高等学校教材

精密测试技术

杨　俊　冯凯昉
李永存　杨　勃　编

江苏科学技术出版社
电子工业出版社

精密测试技术

杨　俊　冯凯昉
李永存　杨　勃　编

江苏科学技术出版社
电子工业出版社

精 密 测 试 技 术

杨　俊　冯凯昉
李永存　杨　勃　编

出　　版：江苏科学技术出版社
　　　　　电 子 工 业 出 版 社
发　　行：江 苏 省 新 华 书 店
印　　刷：丹 阳 练 湖 印 刷 厂

开本 787×1092 毫米　1/16　印张 15.5　字数 353,000
1990 年 9 月第 1 版　　1990 年 9 月第 1 次印刷
印数 1—700 册

ISBN　7—5345—0867—3

TN·23　　（课）定价：3.70 元

责任编辑　钱　亮

出 版 说 明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986～1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题、这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前　言

本教材由电子工业部电子机械教材编审委员会无线电专用机械设备教材编审小组审定，并被推荐作为高等学校工科电子类专业教材，也可作为工科有关专业的教材。

本教材由西安电子科技大学杨俊教授担任主编，由杭州电子工业学院莫宏勋副教授主审。

本课程的参考学时数为60学时。书中以精密测试技术中涉及到的共性问题为主，以信号分析、转换、传输、测量、记录为体系，在建立完整测试系统基本概念的基础上，将位移测量和机械振动作为应用例子，以达到举一反三的作用。书中用到的数学公式和有关定理，只引用结论，主要说明其物理意义及应用方法，不作推导。有关测量仪器，着重介绍其基本原理和特性。每章最后附有习题及思考题，以供练习。

本教材共分七章。绪论及第一章由西安电子科技大学杨勃同志编写，第二、四、五章由西北工业大学冯凯昉同志编写，第三、六、七章由西安电子科技大学李永存同志编写，全书由杨俊审阅。

由于编者水平有限，书中难免有不当和错误之处，恳请读者批评指正。

编　者

一九九〇年一月

绪　论

随着科学技术的迅猛发展，新技术革命将把人类社会从工业化社会推进到信息化社会。对于信息来说，都有一个检测、转换、存贮和加工的过程。以上述过程为主要内容的“精密测试技术”已形成了一门专门的技术科学，它在科学研究、工业生产等领域起着重要的作用。

测试包含有测量和试验两个内容。测量就是把被测系统中的某种信息检测出来，并加以量度；试验就是将被测系统中的某种信息用专门的装置，人为地把它激发出来，以便测量。精密测试技术就是以解决上述两个课题为目的的一门技术科学。

由于现代技术的发展，各种静态测量已逐渐显示出它的局限性，而现在的科学研究、工业生产都要求对动态量进行测量。例如在机床的参数测量中，以前只是测量一些静态或稳态下的参数(静态特性)，如导轨的平直度，主轴径向跳动和主轴轴向窜动等等。而现在则普遍要求测量它的动态参数，如主轴的回转误差，在切削状态下的稳定性、自激情况以及它的动刚度、振型等，以便更好地了解机床在运行时的确切情况，找出薄弱环节，改进机床设计。现代测试的另一个特点就是朝着更精密的方向发展，测试精度从毫米级扩展到微米级甚至亚微米级。例如精密工作台的定位检测、磁盘存贮器定位机构的位移测量和集成电路的薄膜测量等等。实现这些精密、动态量的测量可以用机械测量、光测量、电测量的方法。特别是电测方法由于其高精确度、高灵敏度、高响应速度，以及耗能少、结构小、可以连续测量、自动控制等特点，已成为精密动态量测量的主要方法。

精密测试技术是一门随着现代技术的发展而迅猛发展的技术，各种学科领域的新成就(新的物理和化学原理、新材料、微电子学和计算机技术等)也常常首先反映在测试方法和仪器设备的改进中。例如，新型半导体材料及光导纤维的出现，便发明了一系列对力、热、光、磁等物理量或化学成分特别敏感的传感器。此外，由于微电子学的发展使得有可能把某些电路甚至微处理器和传感测量部分做成一体，而使传感器具有放大、校正、判断和一定的信号处理功能，组成所谓的智能传感器。

计算机技术的发展也使精密测试技术发生了根本变化。利用专用的硬件和软件可以实现实时测试。利用计算机进行数据处理，提高了信号分析处理的速度和精度，扩展了其功能。整个测试工作也可以在计算机的控制下，自动按照一定的试验步骤进行，组成了自动测试系统。

可以看出，精密测试技术的发展趋势，除了不断提高灵敏度、精度和可靠性外，更重要的是向小型化、非接触化、测量放大一体化和智能化方向发展。

一个完整的测试过程，一般应包括信息的检测、变换、传输、显示、记录、处理及分析几个部分。信息的检测由传感器完成，信息的变换及传输由中间变换装置完成，信

息的显示及记录由记录显示仪器完成，而信息的处理和分析则由数据分析仪、频谱分析仪及电子计算机来完成。这几部分的任务，首先是把被测信息用传感器检拾转换成电信号，随后利用放大、调制解调、滤波等装置把它转换成传输方便、功率足够、可以记录和显示的电压量或电流量，再用电压及电流表、显示器、记录仪等装置将其显示并记录下来，最后用信号处理设备对记录下来的信号进行分析处理，例如求特征参数、频率结构等等，找出被测信息的规律。

典型测试过程如图 1 所示。

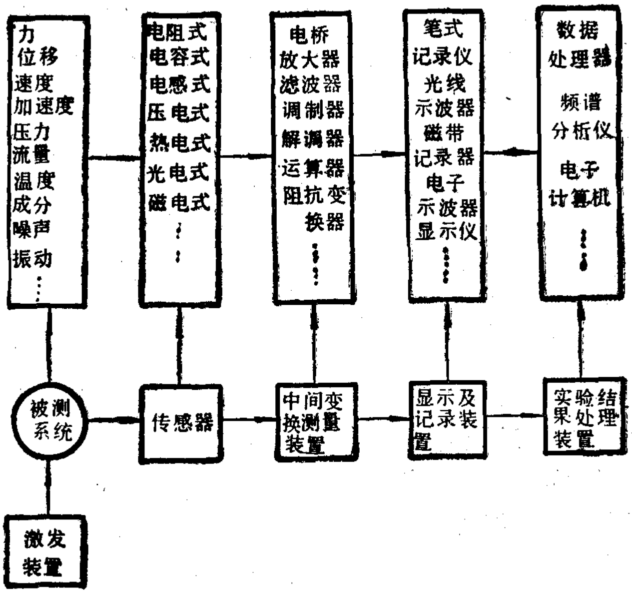


图 1　典型测试过程框图

从信号流的观点来看，也可将测试看成如图 2 所示的过程。

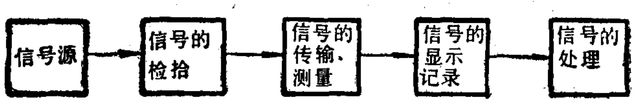


图 2　从信号流角度研究测试过程

本课程所研究的对象是精密动态测试中涉及的信号分析与处理；测试系统的静、动态特性；常用传感器、中间变换电路的工作原理；常用的记录仪器以及常见物理量的测试方法等。

对高等学校电子机械各专业来说，《精密测试技术》是一门技术基础课。通过本课程的学习，将使学生初步掌握精密动态量测试所需要的基本知识和技能。

目 录

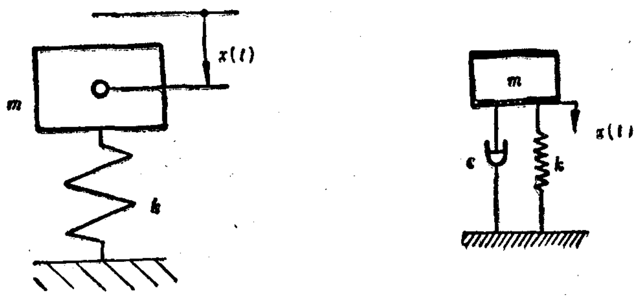
第一章　信号分析与处理

在对物理量进行精密检测的过程中，为了掌握各种现象的内在规律和彼此之间的关系，必须对某些表示现象特征的物理量进行测量、分析与处理。反映各种客观现象的信号是多种多样的，如位移、速度、加速度、压力、扭矩、温度、颜色、电压等，它们可以是力学的、运动的信号，也可以是光学的和电磁的信号，但信号一般都表现为一个复杂的时间函数。我们常把这个时间函数分为确定性的和非确定性的，即确定性信号与非确定性信号。

在任一瞬时，如果信号都有一个完全确定的数值，这种信号就称为确定性信号。确定性信号又可分为周期性信号与非周期性信号。周期信号按一定的周期(T)重复变化，例如一个集中参数的单自由度无阻尼自振系统（图 1-1a)），它的输出位移信号：

$$x(t)=X_0\cos\sqrt{\frac{k}{m}}\,t \tag{1-1}$$

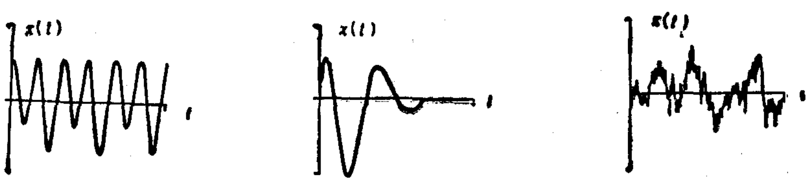
式中 t 为时间，k 为弹簧常数，m 为质量，X_0 为由初始条件决定的常数。$x(t)$ 就是一个周期信号（图 1-2a)）。



a) 无阻尼自振系统　　　　b) 阻尼自振系统

图 1-1　单自由度振动系统

而非周期信号虽有确定的数学关系，却无重复变化的周期。例如，一个集中质量的单自由度阻尼自振系统(图 1-1b))，其输出位移信号就是一个非周期信号（图 1-2b))。



a) 周期的　　　　b) 非周期的　　　　c) 随机的

图 1-2　信号的类型

$$x(t)=e^{-\zeta\omega_n t}(b_1\cos\omega_d t+b_2\sin\omega_d t) \tag{1-2}$$

式中：　$\omega_n=\sqrt{\dfrac{k}{m}}$，　$\xi=\dfrac{C}{2\sqrt{mk}}$，$\omega_d=\sqrt{1-\xi^2}\,\omega_n$

b_1、b_2—由初始条件决定的常数

在精密检测中还有许多信号，它作为时间函数却无法用明确的数学关系式来表达，无法预测未来任何瞬时的精确值，这类信号就称为非确定性信号，或叫随机信号（图1-2 *c*））。非确定性信号又可分为平稳的和非平稳的二种。

各种信号在数学上可以表示为一个或几个独立变量的函数，信号的数学表达式中的独立变量可以是连续的，也可以是离散的。信号按照其取值情况可分为连续信号和离散信号。连续信号在某一时间间隔内，其幅值可在连续范围内取任意数值；而在离散信号中，其独立变量仅取离散值（图1-3 *a*）、*b*））。此外，若要用计算机对测试信号进行处理，信号除了其自变量要取离散值外，信号在其离散点上的值也要通过量化转换成数码，这种在时间上和幅值上都离散化的信号，又叫做数字信号（图1-3*c*））。

我们直接观测或记录的信号一般是随时间变化的物理量，即以时间作为独立变量，称为信号的时域描述。信号的时域描述只能反映信号的幅值随时间变化的特征，而不能明确揭示其频率组成成分。为了研究信号的频率结构和各频率成分的幅值大小，应对信号进行频谱分析，把时域信号通过处理变换为频域信号，即对信号作频域描述。

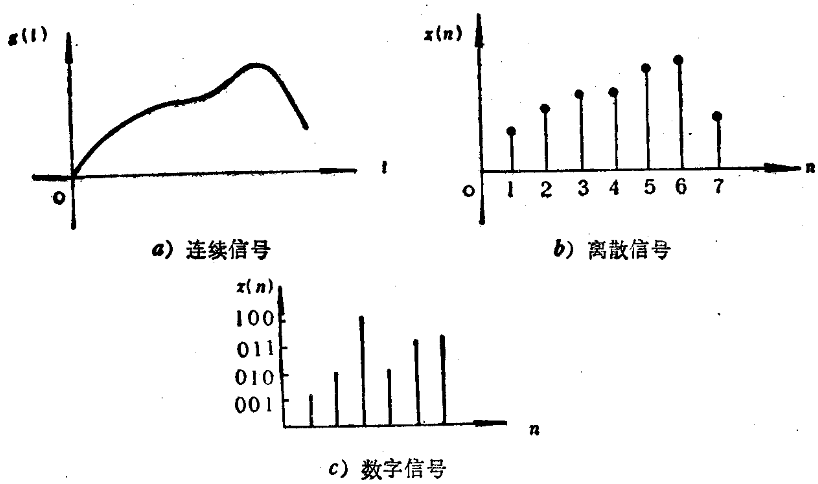


图1-3　连续信号及离散信号

信号分析与处理是精密测试技术中极其重要的一步，在测试中实际检测到的信号有时并不十分理想，信号中经常混有各种噪声，因此对测得的信号必须经过分析和处理才能提取到有用的信息。通常把研究信号的构成和特征值的过程称为信号分析，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。

信号的分析与处理还应用于许多不同的学科领域，例如通信、控制系统、医学、地震学、机械震动与冲击的研究、流体力学等等。并且信号分析与处理技术正不断以新的方式应用于新的领域。信号的分析与处理方法有多种多样，常用的方法除了频谱分析外，还有滤波、相关及功率谱分析（图1-4）。滤波的目的是为了抑制、摒弃通带外的频率成分，突出通带内的频率成分；而时域中的相关分析和频域中的功率谱分析则是在噪声背景下提取有用信息的有效方法。近年来，由于计算机和软件技术的飞速发展，以

及为计算机使用而发明的各种快速算法的日益增多，将模拟信号转换成数字信号来进行信号的分析、处理的数字信号分析及处理技术已占有越来越重要的地位。

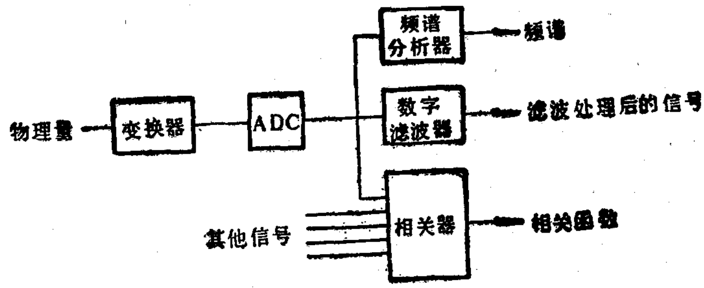


图 1-4　信号分析处理的主要方法

§1-1　周期信号与傅立叶级数

周期信号在一定的时间间隔 T（周期）中应满足下列关系：

$$x(t)=x(t+nT) \tag{1-3}$$

周期信号 $x(t)$ 的频率记为 f_0，$f_0=1/T$。记 $2\pi f_0$ 为 ω_0，称为角频率。一个典型的周期信号——正弦信号，其表达式为：

$$x(t)=X_0\sin(\omega_0 t+\theta_0) \tag{1-4}$$

式中：X_0——幅值；

θ_0——初相位。

下面的分析将说明，任何一个周期信号都可以展开成由许多正弦谐波构成的傅立叶级数。

一、周期信号的傅立叶级数

在有限区间上，凡满足 Dirichlet 条件的任何一个周期为 T 的周期信号 $x(t)$ 都可展开成傅立叶级数，其三角函数展开式如下：

$$x(t)=a_0+\sum_{n=1}^{\infty}(a_n\cos n\omega_0 t+b_n\sin n\omega_0 t) \tag{1-5}$$

$$(n=1,\ 2,\ 3\cdots)$$

式中

$$\left.\begin{aligned}
a_0&=\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2}x(t)\mathrm{d}t\\
a_n&=\frac{2}{T}\int_{-T/2}^{T/2}x(t)\cos n\omega_0 t\mathrm{d}t\\
b_n&=\frac{2}{T}\int_{-T/2}^{T/2}x(t)\sin n\omega_0 t\mathrm{d}t\\
\omega_0&=\frac{2\pi}{T}
\end{aligned}\right\} \tag{1-6}$$

如果信号 $x(t)$ 为奇函数或偶函数，则根据奇偶函数的性质，上述展开式中的系数

a_0、a_n、b_n 还可简化。

若 $x(t)$ 为奇函数，则：

$$\left.\begin{aligned}
&a_0=0\\
&a_n=\frac{2}{T}\int_{-T/2}^{T/2}x_{奇}(t)\cos n\omega_0 t\,dt=0\\
&b_n=\frac{2}{T}\int_{-T/2}^{T/2}x_{奇}(t)\sin n\omega_0 t\,dt=\frac{4}{T}\int_0^{T/2}x_{奇}(t)\sin n\omega_0 t\,dt
\end{aligned}\right\}\tag{1-7}$$

可见周期信号若为奇函数，其展开式中只有正弦分量 而无直流分量和余弦分量，其相应傅立叶级数展开式为：

$$x(t)=\sum_{n=1}^{\infty}b_n\sin n\omega_0 t\tag{1-8}$$

若 $x(t)$ 为偶函数，则：

$$\left.\begin{aligned}
&a_0=\frac{2}{T}\int_0^{T/2}x_{偶}(t)\,dt\\
&a_n=\frac{4}{T}\int_0^{T/2}x_{偶}(t)\cos n\omega_0 t\,dt\\
&b_n=0
\end{aligned}\right\}\tag{1-9}$$

由式(1-9)可见，展开式中只包含余弦分量和直流分量，而无正弦分量，其相应的傅立叶级数展开式为：

$$x(t)=a_0+\sum_{n=1}^{\infty}a_n\cos n\omega_0 t\tag{1-10}$$

式(1-5)也可写成：

$$x(t)=a_0+\sum_{n=1}^{\infty}A_n\sin(n\omega_0 t+\theta_n)\tag{1-11}$$

式中：$A_n=\sqrt{a_2^n+b_n^2}$

$\quad\operatorname{tg}\theta_n=\frac{a_n}{b_n}$

由式(1-6)可以看出，周期信号是由无穷多个不同频率的谐波叠加而成，这些谐波的频率都是基频 ω_0 的整数倍。以 $\omega=n\omega_0$ 为自变量，A_n 及 θ_n 为因变量作图，则 A_n—ω 称为幅值频谱，θ_n—ω 称为相位频谱，总称为周期信号的频谱。由于 n 是整数序列，所以 A_n 与 θ_n 也是二个序列，该二个序列与时间 t 无关。

利用欧拉公式，还可将傅立叶级数表示为复数形式：

因为
$$e^{\pm j\omega t}=\cos\omega t\pm j\sin\omega t\tag{1-12}$$

有
$$\cos\omega t=\frac{1}{2}(e^{-j\omega t}+e^{j\omega t})\tag{1-13}$$

$$\sin\omega t=j\frac{1}{2}(e^{-j\omega t}-e^{j\omega t})\tag{1-14}$$

因此式(1-5)可改写为：

$$x(t)=a_0+\sum_{n=1}^{\infty}\left[\frac{1}{2}(a_n+jb_n)e^{-jn\omega_0 t}+\frac{1}{2}(a_n-jb_n)e^{jn\omega_0 t}\right]\tag{1-15}$$

令
$$c_n=\frac{1}{2}(a_n-jb_n)$$

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

$$c_0=a_0$$

则
$$x(t)=c_0+\sum_{n=1}^{\infty}c_{-n}e^{-jn\omega_0t}+\sum_{n=1}^{\infty}c_ne^{jn\omega_0t} \tag{1-16}$$

式(1-16)第二项中的 n 从 $-\infty$ 到 -1 时有：

$$\sum_{n=1}^{\infty}c_{-n}e^{-jn\omega_0t}=\sum_{n=-\infty}^{-1}c_ne^{-jn\omega_0t} \tag{1-17}$$

合并(1-16)式中各项，得：

$$x(t)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}c_ne^{jn\omega_0t}(n=0,\ \pm1,\ \pm2,\ \cdots) \tag{1-18}$$

式(1-18)为傅立叶级数的复指数函数形式。将 a_n、b_n 的表达式 代入 c_n 的表达式，即得：

$$c_n=\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2}x(t)e^{-jn\omega_0t}dt \tag{1-19}$$

当 $n=0$ 时，由式(1-6)可知 $b_n=0$，$a_n=\frac{2}{T}\int_{-T/2}^{T/2}x(t)dt$，所以 c_0 与 $n=0$ 时的 c_n 是一致的。

c_n 是复数，用 c_{nR}、c_{nI} 分别表示 c_n 的实部和虚部，c_n 可写成

$$c_n=c_{nR}+jc_{nI}=|c_n|ej\varphi_n$$

式中
$$|c_n|=\sqrt{c_{nR}^2+c_{nI}^2}$$

$$\varphi_n=\mathrm{arctg}\frac{c_{nI}}{c_{nR}}$$

$$c_n=c^*_{-n};\varphi_n=-\varphi_{-n}$$

傅立叶级数的复指数函数形式是一种比较重要的表达形式，在下一节讨论非周期信号时要经常用到它。

例 求图 1-5 中周期性三角波的傅立叶级数。

解 在 $x(t)$ 的一个周期中可表示为

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

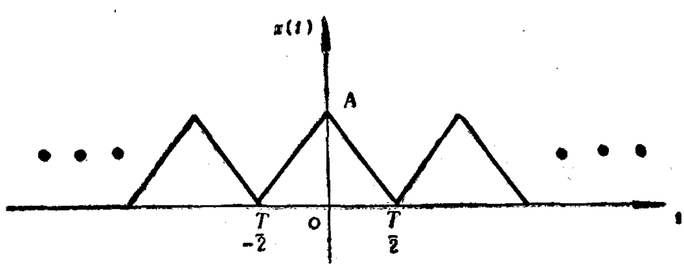


图 1-5 周期性三角波

常值分量：

$$a_0=\frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}x(t)\mathrm{d}t=\frac{2}{T}\int_{0}^{\frac{T}{2}}\left(A-\frac{2A}{T}t\right)\mathrm{d}t=\frac{A}{2}$$

余弦分量的幅值：

$$a_n=\frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}x(t)\cos n\omega_0 t\mathrm{d}t$$

$$=\frac{4}{T}\int_{0}^{\frac{T}{2}}\left(A-\frac{2A}{T}t\right)\cos n\omega_0 t\mathrm{d}t=\frac{4A}{n^2\pi^2}\sin^2\frac{n\pi}{2}$$

$$=\begin{cases}\dfrac{4A}{n^2\pi^2} & n=1,\ 3,\ 5,\ \cdots\\ 0 & n=2,\ 4,\ 6,\ \cdots\end{cases}$$

正弦分量的幅值：

$$b_n=\frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}x(t)\sin n\omega_0 t\mathrm{d}t=0$$

因为 $x(t)$ 为偶函数，$\sin n\omega_0 t$ 为奇函数，所以 $x(t)\sin n\omega_0 t$ 为奇函数，而奇函数积分一个周期之值等于零。这样，该周期性三角波的傅立叶级数展开式为：

$$x(t)=\frac{A}{2}+\frac{4A}{\pi^2}\left(\cos\omega_0 t+\frac{1}{3^2}\cos 3\omega_0 t+\frac{1}{5^2}\cos 5\omega_0 t+\cdots\right)$$

$$=\frac{A}{2}+\frac{4A}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}\cos n\omega_0 t\qquad(n=1,\ 3,\ 5,\ \cdots)$$

$$=\frac{A}{2}+\frac{4A}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}\sin\left(n\omega_0 t+\frac{\pi}{2}\right)\quad(n=1,\ 3,\ 5,\ \cdots)\quad(1\text{-}20)$$

周期性三角波的频谱图如图 1-6 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。

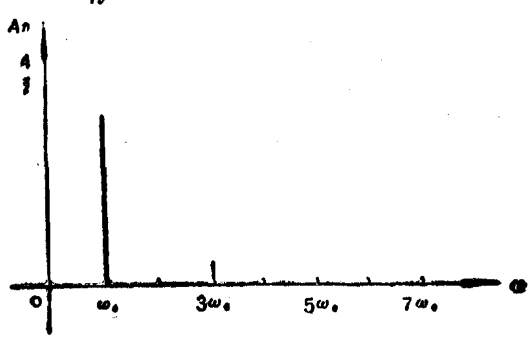


图 1-6　周期性三角波的频谱