



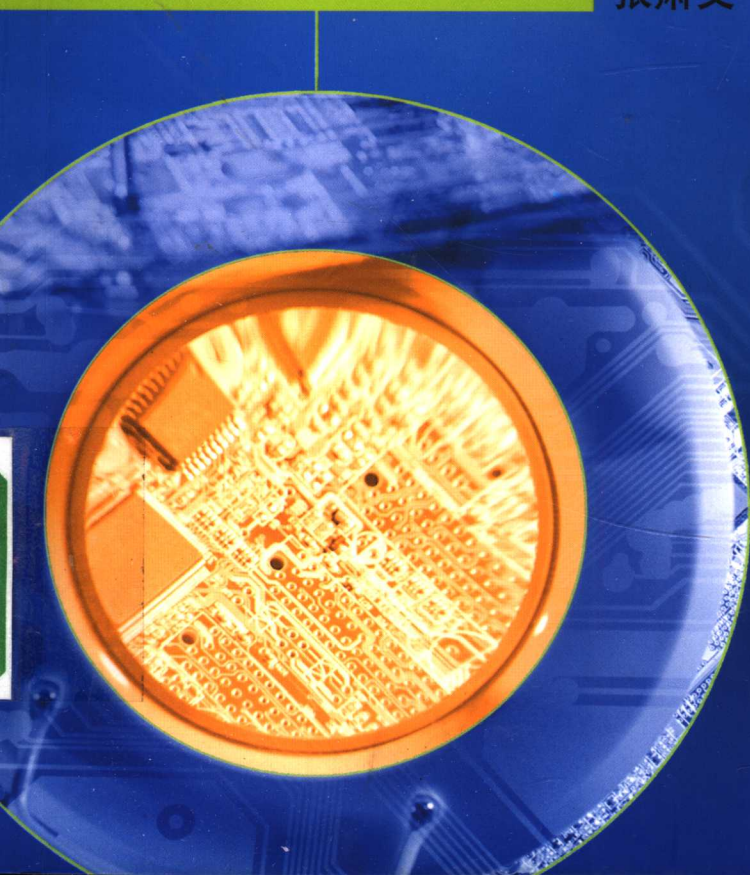
普通高等教育“十五”国家级规划教材配套参考书

高频电子线路

第四版

学习指导书

张肃文 著



高等教育出版社
Higher Education Press

普通高等教育“十五”国家级规划教材配套参考书

高频电子线路

(第四版)

学习指导书

张肃文 著

高等教育出版社

内容简介

本书是为配合张肃文主编的《高频电子线路》(第四版)编写的学习指导书。

根据本书作者数十年从事电子线路的教学经验,本书每章均指出原书[即《高频电子线路》(第四版)]的内容要点、重点与难点,各章均有解题示例与习题解答,以帮助学习者学习好这门重要的电子类专业技术基础课。

本书可作为高等学校电子信息工程与通信工程专业师生的参考书,也可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路(第四版)学习指导书/张肃文著.

北京:高等教育出版社,2005.12

ISBN 7-04-017957-1

I. 高... II. 张... III. 高频-电子电路-高等学校-教学参考资料 IV. TN710.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 133298 号

策划编辑 吴陈滨 责任编辑 吴陈滨 封面设计 于涛 责任绘图 尹莉
版式设计 胡志萍 责任校对 康晓燕 责任印制 朱学忠

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京鑫海金澳胶印有限公司

开 本 787×960 1/16
印 张 24.25
字 数 450 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2005 年 12 月第 1 版
印 次 2005 年 12 月第 1 次印刷
定 价 30.20 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 17957-00

序 言

“高频电子线路”是高等学校电子信息工程与通信工程专业的重要技术基础课。笔者一直从事高等学校的教学与科研工作，从事“电子线路”的教学几十年，所主编的《高频电子线路》(第一版)于1980年问世以来，现已出至第四版。为了帮助学习者更好地学习该书第四版，特编写本书，以供参考。

为了便于读者使用，本书的章次与《高频电子线路》(第四版)相同，仍分为13章。每章分为：学习目的，内容要点，本章重点与难点，解题示例，思考题与习题解答等五节。

作者根据多年来的教学体会，指出每章学习应达到的目的，对不同内容的学习要求分为：掌握、熟悉、理解与了解四个不同层次。

应掌握的是基本概念与原理；重要内容与基本公式必须熟悉；某些较繁杂的内容与公式应予以理解；对于某些次要内容则只要求了解。

内容要点扼要综述了各章的主要内容。为了便于读者掌握每章的重点与难点，书中也单列出一节。

解题示例是为扩展学习者的思路而编写的，有些例题还适当扩展了原书[即《高频电子线路》(第四版)]的内容。

每章最后部分为原书的全部思考题与习题详解。但作者建议，学习者只有在感到十分困惑时，才参看这些解答。通常以自己独立解答为最佳方式，以本书的解答作为核对之用。

在编写此书时，曾参考并选用了作者主编，陈惠中、张惠敏、严国萍、胡长阳参编的《电子线路题解分析》(湖北科学技术出版社1989年出版)的部分内容。本书的编写是在高等教育出版社高等工科分社张培东社长与吴陈滨编辑的积极倡议与帮助下完成的。

谨对以上同志致以衷心的感谢。

本书如能对学习者学习“高频电子线路”课程有所帮助，则笔者将感到非常欣慰与荣幸。

书中难免有疏漏与不当之处，恳请读者不吝指正，预致谢忱。

张肃文

2005年6月于武汉大学

目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 学习目的	1
§ 1.2 本章重点	1
第 2 章 信号分析	2
§ 2.1 学习目的	2
§ 2.2 内容要点	2
2.2.1 周期信号的傅里叶级数表示式	2
2.2.2 非周期信号的傅里叶变换表示式	2
2.2.3 傅里叶变换的基本性质	3
2.2.4 抽样定理	4
2.2.5 信号通过线性系统无失真传输的条件	5
§ 2.3 本章重点与难点	5
§ 2.4 解题示例	5
§ 2.5 思考题与习题解答	13
第 3 章 选频网络	19
§ 3.1 学习目的	19
§ 3.2 内容要点	19
3.2.1 串联谐振回路	19
3.2.2 并联谐振回路	20
3.2.3 串、并联电路的阻抗互换与抽头电路的阻抗互换	21
3.2.4 耦合回路	24
3.2.5 其他形式的滤波器	28
§ 3.3 本章重点与难点	29
3.3.1 本章重点	29
3.3.2 本章难点	29
§ 3.4 解题示例	29
§ 3.5 思考题与习题解答	37
第 4 章 高频小信号放大器	51
§ 4.1 学习目的	51
§ 4.2 内容要点	51

4.2.1 高频小信号放大器的主要质量指标	51
4.2.2 晶体管高频小信号等效电路与参数	52
4.2.3 单调谐回路谐振放大器	57
4.2.4 多级单调谐回路谐振放大器	59
4.2.5 双调谐回路谐振放大器	59
4.2.6 谐振放大器的稳定性与稳定措施	61
* 4.2.7 场效应管高频小信号放大器	64
4.2.8 放大器中的噪声	66
4.2.9 噪声的表示和计算方法	68
§ 4.3 本章重点与难点	73
4.3.1 本章重点	73
4.3.2 本章难点	73
§ 4.4 解题示例	73
§ 4.5 思考题与习题解答	81
第 5 章 非线性电路、时变参量电路和变频器	103
§ 5.1 学习目的	103
§ 5.2 内容要点	103
5.2.1 非线性元件的特性曲线	103
5.2.2 分析非线性电路的方法	103
5.2.3 线性时变参量电路	104
5.2.4 变频器的工作原理	105
5.2.5 晶体管混频器	105
5.2.6 二极管混频器	107
5.2.7 混频器的干扰	108
5.2.8 外部干扰	110
§ 5.3 本章重点与难点	110
5.3.1 本章重点	110
5.3.2 本章难点	110
§ 5.4 解题示例	110
§ 5.5 思考题与习题解答	115
第 6 章 高频功率放大器	135
§ 6.1 学习目的	135
§ 6.2 内容要点	135
6.2.1 高频功率放大器与低频功率放大器的异同点	135
6.2.2 谐振功率放大器的工作原理	135

6.2.3 动态特性与负载特性	137
6.2.4 晶体管功率放大器的高频特性	141
6.2.5 高频功率放大器的电路组成	141
6.2.6 丁类(D类)功率放大器	145
6.2.7 戊类(E类)功率放大器	147
6.2.8 宽带高频功率放大器	149
6.2.9 功率合成器	152
6.2.10 晶体管倍频器	156
§ 6.3 本章重点与难点	157
6.3.1 本章重点	157
6.3.2 本章难点	157
§ 6.4 解题示例	157
§ 6.5 思考题与习题解答	165
第 7 章 正弦波振荡器	181
§ 7.1 学习目的	181
§ 7.2 内容要点	181
7.2.1 LC 振荡器的基本工作原理	181
7.2.2 振荡器的平衡与稳定条件	182
7.2.3 反馈型 LC 振荡器线路	183
7.2.4 振荡器的频率稳定问题	185
7.2.5 石英晶体振荡器	186
7.2.6 负阻振荡器	188
7.2.7 几种特殊振荡现象	190
7.2.8 集成电路振荡器	191
7.2.9 RC 振荡器	192
§ 7.3 本章重点与难点	193
7.3.1 本章重点	193
7.3.2 本章难点	194
§ 7.4 解题示例	194
§ 7.5 思考题与习题解答	209
第 8 章 参量现象与时变电抗电路	231
§ 8.1 学习目的	231
§ 8.2 内容要点	231
8.2.1 参量放大原理	231
8.2.2 门雷-罗威关系式	232

8.2.3 参量混频器	233
8.2.4 参量倍频器	234
8.2.5 参量自激现象及其消除	235
§ 8.3 本章重点与难点	235
8.3.1 本章重点	235
8.3.2 本章难点	236
§ 8.4 思考题与习题解答	236
第9章 振幅调制与解调	241
§ 9.1 学习目的	241
§ 9.2 内容要点	241
9.2.1 调幅波的基本性质与功率关系	241
9.2.2 平方律调幅	243
9.2.3 斩波调幅	244
9.2.4 模拟乘法器调幅	246
9.2.5 单边带信号的产生	248
9.2.6 残留单边带调幅	250
9.2.7 高电平调幅	251
9.2.8 包络检波	252
9.2.9 同步检波	254
9.2.10 单边带信号的接收	257
§ 9.3 本章重点与难点	257
9.3.1 本章重点	257
9.3.2 本章难点	258
§ 9.4 解题示例	258
§ 9.5 思考题与习题解答	267
第10章 角度调制与解调	278
§ 10.1 学习目的	278
§ 10.2 内容要点	278
10.2.1 调角波的性质	278
10.2.2 调频的方法	284
10.2.3 相位鉴频器	293
10.2.4 比例鉴频器	297
10.2.5 其他形式的鉴频器	298
§ 10.3 本章重点与难点	302
10.3.1 本章重点	302

10.3.2 本章难点	303
§ 10.4 解题示例	303
§ 10.5 思考题与习题解答	307
第 11 章 数字调制与解调	322
§ 11.1 学习目的	322
§ 11.2 内容要点	322
11.2.1 数字通信的基本概念	322
11.2.2 振幅键控	323
11.2.3 移频键控	323
11.2.4 移相键控	325
11.2.5 正交调幅与解调	330
§ 11.3 本章重点与难点	331
11.3.1 本章重点	331
11.3.2 本章难点	331
§ 11.4 思考题与习题解答	332
第 12 章 反馈控制电路	335
§ 12.1 学习目的	335
§ 12.2 内容要点	335
12.2.1 自动增益控制 (AGC)	335
12.2.2 自动频率微调 (AFC)	336
12.2.3 锁相环路的基本工作原理	339
12.2.4 锁相环路的数学模型	340
12.2.5 锁相环路的分析	346
12.2.6 锁相环路应用简介	349
§ 12.3 本章重点与难点	353
12.3.1 本章重点	353
12.3.2 本章难点	353
§ 12.4 解题示例	353
§ 12.5 思考题与习题解答	355
第 13 章 频率合成技术	361
§ 13.1 学习目的	361
§ 13.2 内容要点	361
13.2.1 频率合成器的主要技术指标	361
13.2.2 频率直接合成法	361
13.2.3 频率间接合成法 (锁相环路法)	364

13.2.4 集成频率合成器	370
§ 13.3 本章的重点与难点	372
13.3.1 本章重点	372
13.3.2 本章难点	372
§ 13.4 解题示例	373
§ 13.5 思考题与习题解答	374

第 1 章 绪 论

§ 1.1 学 习 目 的

1. 了解无线电通信发展简史。
2. 建立无线电信号的发送与接收的初步概念，作为学习原书^①以后各章的基础。
3. 一般了解通信的传输媒质。

§ 1.2 本 章 重 点

本章重点为原书的图 1.2.8 与图 1.2.11，必须牢固记忆。其余部分一般了解即可。

^① “原书”即指《高频电子线路》(第四版)。以下同。

第2章 信号分析

§ 2.1 学 习 目 的

1. 了解信号的分类。
2. 掌握傅里叶级数表示式。
3. 理解非周期信号的傅里叶变换表示式。
4. 了解傅里叶变换的基本性质。
5. 理解抽样定理。

§ 2.2 内 容 要 点

2.2.1 周期信号的傅里叶级数表示式

对于周期信号 $g(t)$ ，可用以下傅里叶级数表示：

$$g(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (2.2.1)$$

式中

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} g(t) dt \quad (2.2.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} g(t) \cos n\omega_0 t dt \quad (2.2.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} g(t) \sin n\omega_0 t dt \quad (2.2.4)$$

2.2.2 非周期信号的傅里叶变换表示式

若 $g(t)$ 为非周期信号，则它的傅里叶变换表示式为

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.2.5a)$$

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.2.5b)$$

$G(\omega)$ 为 $g(t)$ 的傅里叶正变换; $g(t)$ 为 $G(\omega)$ 的傅里叶反变换。以上二式也可表示为

$$G(\omega) = \mathcal{F}[g(t)] \quad \text{与} \quad g(t) = \mathcal{F}^{-1}[G(\omega)] \quad (2.2.6)$$

$G(\omega)$ 代表 $g(t)$ 的频谱。上列关系也可简化为

$$g(t) \longleftrightarrow G(\omega) \quad (2.2.7)$$

2.2.3 傅里叶变换的基本性质

1) 对称性

若
$$g(t) \longleftrightarrow G(\omega)$$

 则
$$G(t) \longleftrightarrow 2\pi g(-\omega) \quad (2.2.8)$$

2) 尺度转换特性

若
$$g(t) \longleftrightarrow G(\omega)$$

 则
$$g(at) \longleftrightarrow \frac{1}{|a|} G\left(\frac{\omega}{a}\right) \quad (a \text{ 为实数}) \quad (2.2.9)$$

3) 时移特性

若
$$g(t) \longleftrightarrow G(\omega)$$

 则
$$g(t - t_0) \longleftrightarrow G(\omega) e^{-j\omega t_0} \quad (2.2.10)$$

4) 频移特性

若
$$g(t) \longleftrightarrow G(\omega)$$

 则
$$g(t) e^{j\omega_0 t} \longleftrightarrow G(\omega - \omega_0) \quad (2.2.11)$$

5) 叠加特性

若
$$g_i(t) \longleftrightarrow G_i(\omega) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

 则
$$\sum_{i=1}^n a_i g_i(t) \longleftrightarrow \sum_{i=1}^n a_i G_i(\omega) \quad (2.2.12)$$

式中 a_i 为常数, n 为有限正整数。

6) 奇偶虚实性

若
$$g(t) \longleftrightarrow G(\omega)$$

 则
$$\left. \begin{aligned} g(-t) &\longleftrightarrow G(-\omega) \\ g^*(-t) &\longleftrightarrow G^*(\omega) \\ g^*(t) &\longleftrightarrow G^*(-\omega) \end{aligned} \right\} \quad (2.2.13)$$

7) 微分与积分特性

若
$$g(t) \longleftrightarrow G(\omega)$$

$$\text{则} \quad \left. \begin{aligned} \frac{dg}{dt} &\longleftrightarrow (j\omega) G(\omega) \\ \frac{d^n g}{dt^n} &\longleftrightarrow (j\omega)^n G(\omega) \\ \frac{dG}{d\omega} &\longleftrightarrow (-jt) g(t) \\ \frac{d^n G}{d\omega^n} &\longleftrightarrow (-jt)^n g(t) \end{aligned} \right\} \quad (2.2.14)$$

且有

$$\int_{-\infty}^t g(\tau) d\tau \longleftrightarrow \frac{G(\omega)}{j\omega} + \pi G(0) \delta(\omega) \quad (2.2.15)$$

8) 卷积特性

$g_1(t)$ 与 $g_2(t)$ 的卷积定义为

$$g_1(t) * g_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g_1(x) g_2(t-x) dx \quad (2.2.16)$$

则有

$$g_1(t) * g_2(t) \longleftrightarrow G_1(\omega) G_2(\omega) \quad (\text{时间卷积}) \quad (2.2.17)$$

$$g_1(t) g_2(t) \longleftrightarrow \frac{1}{2\pi} G_1(\omega) * G_2(\omega) \quad (\text{频率卷积}) \quad (2.2.18)$$

9) 时间相关特性

两个实函数 $g_1(t)$ 与 $g_2(t)$ 的时间互相关函数定义为

$$\Psi_{g_1 g_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} g_1(t) g_2(t+\tau) dt \quad (2.2.19)$$

令 $t = -x$, 上式改写成

$$\begin{aligned} \Psi_{g_1 g_2}(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} g_1(-x) g_2(\tau-x) dx \\ &= g_1(-\tau) * g_2(\tau) \end{aligned} \quad (2.2.20)$$

自相关函数的定义为

$$\begin{aligned} \Psi_g(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} g(t) g(t+\tau) dt \\ &= g_1(-\tau) * g(\tau) \end{aligned} \quad (2.2.21)$$

2.2.4 抽样定理

“一个带宽为 B 的信号可由间隔小于 $1/2B$ 秒处的值所唯一确定。”

换句话说, 对带宽为 B 的信号, 以每秒至少抽样 $2B$ 个值, 即可重现原始信号。

此定理在通信理论中占有极重要的地位。

2.2.5 信号通过线性系统无失真传输的条件

- 1) 所有输入频率分量通过系统后, 受到同样的衰减或放大。
- 2) 所有输入频率分量通过系统后, 受到同样大小的时延。或者说, 输出信号对应于输入信号的相角滞后应与 ω 成线性关系。

§ 2.3 本章重点与难点

1. 本章的重点是傅里叶级数与傅里叶变换。
2. 本章的难点是傅里叶变换。

§ 2.4 解题示例

例 2.1 试求图 2.4.1 所示的三角形周期信号 $g(t)$ 的傅里叶级数。

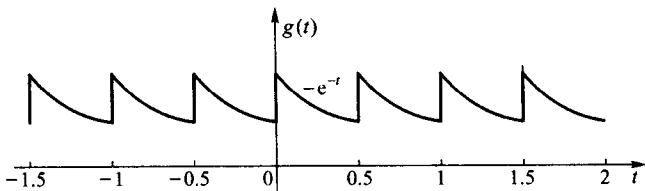


图 2.4.1 三角形周期信号

解 在本例中, 周期 $T_0 = 0.5$, 频率 $f_0 = 2$, $\omega_0 = 2\pi f_0 = 4\pi$, 因而它的傅里叶级数由角频率为 $0, 4\pi, 8\pi, 12\pi \cdots$ 各分量组成, 亦即 $g(t)$ 可表示为

$$g(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 4\pi n t + b_n \sin 4\pi n t) \quad (2.4.1)$$

由傅里叶级数求系数公式(2.2.2) ~ (2.2.4)可得

$$a_0 = 2 \int_0^{0.5} e^{-t} dt = 0.79 \quad (2.4.2)$$

$$a_n = 4 \int_0^{0.5} e^{-t} \cos 4\pi n t dt = 0.79 \left(\frac{2}{1 + 16\pi^2 n^2} \right) \quad (2.4.3)$$

$$b_n = 4 \int_0^{0.5} e^{-t} \sin 4\pi n t dt = 0.79 \left(\frac{8\pi n}{1 + 16\pi^2 n^2} \right) \quad (2.4.4)$$

利用 $a \cos x + b \sin x \equiv \sqrt{a^2 + b^2} \cos \left(x - \arctan \frac{b}{a} \right)$

可将式(2.4.1)改写成

$$g(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(4\pi n t + \theta_n) \quad (2.4.5)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} C_0 &= a_0 = 0.79 \\ C_n &= \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = 0.79 \left(\frac{2}{\sqrt{1 + 16\pi^2 n^2}} \right) \\ \theta_n &= -\arctan(b_n/a_n) = -\arctan 4\pi n \end{aligned} \right\} \quad (2.4.6)$$

根据式(2.4.6), 可以绘出 $g(t)$ 的频谱幅值与相位, 如图 2.4.2 (a) 与 (b) 所示。

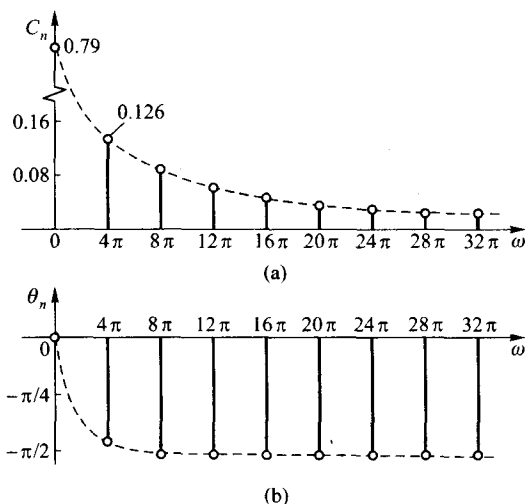


图 2.4.2 图 2.4.1 周期信号的频谱幅值与相位

例 2.2 图 2.4.3 (a) 所示为一个三角形脉冲 $p(t)$, 它的傅里叶变换为 $P(\omega)$ 。试求图 2.4.3 (b) 所示由 $P(\omega)$ 表示的 $g(t)$ 的傅里叶变换。

解 依次绘出图 2.4.3 (c)、(d)、(e), 它们示出如何将 $p(t)$ 变换成 $g(t)$ 的过程。

由于 $p(t) \longleftrightarrow P(\omega)$, 根据式(2.2.9)的尺度变换特性可得

$$p\left(\frac{t}{1.5}\right) \longleftrightarrow 1.5 P(1.5\omega)$$

$$2p\left(\frac{t}{1.5}\right) \longleftrightarrow 3 P(1.5\omega)$$

因而最后得

$$g(t) = 2p\left(-\frac{t}{1.5}\right) \longleftrightarrow 3 P(-1.5\omega)$$

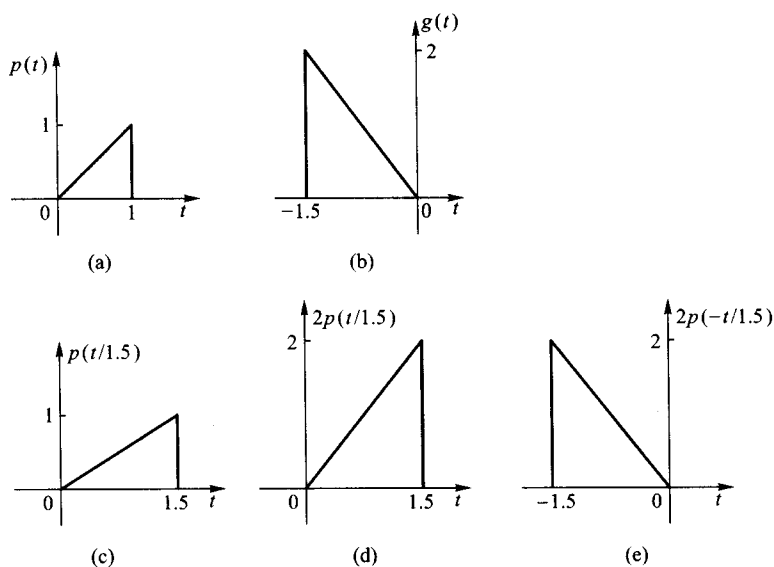


图 2.4.3 尺度变换举例

例 2.3 求图 2.4.4 所示的三个矩形脉冲信号的频谱。

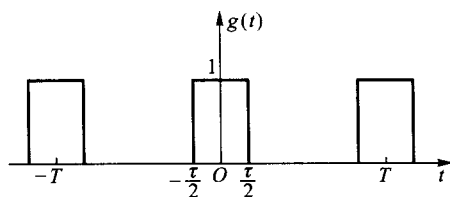


图 2.4.4 三脉冲信号的波形

解 令 $g_0(t)$ 表示中心位于原点的矩形单脉冲信号, 则由原书的式 (2.2.29) 已知它的傅里叶变换(亦即频谱函数)为

$$G_0(\omega) = \tau \frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega\tau/2} = \tau \operatorname{sinc}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)$$

由于三个脉冲的表示式应为

$$g(t) = g_0(t) + g_0(t+T) + g_0(t-T)$$

则由时移特性[见式(2.2.10)]可知, $g(t)$ 的频谱函数应为

$$\begin{aligned} G(\omega) &= G_0(\omega)(1 + e^{j\omega T} + e^{-j\omega T}) \\ &= \tau \operatorname{sinc}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)(1 + 2\cos \omega T) \end{aligned} \quad (2.4.7)$$