2001年元月于南京

前 言

测试技术是当今信息技术中一个主要分支,是理工科各专业的重要技术基础。从 20 世纪 70 年代末开始,测试技术就成为机械类专业的技术基础课或骨干专业课。特别是随着机电一体化技术的发展,机械电子工程这样现代学科的形成,一批优秀的测试技术教材应运而生,对测试技术的教学、应用和发展起到奠基和推动的作用。测试技术是随着电子技术、传感技术、新材料、新工艺的发展而发展的,内容很丰富,涉及物理学、电子学等多种学科。同时该门课程既有较强的实践性,又有较深的理论性。编写的关键是如何规划教材的内容,使其在实践性和理论性上得到有机的结合。按照编审委员会的要求,编写适用于以应用性本科人才为培养目标的教材是我们在编写过程中力求达到的目标。所谓应用性,我们认为,就是要把教材在理论上的系统性纳入应用的轨道,这是本书的一个特点。本书的编写内容和提纲是经编写协调会的多次协调,进行了认真的修改后确定的,并经过南京航空航天大学刘正勋教授审阅。

本书是按照从宏观到局部再到宏观的认识思路编写的。先整体地认识测试系统并了解其数学工具及其基本特性,然后分各组成部分进行认识,最后再从宏观上进一步了解系统的性能及其应用。既突出重点,又注意知识面宽;既突出实际应用,又注重必要的基础理论;同时注意到内容的新颖和技术的发展。借此机会,对教材编写作几点说明:

1. 将信号和系统作为不可分割的整体、放在第一章中同时认识,有利于比较分析,分清易混淆的概念。并把对信号和系统描述的数学表达式以数学模型的概念提出,以突出其物理意义。

2. 在第三章中,根据实际使用要求,增加了常用的差动放大电路,程控放大电路等。以满足智能化测试仪的要求。

3. 信号分析是学生较难掌握的一章。本书编写中力求用通俗化语言阐明物理意义,并用应用加深理解,同时把数字信号处理内容删去,在计算机辅助测试中将模拟量数字化的基本概念交待清楚。

4. 本书增加“测试系统性能”一章的出发点是希望能进一步了解测试系统全面的品质,而不局限于基本特性的认识。拓宽学生的知识面。

本书由尤丽华统稿和定稿,任主编,高龙琴、林晖任副主编。其中第一、六章和第七章的部分内容由尤丽华编写,第二章和第七章的部分内容由林晖编写,第三、四、五章由高龙琴编写,倪厚强参与了第四、五章的编写,陈树祥参与了编

写内容和编写提纲的确定。全书由南京航空航天大学刘正勋教授主审。

编写中参考了许多同类教材和著作,在此对诸位编者和作者表示深深的谢意。

姜旻副教授和安伟副教授对本书提出许多宝贵的建设性意见,在此深表感谢。由于本书编者的水平有限,经验不足,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编者

目 录

序

前言

第一章 测试技术概论	1
第一节 测试技术基本概念	1
第二节 测试系统和信号	5
第三节 测试系统的基本特性	31
第四节 测试系统的组成方法	40
第五节 测试技术的发展	42
习题与思考题	42
第二章 测试系统常用传感器	44
第一节 概述	44
第二节 结构型传感器	45
第三节 物性型传感器	64
第四节 其它传感器	73
第五节 传感器的选用	81
习题与思考题	84
第三章 测试信号调理电路与显示记录	85
第一节 电桥	85
第二节 测量放大器	90
第三节 信号的调制与解调	96
第四节 滤波器	103
第五节 信号的显示和记录	110
习题与思考题	114
第四章 测试信号分析	115
第一节 概述	115
第二节 相关分析及其应用	116
第三节 功率谱密度分析及其应用	124
习题与思考题	128
第五章 计算机辅助测试技术	130
第一节 智能化测试仪	130
第二节 接口总线	138
第三节 工业现场分布测试系统	141

习题与思考题	148
第六章 测试系统性能	149
第一节 可测性测试模型	149
第二节 测试的确定性	152
第三节 测试系统的可靠性	155
习题与思考题	165
第七章 测试系统应用	166
第一节 力的测量	166
第二节 位移的测量	171
第三节 振动的测量	176
参考文献	181

第一章 测试技术概论

测试技术是当今信息时代一门重要的基础技术，它是研究从工业领域及其它领域获取信息的方法和规律的科学。测试技术以现代科学技术的发展为支撑，又反过来促进现代科学技术进一步发展，在当今技术领域内有着特殊而重要的地位。本章旨在从宏观的角度对测试技术作基础介绍，为后续章节的内容作铺垫。使读者了解测试技术的内容、认识一般测试装置（系统）的组成及组成方法、了解测试系统的研究方法等。

第一节 测试技术基本概念

一、何谓测试

测试——是测量和试验的综合。不管在日常生活还是生产活动中都需要定量地、系统地认识客观事物，由测量来知晓未知量。而试验则是带有研究、探索、论证性质的实践活动。如果把两者有机地结合起来可以定义：测试是一种研究性的、探索性的、论证性的测量过程。不是像用一根皮尺去量一块布那样的简单测量，而是要具备专门的知识，采用较为复杂的技术手段完成的测量工作。因为我们要测试的量大多是以被测物的运动形式体现出来，例如机床工作台位移的测量，实质是属于长度测量，但该长度是在变化的。测试过程可以抽象的表达为：用一定方法将工作台的运动变换成易于处理的电信号，而位移这一信息就包含在信号中（信号是信息的载体），再用一定的方法将信息从信号中提取出来并加以处理，使之成为符合要求的形式表现出来。因此又可定义：测试是获取信息的过程。

二、认识被测量

1. 被测对象

既然测试是获取信息的过程，那么需要测试的量就很广泛。本书中的测试对象主要是工业生产过程以及机电产品中的物理量，如位移（机床工作台的位移、自动线上工件的位移、工件的尺寸等）、压力（液压回路的压力、发动机气缸内的压力、压力容器内的压力等）、力（机床的切削力，机械手的夹持力等）、速度（工作台的位移速度、主轴的旋转速度等）、温度（环境温度、炼钢炉内的温度等）等等。

2. 被测量的形式

事物都是在运动的，被测量是在变化的，随时间变化的规律也是多种多样的。

有的随时间连续变化、有的随时间变化是不连续的，即离散的。总的可将被测量分成两类：确定性的和非确定性的，测试过程中的信号也相应地有确定性的和非确定性的信号。所谓确定性信号就是能够用函数关系描述的（如匀速的直线位移），而非确定性信号又称作随机信号，不能用函数关系准确描述（如机床的振动），详见本章第二节。在测试过程中对这两类信号有不同的处理方法。严格地讲在测试过程中即使被测量是确定性的，由于各种随机的干扰信号会叠加在信号上，使信号由确定变为不确定。因此处理不确定信号或从不确定信号中获取信息是测试过程中的主要任务。

另外，被测量随时间的变化有快有慢，如气温随时间变化缓慢，而机床的振动随时间变化很快。

三、测试技术应用范围及其作用

凡需要考察事物的状态、运动方式并要定量描述时均要运用测试手段。测试技术在技术研究、生产过程、自动化产品等各个环节中担当着获取信息、转换信息、传输信息和储存信息的作用。测试技术应用范围相当广泛，从航空、航天、工业自动化到我们身边简单的家用电器都离不开测试技术。测试技术已是当今信息技术的重要组成部分。总的来说，测试技术主要应用于以下四个环节中：

1. 应用于科学研究中

科学研究要对研究方案、新的未知量进行测试论证，用测试数据来确定方案正确与否。

2. 应用于机电一体化产品中

机电一体化产品也就是自动化机器，如工业用的数控机床、加工中心、工业机器人等自动化设备；办公自动化设备如复印机、打印机、扫描仪等；家庭自动化设备如全自动洗衣机、冰箱、空调、VCD等。因为测试系统是自动控制系统中的环节，机电一体化产品要实现自动化都离不开测试技术。测试是机电一体化技术五大功能要素之一。

3. 应用于生产过程的监视与控制

在生产过程中通过测试与运行条件有关的物理量，确保生产的正常运行，如火力发电厂，要时刻测量燃气轮机的气体压力、温度、发电机组的转速等，以达到控制的目的。

另一方面在生产过程中进行质量控制，如在自动加工线上设置多个质量监控点，对被加工的工件进行测量，测出不合格零件。

4. 应用于产品的质量检定

对出厂前的产品进行质量检测，达到产品标准的规定指标才能出厂。如机床厂测量出厂机床的各项精度指标、发动机厂对出厂发动机进行性能测试，检测发动机各项性能指标。

综上所述，测试技术在产品设计、生产过程、出厂检测的各项环节中起到了相当重要的作用。测试技术的水平直接影响到一个国家的工业和科技水平，它对于工业过程就像眼睛对于人一样的重要。

四、初识测试技术和系统

测试技术是解决测试的方法和手段问题的一门科学。测试的过程要由测试技术指导的实际物理系统来完成，该物理系统就称作测试系统或测试装置。

在工业领域内构成测试系统的原理和方法有多种：如机械方式（采用机械的方式测试，如测力器件：弹簧秤、磅秤）、气动方式（利用气体流速、压力的变化来测量未知量，如浮标式气动量仪）、光学方式（利用光的传输特性对未知量进行测量，如准直仪）、电测方式（将被测量转换成易于识别、传输的电信号，是一种用电量测量物理量的方式，过去称作非电量的电测技术）。前三种方式较为传统，已经逐步演化为和电测相结合。由于电子技术、传感技术、计算机技术的高速发展，电测技术已成为占主导地位的测试方式。本书所介绍的测试技术就是非电量的电测技术和相应的测试系统。

让我们看两个例子，以了解测试的过程及系统的组成。图 1-1 是加热炉温度测试系统示意图。

加热炉温度经过温度传感器 1 被转换成和温度有定量关系的电信号；该电信号经过信号调理电路或称作中间转换电路 2 被转换成易于显示记录的信息；最后从记录仪 3 输出。传感器是一种感受被测量，并将被测量转换成电量（电信号）的器件。转换电路根据需要对信号进行放大、整形、变换等，使信号能够被后续装置显示、记录、处理、储存等。

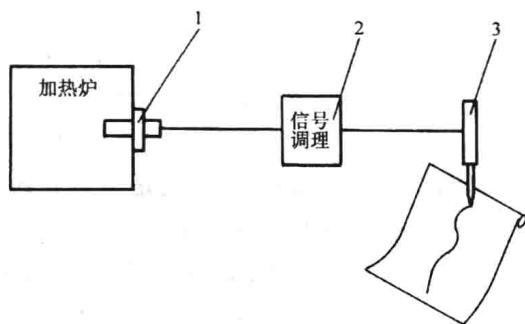


图 1-1 加热炉温度测试示意图

1—温度传感器 2—转换电路 3—显示记录仪

图 1-2 为机床工作台位移测量示意图。

在数控机床和加工中心中，为了达到精确控制进给量，必须对进给的位移量进行测量。测量由图中的 2、4、5、6 部件完成。位移传感器 2 将工作台 3 的位移量转换成电信号；信号转换电路 4 将传感器输出的电信号进行转换使之符合计算机数控装置的输入要求；计算机数控装置 5 担负数据采集、数据处理和自动控制工作。数控装置采集信号转换电路 4 的输出信号并进行处理，从中提取出和工作台位移有定量关系的、能够表达工作台位移的信息，并将位移量经显示器 6 输出，同时产生控制信号控制工作台的运动。

从上两个例子我们看到传感器、转换电路、显示记录三部分是测试系统中不可缺少的部分，是组成测试系统的基本部分。工作台位移测试系统中的信号在数

控装置中进一步被进行处理，从而完成显示和控制的任务。这是一个智能化测试系统，工业自动化系统中的测试系统通常都采用这样的组成方式。位移测试系统是工作台自动控制系统中的一部分，没有测试系统提供的数据要实现高精度自动控制是不可能的。

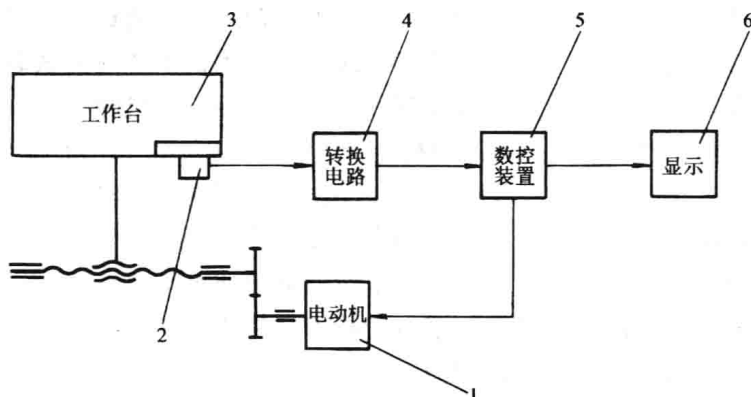


图 1-2 机床工作台位移测量示意图

1—传动装置 2—位移传感器 3—工作台 4—信号转换电路
5—计算机数控装置 6—显示器

测试技术所研究的内容就是测试系统中所包含的各组成部分的具体实施方法。各种传感方式和传感器的研究开发、各种电路及元器件的研究开发、组织或设计满足测试任务要求的测试系统；合理地选择传感器，根据要求确定转换电路和信号处理装置，确定显示、记录方式等。以上内容可分成两个研究方向：一是研究各种物理量的测量方法及元部件（包括传感器、电路）。二是根据要求研究测试系统组成。前者可以归纳到基础研究，而后者则是应用研究。本书侧重于测试技术的应用研究。

测试技术是一门综合性技术，它由多门学科支撑，如传感技术、电子技术、计算机技术等；特别是传感技术是以物理学为基础，涉及力学、电学、磁学、光学、声学、热学等。

五、测量方法

测试技术以测量学的理论作指导，符合测量原理。测量方法是指按测量原理获得测量结果的方法。在构成测试系统之前首先要确定采用何种测量方法。从不同的角度来看可分多种方法：

1. 直接测量和间接测量

间接测量是通过测量与被测量有函数关系的其它量，经计算而得到被测量的方法；直接测量则是直接测量得到被测量。如测量发动机的功率往往采用间接测量方法，即分别直接测量发动机的扭矩、转速，经计算得到功率。

2. 相对测量和替代测量

相对测量也称比较测量,通常是和某同种标准量进行比较而获得被测量的;替代测量是将已知量值的同种其它量来替代被测量。大多数的测量任务都属于相对测量,即测量值是和一标准量比较得到的。如测量工件的外径时和一标准量块或标准工件作比较。古代曹冲称象采用的方法是替代测量法。

3. 接触测量和非接触测量

是指测试系统或传感器与被测物是否接触。测试系统的部件接触被测物都会给被测物的运动带来影响。在不能忽略影响的情况下就要采用非接触测量。

4. 动态测量和静态测量

动态测量和静态测量是以被测信号的变化速度来区分的。如果测量系统测量的信号变化缓慢,这种测量过程称作静态测量;测量变化较快的信号称作动态测量。

测量方法对测量形式和测量精确性有直接的影响,测量方法的确定是测试工作关键的第一步。

第二节 测试系统和信号

测试系统是广义的,既可以是一个简单的测试装置也可指一个复杂的自动测试系统。

一、测试系统结构

从前两例中对测试系统已经有了一定的认识,现用图 1-3 的框图来表示一个测试系统或测试装置,并对其做进一步的了解。

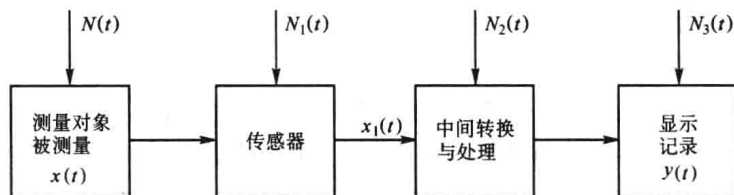


图 1-3 测试系统结构框图

传感器在测试系统和被测物体之间建立了一定的连接关系,它直接感受被测量并将其转换成电信号。例如将位移的变化转换成电压量的变化,将温度转换成电动势,将应变转换成电阻量的变化等。传感器的性能直接影响到测试系统的质量,是测试系统中的关键部件。常用传感器的原理及应用将在第二章阐述。

中间转换电路又称作信号调理电路。从传感器输出的各种电信号大多是较微弱的,还可能是电阻、电容等电参量信号,需将其转换成电压信号。中间转换电

路的作用是将传感器的输出信号进行传输、放大和转换,使其适合于显示、记录、数据处理。电路形式很多,但本书将介绍部分有共性和常见的典型信号转换电路,如电桥电路、放大电路、调制解调电路、滤波电路等。该部分内容将在第三章阐述。

信号处理单元是以计算机为核心对中间转换电路的输出信号作进一步地处理,如计算、频谱分析、数据储存和输出等。信号的分析处理方法将在第四章中阐述。

显示记录部分输出测试结果,在测试系统中是不可缺少的。显示记录装置有两种类型:一种用于显示记录模拟电信号,如记录仪、磁带记录仪、示波器等;它们直接和中间转换电路的输出连接。另一种显示记录数字信号,如显示器、打印机、绘图仪等计算机的输出设备。

测试系统离不开信号,信号是信息的载体。从图 1-3 测试系统结构方框图中可知:被测量用 $x(t)$ 表示,测试系统的输出为 $y(t)$, $N(t)$ 和 $N_i (i=1, 2, 3)$ 是系统各环节的干扰信号。信号和系统构成了完整的测试系统,是不可分割的。因此,既要研究系统也要研究信号,对它们有不同的描述方法。

二、信号及其数学模型

被测量总是按一定的规律变化,经测试系统变换成相应变化规律的电信号。信号中包含着被测物的状态或特征等有用的信息。要从各种各样的信号中获取信息,就要用一定的方法研究信号。首先要了解如何描述信号,其次了解如何分析、转换信号。描述信号变化规律的函数称作信号的数学模型。这里有一点要指出:数学模型是建立在一定的论域中的。常用的论域是时域、频域和幅值域。简单地说:时间 t 的函数表达式称作时域模型;频率的函数表达式即频域模型。

(一) 信号分类

1. 两大类信号

信号可以分成两大类:一是确定性信号,二是随机信号。确定性信号能表示为一个确定的时间函数,并能确定任何时刻的量值。确定性信号又可分为周期信号和非周期信号(大多为瞬变非周期信号)。例如单质点自由振动系统的质点位移信号。图 1-4 表示一单质点自由振动系统,图中 K 为弹簧刚度, m 为质点质量, c 为阻力系数。

如果该系统作无阻尼自由振动,其质点位移 $x(t)$ 可用下式来确定:

$$x(t) = X_0 \sin(\sqrt{K/m}t + \phi_0) \quad (1-1)$$

这是一个正弦信号,为确定性的周期性信号。

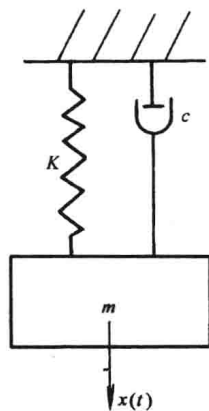


图 1-4 单质点自由振动系统

式中 X_0 ——质点 m 的最大振幅;

$\sqrt{K/m} = \omega_0$ ——周期信号的圆频率;

$\frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{1}{f_0} = T_0$ ——信号的周期;

f_0 ——信号的频率;

ϕ_0 ——由初始条件决定的信号的初相位。

图 1-5a 为该信号的波形。

如果该质点作有阻尼自由振动,阻力系数为 c , 阻尼系数 $n = c/2m$, 当阻尼系数 $n < \omega_0$ 时(即欠阻尼状态), 则质点位移 $x(t)$ 用下式来确定:

$$x(t) = X_0 e^{-nt} \sin(\omega_0 t + \phi_0) \quad (1-2)$$

用图 1-5b 表示其波形。

如果 $n > \omega_0$ 则为过阻尼状态, 则质点位移 $x(t)$ 。用下式来确定:

$$x(t) = B e^{-nt} \quad (1-3)$$

B 是由系统固有参数和初始状态决定的常数, 其波形用图 1-5c 表示。

图 1-5 所示的信号均为确定性信号。

图 1-5a 为周期性信号, 按一定的时间间隔(周期 T) 周而复始重复出现, 可用 $x(t) = x(t + nT)$ 表示, $n = 1, 2, 3 \dots$ 。图 1-5b、c 所示的信号已不是周期信号, 它们都随时间而衰减到零或一定的值。这种信号称作非周期性信号或叫作瞬变非周期性信号。

准周期信号也是非周期信号。准周期信号由两个或两个以上的周期信号合成, 但其组成分量间无法找到公共周期。如 $x(t) = A_1 \sin(\omega t + \phi_1) + A_2 \sin(\Omega t + \phi_2)$, 当 ω 和 Ω 之间没有有理公倍数时, $x(t)$ 即为准周期信号。

随机信号是无法用数学关系式准确描述的信号, 并不能准确预测其未来瞬时值。一般用概率统计的方法根据过去值来估计未来值, 或求出其平均值等具有统计特征的参数。随机信号表示的物理过程叫做随机过程, 在生产、生活中这一类信号很多。如机床在工作时刀架或床身的振动、环境噪声等, 图 1-6 为某机床床身振动的随机信号。

2. 模拟信号和数字信号

在前面所介绍的两类信号中, 独

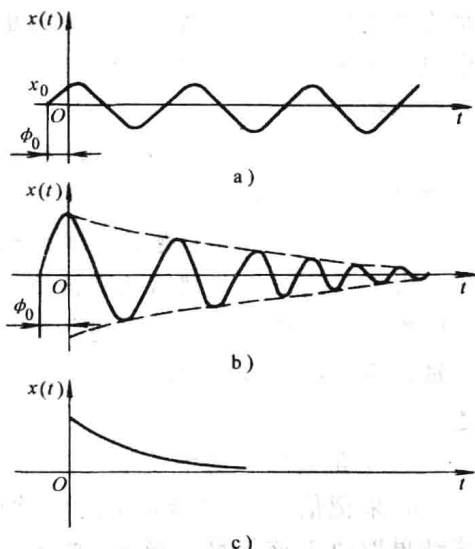


图 1-5 单质点振动系统信号波形

a) 无阻尼振动信号 b) 欠阻尼自由振动信号波形 c) 过阻尼自由振动信号

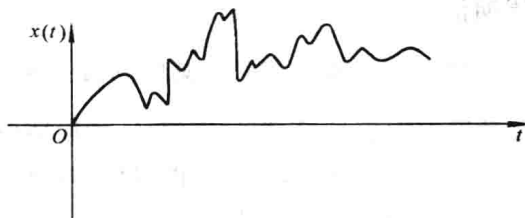


图 1-6 机床床身振动信号