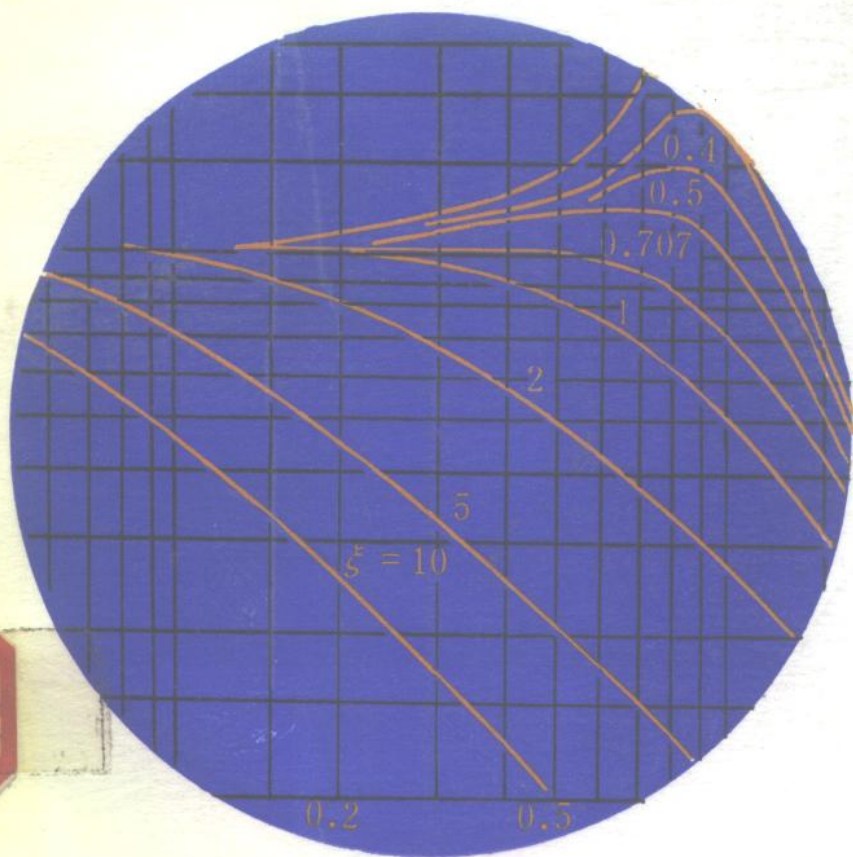


# 技术 | 测试 | 动态

杨维明 刘瑞复 编著



辽宁科学技术出版社

# 动态测试技术

杨维明 刘瑞复 编著

辽宁科学技术出版社

(辽)新登字4号

动态测试技术

Dongtai Ceshi Jishu

杨维明 刘瑞复 编著

---

辽宁科学技术出版社出版 (沈阳市和平区北一马路108号)  
辽宁省新华书店发行 朝阳新华印刷厂印刷

---

开本:  $850 \times 1168^{1/32}$  印张:  $14^{1/4}$  字数: 370,000 插页: 2  
1992年4月第1版 1992年4月第1次印刷

---

责任编辑: 李伟民 责任校对: 赵淑新  
封面设计: 栾良才

---

印数: 1—557

ISBN 7-5381-1220-0/TN·29 定价: 16.10元

## 序

随着科学技术的进步，动态测试计量技术在生产和建设上占到愈来愈重要的地位。它用于生产过程的检测和控制、设备的故障诊断、产品质量的检验，同时也构成自动化和人工智能的耳目。它综合了近代物理、计算机科学和电子学的成果而形成了一门独立的技术。

目前，工程测试技术已成为大专院校理工科每个专业的必修课程，也是广大工程技术人员迫切需要了解、熟悉并掌握的知识之一。

本书是作者结合他们科研和教学实践经验，并参阅了国内外大量资料写成的，也可以说是他们科研工作和教学工作的初步总结，是一本理论联系实际值得向读者推荐的著作。

《动态测试技术》的出版，无疑对工程测试技术能起到普及和推广作用。谨在此期望我国从事工程测试技术的科技人员、教学人员，通过你们的辛勤工作，在工程测试领域取得更大的成绩，总结出更多经验，并写出更好的著作问诸于世，在我国四个现代化进程中作出更大贡献！

雷天觉

1990年7月于北京

# 目 录

绪论.....	1
第一篇 动态测试的基本理论.....	3
第一章 信号分析理论.....	3
§ 1—1 周期信号.....	4
§ 1—2 瞬变信号.....	10
§ 1—3 随机信号.....	12
第二章 测试系统特性.....	17
§ 2—1 静态特性.....	18
§ 2—2 动态特性.....	20
§ 2—3 动态测试系统误差分析.....	34
§ 2—4 系统特性参数实验测定.....	47
第二篇 测试方法和技术.....	53
第三章 信息转换技术概述.....	53
§ 3—1 传感器的分类与性能指标.....	53
§ 3—2 传感器的发展方向.....	61
第四章 力和力矩的测试.....	66
§ 4—1 概述.....	66
§ 4—2 应力(应变)测试.....	69
§ 4—3 微机可编程序遥测系统.....	108
§ 4—4 压电晶体测力计.....	124
§ 4—5 电涡流测力计.....	131
§ 4—6 光导纤维压力传感器.....	145

§ 4—7	机床切削力的测量	148
第五章	位移测试系统	156
§ 5—1	光导纤维测试技术	158
§ 5—2	光导纤维传感器的位移测试	176
§ 5—3	激光干涉仪的测试系统	187
§ 5—4	微波式物位测试	198
§ 5—5	超声波导位移传感器	202
第六章	机械振动的测试	211
§ 6—1	测振传感器	212
§ 6—2	激振系统和激振器	222
§ 6—3	机械阻抗及其应用	232
§ 6—4	结构动力参数其他测定方法	248
§ 6—5	振动信号的谱分析和相关分析	252
第七章	温度的测试	267
§ 7—1	各类温度传感器的特点和应用范围	268
§ 7—2	红外测温仪及其应用	281
§ 7—3	微型自粘式温度记录片	288
§ 7—4	磁敏材料温度特性及其应用	289
§ 7—5	轧辊表面温度测试系统	296
§ 7—6	橡胶密封圈唇口温升遥测系统	301
§ 7—7	光导纤维在温度测试中的应用	307
§ 7—8	红外热成像和二维温度场测试	316
§ 7—9	测定金属切削温度的常用方法	324
第八章	机床中直线运动参数测试	327
§ 8—1	直线运动误差基本概念	328
§ 8—2	基准元件测量法	333
附:	水泡式电子水平仪平直度测试系统	340
§ 8—3	激光干涉法测线性误差	342
第九章	齿轮传动链精度的动态测试	350

§ 9—1	惯性式 (地震仪式) 传动精度测试仪	
	原理.....	351
§ 9—2	惯性式齿轮传动链动态精度检查仪.....	352
§ 9—3	相位比较法齿轮传动链动态精度测 试仪.....	354
§ 9—4	机床传动链的误差频谱分析方法.....	359
第十章	机床主轴回转运动误差的动态测试.....	368
§ 10—1	主轴回转精度与回转误差.....	368
§ 10—2	主轴回转运动误差的动态测试方法.....	376
§ 10—3	主轴四转角漂移误差的测试原理.....	389
§ 10—4	主轴回转运动误差的评定和圆形的分 析、处理.....	397
第十一章	测试数据和信号的分析处理.....	401
§ 11—1	回归分析.....	401
§ 11—2	随机信号的数据处理.....	410
§ 11—3	工程实用频谱分析.....	428
§ 11—4	相关分析.....	435
	主要参考文献.....	450
	后记.....	452

## 绪 论

测量是科学技术的基础，从航天飞行、核弹爆炸、制造大规模集成电路等尖端科学，直至机械制造业中零件加工和机器装配、调整，无一不需要统一和精确的测量。

测量按被测参数可分为电量的测量与非电量的电测量；按测量原理及测量方法可分为电子测量、机械测量、光学测量、气动测量等；按被测参数随时间变化与否可分为动态测试与静态测量。

测量技术是一门传统的基础学科，然而动态测试技术却是一门年轻的发展中的学科。它在提高劳动生产率和质量控制、技术改造、用微型计算机来改造旧设备，以及逐步用人工智能来代替人的判断中，都起重要作用。

动态测试技术，简言之是完成瞬时信息的获得、转换、传输、处理，直至显示的一种功能和手段。

现在从事机械创造、工业自动化等专业的工程技术人员、研究人员，面临着的是越来越多的、不可避免的动态物理量的测试。这些测试，尽管经常是光、机、电相结合的，但其基本组成部分，几乎都是采取非电量电测技术来实现的。所谓非电量电测，是将被测参量（如温度、位移、压力等）先变成电参量（如电位），然后再将电参量进行传输、处理、记录、显示。因此，在动态测试技术和自适应控制测量系统中，电测技术占有十分重要地位。

动态测试系统的构成如图 0—1 所示。它表示了非电量电测系统的各基本单元及其组成。从框图看出，被测信号首先经传感



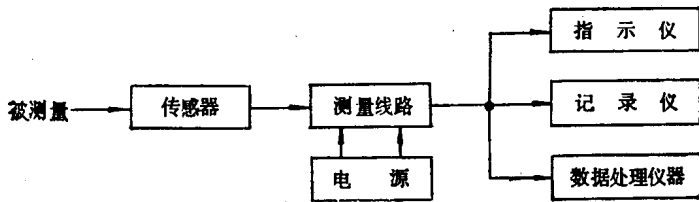


图 0—1 非电量电测系统的组成

器变换成便于输送、转换和测量的电信号进入测量线路；测量线路（电路）再对电信号进行转换（即对电信号进行放大或衰减、调制和解调、阻抗变换、分析和运算等处理），使之成为人们需要的形式，直接输给记录与显示仪表；最后被还原出被测的物理量，供测量者应用。

随着电子计算机、半导体器件、传感技术以及电子技术的发展，近代的完整的动态测试系统也在日臻完善。由于各领域中各种测量目的的要求，种类繁多的高灵敏度、高稳定性的传感器件不断涌现，使信号检出、变换的精度和灵敏度大为提高。磁记录技术业已成熟，可广泛采用磁记录器来完成信号的记录。进行数据处理的电子计算机硬件、软件都得到显著的发展，具有快速傅里叶变换软件的高速信号处理系统，使大量的测量数据得以高速、自动处理。记录曲线也可经自动或半自动曲线读取穿孔仪，输至大型高速电子计算机进行处理。总之，测量技术在全力吸取多种新技术、新理论（激光、半导体技术、光导纤维、声学、计算机技术、通信技术、遥感技术、自动化技术以及近代物理、数理统计、控制论、信息论等）的过程中，本身也得到了飞快的发展。

# 第一篇 动态测试的基本理论

动态测试中的被测参数（例如机械加工过程中的位移、振动、切削力、噪声和温度等）与静态测量的主要区别是被测量是随时间变化的。通常，利用非电量电测技术，经传感器将被测量转换成相应的电信号，动态测试中的信号特征是与时间有关。本篇首先概略介绍信号分析方面的基本知识；接着对接受信号的测试系统（其中包括传感器、测量电路、记录显示装置等）本身的动态特性进行讨论，此即为测试系统一般数学模型问题；最后讨论测试系统对信号的动态响应以及动态参数实验测定。

## 第一章 信号分析理论

表征动态参数的信号可分为确定性信号和非确定性信号。所谓确定性信号，是能够用明确的数学关系来描述的信号。例如，蜗轮因安装偏心而引起的传动比误差为

$$\Delta i = \frac{l}{r_2} \sin \omega t \quad (1-1)$$

式中： $l$ ——偏心距；  
 $r_2$ ——蜗杆的节圆半径。

从上式看出，因安装偏心引起的传动比误差是正弦函数。非确定性信号则无法用明确的数学关系式来表达，此类信号又称为随机信号。例如，机加工过程中，因工件材料中某一硬点所引起的切削力变化，往往因硬点出现的随机性，从而造成切削力变化的随机性。

判断信号是确定性信号还是非确定性信号，通常从实验能否重复产生这些信号作为依据。如果对某一机械或物理过程，经重复多次检测，能在一定实验误差范围内得到相同信号，一般就可认为这些信号是确定性的，否则就是随机性的。

确定性信号可进一步分为周期性信号和瞬态信号（也称非周期信号）。非确定性信号可分为平稳的和非平稳的两种。

动态信号虽然分为周期性的、瞬态的（非周期性的）和随机的三种，并且每种信号也可单独存在，但实际应用中遇到的信号则往往是上述二种或二种以上信号的组合。

## § 1—1 周期信号

周期性信号中最简单最典型的形式为正弦信号。正弦信号的表达式为

$$\begin{aligned} x(t) &= x_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \\ &= x_m \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0) \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中： $x_m$ ——幅值；

$\varphi_0$ ——初相角；

$f_0$ ——频率；

$\omega_0$ ——角频率， $\omega_0 = 2\pi f_0$ 。

利用这种信号，我们可以组合出任何复杂形状的周期信号；相反，任何周期信号也可分解成一系列正弦信号之和。这种分解，在测量系统中是很重要的。通常观察各个正弦分量如何受测量系统的影响将比周期信号作为一个整体来处理要简单得多。

可以证明，任何周期为  $T$  的信号  $f(t)$ ，可以分解成一系列离散的正弦信号。即

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t) \quad (1-3)$$

式中谐波幅值为

$$a_n = \frac{2}{T_1} \int_0^{T_1} f(t) \cos n\omega_1 t dt \quad (1-4)$$

$$b_n = \frac{2}{T_1} \int_0^{T_1} f(t) \sin n\omega_1 t dt \quad (1-5)$$

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} f(t) dt \quad (1-6)$$

这一级数称为傅立叶级数，它包含一项 $\frac{a_0}{2}$ （等于一个周期 $f(t)$ 的平均值）以及一系列sin和cos项的和，其频率则由基频 $\omega$ 按整数倍增至无限大。

任何一个周期信号可由式(1-3)精确表示。初看似乎有些奇怪，观察图1-1所示的方波合成就变得直观清楚。因此，适当

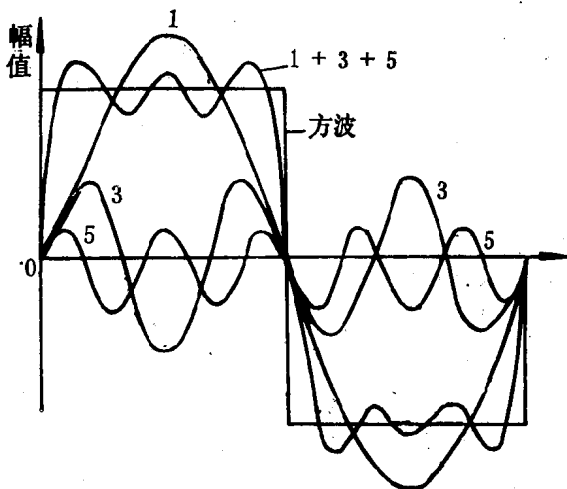


图 1-1 方波的合成

选择幅值的大小和符号，可将谐波分量合成一复杂波形。

可以证明，如果信号为奇函数（即 $-f(t) = f(-t)$ ），级数中只有sin项；如果信号为偶函数（即 $f(t) = f(-t)$ ），级数中只有cos项。图1-2给出了几个偶函数和奇函数的例子。从图 1-2

所示的波形可以决定其是否为偶奇函数，从而可决定 $a_n$ 和 $b_n$ 项是否为零。

式(1-3)的另一种形式是

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(n\omega_1 t - \varphi_n) \quad (1-7)$$

式中:  $C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$  (1-8)

$$\varphi_n = \operatorname{tg}^{-1} \frac{a_n}{b_n} \quad (1-9)$$

这种形式的傅立叶级数对观察随频率而变化的相移对波形的影响时特别有用。

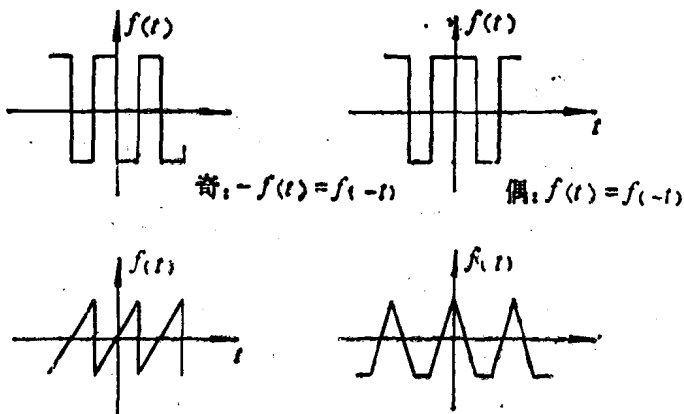
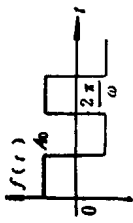
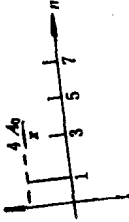
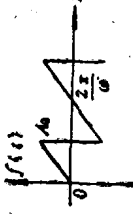
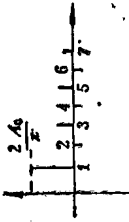
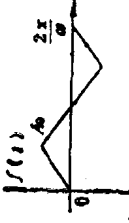
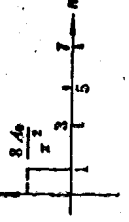

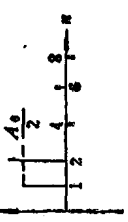


图 1-2 奇函数和偶函数的波形

将式(1-3)应用于某些比较简单的波形时，发现对于平滑变化的一些曲线，它的谐波幅值则随谐波数的增加而迅速下降，从表1-1中可看到，第三行的三角波的谐波幅值比方波的谐波幅值下降快得多。反之，对于突变不连续的一些波形组合成原来的波形需要的傅立叶级数项数就要多一些。图1-3所示的为某动态信号的综合与分析的例子。

处理非正弦信号(即一般周期性信号)时，频谱是个很重要

表 1-1 某些简单周期波的傅立叶级数及频率

曲线形式	波 形	谐波幅值 (频谱)	公 式
方 波			$f(t) = \frac{A_0}{\pi} \left( \sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3 \omega t + \frac{1}{5} \sin 5 \omega t + \dots \right)$
锯齿波			$f(t) = \frac{2A_0}{\pi} \left( \sin \omega t - \frac{1}{2} \sin 2 \omega t + \frac{1}{3} \sin 3 \omega t - \frac{1}{4} \sin 4 \omega t + \dots \right)$
三角波			$f(t) = \frac{8A_0}{\pi^2} \left( \sin \omega t - \frac{1}{3^2} \sin 3 \omega t + \frac{1}{5^2} \sin 5 \omega t - \dots \right)$
半波整流			$f(t) = \frac{A_0}{2} \left( \frac{2}{\pi} + \cos \omega t + \frac{4}{3} \cos 3 \omega t - \frac{4}{15} \cos 5 \omega t + \frac{4}{35} \cos 7 \omega t - \dots \right)$

的概念。表1—1第三列中表示了几种周期性信号波形的幅值频谱。幅值频谱表示的是各谐波分量所占的比重关系。严格来说，周期性信号所包含的谐波分量有无限多，不过由于谐波振幅随频率增高而减小，通常只考虑频率较低的一些分量就够了。信号的

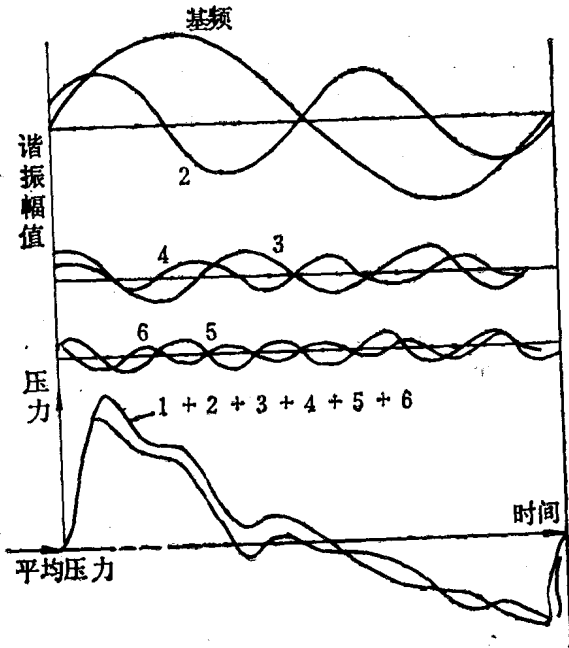


图1—3 六次谐波的合成

频带宽度指的是从零频率到需要考虑的最高次谐波频率间的频段，至于信号频带宽度的具体定义则视具体情况而定。有时将零频率到频谱包络线第一个零值间的频段认为是信号的频带宽度；有时将零频率到谐波幅值下降到最大值的多少分之一的频率之间的频段称为信号的频带宽度。

在信号分析中，决定周期性信号波形的频谱，对于正确设计一个动态测试系统是很重要的。关于频谱分析方法目前常用的有四种

种，即基于窄带模拟滤波器系统，基于自相关函数的傅立叶级数变换系统、基于快速傅氏变换（FFT）的数学技术、基于光学数据处理系统。本节只简要介绍基于自相关函数的傅立叶级数变换系统决定周期信号频谱的基本原理（自相关函数详细介绍见有关章节）。

相关函数是表征两个信号或同一信号相隔时间  $\tau$  的两点之间相似程度的关系。

$$\text{定义} \quad R_{12}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x_1(t) x_2(t + \tau) dt \quad (1-10)$$

为周期信号  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  的互相关函数。

式中：  $T$  ——  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$  的周期；

$\tau$  —— 在  $(-\infty, \infty)$  中变化并与  $t$  无关的时间连续变量。

同样定义

$$R_x(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) x(t + \tau) dt \quad (1-11)$$

为周期信号  $x(t)$  的自相关函数。

如果周期信号  $x(t)$  由式 (1-7) 给出，将式 (1-7) 代入式 (1-11)，则可得

$$R_x(\tau) = \frac{a_0^2}{4} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (a_n^2 + b_n^2) \cos n\omega\tau \quad (1-12)$$

$R_x(\tau)$  的傅氏级数变换为

$$R_x(n) = \frac{1}{T} \int_0^T R_x(\tau) \cos n\omega\tau d\tau \quad (1-13)$$

将式 (1-12) 代入式 (1-13) 得

$$R_x(n) = \frac{a_n^2 + b_n^2}{4} \quad (1-14)$$

上式即是  $n$  次谐波的均方值。因此，求自相关函数并取其傅氏级数变换的过程即可求出频谱的幅值。



## § 1—2 瞬变信号

在动态测试中，会遇到一些产生瞬变信号的物理过程。例如，末端受拉力的钢丝绳在某时刻断裂，则绳中的应力即为瞬变信号。再如，把温度计插入恒温介质中，该时刻温度计所感受到的信号即为瞬变信号。除了准周期信号以外的非周期信号都称为瞬变信号。后面讨论的非周期信号即为瞬变信号。准周期信号是由若干个频率比不是有理数的正弦信号合成的信号，它不同于周期信号，也不同于瞬变信号。

如前所述，周期性信号可以利用傅立叶级数展开成不连续频谱，并且谱线间隔及振幅频谱的谱级高度将随周期增大而减小。当周期无限增大（周期信号向非周期信号转化）时，谱线将无限密集（不连续谱向连续谱转化），各谐波的振幅将趋向无穷小。

这就是说，当  $T \rightarrow \infty$  时，信号频谱的谱线间隔  $\omega_0 = \Delta\omega = \frac{2\pi}{T} \rightarrow d\omega$

成为无穷小量；不连续变量  $n\omega_0 = n\Delta\omega \rightarrow \omega$  成为连续变量；同时，各谐波的振幅也将成为趋近于零的无穷小量。

由周期信号的傅立叶级数展开式（1—7），可改写成傅立叶级数的虚指数形式

$$x(t) = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{j n \omega_0 t} \quad (1-15)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-j n \omega_0 t} dt \quad (1-16)$$

式中  $n$  在  $-\infty$  至  $+\infty$  范围中取整数值。

由上式可见，谐波振幅是与周期  $T$  成反比关系变化的，这就决定了周期无限增大时，谐波振幅必然成为趋于零的无穷小量。

定义