

普通高等教育机电类规划教材

机械工程测试技术基础

(第2版)

厦门大学 黄长艺 主编
清华大学 严普强

机械工业出版社

ND29/05
普通高等教育机电类规划教材

机械工程测试技术基础

(第 2 版)

厦门大学 黄长艺 主编
清华大学 严普强



机械工业出版社

本教材吸取近十年来的教学经验和科技新成就,对初版作了较大篇幅的修改,增加了“计算机辅助测试”一章。新教材着重于物理概念和工程应用的阐述,重点突出,条理清晰,分析透彻,内容符合教学大纲的要求,比初版更便于教和学。

全书包括信号描述,测试装置基本特性,常用的传感器,信号调理和记录装置,信号处理初步,位移测量,振动测试、应变、力和扭矩测量、流体参量测量和计算机辅助测试等十章。

本书可作为高等学校本科机械类专业,以及仪器类专业的教材,也可供大专、夜大和职大机械类和仪器仪表类专业选用;也是研究生、高等学校教师和从事测试工作的工程技术人员的良好参考书。

机械工程测试技术基础

(第2版)

厦门大学 黄长艺 主编
清华大学 严普强

*

责任编辑:张一萍 高文龙 版式设计:张世琴
责任校对:孙志筠 责任印制:路琳

*

机械工业出版社出版(北京市百万庄大街22号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京机工印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787mm×1092mm¹/₁₆·印张16·字数387千字

1999年10月第2版第16次印刷

印数 309 901—319 900 定价:21.00元

*

ISBN 7-111-04673-0/TH·597(课)

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

初 版 前 言

本书系根据 1983 年 4 月机械制造(冷加工)类专业教材编审委员会的测试技术教材编审小组筹建组扩大会议所审订的《机械工程测试技术基础》课程大纲而编写的试用教材,适用于高等学校各种机械设计和机械制造类专业,也可作为从事机械工程测试技术的工程技术人员自学、进修用的参考书。

《机械工程测试技术基础》是一门技术基础课。本书前七章着重介绍从事测试工作,特别是动态测试工作和所必需的基础知识。这部分内容包括:测试信号的描述、分析和处理,测试装置的静、动态特性的评价方法,常用的传感器、中间转换电路及记录仪器的工作原理以其特性。

为了加深对上述基础知识的理解,本书后几章介绍了几种典型参数的测试方法。这部分内容可以看作是上述基础知识的应用举例,不同的专业可以根据其教学要求从中选择一章进行讲授。

书中标以“*”的章节可视为参考、补充的内容。

本书由华中工学院等 11 个院校的有关教师协力编写。参加编写的有齐永顺、翁善惠、洪迈生、卢文祥、吴正毅、蔡鹤皋、陆乃炎、梁德沛、施雄茂、戚昌滋、熊诗波等同志,由清华大学严普强和华中工学院黄长艺主编。

本书由唐统一教授和程高楣教授主审。参加审稿的还有邬惠乐、邓延光、艾茂生、冯国华、郭之璜、张松涛、杨仁逖、傅庭和、杜永祚、孙鲁杨等同志。

本书在编写过程中参考了一些兄弟院校的讲义和资料,并得到许多同志的关心、帮助和指正,谨表谢意。本书在正式出版前,为了满足部分院校的使用要求,也为了更广泛地征求意见,曾由“全国高校机械工程测试技术研究会”组织印刷“试用本”。但由于时间紧迫,未能广泛汇集试用意见进行修改。恳切希望教师、学生和读者对本书的内容编排、材料取舍以及书中的错误、欠妥之处提出批评、指正和修改意见。

严普强 黄长艺

1984 年 11 月

第2版前言

在1978年前后,测试技术作为专业课开始列入部分机械类专业的教学计划。先后出版了一批试用教材,如《机械制造中的测试技术》(黄长艺、卢文祥编)、《液压测试技术》(熊诗波主编)、《试验技术》(丁汉哲主编),等等。这批教材适应了当时教学改革和科学技术发展的需要,对以后的课程建设、教材建设和师资培养起着深远的影响。

随着教学改革的深入,教学经验的积累,对测试技术课程在高等工业教育中的作用和地位有了新的认识。1985年该课程被确认为重要的技术基础课。十多年来,由于各类教学实践的广泛开展,使测试技术课在培养学生、改造专业和促进科技发展等方面的重要作用得到公认,并受到普遍的重视。许多高校纷纷将该课程列为本科教学中的主干课程和研究生的学位课程,并切实加强师资和改善实验条件以提高其教学质量。在这种形势下,《机械工程测试技术基础》应运而生,于1985年出版,并为多种学制、多种专业所采用,深得广大师生和工程技术人员的欢迎,1991年荣获第二届全国高等学校机电、兵工类专业优秀教材二等奖。多次重印,发行数量较大。但在教技飞速发展和教学改革不断深入的今天,为了反映十余年来教学实践的新经验和教学研究新成果、吸取新技术和修改初版的缺点,修订该书显然是十分必要的。为此,机械工业部高等工业学校机电兵工类机制专业教学指导委员会《测试技术》课程教学指导小组和全国高校机械工程测试技术研究会曾作过多次研究和具体安排。

修订后,本书仍是一部适用作高等学校各种机械设计、机械制造、机械电子工程类专业以及相近专业的教材,也可作为有关专业研究生和从事机械工程测试技术的工程技术人员自学、进修用的参考书。

和初版相比,第2版在内容增删、具体写法等方面均有较大的变化。首先是各章的内容和具体写法都有较大的改动,以期能更好地适应大多数学校的教学需要和更便利学生的自学。其次,新增了“计算机辅助测试”一章。关于是否编入微机在测试中应用的内容和如何写法,自1984年初编本书以来,就有各种不同的意见。几年来,微机已广泛用于科研和教学中,新版编入这方面的内容是必要和可能的。至于如何写法才合适,也只有通过实践并从中总结经验的办法来加以解决。现在书中的写法是在充分考虑计算机在测试中应用的实际、教学的方便和许多教师的意见的基础上提出的,我们希望以此推动计算机技术和测试技术的结合。

多年教学实践表明,各校的教学计划,特别是教学要求、课时数和课程安排次序有很大的差异。因此,任课老师可根据本校专业的特点、课时数的多少和前行课程来适当地删减、调整和补充教学内容,以便适应本校的教学实际。我们设想,一般可以讲授第一~五章为主,而后在其余各章中再选讲一、两章即可。

测试技术是一门实践性很强的课程,为了保证教学质量,必须开设适量的实验。有关本课程教学实验的内容,可参阅配套教材《机械工程测试技术基础实验》(杜润生、王崇义编。北京:机械工业出版社)。

参加本书第2版编写的有北京机械工业学院翁善惠、上海交通大学洪迈生、华中理工大

学卢文祥、重庆大学梁德沛、山西矿业学院熊诗波、厦门大学黄长艺等教授和浙江大学陆乃炎、南京理工大学梁人杰、清华大学吴正毅等副教授。由厦门大学黄长艺和清华大学严普强教授主编，并最后由黄长艺教授统稿。

本书第2版由烟台大学施雄茂教授和华北工学院潘德恒教授主审。

本书在编写过程中，得到机电部高等工业学校机电兵工机制专业教学指导委员会《测试技术》课程教学指导小组各位委员的指导，得到全国高校机械工程测试技术研究会的大会会员的支持，在此一并表示衷心的感谢。

作为教材，势必应当吸取各方面的观点和成就，因此本书在编写过程中，参阅了许多文献，尤其是书后所列的文献，从中得益非浅，在此特向有关作者致谢。

由于编者水平所限，书中肯定存在诸多缺点和错误，恳切希望读者批评指正。

编 者

1994年7月

目 录

初版前言	
第2版前言	
绪言	1
第一章 信号及其描述	5
第一节 信号的分类与描述	5
第二节 周期信号与离散频谱	8
第三节 瞬变非周期信号与连续频谱	13
第四节 随机信号	23
习题	27
第二章 测试装置的基本特性	29
第一节 概述	29
第二节 测试装置的静态特性	33
第三节 测试装置动态特性的数学描述	35
第四节 测试装置对任意输入的响应	44
第五节 实现不失真测试的条件	46
第六节 测试装置动态特性的测试	48
第七节 负载效应	51
习题	54
第三章 常用的传感器	55
第一节 传感器的分类	55
第二节 机械式传感器	57
第三节 电阻式传感器	58
第四节 电感式传感器	64
第五节 电容式传感器	69
第六节 压电式传感器	73
第七节 磁电式传感器	78
第八节 半导体传感器	87
第九节 光纤传感器	88
第十节 传感器的选用原则	91
习题	93
第四章 信号调理、处理和记录	95
第一节 电桥	95
第二节 调制与解调	99
第三节 滤波器	105
第四节 信号的指示和记录装置	115
习题	123
第五章 信号处理初步	125
第一节 数字信号处理的基本步骤	125
第二节 信号数字化出现的问题	126
第三节 相关分析及其应用	134
第四节 功率谱分析及其应用	141
习题	146
第六章 位移的测量	148
第一节 常用的位移传感器	148
第二节 位移测量应用实例	156
第七章 振动的测试	159
第一节 概述	159
第二节 单自由度系统的受迫振动	159
第三节 振动的激励	163
第四节 激振器	165
第五节 振动测量方法及测振传感器	168
第六节 振动的分析方法与仪器	175
第七节 机械系统振动参数的估计	179
第八节 测振装置的校准	181
第八章 应变、力和转矩的测量	184
第一节 应变、应力的测量	184
第二节 力的测量	189
第三节 扭矩的测量	196
第九章 流体参量的测量	198
第一节 压力的测量	198
第二节 流量的测量	211
第十章 计算机辅助测试	221
第一节 计算机的模拟信号输入和输出子系统	221
第二节 计算机辅助测试技术中的接口技术	227
第三节 微机化测试仪器	238
第四节 计算机辅助实验系统	244
参考文献	248

绪 言

一、测试技术的重要性

测试的基本任务是获取有用的信息。首先是检测出被测对象的有关信息，然后加以处理，最后将其结果提供给观察者或输入其他信息处理装置、控制系统。因此，测试技术是属于信息科学范畴，是信息技术三大支柱(测试控制技术、计算技术和通信技术)之一。

测量是以确定被测物属性量值为目的的全部操作。测试是具有试验性质的测量，或者可理解为测量和试验的综合。人类在从事社会生产、经济交往和科学研究活动中，都与测试技术息息相关。

测试是人类认识客观世界的手段，是科学研究的基本方法。科学的基本目的在于客观地描述自然界。科学定律是定量的定律。科学探索需要测试技术，用准确而简明的定量关系和数学语言来表述科学规律和理论也需要测试技术，检验科学理论和规律的正确性同样需要测试技术。可以认为精确的测试是科学的根基。

在工程技术领域中，工程研究、产品开发、生产监督、质量控制和性能试验等，都离不开测试技术。特别近代工程技术广泛应用着的自动控制技术已越来越多地运用测试技术，测试装置已成为控制系统的重要组成部分。甚至在日常生活用具，如汽车、家用电器等方面也离不开测试技术。

总之，测试技术已广泛地应用于工农业生产、科学研究、国内外贸易、国防建设、交通运输、医疗卫生、环境保护和人民生活的各个方面，起着越来越重要的作用，成为国民经济发展和社会进步的一项必不可少的重要基础技术。因而，使用先进的测试技术也就成为经济高度发展和科技现代化的重要标志之一。

机械工业担负着装备国民经济各个部门的任务。在改革开放的过程中，机械工业面临着更新产品、革新生产技术、改善经营管理、提高产品质量、提高经济效益和参与国际市场竞争的挑战。测试技术将是机械工业对付上述挑战的基础技术之一。

二、测试过程和测试系统的一般组成

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。

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，特别是时间函数或空间函数，从数学上加以分析研究，从中得出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 and 处理技术。

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。

因此，测试系统的大致框图可用图 0-1 来表示。

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；而在另外一些状态下却可能没有显示出来，或者显示得很不明显，以致难于检测出来。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参量特性的状态中，以便有效地检测载有这些信息的信号。

传感器直接作用于被测测量。并能按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。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、将阻抗的变化转换成电压的变化、或将阻抗的变化转换成频率的变化，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，或者将测量结果存贮，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 中所有环节，尤其是虚线连接的环节和传输环节。实际上，环节与环节之间都存在着传输。图中的传输环节是专指较远距离的通讯传输。

测试技术是一种综合性技术，对新技术特别敏感。要做好测试工作，需要综合运用多种学科的知识，注意新技术的运用。

三、测试技术的发展

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。现代科技的发展不断地向测试技术提出新的要求，推动测试技术的发展。与此同时，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，新技术的兴起促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

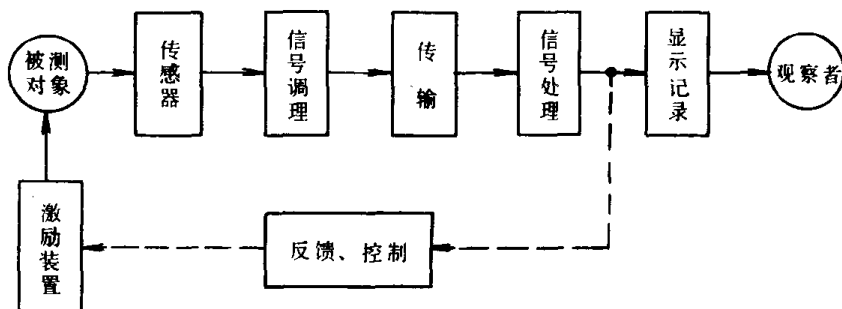


图 0-1 测试系统框图

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器技术，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，以下列三方面的发展最引人注目：

(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、湿度、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元件设计的概念：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，传感器正经历着从以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；或是传感器与放大、运算、温度补偿等电路集成一体的器件。近年来，更有把部分信号处理电路和传感器集成一体，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、湿度传感器、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，化学传感器件将会蓬勃发展，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、逻辑决断、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。这种测量系统可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器阵列进行图象或场量的测试。

四、课程的研究对象和性质

综上所述，本课程所研究的对象是机械工程动态测试中常用的传感器、信号调理电路及记录仪器的工作原理，测量装置基本特性的评价方法，测试信号的分析 and 处理，以及常见物理量的测量方法。本书大体上分成三部分：第一～五章。按信号的获取、调理、记录、分析的流程编写，讨论了测试技术的一般问题；第六～九章，介绍了一些特定参量的测量；第十章，介绍计算机辅助测试的知识。

对高等学校机械类的各有关专业而言，《机械工程测试技术基础》是一门技术基础课。通

过本课程的学习,培养学生能合理地选用测试装置并初步掌握进行动态测试所需的基本知识和技能,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,学生在学完本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,建立明确的信号的频谱结构的概念;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的一些基本概念。
- 2) 掌握测试装置基本特性的评价方法和不失真测试条件,并能正确地运用于测试装置的分析和选择。掌握一阶、二阶线性系统动态特性及其测定方法。
- 3) 了解常用传感器、常用信号调理电路和记录仪器的工作原理和性能,并能较合理地选用。
- 4) 对动态测试工作的基本问题有一个比较完整的概念,并能初步运用于机械工程中某些参量的测试。

本课程具有很强的实践性。只有在学习中密切联系实际,加强实验,注意物理概念,才能真正掌握有关理论。学生只有通过足够和必要的实验才能受到应有的实验能力的训练,才能获得关于动态测试工作的比较完整的概念,也只有这样,才能初步具有处理实际测试工作的能力。

作为一门学科,测试技术既综合应用许多学科的原理和技术,又被广泛应用于各种学科中。然而,作为高等教育中的一门课程,它在教学计划中,有其特定的地位、作用和范围。它必须以前行课程为基础来展开讨论和培养学生掌握测试技术的基本理论、基本知识、基本能力和技能;同时,也不宜超越其特定的课程范围,更不应试图取代其他课程的任务和作用。恰当地把握课程间的分工和配合是编写教材理应遵循的原则之一。

第一章 信号及其描述

在生产实践和科学实验中，需要观测大量的现象及其参量的变化。这些变化量可以通过测量装置变成容易测量、记录和分析的电信号。一个信号包含着反映被测系统的状态或特性的某些有用的信息，它是人们认识客观事物内在规律、研究事物之间的相互关系、预测未来发展的依据。

第一节 信号的分类与描述

一、信号的分类

(一) 确定性信号与随机信号

若信号可表示为一个确定的时间函数，因而可确定其任何时刻的量值，这种信号称为确定性信号。确定性信号又分为周期信号和非周期信号。

1. 周期信号 周期信号是按一定时间间隔周而复始重复出现，无始无终的信号，可表达为

$$x(t) = x(t + nT_0) (n = 1, 2, 3, \dots)$$

(1-1)

式中 T_0 ——周期。

例如，集中参量的单自由度振动系统(图 1-1)作无阻尼自由振动时，其位移 $x(t)$ 就是确定性的；它可用下式来确定质点的瞬时位置

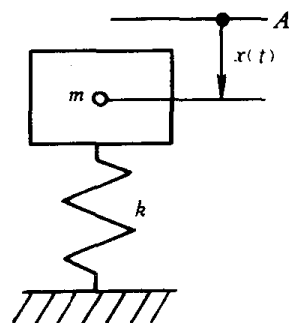


图 1-1 单自由度振动系统
A—质点 m 的静态平衡位置

$$x(t) = x_0 \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t + \varphi_0\right) \quad (1-2)$$

式中 x 、 φ_0 ——取决于初始条件的常数；

m ——质量；

k ——弹簧刚度；

t ——时刻。

其周期 $T_0 = 2\pi/\sqrt{k/m}$ ，圆频率 $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 。

2. 非周期信号 将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。它有两种：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，或随着时间的增长而衰减至零的信号，并称为瞬变非周期信号。图 1-1 所示的振动系统，若加上阻尼装置后，其质点位移 x

(t)可用下式表示

$$x(t) = x_0 e^{-at} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1-3)$$

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

随机信号是一种不能准确预测其未来瞬时值, 也无法用数学关系式来描述的信号。但是, 它具有某些统计特征, 可以用概率统计方法由其过去来估计其未来。随机信号所描述的现象是随机过程。自然界和生活中有许多随机过程, 例如汽车奔驰时产生的振动、环境噪声等。

(二) 连续信号和离散信号

若信号数学表示式中的独立变量取值是连续的, 则称为连续信号(图 1-3a)。若独立变量取离散值, 则称为离散信号。图 1-3b 是将连续信号等时距采样后的结果, 它就是离散信号。离散信号可用离散图形表示, 或用数字序列表示。连续信号的幅值可以是连续的

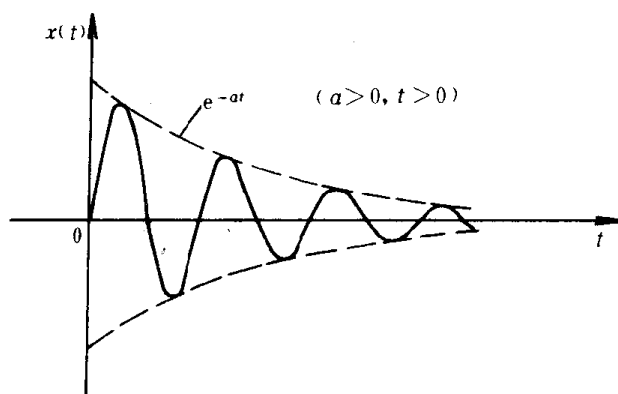


图 1-2 衰减振动信号

的, 也可以是离散的。若独立变量和幅值均取连续值的信号称为模拟信号。若离散信号的幅值也是离散的, 则称为数字信号。数字计算机的输入、输出信号都是数字信号。

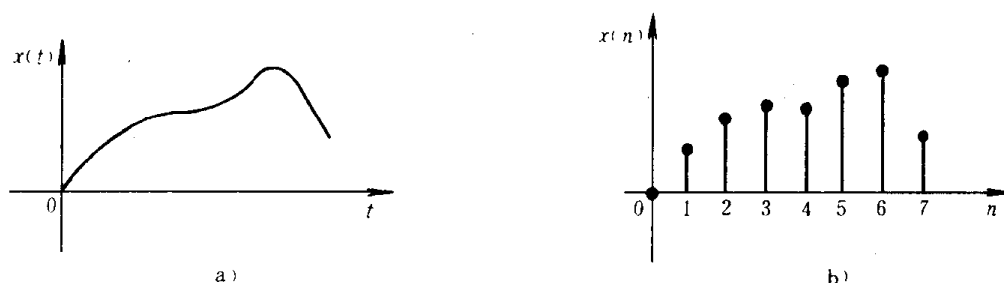


图 1-3 连续信号和离散信号

a) 连续信号 b) 离散信号

(三) 能量信号和功率信号

在非电量测量中, 常把被测信号转换为电压或电流信号来处理。显然, 电压信号 $x(t)$ 加到电阻 R 上, 其瞬时功率 $P(t) = x^2(t)/R$ 。当 $R=1$ 时, $P(t) = x^2(t)$ 。瞬时功率对时间积分就是信号在该积分时间内的能量。依此, 人们不考虑信号实际的量纲, 而把信号 $x(t)$ 的平方 $x^2(t)$ 及其对时间的积分分别称为信号的功率和能量。当 $x(t)$ 满足

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

时, 则认为信号的能量是有限的, 并称之为能量有限信号, 简称能量信号, 如矩形脉冲信号、衰减指数函数等。

若信号在区间 $(-\infty, \infty)$ 的能量是无限的

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt \rightarrow \infty \quad (1-5)$$

但它在有限区间 (t_1, t_2) 的平均功率是有限的, 即

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} x^2(t) dt < \infty \quad (1-6)$$

这种信号称为功率有限信号，或功率信号。

图 1-1 所示的振动系统，其位移信号 $x(t)$ 就是能量无限的正弦信号，但在一定时间区间内其功率却是有限的。如果该系统加上阻尼装置，其振动能量随时间而衰减(图 1-2)，这时的位移信号就变成能量有限信号了。

但是必须注意，信号的功率和能量，未必具有真实功率和能量的量纲。

二、信号的时域描述和频域描述

直接观测或记录到的信号，一般是以时间为独立变量的，称其为信号的时域描述。信号时域描述能反映信号幅值随时间变化的关系，而不能明显揭示信号的频率组成关系。为了研究信号的频率结构和各频率成分的幅值、相位关系，应对信号进行频谱分析，把信号的时域描述通过适当方法变成信号的频域描述，即是以频率为独立变量来表示信号。

例如，图 1-4 是一个周期方波的一种时域描述，而下式则是其时域描述的另一种形式

$$\begin{cases} x(t) = x(t + nT_0) \\ x(t) = \begin{cases} A & 0 < t < \frac{T_0}{2} \\ -A & -\frac{T_0}{2} < t < 0 \end{cases} \end{cases}$$

若该周期方波应用傅里叶级数展开，即得

$$x(t) = \frac{4A}{\pi} \left(\sin\omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 t + \cdots \right)$$

式中 $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$

此式表明该周期方波是由一系列幅值和频率不等、相角为零的正弦信号叠加而成的。实际上此式可改写成

$$x(t) = \frac{4A}{\pi} \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n\omega_0 t \right)$$

其中 $\omega = n\omega_0 \quad n=1, 3, 5, \cdots$ 可见，此式除 t 之外尚有另一变量 ω 为各正弦成分的频率。若视 t 为参变量，以 ω 为独立变量，则此式即为该周期方波的频域描述。

在信号分析中，将组成信号的各频率成分找出来，按序排列，得出信号的“频谱”。若以频率为横坐标、分别以幅值或相位为纵坐标，便分别得到信号的幅频谱或相频谱。图 1-5 示出了该周期方波的时域图形、幅频谱和相频谱三者的关系。

表 1-1 列出两个同周期方波及其幅频谱、相频谱。不难看出，在时域中，两方波除彼此相对平移 $T_0/4$ 之外，其余完全一样。但两者的幅频谱虽相同，相频谱却

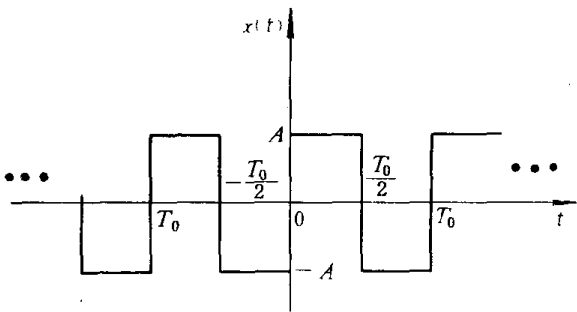


图 1-4 周期方波

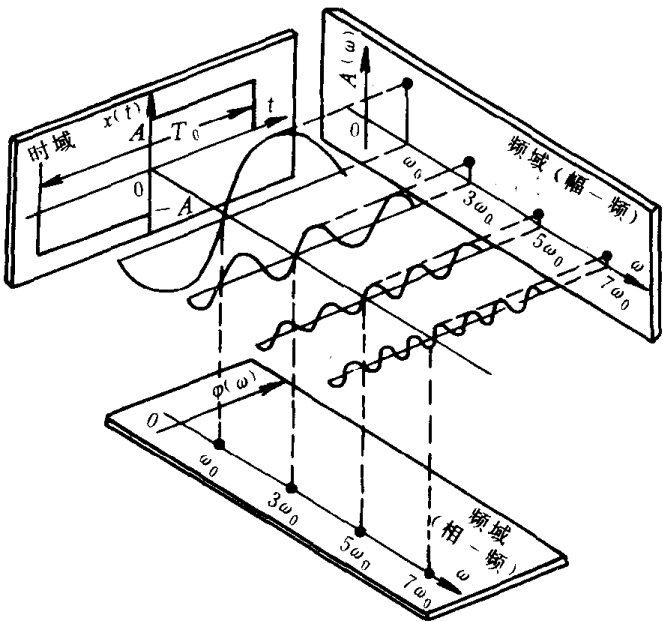
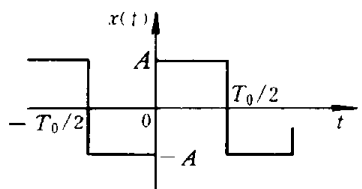
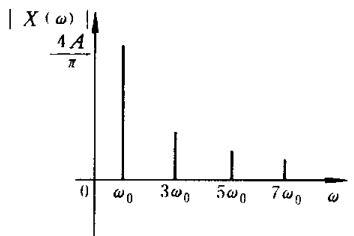
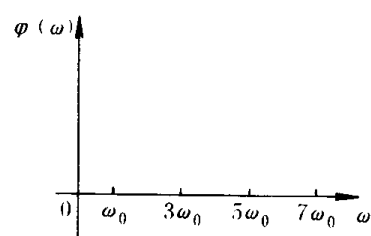
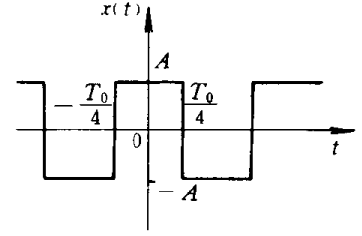
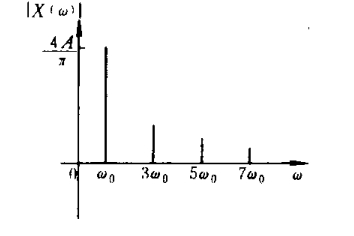
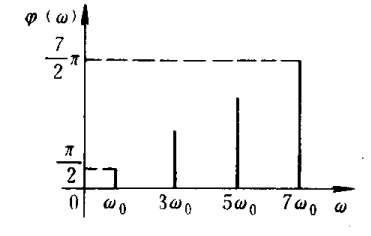


图 1-5 周期方波的描述

不同。平移使各频率分量产生了 $n\pi/2$ 相角, n 为谐波次数。总之, 每个信号有其特有的幅频谱和相频谱。故在频域中每个信号都需同时用幅频谱和相频谱来描述。

信号时域描述直观地反映出信号瞬时值随时间变化的情况; 频域描述则反映信号的频率组成及其幅值、相角之大小。为了解决不同问题, 往往需要掌握信号不同方面的特征, 因而可采用不同的描述方式。例如, 评定机器振动烈度, 需用振动速度的均方根值来作为判据。若速度信号采用时域描述, 就能很快求得均方根值。而在寻找振源时, 需要掌握振动信号的频率分量, 这就需采用频域描述。实际上, 两种描述方法能相互转换, 而且包含同样的信息量。

表 1-1 周期方波的频谱

时域波形	幅 频 谱	相 频 谱
		
		

第二节 周期信号与离散频谱

一、傅里叶级数的三角函数展开式

在有限区间上, 凡满足狄里赫利条件的周期函数(信号) $x(t)$ 都可以展开成傅里叶级数。傅里叶级数的三角函数展开式如下:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t)$$

(1-7)

式中 常值分量

余弦分量的幅值

正弦分量的幅值

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} x(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} x(t) \cos n\omega_0 t dt \\ b_n &= \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} x(t) \sin n\omega_0 t dt \end{aligned} \right\}$$

(1-8)

T_0 ——周期;

ω_0 ——圆频率, $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$;

$n = 1, 2, 3, \dots$ 。

将式(1-7)中同频项合并, 可以改写成

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n) \quad (1-9)$$

式中

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_n = \frac{a_n}{b_n}$$

从式(1-9)可见, 周期信号是由一个或几个、乃至无穷多个不同频率的谐波叠加而成的。以圆频率为横坐标, 幅值 A_n 或相角 φ_n 为纵坐标作图, 则分别得其幅频谱和相频谱图。由于 n 是整数序列, 各频率成分都是 ω_0 的整倍数, 相邻频率的间隔 $\Delta\omega = \omega_0 = 2\pi/T_0$, 因而谱线是离散的。通常把 ω_0 称为基频, 并把成分 $A_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n)$ 称为 n 次谐波。

例 1-1 求图 1-6 中周期性三角波的傅里叶级数。

解 在 $x(t)$ 的一个周期中可表示为

$$x(t) = \begin{cases} A + \frac{2A}{T_0}t & -\frac{T_0}{2} \leq t \leq 0 \\ A - \frac{2A}{T_0}t & 0 \leq t \leq \frac{T_0}{2} \end{cases}$$

常值分量:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} x(t) dt \\ &= \frac{2}{T_0} \int_0^{\frac{T_0}{2}} \left(A - \frac{2A}{T_0}t \right) dt \\ &= \frac{A}{2} \end{aligned}$$

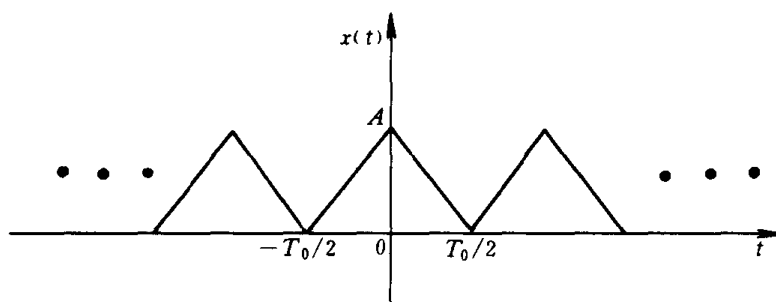


图 1-6 周期性三角波

余弦分量的幅值:

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} x(t) \cos n\omega_0 t dt = \frac{4}{T_0} \int_0^{\frac{T_0}{2}} \left(A - \frac{2A}{T_0}t \right) \cos n\omega_0 t dt \\ &= \frac{4A}{n^2\pi^2} \sin^2 \frac{n\pi}{2} = \begin{cases} \frac{4A}{n^2\pi^2} & n = 1, 3, 5, \dots \\ 0 & n = 2, 4, 6, \dots \end{cases} \end{aligned}$$

正弦分量的幅值:

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} x(t) \sin n\omega_0 t dt = 0$$

上式是因为 $x(t)$ 为偶函数, $\sin n\omega_0 t$ 为奇函数, 所以 $x(t)\sin n\omega_0 t$ 也为奇函数, 而奇函数在上下限对称区间积分之值等于零。这样, 该周期性三角波的傅里叶级数展开式为

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{A}{2} + \frac{4A}{\pi^2} \left(\cos\omega_0 t + \frac{1}{3^2} \cos 3\omega_0 t + \frac{1}{5^2} \cos 5\omega_0 t + \cdots \right) \\ &= \frac{A}{2} + \frac{4A}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cos n\omega_0 t \quad (n=1, 3, 5, \cdots) \end{aligned}$$

周期性三角波的频谱图如图 1-7 所示, 其幅频谱只包含常值分量、基波和奇次谐波的频率分量, 谐波的幅值以 $\frac{1}{n^2}$ 的规律收敛。在其相频谱中基波和各次谐波的初相位为 φ_n 均为零。

二、傅里叶级数的复指数函数展开式

傅里叶级数也可以写成复指数函数形式。根据欧拉公式:

$$e^{\pm j\omega t} = \cos\omega t \pm j\sin\omega t \quad (j = \sqrt{-1})$$

(1-10)

$$\cos\omega t = \frac{1}{2}(e^{-j\omega t} + e^{j\omega t})$$

(1-11)

$$\sin\omega t = j \frac{1}{2}(e^{-j\omega t} - e^{j\omega t})$$

(1-12)

图 1-7 周期性三角波的频谱

因此式(1-7)可改写为

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{2}(a_n + jb_n)e^{-jn\omega_0 t} + \frac{1}{2}(a_n - jb_n)e^{jn\omega_0 t} \right] \quad (1-13)$$

令

$$c_n = \frac{1}{2}(a_n - jb_n) \quad (1-14a)$$

$$c_{-n} = \frac{1}{2}(a_n + jb_n) \quad (1-14b)$$

$$c_0 = a_0 \quad (1-14c)$$

则

$$x(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_{-n} e^{-jn\omega_0 t} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n e^{jn\omega_0 t}$$

或

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega_0 t} \quad (n=0, \pm 1, \pm 2, \cdots) \quad (1-15)$$

这就是傅里叶级数的复指数函数形式。将式(1-8)代入式(1-14a)和(1-14b), 并令 $n=0, \pm 1, \pm 2, \cdots$, 即得

$$c_n = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} x(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \quad (1-16)$$

在一般情况下 c_n 是复数, 可以写成

$$c_n = c_{nR} + jc_{nI} = |c_n| e^{j\varphi_n} \quad (1-17)$$

式中

$$|c_n| = \sqrt{c_{nR}^2 + c_{nI}^2} \quad (1-18)$$

