

测试技术

吴正毅 韩云台 编

机电工程
新技术
基础丛书

3.81



测试技术

吴正毅 韩云台 编

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168 $1/32$ ·印张 $9 \frac{3}{4}$ ·字数 253 千字

1987年3月北京第一版·1987年3月北京第一次印刷

印数 0,001—4,000·定价 2.45 元

统一书号: 15033·6584



《机电工程新技术基础丛书》出版说明

科学技术的飞速发展,要求在机械工业部门从事技术和管理工作的干部学习和了解有关专业的新水平、新成就、新技术、新知识。为了贯彻机械工业“上水平、上质量、上品种,提高经济效益”这个总方针,帮助在职工程技术人员学习业务,更新知识,更好地为祖国的四化建设服务,我们特组织编写了这套《机电工程新技术基础丛书》,第一批将陆续出版十七种。这十七种书是:《工程数学方法》、《弹性塑性力学》、《机械优化设计》、《电机电器优化设计》、《机电产品可靠性技术》、《数控技术》、《环境污染与治理》、《材料科学及其新技术》、《微型计算机应用技术》、《电子电路技术》、《自动控制工程》、《系统工程概论》、《管理数学》、《技术经济分析》、《能源利用与开发》、《液压传动与控制》、《测试技术》。

这套丛书的读者对象,主要是六十年代以来的大学和中专毕业生,现在从事机电产品的设计、制造工艺、技术改造、设备维修、质量管理等工作的工程技术人员。

丛书内容着重于七十年代以来机电工程和管理工程有关学科的最新发展。在重视阐明物理概念的基础上,介绍新技术、新理论的应用,以进行有效地管理和提高经济效益。为了适应更多读者的需要,丛书以介绍基础性知识为主,不过多地作专业理论的探讨和论证。使它既可以作为在职技术干部和管理人员的培训教材,又可兼顾自学需要,使具有一般高等数学,普通物理知识的读者能够看懂。

由于条件和水平所限,丛书内容难免有不妥之处,希望读者提出宝贵意见,帮助我们改进提高。

前 言

本书是根据机械工业出版社《机电工程新技术基础丛书》的要求编写的。

测试技术是近年来发展起来的一门新的学科，它涉及的知识面非常广泛。数学、物理学、电子学、控制工程以及计算机技术等领域的成果都在这门学科中得到应用，同时它已成为现代工业生产过程及科学研究中不可缺少的手段，且其地位和作用日显重要。为使过去在学习阶段未能接触这一方面内容的工程技术人员能较系统地了解测试技术的内容，本书着重讨论了测试技术的理论基础、典型机械工程参数的测试、测试信号的转换和记录，以及信号的分析 and 处理。

本书由吴正毅、韩云台同志编写，其中第一、四、五、六章由吴正毅同志编写；第二、三、七章由韩云台同志编写。本书由黄长艺同志担任主审；程高楣同志主持了编写大纲的审定工作，并对全书作了仔细审阅。

本书在编写中，严普强、熊诗波等同志对本书提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中一定会有不少缺点和错误，希望读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 测试技术的内容和作用	1
§ 1-2 测试系统的组成	3
第二章 测试信号概述	6
§ 2-1 信号的分类	6
§ 2-2 确定性信号及其描述	7
一、周期信号与傅里叶级数	8
二、周期信号的离散频谱	8
三、准周期信号	15
四、瞬变信号	15
五、傅里叶变换	16
六、傅里叶变换的主要性质	18
七、非周期信号的连续频谱	19
八、单位脉冲函数及其傅里叶变换	23
九、功率有限信号及其傅里叶变换	25
§ 2-3 随机信号	31
一、随机过程及其描述	31
二、平均值、方差、均方值	34
三、概率密度函数	35
四、联合概率密度函数	38
五、相关函数	39
六、有限傅里叶变换	46
七、功率谱密度函数, 互功率谱密度函数	47
八、相干函数(凝聚函数)	50
第三章 测量装置的基本特性	51
§ 3-1 概述	51
§ 3-2 静态特性	52
一、静态特性曲线	52

二、静态灵敏度	53
三、线性度	53
四、滞后误差	54
五、分辨力和灵敏限	55
六、精密度、准确度和精确度	55
§ 3-3 动态特性及其基本分析方法	56
一、线性时不变系统及其传递函数	57
二、频率响应函数	59
三、单位斜坡函数、单位阶跃函数、单位脉冲函数	61
四、卷积	61
五、相似系统	66
§ 3-4 典型测量装置的动态特性	68
一、典型测量装置的分类	68
二、零阶系统	69
三、一阶系统	70
四、二阶系统	74
§ 3-5 实现不失真测量的条件	82
§ 3-6 测量装置动态特性的试验测定	86
一、一阶系统	86
二、二阶系统	91
第四章 机械工程常用物理量的测量	96
§ 4-1 应变的测量	96
一、工作原理	98
二、应变计的结构和材料	102
三、应变计的关连电路与电阻应变仪	104
四、应变测量中的误差及其补偿	112
§ 4-2 运动量的测量	115
一、相对位移的测量	115
二、运动速度的测量	123
三、加速度的测量	127
§ 4-3 噪声的测量	134
一、概述	134
二、噪声测量用仪器	138

三、噪声的测量方法	141
§ 4-4 力和扭矩的测量	144
一、概述	144
二、测力传感器	146
三、测力传感器的动态特性及动态误差的补偿	151
四、扭矩的测量	154
§ 4-5 振动的测量	159
一、概述	159
二、振动测试内容和测试系统	160
三、振动测试方法和仪器	162
四、振动试验和分析仪器	164
第五章 测试信号的记录	175
§ 5-1 概述	175
§ 5-2 视觉记录仪器	175
一、电压记录	175
二、电流记录	176
§ 5-3 磁带记录器	190
一、工作原理	190
二、记录方式	193
第六章 模拟测试信号的处理	197
§ 6-1 电桥	197
§ 6-2 放大器	203
一、理想运算放大器及其主要特性	204
二、比例放大器	205
§ 6-3 滤波器	212
一、理想滤波器	213
二、实际滤波器	214
三、RC滤波器原理电路及特性	217
四、相关滤波	220
§ 6-4 非线性校正	221
第七章 信号分析及其应用	230
§ 7-1 概述	230
§ 7-2 离散傅里叶变换(DFT)	234

一、傅里叶变换的卷积定理·····	234
二、离散傅里叶变换(DFT)的导出·····	235
三、离散傅里叶变换中的几个重要问题·····	239
§ 7-3 快速傅里叶变换(FFT) ·····	244
一、问题的提出·····	244
二、FFT算法效率高的关键所在·····	245
三、FFT算法基本原理(基2时间分解法) ·····	246
§ 7-4 相关分析 ·····	251
一、自相关函数·····	251
二、互相关函数·····	256
§ 7-5 谱分析 ·····	262
一、概述·····	262
二、谱估计方法·····	264
三、频率分析仪·····	265
四、数字信号分析仪或系统·····	273
五、谱分析在工程中的应用·····	282
§ 7-6 随机信号分析中的统计误差 ·····	295
参考文献 ·····	29

第一章 绪 论

§ 1-1 测试技术的内容和作用

测试技术是用专门的技术手段，靠实验和结果的后续分析找到被测量的量值和性质的过程。

测试是人类获得客观事物运动定量概念，以掌握其发展规律所不可缺少的，在某种意义上来说：“没有测试，就没有科学”。广泛地说，在人类的各个活动领域中都离不开测试。例如，人体各项指标的测试、大气参数的测试等等。特别是近代化的科学研究和近代化生产领域中更是如此。

在机械工程领域中，随着技术的进步，测试得到愈来愈多的应用，起着愈来愈大的作用。从下面的几个例子中可以看到测试的概貌和应用的广泛性。

例一 一个有经验的工人用一根杆子一头触及机器，另一端将耳朵靠上以倾听正在运行中的发电设备工作是否正常；或用手去触摸机器表面以鉴别其温升是否过高。这些虽然也是一些简易的测试方法，但在现代化的生产中，这些方法就不够精确了，需用能更精确地测量其运行状态的参数，如振动、噪声、温度、动压轴承油膜厚度等参数的测试方法了。

例二 电风扇的噪声和振动以及某些精密旋转仪器如陀螺仪转子振动的消除，在过去也是靠有经验的工人用手感觉电动机的转子不平衡所引起的振动，再估计在何适当位置去重达到动平衡的目的。但这样做的效率低、平衡精度也有限，往往不能满足要求，这就促使新型的测试设备——动平衡仪的出现，它能准确地测试、判断电动机不平衡的量值和角度位置。

例三 磨削表面粗糙度过大，是和磨床上工件与砂轮间相对

振动等因素有关。造成这种振动的原因很多,如机床上同时运行的所有电动机、机床各传动部件等都会导致振动。在诸多振动原因中如何分辨出那个是主要的影响因素,即进行振源的分析,显然是提高加工质量的主要研究课题。由人的感官来作振源分析是很困难的,只有借助于测试的设备和分析仪器才能作到。

由上述三例可以看出测试装置能使人类的感官得到一种延伸,但它比人的感官能获得更客观、更准确的量值,更为宽广的量限,更为迅速的反应。不仅如此,测试系统还能把所测得的结果作必要的处理,例如在噪声背景下提取有用的信号,以及把最能反映研究对象运动本质的量提取出来。这样已不是单纯感官的延伸,而且是具有了选择、加工、处理、判断的能力。

在机械工程领域中,测试技术的作用主要表现在四个方面:

1. 监视生产过程,告诉人们是否处于最佳工况;或诊断已发生故障的部位和性质。

2. 作为控制生产过程系统的一个部分。在生产过程中以测试手段检测生产过程中各种工艺参数,与要求的量值进行比较,进行反馈,自动调节这些参数,使生产过程在最佳状态下运行,这就是所谓以信息流控制物质流和能量流。

3. 工程过程的实验分析。机械工程中的各种工艺过程,工艺设备如需加以改进,在改进前需对原有的状况作深入的分析,作出评价,找出改进措施,这就需要测试大量的数据作为分析、评价和改进的依据。在改进后是否达到了预期的要求,也需要进行大量的参数测试来进行分析和评价。

4. 生产成品的质量评价。各种机电零部件产品都有技术性能要求,在其制成后需通过测试对其作出定量的评价,以判断是否与原设计要求相符。

值得重视的是现在从事机械工程方面工作的技术人员,不仅面临静态几何量的测量,而且随着科学技术的发展,越来越多地面临着许多不可避免的动态物理量的量测(如动态力、振动参数

等)。这些测量大量使用非电量的电测技术,这种技术有其突出的优点,如速度快、惯性小、可进行遥测,可以用通用的数据及信号分析技术和手段等。本书重点讨论的是机械工程中常用的动态测试基本理论、测试方法和测试手段,以及对测试结果的分析 and 处理理论、方法和仪器。

§ 1-2 测试系统的组成

一个测试系统往往是由许多功能不同的部分所组成。最基本的测试系统组成如图1-1所示。

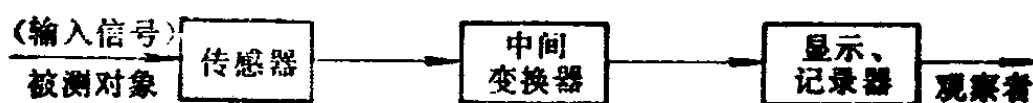


图1-1 测试系统的组成

首先是传感器。传感器是检测被测物理量,并将其变为便于输送、变换和测量的电信号的装置。

其次是中间变换器。它是在保存原始信号中所需要的信息内容前提下,将传感器送来的电信号进行再转换,如放大或衰减、调制和解调、阻抗变换、微分或积分等数学运算,使信号变成一些合乎需要、便于显示、记录或后续处理的信号。

最后是显示与记录器。它是将信号变为一种为人们的感官所能接受的形式,以便观测和分析;或记录后保存起来,事后重放出来进行分析处理。

图中所示的各部分都是指“功能块”,在实际工作中,这些功能块所包含的具体仪器或装置有较大的伸缩性。如中间变换器有时可以由很多仪器组合后完成一特定功能;有时却很简单,甚至可能仅为一根导线,这要随需要而定。

由于计算机技术的发展和广泛应用,现在的测试系统往往还引进测试信号的后续分析和处理仪器。测试系统也就较前述的更复杂些,如图1-2所示。

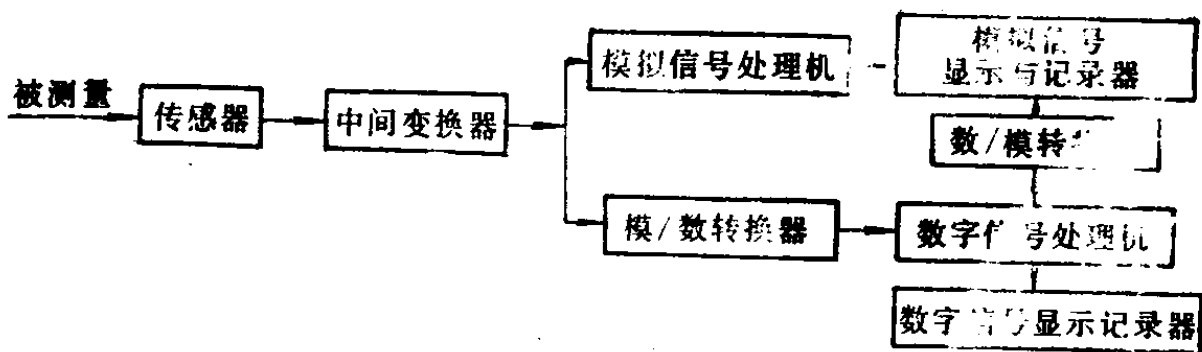


图1-2 带有后续信号处理的测试系统

在工业生产中将具有检测、后续处理及结果显示功能的测试系统作为生产线中的一个部分，适时地将产品质量情况显示、记录下来。图 1-3 即为汽车弹簧组件生产过程中的特性测试系统，它用来鉴别弹簧组件的载荷一位移特性是否符合要求。

液压机锤头对弹簧组件加力，由载荷传感器和位移传感器分别测其相应数值，各由中间变换电路输出电量，在一定的载荷点上（图中为五点），将实测的位移值与所需的参考值相比较，显示板按偏小、合格和偏大三级自动显示出比较的结果，由于引进了这套自动测试系统，复杂的测试过程仅需 2 s 即可完成，极大地提高了生产率，节约了人力。

测试系统是要测出被测对象上某些人们所需要的特征参数信号，不管中间经过多少变换，在这些变换过程中必须忠实、迅速地从信源点把所需要的信息传输到输出端。整个过程要求既不失真，也不受干扰的“污染”，即要求测试系统既具有不失真传输信号的能力，还需在具有外界干扰的情况下能够提取和辨识信号中所包含的有用信号的能力。

测试技术是一门新兴的边缘学科，随着各种有关学科的发展，新型的传感器、测试电路、显示记录仪器以及新的测试方法、技术，新的测试信号分析理论、处理方法和仪器不断地出现。而且随着测试技术在各个领域中应用的广泛和深入，必将更加促进各个领域更为迅速的发展。

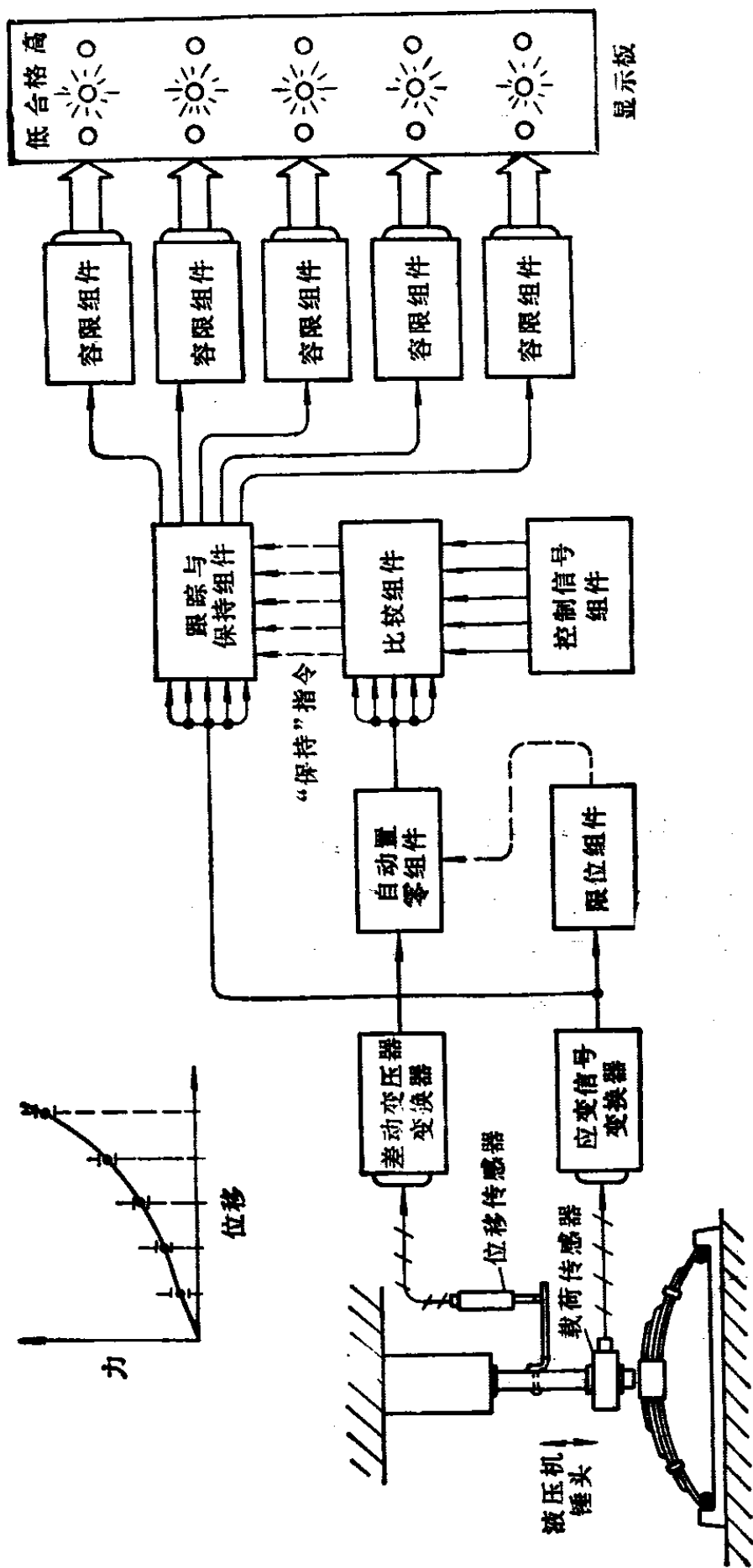


图1-3 汽车弹簧组件特性测试鉴别系统

第二章 测试信号概述

在测试工作中，人们往往是通过传感器把被研究物理过程的各种物理量，转换成便于测量、分析和处理的电信号。因此，信号中包含着所研究物理过程的有关信息。信号是信息的载体，它是我们认识客观物理过程的内在规律、研究各个物理量之间的相互关系、预测未来发展的重要依据。在某种意义上说，测试就必定需要经常研究信号。为了对测试信号有一比较全面的了解，本章简要概述有关信号及其描述、所使用的基本数学工具等方面的基础知识，以便有助于较深入地理解、掌握现代测试技术。

§ 2-1 信号的分类

在动态测试中，通常要研究信号幅值随时间变化的函数关系。因此，可以按作为独立变量的时间取值是连续的还是离散的，把信号分为连续时间信号和离散时间信号（见图2-1）。

连续时间信号的幅值可以是连续的（如振动加速度随时间变化的信号），也可以是离散的（如人口随时间变化的信号）。时

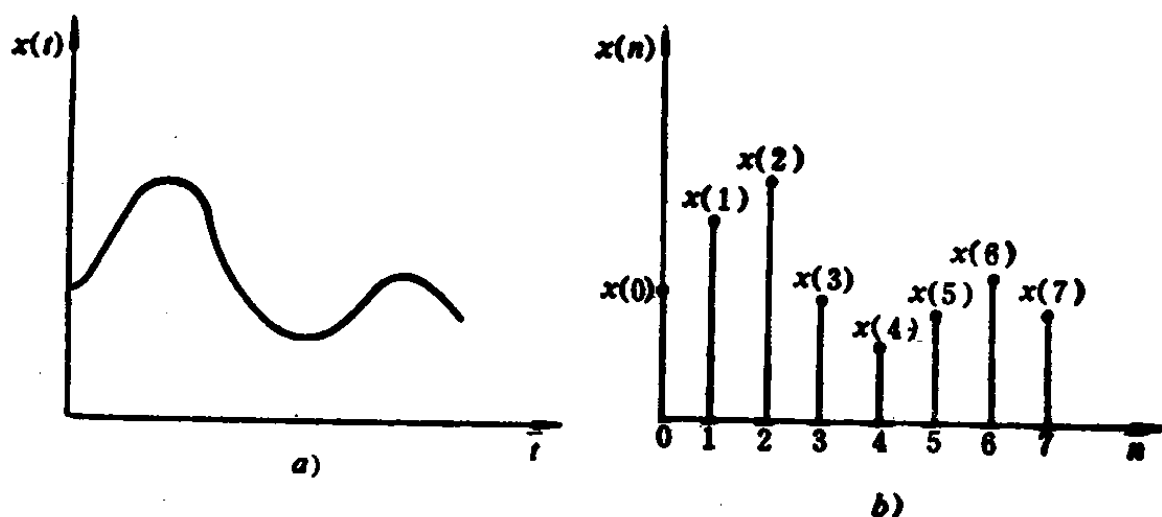


图2-1 连续信号与离散信号

a) 连续时间信号 b) 离散时间信号

间和幅值均为连续的信号一般称之为模拟信号。离散时间信号的幅值可以是连续的（如模拟信号经过采样后的信号），也可以是离散的（如模拟信号经过采样、量化后的信号）。时间和幅值均为离散的信号则称为数字信号。

信号还可以根据其能否以明确的数学关系式来描述而分为确定性信号和随机信号两大类。能够精确地用明确的数学关系式来描述的信号称之为确定性信号。在工程实践中，这类确定性信号是很多的，如振动台的正弦振动；压电晶体因受力作用而产生的电荷输出；应变片因受力作用而产生的电阻变化等。但是，在实践中，有许多物理现象无法用明确的数学关系式来表示，更无法预测未来任意时刻的精确值。这种“不确定性”和“事先不可预知性”统称为随机性，我们把这类信号称为随机信号。如火车、汽车运行时的振动；机床、建筑物基础感受到的环境振动；电子器件的热噪声等均属此类。随机信号是来自随机过程，要用概率论与数理统计的观点和方法去研究。

上述两大类信号还可进一步细分，如表2-1所示。

表2-1 动态测试信号分类

确 定 性 信 号				随 机 信 号			
周 期 信 号		非 周 期 信 号		平 稳 随 机 过 程		非 平 稳 随 机 过 程	
简谐周期信号	复杂周期信号	准周期信号	瞬变信号	各态历经过程	非各态历经过程	一般非平稳随机过程	瞬变随机过程

§ 2-2 确定性信号及其描述

我们直接测试或记录到的信号一般是随时间变化的物理量，称为信号的时间域描述。这种以时间作为独立变量的描述方式只能反映信号的幅值随时间变化的特征。为了更加全面研究信号，从

中获得更多的有用信息，可以运用傅里叶级数或傅里叶变换，把时间域信号变换成频率域信号，即以频率作为独立变量建立信号与频率的函数关系，这称为信号的频率域描述。它可以反映信号的频率结构和各频率成分的幅值和相位，这也就是通常所说的，对信号进行频谱分析。

一、周期信号与傅里叶级数

周期信号 $f(t)$ 是一种周期性重复出现的时变函数，满足如下关系式：

$$f(t) = f(t \pm nT_0) \quad (2-1)$$

式中 $n = 1, 2, 3, \dots$;

T_0 ——重复周期。

在数学上，一个以 T_0 ($T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$, ω_0 称为圆频率或角频率)

为周期的周期函数 $f(t)$ ，如果在 $[-T_0/2, T_0/2]$ 上满足狄里赫利 (Dirichlet) 条件 (即函数在 $[-T_0/2, T_0/2]$ 上连续或只有有限个第一类间断点；只有有限个极值点)，那么在 $[-T_0/2, T_0/2]$ 上就可以展成傅里叶级数。该级数和的表示式，常用有三种，如表 2-2 所示。

二、周期信号的离散频谱

利用傅里叶级数可将周期信号进行分解，其物理意义是十分明确的。以表 2-2 中三角函数形式的傅里叶级数为例：

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t - \varphi_n) \quad (2-2)$$

它表明任意一个周期信号可看作是由一直流分量 (式中第一项) 和无限个谐波分量 (式中第二项) 叠加而成。各次谐波的幅值和相位分别由 A_n 和 φ_n 求出。当 $n = 1$ ，即 $A_1 \cos(\omega_0 t - \varphi_1)$ 称为信号的基波， ω_0 称为基波角频率，其余依次称为二次谐波 ($n = 2$ ，角频率为 $2\omega_0$)、三次谐波 ($n = 3$ ，角频率为 $3\omega_0$)……。 n 次谐波即 $A_n \cos(n\omega_0 t - \varphi_n)$ 。我们以角频率 ω ($\omega = \omega_0, 2\omega_0, 3\omega_0, \dots$)

表2-2 傅里叶级数

	三角函数	形式	复指数形式
表示式	$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t)$	$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t - \varphi_n)$	$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega_0 t}$
系数	$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t) \cos n\omega_0 t dt$ $n = 0, 1, 2, \dots$	$A_0 = a_0$ $a_n = A_n \cos \varphi_n$ $b_n = A_n \sin \varphi_n$ $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ $\varphi_n = \arctg \frac{b_n}{a_n}$	$c_n = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt$ $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ $a_0 = \frac{a_0}{2}, c_n = \frac{c_n - jb_n}{2}, c_{-n} = \frac{c_n + jb_n}{2}$ $c_n = c_n e^{j\angle c_n}$ $ c_n = c_{-n} = \frac{1}{2} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = \frac{A_n}{2}$ $\angle c_n = \arctg \frac{-b_n}{c_n} = -\varphi_n$ $\angle c_{-n} = \arctg \frac{b_n}{c_n} = \varphi_n$
	$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t) \sin n\omega_0 t dt$ $n = 1, 2, 3, \dots$		
向量表示	