

CHONGJI YINGLIBO JIANCE JISHU YANJIU

冲击应力波 检测技术研究

张心斌 吴兆军 吴婧姝 著



中国建材工业出版社

冲击应力波检测技术研究

张心斌
吴兆军 著
吴婧姝



中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

冲击应力波检测技术研究/张心斌, 吴兆军, 吴婧
姝著. —北京: 中国建材工业出版社, 2014. 10
ISBN 978-7-5160-0947-5

I. ①冲… II. ①张… ②吴… ③吴… III. ①撞击应
力—应力波—检测—研究 IV. ①TB303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 185837 号

内 容 简 介

冲击应力波检测技术因其操作简单, 能量消耗少, 可实现无损检测, 所以在混
凝土无损检测领域、桩基无损检测技术领域得到广泛应用。

本书全面介绍了冲击应力波在无损检测领域的应用, 可为该领域从业者提供有
益的参考和帮助。

冲击应力波检测技术研究

张心斌 吴兆军 吴婧姝 著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 710mm × 1000mm 1/16

印 张: 7.5

字 数: 130 千字

版 次: 2014 年 10 月第 1 版

印 次: 2014 年 10 月第 1 次

定 价: 45.80 元

本社网址: www.jcbs.com.cn 公众微信号: zgjcycbs

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

冲击应力波检测技术是无损检测领域一门新兴技术，其特点是操作简单，消耗的能量小，适用范围广。二十世纪九十年代初美国康耐尔大学土木学院 Sansalone, M. J 教授和美国标准研究所合作研制成功一种主动式应力波检测技术，随后该技术不断完善并引入了频率分析的方法使得应力波检测技术的精度大大提高，迅速在很多领域得到应用。

我国在二十世纪八十年代开始进行无损检测技术的研究，并且在很多领域得到应用，现在无损检测技术已是普遍使用的检测方法。

无损检测技术是一门涉及范围相当广泛的技术，包括常用的超声技术、电磁检测技术，应力波检测技术等都可以归结为无损检测，其中应力波是无损检测技术的一个分支，现在广泛使用的混凝土无损检测、桩基无损检测都是应力波检测的成功应用。

冲击应力波检测技术引进了信号处理技术，将频率分析方法引进到检测技术中来，提高了检测的速度和自动化程度，使得无损检测变得更加快捷。目前国内尚未有开展冲击应力波检测技术与开发。本课题是由中冶集团建筑研究总院检测中心联合中国科学院声学所有关专家共同完成的。经过两年研制成功了 S-1（暂定）型应力波检测仪并在实际工程中得到应用。

在此衷心感谢有关领导和专家的大力支持和帮助。

著者

2014. 9



中国建材工业出版社

China Building Materials Press

我们提供

图书出版、图书广告宣传、企业/个人定向出版、设计业务、企业内刊等外包、代选代购图书、团体用书、会议、培训，其他深度合作等优质高效服务。

编辑部

010-88386119

宣传推广

010-68361706

出版咨询

010-68343948

图书销售

010-88386906

设计业务

010-68343948

邮箱：jccbs-zbs@163.com

网址：www.jccbs.com.cn

发展出版传媒 服务经济建设

传播科技进步 满足社会需求

(版权专有，盗版必究。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。举报电话：010-68343948)

目 录

第 1 章 应力波基本原理	1
第 2 章 傅里叶变换	5
2.1 傅里叶变换的基本概念	5
2.2 卷 积	19
2.3 离散傅里叶变换	22
2.3.1 理论推导	23
2.3.2 离散傅里叶变换举例	28
2.3.3 离散傅里叶变换的性质	29
第 3 章 数字信号处理快速傅里叶变换	34
3.1 快速傅里叶变换的原理	34
3.1.1 变换矩阵的因式分解	35
3.1.2 信号流程图	38
3.2 按时间抽取的 FFT 算法	45
3.2.1 按时间抽取法的信号流程图	47
3.2.2 码序翻转	49
3.2.3 FFT 的 C + + 程序	50
3.3 快速傅里叶变换的应用	56
3.3.1 用快速傅里叶变换进行频谱分析	56
3.3.2 频谱分析中参数的选取	57
3.3.3 用快速傅里叶变换计算功率谱和互谱	58
3.3.4 用快速傅里叶变换计算频率响应函数和相干函数	59
第 4 章 采样定理与离散信号	61
4.1 采样定理一	61
4.1.1 连续信号的离散化	61
4.1.2 正弦信号的采样问题	62
4.1.3 采样定理一	65
4.1.4 采样定理一应用举例	69

4.2 采样定理二	71
4.2.1 采样定理二的直观意义	71
4.2.2 采样定理二的证明	72
4.2.3 奈魁斯特 (Nyquist) 频率	74
4.3 由离散信号恢复成连续信号	74
4.3.1 由离散信号恢复成连续信号 $\tilde{x}(t)$	74
4.3.2 连续信号 $\tilde{x}(t)$ 与 $x(t)$ 的关系	75
4.4 采样定理三	77
4.4.1 采样定理三 (重采样定理)	77
4.4.2 采样定理三的直观意义	78
4.5 采样与频混	79
4.5.1 频混现象	79
4.5.2 消除频混的途径	79
第5章 S-1 冲击应力检测仪	81
5.1 应力波的产生	82
5.2 系统说明	84
5.3 测试范围	85
5.4 检测原理和实例	88
附录1 应力波 P 检测之数据采集卡研制说明书	91
附录2 系统操作手册	109

第 1 章 应力波基本原理

机械波在固体介质中传播时，可以发生一系列的反射、折射、衍射、透射，甚至干涉。它的基本特性与声波、电磁波具有完全的共性。

当固体受到力的作用时，在固体内部会产生应力的传播，这种应力的传播具有波的特性。此处所说的力是广义的概念。如地震就是地球内部局部能量活动达到一定的规模时突然释放，能量释放就是以应力波的形式向四周传播。核武器爆炸时其部分能量也是从地表或地下以应力波的形式向四周传播。

应力波在固体中传播时会有很多种形式，最基本的形式有横波（剪切波 Shear Wave 或 Second Wave）和纵波（压缩波 Pressure Wave 或 Primary Wave）；

纵波为压缩波，波的传播方向与质点振动方向一致，如图 1-1 所示，质点沿着波的传播方向振动，波速为 $C_p = \sqrt{\frac{E(1-\gamma)}{\rho(1+\gamma)(1-2\gamma)}}$ ，固体内部形成一系列梳密相间的区域见图 1-1：

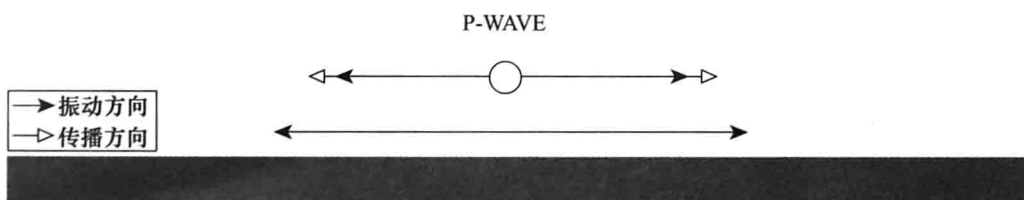


图 1-1 纵波

横波为剪切波，波的传播方向与质点振动方向垂直，

如图 1-2 所示，波速为： $C_p = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$

应力波在固体中传播时，遇到声阻抗不同的介质时会发生反射、散射和折射，同样道理当应力波在固体中传播时遇到空洞、裂缝等缺陷时也会发生反射，利用反射回来的波可以判断缺陷的位置大小和程度。下图 1-3 中有一个入射波从表面向内部传播，传播的过程中遇到缺陷时会发

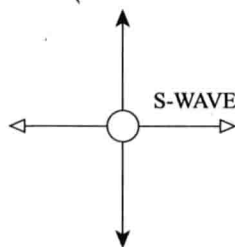


图 1-2 横波

生反射，如果我们在表面设置相应的传感器接收这种反射波则可以了解内部的缺陷情况，首先可以计算出内部缺陷的深度，通过信号处理技术还可以分析出缺陷的范围。

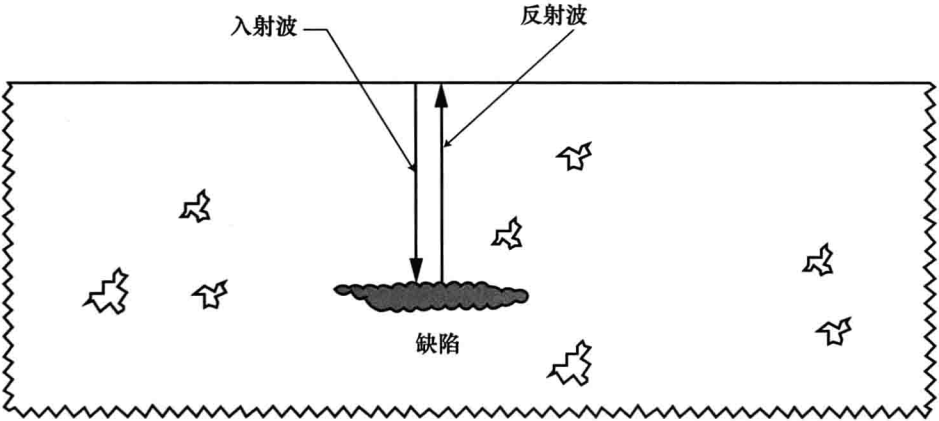


图 1-3 应力波反射

从理论上讲只要有波传播且遇介质不同的物质时一般就会发生反射，且反射的程度和波本身的特征有很大关系，取决于波的基本特征。

实际工程探测中人们为了较准确探测到结构内部缺陷，人们希望发射一种特定的波，此种波对内部的缺陷最敏感，反射回来的强度最大和特征最明显，因此如何控制波源成为重要因素之一。另一方面对反射回来的波进行有效的分析和处理，使得有用信息最大程度地得到提取也成为一种十分重要的途径。

探测时我们预先并不知道什么位置有缺陷，因此要求发射的波有很好的方向性，声波发射时其方向性与波长 λ 有很大的关系，遇到缺陷反射时同样和波长 λ 有很大的关系，因此如能对所发射应力波的主要成分波的波长进行控制则会大大提高测试的准确性和时效性。

冲击应力波的基本方法就是利用可受控冲击来获得一定波长的应力波，以检测介质内部的缺陷。

此处对冲击的概念进行说明，一般冲击指突然作用的力，幅值较大、时间较短，是一个瞬间作用的力，右图 1-4 所示为一冲击脉冲，宽度为 T ，幅值为 F 。对于这样的一个脉冲，可以通过调节

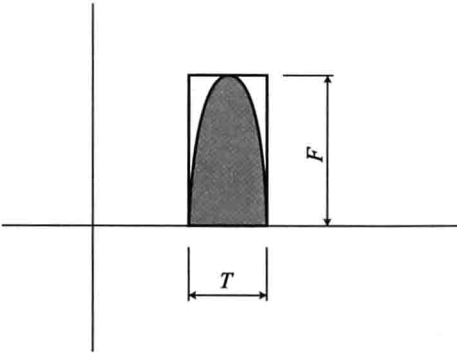


图 1-4 脉冲

其脉冲宽度 T 来改变其频率成分 f_i 和 λ_i ，从而使脉冲波传播的时候具有一些特定的属性，对反射物的敏感度更强一些。

如果脉冲的宽度越窄则频率成分越宽，能量向不同频率段上平均分散，时域宽度和频域宽度成反比。

冲击回波应力波就是利用瞬态冲击形成一定宽度的脉冲，脉冲向介质内传播遇到缺陷时将向表面反射，反射回来的波的相位会根据两种介质的声阻抗 Z_1 和 Z_2 的不同发生变化。应力波从一种介质向另外一种介质传播时界面反射率为： $R = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$ ，该公式为矢量，不仅反映波的反射大小程度，同时反映了波的相位变化。

下面分两种情况进行分析。

第一种情况：如图 1-5 所示的为 $Z_1 > Z_2 > Z_0$ 的反射波情况，上表面为空气，因此每反射一次同相位。

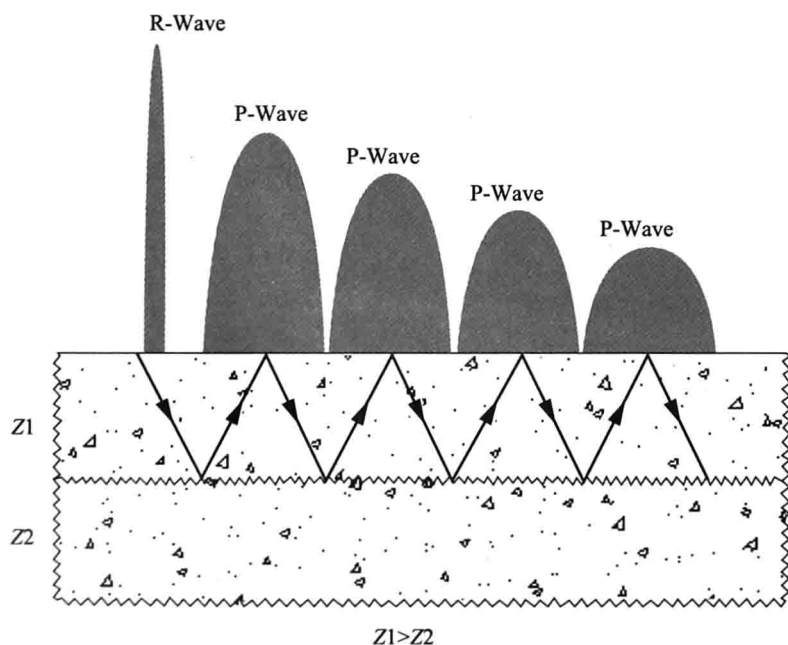


图 1-5 同向反射原理

根据此计算缺陷的深度为：

$$H = \frac{C}{2f} \quad (1-1)$$

式中 H ——深度；

C ——应力波速；

F ——反射波的主频。

第二种情况：如图 1-6 所示的为 $Z_0 < Z_1 < Z_2$ 的反射波情况，上表面为空气，因此波每反射一次相位发生变化。

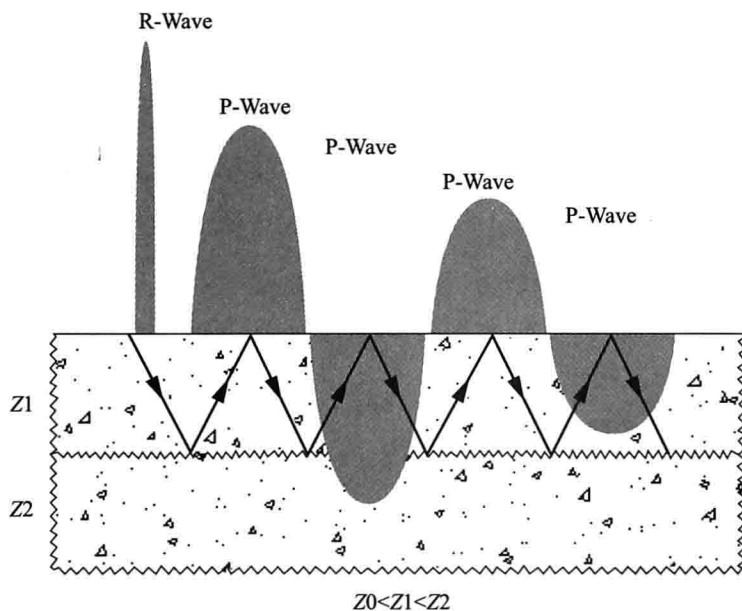


图 1-6 异向反射原理

根据此计算缺陷的深度为：

$$H = \frac{C}{4f} \quad (1-2)$$

第2章 傅里叶变换

冲击应力波测试结构内部缺陷时，首先要对采集到的信号进行处理，在信号处理当中，最为重要的方式是对信号进行从时域到频域的转换。傅里叶级数是转换的基本手段。离散傅里叶变换（DFT）是数字信息处理的强有力的工具，特别是快速傅里叶变换（FFT）的出现使许多科学问题的分析完全改观。

从信息观点来看，一个信息处理系统都是由信息的获取开始，经过信息的变换，特征抽取，贮存，整理和判别直至信息的输出，而信息的分析如频谱分析、数字滤波等都要使用傅里叶变换这一数学工具。

傅里叶变换的实质是将时域信号变换为频域信号从而使信号分析处理大为简化。因此，“变换”不过是将同一问题放在不同定义下进行分析，而其结果应是等价的，只是形式不同而已。这样说似乎有些抽象，其实不然，因为我们在初等数学中已经使用过“变换”这一概念，例如对数就是一种变换，如普通的乘、除运算在对数中变换为简单的加、减运算，再经过反对数变换（逆变换）便可得到与用普通乘、除运算所得到的结果相同。但从利用变换这一技巧来看，可使复杂问题简单化。

2.1 傅里叶变换的基本概念

由傅里叶级数可导出傅里叶变换的定义式：

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2-1)$$

其逆变换为

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df \quad (2-2)$$

式中， f 是频率，也可用角频率（ $\omega = 2\pi f$ [rad/s]）来表示

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$$

如果积分存在，称 $X(f)$ 为 $x(t)$ 的傅里叶变换，而 $x(t)$ 称为 $X(f)$ 的傅

里叶反变换（或逆变换）。简称 $x(t)$ 和 $X(f)$ 为傅里叶变换对。记为

$$X(f) = F[x(t)] \quad \text{或} \quad X(\omega) = F[x(t)]$$

$$x(t) = F^{-1}[X(f)] \quad \text{或} \quad x(t) = F^{-1}[X(\omega)]$$

一般说来，傅里叶变换 $X(f)$ 是一个复变函数，可表示为

$$X(f) = R(f) + jI(f) = |X(f)|e^{j\phi(f)} \quad (2-3)$$

式中， $R(f)$ 是傅里叶变换的实部， $I(f)$ 是傅里叶变换的虚部。

$$|X(f)| = \sqrt{R^2(f) + I^2(f)}$$

是傅里叶变换的模。

1. 傅里叶变换的直观说明 用傅里叶方法可将信号分解成许多不同频率的正弦波之和，这些频率的范围代表信号的频谱。如果再将这些正弦波相加就成为原来的信号，那么我们就确定了这个信号的傅里叶变换。

图 2-1 是一个简单波形的傅里叶变换的直观说明，这个简单波形是由两个正弦相加而得。图中示出了每个正弦波的振幅和频率。

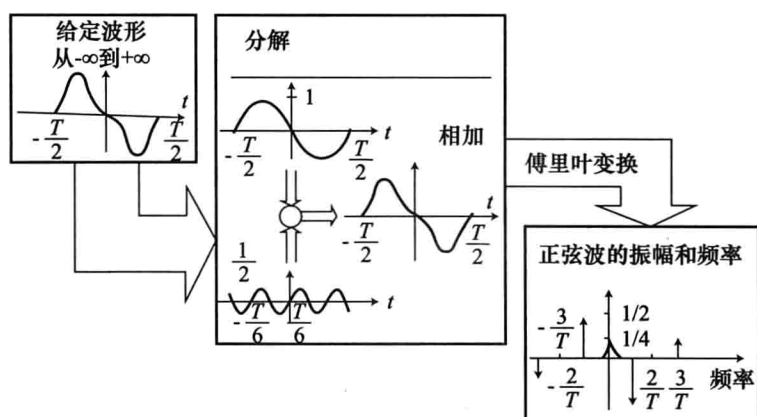


图 2-1 傅里叶变换的图解

2. 信号的傅里叶级数形式 一个重复的信号是时间的周期函数，任何一个周期为 T 的周期信号 $x(t)$ 都可用傅里叶级数的形式来表示：

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (2-4)$$

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

式中

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} x(t) dt \quad (2-5)$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} x(t) \cos n\omega_0 t dt \quad (2-6)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} x(t) \sin n\omega_0 t dt \quad (2-7)$$

$$\omega_0 = 2\pi/T$$

式(2-4)也可写成下列形式:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_0 t - \theta_n) \quad (2-8)$$

式中

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2-9)$$

$$\theta_n = \arctg(b_n/a_n) \quad (2-10)$$

从(2-4)式看出,满足狄里赫利(Dirichlet)条件的一个周期函数,总可以展成无限个正弦和余弦谐波分量之和,这些谐波频率是基波频率(1/T)的整数倍。各频率的幅值 C_n 和初相位 θ_n 由(2-9)和(2-10)式给定,并与时间 t 无关。

例:方波函数的傅里叶变换

因为傅里叶级数是傅里叶变换的一种特殊情况,所以在分析方波这样的周期函数时,我们宁可用傅里叶级数而不用傅里叶变换。

设方波函数为对称方波,见图2-2(a),由于这种波形是水平中心对称的,所以其平均面积为零,因此直波项为零。

又因 $x(t) = x(-t)$, 所以只存在余弦项,故 $b_n = 0$

现在有

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} x(t) \cos n\omega_0 t dt$$

式中

$$x(t) = -A \quad \text{从 } -T/2 \text{ 到 } -T/4$$

$$x(t) = A \quad \text{从 } -T/4 \text{ 到 } +T/4$$

$$x(t) = -A \quad \text{从 } T/4 \text{ 到 } +T/2$$

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \left\{ \int_{-T/2}^{-T/4} (-A) \cos n\omega_0 t dt + \int_{-T/4}^{+T/4} (A) \cos n\omega_0 t dt + \int_{+T/4}^{+T/2} (-A) \cos n\omega_0 t dt \right\} \\ &= \frac{2}{T} \left\{ \left[\frac{-A \sin n\omega_0 t}{n\omega_0} \right]_{-T/2}^{-T/4} + \left[\frac{A \sin n\omega_0 t}{n\omega_0} \right]_{-T/4}^{T/4} - \left[\frac{A \sin n\omega_0 t}{n\omega_0} \right]_{T/4}^{T/2} \right\} \\ &= \frac{2A}{n\omega_0 T} \left\{ -\sin(-n\omega_0 T/4) - \sin(-n\omega_0 T/2) + \sin(n\omega_0 T/4) \right\} \end{aligned}$$

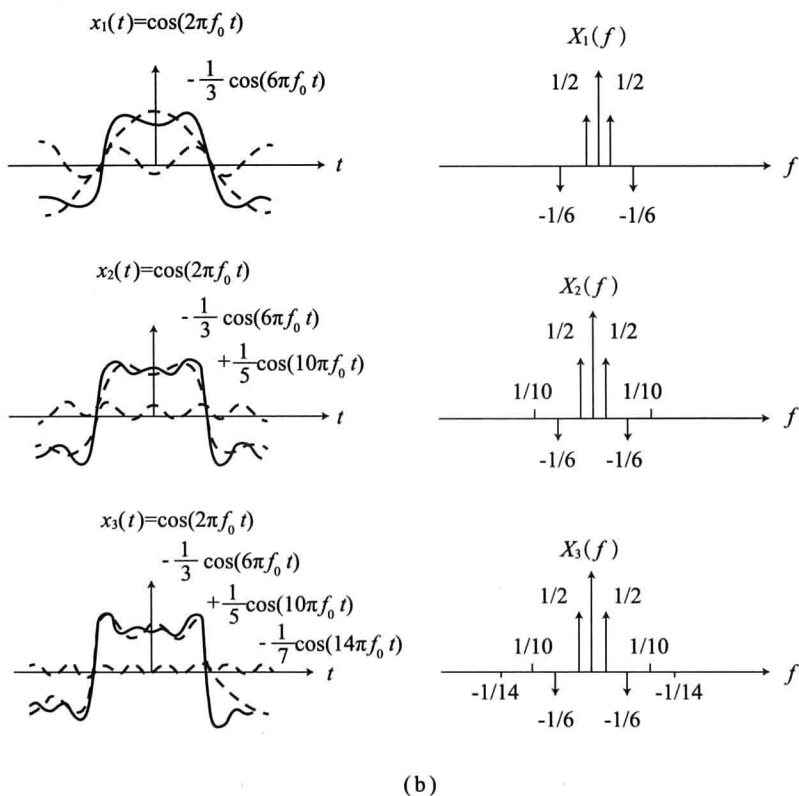
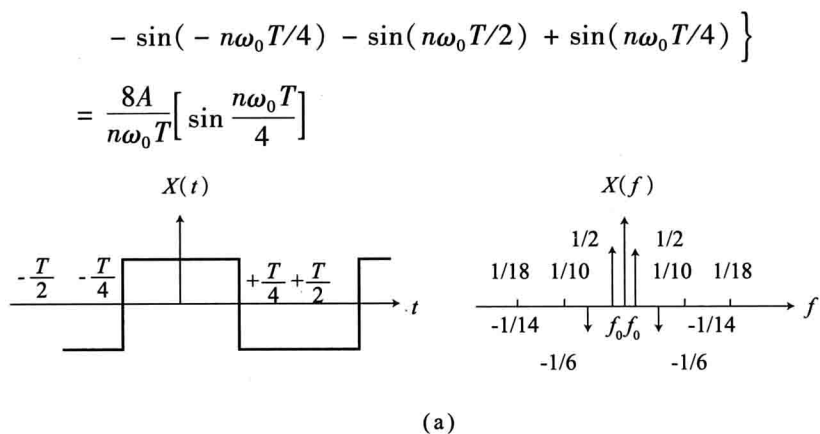


图 2-2 对称方波函数的傅里叶变换

(a) 对称方波函数及其频谱；(b) 前二、三、四项的波形及其频谱。

 因 $\omega_0 T = 2\pi$ ，所以

$$a_n = (4An\pi) \sin(n\pi/2) \quad (n \text{ 取整数})$$

则有

$$\begin{aligned}
 a_1 &= 4A/\pi & a_2 &= 0 \\
 a_3 &= -4A/3\pi & a_4 &= 0 \\
 a_5 &= 4A/5\pi, & a_6 &= 0 \\
 a_7 &= -4A/7\pi \cdots
 \end{aligned}$$

于是得

$$x(t) = \frac{4A}{\pi} \left(\cos\omega_0 t - \frac{1}{3}\cos 3\omega_0 t + \frac{1}{5}\cos 5\omega_0 t - \frac{1}{7}\cos 7\omega_0 t + \cdots \right)$$

或

$$x(t) = 4A/\pi \left(\cos 2\pi f_0 t - \frac{1}{3}\cos 6\pi f_0 t + \frac{1}{5}\cos 10\pi f_0 t - \frac{1}{7}\cos 14\pi f_0 t + \cdots \right) \quad (2-11)$$

从(2-11)式看出, 各次谐波分量的幅值分别为基波幅值 $4A/\pi$ 的 $1/n_0$, 值得注意(2-11)式收敛很慢, 因此需用很多项(例如 50 项以上)的谐波才能构成一个较精确的方波。图 2-2(b) 中示出了前二、三、四项所对应的波形及其频谱。从此可看出与理论方波的差别。

如果波形 $x(t)$ 不是一个周期函数, 那么它的傅里叶变换将是频率的一个连续函数。也就是说, $x(t)$ 要用全部频率的正弦波之和来表示。

$$\begin{aligned}
 S(f) &= \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} [x(t) + y(t)] e^{-j2\pi ft} dt \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt + \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) e^{-j2\pi ft} dt \\
 &= X(f) + Y(f)
 \end{aligned}$$

$$\text{所以} \quad x(t) + y(t) \Leftrightarrow X(f) + Y(f) \quad (2-12)$$

直线性质是相当重要的, 它表明在线性系统的分析中, 傅里叶变换是完全适用的。

(1) 对称性质

如果有:

$$x(t) \Leftrightarrow X(f)$$

则有:

$$X(f) \Leftrightarrow x(-f)$$

为了建立上述傅里叶变换对, 现证明如下: 傅里叶逆变换定义为

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df$$

将上式中的参数 t 用 $-t$ 替代, 则有

$$x(-t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{-j2\pi ft} df$$

再将上式中的参数 t 和积分变量 f 互换, 即得

$$x(-f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

即下列傅里叶变换对成立

$$X(t) \Leftrightarrow x(-f) \quad (2-13)$$

说明: 这个性质告诉我们, 把信号 $x(t)$ 当成频谱 $x(-f)$ 时, 对应的信号就是 $X(t)$, 而不必重新计算。这个性质叫傅里叶变换的对称性。

为了理解对称性质, 现举例如下:

矩形脉冲波形的傅里叶变换对为

$$x(t) = \begin{cases} A, & |t| < T_0 \\ 0, & |t| > T_0 \end{cases} \Leftrightarrow \frac{2AT_0 \sin(2\pi T_0 f)}{2\pi T_0 f}$$

其图形如图 2-3 所示。

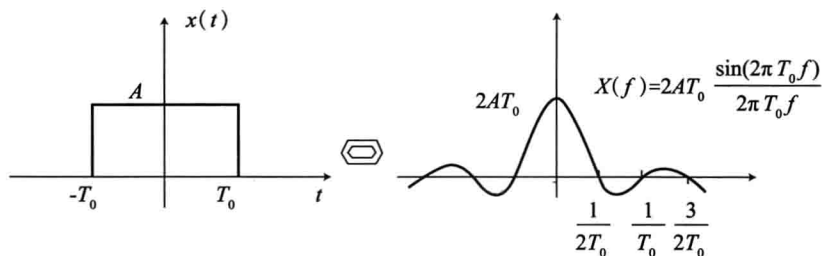


图 2-3 矩形脉冲的傅里叶变换

上述变换对, 由对称定理可得

$$2Af_0 \frac{\sin(2\pi f_0 t)}{2\pi f_0 t} \Leftrightarrow x(-f) = \begin{cases} A, & |f| < f_0 \\ 0, & |f| > f_0 \end{cases}$$

其图形如图 2-4 所示。

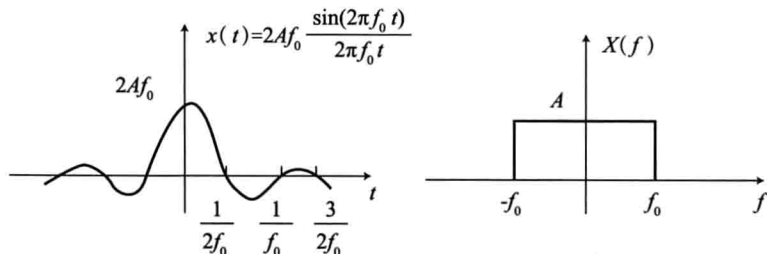


图 2-4 $A \sin(at) / (at)$ 的傅里叶变换

(2) 时间比例性质 如果有

$$x(t) \Leftrightarrow X(f)$$