

● 研究生教材 ● 研究生教材



机械系统动态分析 理论与应用

温熙森 陈 循 唐丙阳 编著

国防科技大学出版社



机械系统动态分析 理论与应用

温熙森 陈 循 唐丙阳 编著

国防科技大学出版社

·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

机械系统动态分析理论与应用/温熙森, 陈 循, 唐丙阳编著. —长沙: 国防科技大学出版社, 1998. 4

ISBN 7-81024-461-2

- I. 机械系统动态分析理论与应用
- Ⅰ. 温熙森, 陈 循, 唐丙阳
- Ⅲ. ①机械系统 ②机电工程 ③信号分析
- Ⅳ. TP274

国防科技大学出版社出版发行

电话: (0731)4555681 邮政编码: 410073

E-mail: gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑: 卢天颢 责任校对: 张 静

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 21 字数: 458 千

1998年4月第1版第1次印刷 印数: 1—2000册

*

定价: 27.00元

内 容 提 要

本书以机电工程为背景,介绍系统分析的基本理论及其在机电工程中的应用技术。主要内容包括四个部分:① 富里叶变换、数字滤波、功率谱估计和频响函数估计等经典的信号与系统分析方法;② 频谱细化、特征分析、高阶谱估计等实用谱分析技术;③ 时频联合域分析方法;④ 系统动态分析在机械监测与诊断、模态分析、随机振动环境模拟等机电工程中的应用专题介绍。本书可用作机械电子工程专业硕士研究生相关课程的教材,也可用作相关领域工程技术人员的参考用书。

前 言

系统动态分析的任务是研究系统的动态特性,并对系统的动态特性进行描述。作为机械电子工程专业硕士研究生相关课程的教材,本书主要介绍系统分析的基本理论及其工程应用专题。信号是系统信息的载体,信号分析是系统分析的重要手段,因此,信号分析的内容在本书中占据了较大篇幅。

考虑到机电工程专业学生的基础和研究需求,本书注重介绍基本概念的物理意义和理论的应用背景。全书由四大部分组成:

(1) 经典理论(第一章至第六章):主要阐述信号与系统分析的基本概念以及经典的稳态过程时域和频域分析方法,包括富里叶变换、随机过程的统计分析、频响函数估计、滤波原理、时序建模及参数谱估计。

(2) 实用谱分析技术(第七章至第九章):针对工程实际,介绍根据经典方法进行组合或拓展派生出的信号与系统实用分析方法,包括频谱细化、特征分析和高阶谱分析。

(3) 时频分析(第十章至第十四章):介绍瞬态过程时频联合域分析方法,这是近年来的研究热点。由于学时数的限制,本书仅介绍短时富里叶变换、小波变换、威格纳-维利分布和时频分布级数的基本概念及其应用方法。

(4) 应用专题(第十五章至十六章):介绍系统分析在机电工程领域中几个典型的应用专题:设备状态监测与故障诊断;机械结构模态实验分析及动力优化设计;随机振动控制。

本书由温熙森、陈循、唐丙阳同志主编。杨拥民、胡政同志参与编写了部分章节的初稿。

由于我们水平有限,书中错漏之处在所难免,敬请读者指正。

作 者

1997. 11

目 录

绪论	(1)
第一章 信号与系统的基础知识	
§ 1.1 信号的分类.....	(6)
§ 1.2 系统模型及其分类.....	(9)
§ 1.3 线性时不变系统.....	(11)
§ 1.4 系统分析方法.....	(13)
第二章 富里叶变换	
§ 2.1 富里叶级数.....	(15)
§ 2.2 富里叶变换.....	(20)
§ 2.3 冲击函数的富里叶变换.....	(22)
§ 2.4 富里叶变换的基本性质.....	(24)
§ 2.5 卷积定理.....	(28)
§ 2.6 相关·相关定理和能量谱·功率谱.....	(32)
§ 2.7 周期信号的富里叶变换.....	(34)
§ 2.8 抽样信号的富里叶变换.....	(37)
§ 2.9 混迭与采样定理.....	(39)
§ 2.10 离散富里叶变换	(42)
§ 2.11 泄漏与加窗	(44)
§ 2.12 DFT 基本原理的图解	(50)
§ 2.13 FFT 的基本原理	(52)
第三章 随机过程的统计特征分析	
§ 3.1 随机过程的基本概念.....	(61)
§ 3.2 相关分析.....	(66)
§ 3.3 功率谱分析.....	(72)
§ 3.4 随机信号分析中的统计误差.....	(75)
§ 3.5 倒频谱分析	(84)
第四章 系统频率响应函数	
§ 4.1 物理系统的响应特性.....	(86)
§ 4.2 单输入/单输出系统	(89)

§ 4.3 频响函数估计的误差分析	(94)
-------------------	------

第五章 数字滤波原理

§ 5.1 概述	(101)
§ 5.2 Z 变换与离散时间系统的 z 域分析	(106)
§ 5.3 数字滤波器的分类与结构	(114)
§ 5.4 数字滤波器的设计方法	(120)
§ 5.5 信号除噪分析技术	(130)

第六章 ARMA 模型与 AR 谱估计

§ 6.1 基于 ARMA 模型的时序分析简介	(135)
§ 6.2 AR 谱估计	(138)
§ 6.3 AR 模型参数的直接最小二乘估计	(139)
§ 6.4 AR 模型的标准方程组	(140)
§ 6.5 基于自相关函数的 AR 模型参数递推估计	(142)
§ 6.6 AR 模型参数的 Burg 递推估计法	(144)
§ 6.7 准确最小二乘递推估计	(150)
§ 6.8 AR 谱估计的其它方法	(160)
§ 6.9 AR 模型的定阶准则	(162)
§ 6.10 AR 谱估计的算例分析	(163)

第七章 频谱细化和选带分析

§ 7.1 概述	(167)
§ 7.2 DFT 运算中 $\{x[n]\}$ 补 0 对 $\{X[k]\}$ 的影响	(168)
§ 7.3 复调制频谱细化	(170)
§ 7.4 相位补偿频谱细化	(175)
§ 7.5 FFT-FS 频谱细化	(177)
§ 7.6 AR 谱的局部表示	(180)

第八章 特征分析

§ 8.1 概述	(183)
§ 8.2 阶比分析	(183)
§ 8.3 全息谱分析	(188)
§ 8.4 复合功率谱与坎贝尔图	(197)

第九章 高阶谱分析

§ 9.1 概述	(199)
§ 9.2 高阶谱的定义	(199)

§ 9.3	双谱的性质	(201)
§ 9.4	双谱的经典估计方法	(207)
§ 9.5	双谱估计的参数模型	(210)
§ 9.6	双谱的应用	(217)
第十章 时频分析引论		
§ 10.1	时频分析的意义	(226)
§ 10.2	级数展开与内积	(229)
§ 10.3	信号时频域表达之间的关系	(231)
§ 10.4	时延与频宽	(233)
§ 10.5	不确定性准则和离散 Poisson 求和公式	(237)
第十一章 短时富里叶变换		
§ 11.1	短时富里叶变换	(240)
§ 11.2	加博尔级数——离散短时富里叶逆变换	(243)
§ 11.3	周期加博尔级数	(245)
§ 11.4	离散加博尔级数	(247)
§ 11.5	类正交加博尔级数	(251)
§ 11.6	对偶函数的快速算法	(253)
第十二章 小波分析		
§ 12.1	连续小波变换	(255)
§ 12.2	分段近似	(257)
§ 12.3	多分辨率分析	(262)
§ 12.4	离散小波变换和数字滤波阵列	(267)
第十三章 Wigner-Ville 时频分布		
§ 13.1	时间相关功率谱	(271)
§ 13.2	Wigner-Ville 分布的基本性质	(274)
§ 13.3	合成信号的 Wigner-Ville 分布	(277)
§ 13.4	Wigner-Ville 分布、二维 STFT 谱图和二维小波谱图	(280)
§ 13.5	平滑 WVD 和解析信号的 WVD	(282)
§ 13.6	离散 Wigner-Ville 分布	(284)
第十四章 时频分布级数		
§ 14.1	WVD 的分解	(288)
§ 14.2	时频分布级数	(289)
§ 14.3	离散时频分布级数	(294)

§ 14.4 解析函数及其对偶函数的选择·····	(295)
---------------------------	-------

第十五章 设备状态监测与故障诊断

§ 15.1 监测与诊断的任务、目的及发展状况·····	(298)
§ 15.2 监测与诊断的基本内容·····	(299)
§ 15.3 监测与诊断的基本技术·····	(300)
§ 15.4 诊断实例·····	(303)
§ 15.5 故障诊断专家系统·····	(305)

第十六章 结构实验模态分析

§ 16.1 模态参数与模态分析·····	(309)
§ 16.2 实验模态分析的基本过程·····	(310)
§ 16.3 实验模态分析的激振方法和响应测量·····	(311)
§ 16.4 传递函数计算·····	(312)
§ 16.5 模态参数识别与模态振型图·····	(314)
§ 16.6 灵敏度分析与结构动力修改预测·····	(317)

第十七章 振动环境模拟

§ 17.1 振动环境模拟与可靠性试验·····	(320)
§ 17.2 振动环境模拟技术的发展概况·····	(320)
§ 17.3 随机振动环境模拟的理论基础·····	(321)
§ 17.4 随机振动环境模拟的控制原理·····	(323)

绪 论

一、系统动态分析的基本任务

系统动态分析的任务是研究系统的动态特性，并对系统的动态特性进行描述。在机电工程领域中，功能各异的机电设备，其动态性能必须满足各种特定的要求，如对系统的频响特性、稳定性等方面的要求。系统动态分析是对设备的动态性能进行评估的基础；系统动态分析结果是对结构进行动力优化设计和实现最优控制的依据；机电设备的状态监测与诊断，就是对设备的运行状态进行识别，这个状态就包括设备的动态性能。

系统动态分析理论的核心是建立系统模型，这个模型必须内含反映系统动态特性的状态信息，因此，广义而言，任何能够反映系统动态特性的函数关系或曲线，都可称为系统模型。

例如，在对恒温炉的温度进行控制时，要求恒温炉的温度 T 不随时间改变，如图 0-1 所示，即是对恒温炉的动态性能提出的要求，也可以用函数表达式 $T=C$ (C 为常数) 表示。这里，函数表达式属于参数模型，而图 0-1 所示的函数曲线则属于非参数模型。如果温度发生波动，则要对加热器实施控制，使炉温稳定在额定值 C 。为此需建立反映加热过程中炉温变化特性的系统模型，从而掌握加热升温过程的动态特性，以达到优化控制的目的。

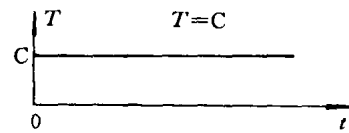


图 0-1 恒温炉温度变化曲线

对于机电系统的监测与诊断来说，其核心任务是对系统进行状态识别，通常的途径是建立反映系统运动状态的数学模型，依据模型的特征参数判断系统的状态是否正常。对于非正常状态，可进一步作故障诊断分析，并以此为依据采取合理的控制或维修策略。

系统建模的方法有两大类：一是分析法，亦称之为理论建模方法；二是系统辨识法，又称实验建模方法。

图 0-2(a) 为某型压电式加速度传感器的简化物理模型。其工作原理为：加速度计的

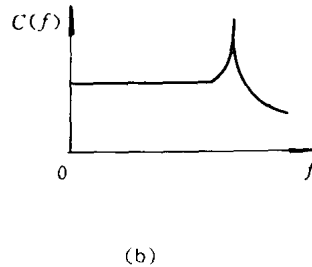
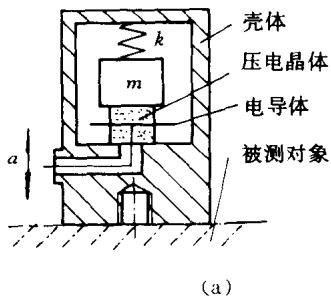


图 0-2

壳体随被测对象沿箭头方向同步振动；设加速度计中的质量块 m 相对壳体的振动加速度为 a ，那么，质量块施加给压电晶体的力 F 与 a 成正比，而压电晶体则产生与受力大小成正比的电荷量。

为了研究加速度计的动态特性，我们既可以建立动力学微分方程，进行理论建模分析，也可以通过实验，根据实测得到的系统输入输出信号建模，如图0-2(b)所示便是实测得到的加速度计频率特性曲线，它是一种描述系统频域动态性能的数学模型。

一般而言，复杂机电设备的理论建模比较困难。相比之下，实验建模往往容易实现，可信度也更高，在只需建立系统的低阶近似模型时尤其如此。因此，目前实验建模仍然是复杂系统动态分析的主要途径。

机电工程的实践离不开实验建模。实验建模的首要问题是通过正确的实验设计，获取反映系统状态信息的输入、输出信号。反映系统动态特性的状态信息是我们研究的主要对象，信息的获取与利用是进行系统动态分析的关键。因此，系统动态分析的实质是研究系统动态信息的提取和应用方法。

综上所述，系统动态分析的主要任务可概括为图 0-3 所示的框图。

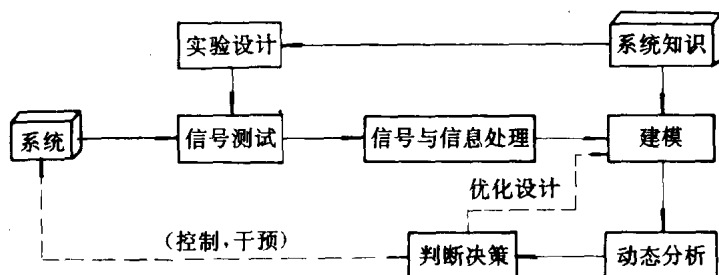


图 0-3 系统动态分析的基本任务

在图 0-3 中，有以下几个基本概念需加以说明：

(1) 系统

在本书中，“系统”指由若干相互作用和相互依赖的事物组合而成的具有特定功能的整体。一个系统，对于给定的输入（激励），将完成既定的输出功能（响应）。对于实际的机电设备来说，系统是一个相对的概念，以一辆主战坦克为例，当研究其机动性能时，“系统”指整车的运动执行机构；而当只研究坦克的火力性能时，则“系统”就只包括坦克上的枪炮及相关的信息控制机构。就坦克的火力性能而言，火力装置又可以划分为“枪”和“炮”等子系统。总之，系统的划分可以有多种方式和多个层次。如何确定系统的边界，取决于系统的结构和研究的目的。

以图 0-2 所示的加速度计为例，尽管其几何尺寸很小，结构也很简单，但它具有上述“系统”定义的全部属性，故可以当作一个系统进行研究。在这个系统中，激励为被测对象的振动加速度，而响应则是由振动加速度引起的电荷量输出。

(2) 信号与信息

从信息论的观点出发，任何系统的组成都包括物质（形体）、能量（力量）、信息（灵魂）三个要素。

信息之所以是系统的灵魂，是因为信息反映了系统运动的状态和特性。

我们研究系统所面临的问题有：信息的获取、传输、转换、储存、处理、分析及利用。

然而，为什么通常总是说“信号与系统”呢？这是因为信息本身不是物质，不具有能量，而信号是传输信息的载体，换句话说，信息寓于信号之中。信号是含有能量的物质，具有可观测性。在系统动态分析中，我们直接打交道的是信号，所以说信号是直接研究对象，而信息才是系统动态分析的真正研究对象。

信号与信息不能混为一谈。信号只是信息的某种表现形式。实际的信号中往往包含着多种信息成分，其中有些是我们关心的，我们称之为系统的动态特征，而那些我们不关心的信息成分，则统统称为噪声或冗余信息。如在齿轮箱的轴承故障诊断中，轴支撑的振动信号中便包含有轴承的故障信息，同时还包含其它的动态信息，如齿轮的啮合信息等。在系统动态分析中，我们通常要花费相当多的精力来设法从信号中提取我们所需要的信息，并将这个过程称之为特征提取。

(3) 信号处理

怎样通过信号获取感兴趣的系统特征信息呢？为此要对信号进行处理。所谓信号处理，就是对信号进行某种加工或变换，以达到从信号中提取感兴趣信息并加以利用的目的。

通过对信号进行加工或变换，可以削弱信号中的冗余信息，滤除不感兴趣的噪声或干扰，将信号变换成容易分析与识别的模式。

在信号处理领域中，“信号处理”有时专指传统的放大、调制、解调和滤波等信号加工技术。而信号的变换和随机信号的统计处理则通常称为“信号分析”。其中，针对离散信号序列进行的加工和变换通常又称为“数据处理”和“数据分析”。

(4) 信息处理

信息处理包括信息的加工和利用，其研究对象是系统。信息处理的具体内容就是对系统信息进行缩维（提纯）、融合、分类等加工，并利用加工过的信息为系统的描述和控制服务。各种系统模式识别方法以及系统控制理论都属于系统信息处理的范畴，而系统的特征信息提取和加工则是系统动态分析的核心任务。

二、系统动态分析理论与应用研究的现状与发展趋势

系统动态分析是基于系统论、信息论、控制论的观点和方法发展起来的新兴学科，它所涉及的知识面很宽，如信号测试、信号与信息处理、系统辨识、模式识别以及计算机应用等等。这正体现了现代工程研究中各学科相互依存、相互渗透、相互交叉、相互促进的特点。

系统动态分析的方法可分为经典和现代两个部分。其中，经典方法主要针对线性时不变系统或稳态过程在时域或变换域（如频域、拉普拉斯域和 z 域）中进行分析，最常用的有时域和频域的统计分析和参数建模分析，如时域波形幅值的各阶矩估计、相关分析与FFT谱估计、时序建模分析和参数谱估计等。此外，还有针对机械系统中的特殊工况提出的一些特殊的变换域分析法，如阶比分析、全息谱分析和高阶谱分析等。但是，由

于经典方法的研究对象主要限于线性时不变系统和稳态过程，故其应用存在一定的局限性。20世纪90年代后，以时频联合域分析方法（简称时频分析）为代表的现代系统分析方法发展很快，这类方法所关注的研究对象主要是瞬态过程和时变系统。其中有代表性的方法有短时富里叶变换、小波分析、威格纳—维利分布和时频分布级数等。时频分析的最大优点是能清晰地描述一个过程在任意时刻的频率结构。

目前，国内外学者正致力于采用神经网络、分形几何、遗传算法、模糊数学、混沌理论等最新理论成果解决非线性系统的状态描述和模式识别问题，并已相继在一些特殊的工程课题中取得了应用研究成果，但比较系统、完整的非线性系统动态分析理论尚有待形成。

三、本书的内容介绍及阅读指南

本着从工程实际出发的原则，本教材系统阐述了系统动态分析必备的理论和应用技术基础知识。其中，对于信号分析，着重强调如何利用特定的信号处理方法达到提取系统状态信息的目的；对于系统模型，着重强调如何针对特定的研究对象建模以达到分析的目的；因此，本书将主要回答下述问题：

- (1) 应该收集什么样的信号或数据？
- (2) 怎样处理信号和数据并得到其物理意义上的解释？
- (3) 怎样建模并提取系统的信息特征？

全书共17章，分成经典理论、实用谱分析技术、时频分析和应用专题四大部分。

经典理论部分（第一至第六章）主要阐述信号与系统分析的基本概念以及经典的时域和频域分析方法，包括富里叶变换，随机过程的统计分析，频响函数估计，滤波原理，时序建模及参数谱估计。目前，尽管系统动态分析的理论发展较快，但由于经典理论的应用技术研究比较成熟，因此在工程应用中仍占主导地位。

实用谱分析技术（第七至第九章）是根据工程实际的需要，对经典方法进行组合或拓展派生出的实用分析方法。主要有旨在提高FFT谱分辨率和频谱分析效率的频谱细化和选带分析技术；能有效提取回转机械振动特征的特征分析技术；能消除二次相位耦合影响的高阶谱（双谱）分析技术。上述方法应用的针对性很强，都是灵活应用经典理论解决工程实际问题的典型范例。通过了解这些技术形成的巧妙思路，有助于读者举一反三，以便更深刻地理解经典理论的实质并为日后的应用研究奠定思想基础。

时频分析（第十至第十四章）是近年来的研究热点。时频分析是在时间/频率构成的二维平面上描述一个瞬态过程的能量分布形式。利用时频分析方法不仅能描述信号或系统的频谱结构，而且能发现感兴趣频谱结构所对应的时刻。这对机械设备故障诊断中的振动与噪声监测无疑十分有利。目前，时频分析的理论与应用研究已构成了一个比较完整的体系，并且仍在不断地完善。由于学时数的限制，本教材仅就短时富里叶变换、小波变换、威格纳—维利分布和时频分布级数的基本概念及其应用方法，更深入的研究还需参阅有关的时频分析专著。

应用专题部分（第十五至十七章）介绍的是机电工程领域中的几个应用研究专题：设备状态监测与故障诊断；机械结构模态实验分析及动力优化设计；随机振动控制。上述

专题的介绍将使读者对系统动态分析在机电工程中的作用有更清晰的认识，同时也是为使读者日后顺利进入相关领域课题的研究起一个承上启下的作用。

本书着重讲透分析方法的基本概念及其物理意义，并给出必要的计算和应用实例，以便读者深刻理解。同时，为了满足读者的研究需要，各章末尾都附有相关的参考文献索引，以方便读者查阅。

第一章 信号与系统的基础知识

如绪论所述，信号与系统是系统动态分析的研究对象，为了使读者，尤其是初次涉猎本研究领域的学生对信号与系统的物理实质有更深入的了解，本章首先以分类为线索介绍信号与系统的一些基本概念和基础知识。

§ 1.1 信号的分类

根据不同的分析手段，信号有多种分类方式，这里介绍几种常见的信号类别，以及各种信号的物理意义。

1.1.1 随机信号和确定性信号

图 1-1 是按信号波形的确定性划分的信号类型关系图。

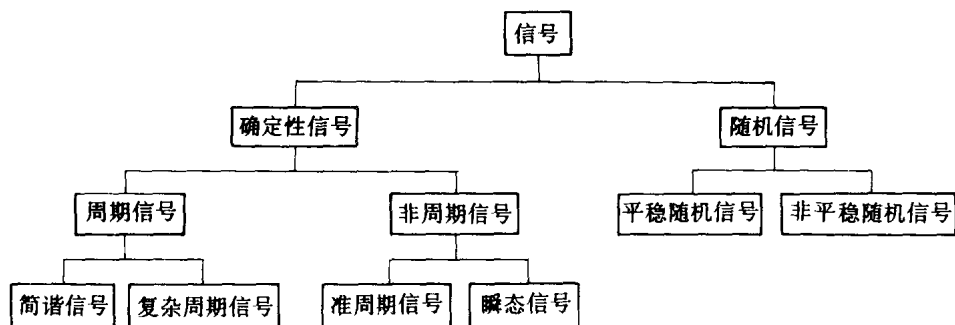


图 1-1 信号类型关系图

随机信号又称为非确定性信号，这类信号的波形具有不确定性，幅值和相位变化不可预知，因此不能用数学表达式进行描述，只能通过统计分析方法得到信号的整体统计特征，如均值、方差、自相关等等。

在信号处理中，随机信号通常被分为平稳随机信号和非平稳随机信号，前者如汽车在平直的碎石路面匀速行驶时产生的振动，振幅的变化比较均匀；后者如汽车在泥泞曲折道路上变速行驶时产生的振动，随着路况和车速的变化，振幅变化很不均匀。有关随机过程及其平稳性将在第三章中专门论述。

确定性信号的波形总可以用明确的数学表达式进行描述。

(1) 周期信号

波形按一定时间间隔重复的信号，其数学表达式为

$$x(t) = x(t + nT_1), \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.1)$$

式中， T_1 为信号的周期。例如，在机械系统中，回转体不平衡引起的振动，往往就是一种周期性运动。简谐信号是最简单的周期信号，其表达式为

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.2)$$

式中， A 为信号幅值； $\omega = 2\pi f$ 为信号的角频率； φ 为信号的初始相位，当 $\varphi = 0^\circ$ 时， $x(t)$ 称为正弦信号；当 $\varphi = 90^\circ$ 时， $x(t)$ 称为余弦信号。

由不同频率的简谐信号叠加而成的周期信号称为复杂周期信号。在复杂周期信号中，各简谐分量的频率之比为有理数。如图 1-2 所示， ω_1 称为基频，复杂周期信号的周期 $T_1 = 2\pi/\omega_1$ 。

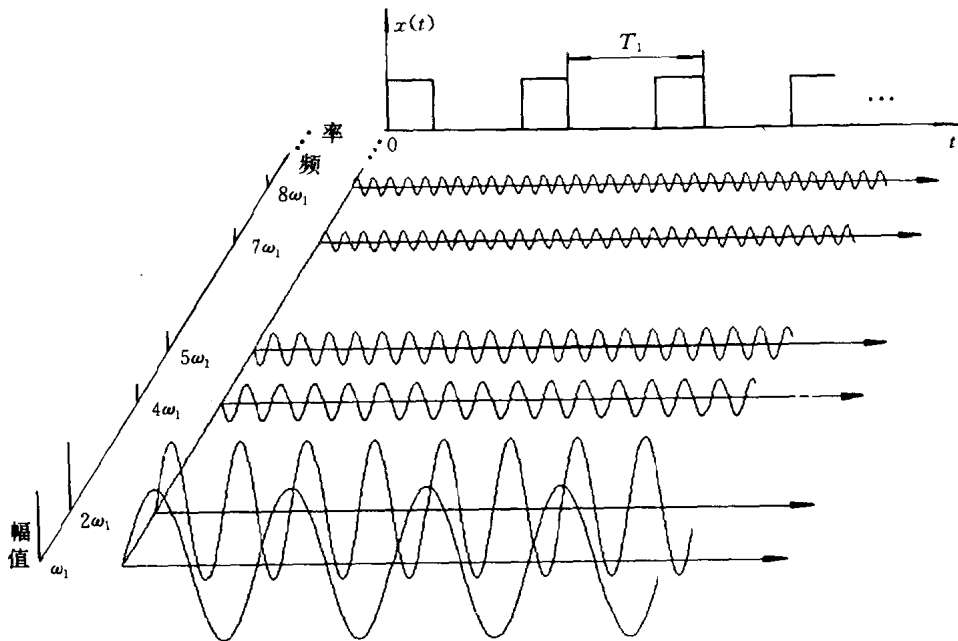


图 1-2 复杂周期信号

(2) 非周期信号

顾名思义，非周期信号不具有周期性，其中，准周期信号是周期与非周期的边缘情况。准周期信号亦由若干简谐分量叠加而成，但这些简谐分量中至少有一个分量与另一个分量的频率之比为无理数（不是公倍数关系），因此合成信号不满足(1.1)式的周期性条件。这种信号往往出现于通信、振动系统。例如，不同独立振源引起的系统响应，通常就属于这一类信号。

瞬态信号的特点是幅值衰减很快，如锤击、爆炸冲击振动就是这类信号。图 1-3 所示为锤击后质量块作有阻尼的自由振动，即属于这类信号。

应当指出的是，实际的物理过程往往很复杂，纯粹的确定性信号非常少见，由于各种环境因素的影响，总是或多或少地渗杂着随机信号成分。

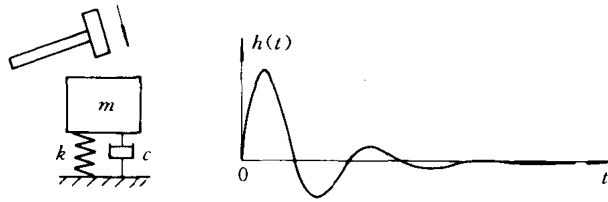


图 1-3 有阻尼的自由振动信号

1.1.2 能量信号与功率信号

(1) 能量信号

在分析区间 $(-\infty, \infty)$ 中, 能量为有限值的信号称为能量信号, 它满足:

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt < \infty \quad (1.3)$$

信号的能量可作如下解释: 对于电信号, 比如电压在已知区间 (t_1, t_2) 内消耗在电阻上的能量

$$E = \int_{t_1}^{t_2} \frac{v^2(t)}{R} dt \quad (1.4)$$

对于电流, 能量

$$E = \int_{t_1}^{t_2} Ri^2(t) dt \quad (1.5)$$

可见, 能量都是正比于信号平方的积分。若考虑 $R=1$ 的情形, 则(1.4)和(1.5)式具有相同形式。因此, 一般情况下, 信号 $x(t)$ 的能量方程为

$$E = \int_{t_1}^{t_2} x^2(t) dt \quad (1.6)$$

称为任意信号 $x(t)$ 的“能量”。请注意, 上式中包含有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有限信号, 常简称为能量信号。例如, 矩形脉冲、减幅正弦波、指数衰减等信号即为能量信号。

(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 $(-\infty, \infty)$ 内的能量不是有限值。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, 信号的平均功率为

$$P = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} x^2(t) dt \quad (1.7)$$

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。换句话说, 功率信号满足条件:

$$0 < \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x^2(t) dt < \infty \quad (1.8)$$

对比(1.3)和(1.8)式, 显见, 一个能量信号具有零平均功率, 而一个功率信号具有无穷大能量。