

THOMSON
LEARNING
汤姆森学习出版集团



BookWare 系列丛书



现代通信系统

► 使用 *MATLAB*[®]

约翰·G·普罗克斯
马苏德·萨勒赫

刘树棠 译

西安交通大学出版社

THOMSON
LEARNING™
汤姆森学习出版集团

 Book Ware 系列丛书

现代通信系统
——使用 MATLAB®
Contemporary Communication Systems
Using MATLAB®

约翰·G·普罗克斯
马苏德·萨勒赫

刘树棠 译



西安交通大学出版社
Xi'an Jiaotong University Press

内 容 提 要

本书系 Brooks/Cole 出版公司(Thomson Learning 出版集团的下属子公司)2000 年推出的 BookWare 系列丛书(BookWare Companion Series™)之一种。该书提供了利用 MATLAB® 的普及型学生版本在计算机上解决“现代通信系统”这门课程中涉及的几乎所有方面的问题的分析思路、方法、MATLAB 脚本文件和处理结果的范例以及供学生自主学习研讨的习题。全书内容分为 9 章,分别是:信号与线性系统;随机过程;模拟调制;模拟/数字转换;基带数字传输;带限信道的数字传输;载波调制的数字传输;信道容量和编码;扩频通信系统。

本书适合已具备 MATLAB 基本知识的通信工程、电子工程、电气工程、计算机等专业高年级本科生和研究生作为相关课程的参考书和补充教材,也可供有关教师、工程技术人员参考使用。

First published by Brooks/Cole Publishing Company, a division of Thomson Learning, United States of America.

All Rights Reserved.

Authorized Translation/Adaptation of the edition by Thomson Learning and XJUP. No part of this book may be reproduced in any form without the prior written permission of Thomson Learning and XJUP.

(*Contemporary Communication Systems Using MATLAB*/John G. Proakis, Masoud Salehi)

本书中文简体字版由美国 Thomson Learning 出版集团授权西安交通大学出版社出版发行,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制和抄袭本书的任何部分。

版权所有,翻印必究。

图书在版编目(CIP)数据

现代通信系统——使用 MATLAB/普罗克斯(John G. Proakis),萨勒赫(Masoud Salehi)著;刘树棠译. —西安:西安交通大学出版社,2001.11
ISBN 7-5605-1433-2

I. 现… II. ①普… ②萨… ③刘… III. 计算机辅助计算—软件包, MATLAB IV. TP391.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 043770 号

*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市兴庆南路 25 号 邮政编码:710049 电话:(029)2668315)

西安交通大学印刷厂印装

各地新华书店经销

*

开本:787 mm×960 mm 1/16 印张:25.5 字数:412 千字

2001 年 11 月第 1 版 2001 年 11 月第 1 次印刷

印数:0001~5 000 定价:38.00 元

陕版出图字:25-2001-003 号

发行科电话:(029)2668357,2667874

中译本出版者的话

Brooks/ Cole 出版公司(Thomson Learning 出版集团的下属子公司)于 2000 年推出的系列丛书 BookWare Companion Series,大致涵盖的都是电子信息和电气工程类大学本科的主干课程。参加这套丛书编撰工作的大多是一些目前仍活跃在教学第一线的知名教授。组织出版这套丛书的初衷和每一位作者的想法可在“出版者的话”和每本书的作者“前言”中略见其详,这里不再赘述。

概括起来,原丛书出版者的意图大致有二:一是探讨如何将基于计算机的学习工具融于教学;二是给学生提供另外的学习空间,让他们能自主学习。总的目的就是要让学生积极主动地学习,这样会学得更好。由于课程性质和每位作者的想法有些差异,每本书在具体构成方式上会各有不同,但综合来看,这套丛书具有如下特点:

- 不求过细,而强调内容的系统性并注重相互联系。提纲挈领,注意总结,联系实际。因此,一般来说最好用作辅助性教材。

- 用“解说题”、“例题”、“强化题”、“探究题”等这些目的各异的题来演绎和深化概念,联系实际,并在重要概念的深度和广度上作适当延伸。这比“硬灌”会收到更好的效果。

- 全部题都有答案(或题解),如有必要均配有相应的 MATLAB 脚本,便于学生在学习中及时获得反馈。

- 丰富的 MATLAB 脚本资源和可随时进入的在线网站为广大读者提供了很大的学习空间。使他们的精力不再耗在编程上,而在探究上;他们可以利用这些脚本资源做他们想做的事;他们可以在计算机仿真上得到初步训练和更大的领悟,并为他们的创新意识和才能的发挥提供无限的空间。

根据我国当前高等学校的具体情况,我们组织出版这套丛书的中译本大致有如下几点考虑:

- 近几年来经国家和各级政府的重点建设和投资,高等学校的计算机硬件条件大为改善, MATLAB 软件已较为普及,有的学校已将宽带接入因特网联到学生宿舍,个人拥有一台 PC 机已不再稀罕,这都为使用这套丛书准备了必要的硬件和软件环境。

- 以 CAI 开始的教学手段现代化改革已持续了十多年,当今多媒体教学、

电子教材、网络大学和网络课程等发展势头方兴未艾,其核心问题就是如何有效地利用计算机作为辅助教学工具,改进教学方法。这套丛书提供了一种可供大家借鉴的方式。

- 减少课内学时,精简内容,重组课程体系就是为了给学生留下更多的空间让他们自主学习。这套丛书为他们提供了这方面的素材。

- MATLAB 是一种集成度很高的语言,由于其功能强,使用方便和适用的计算机平台宽而被大家所接受,已在教学、科研和工程实际中广泛采用。这套丛书为学生熟悉、掌握和熟练应用 MATLAB 提供了一个载体,丛书中所给出的各种 MATLAB 脚本和仿真软件是科学研究工作者和工程实践人员不可多得的宝贵资源。

- 对于非全日制大学的那些成人教育、继续教育和自学考试的学生来说,这也是一套很有参考价值的辅助教材。

西安交通大学出版社早在 20 世纪 80 年代中期就组织翻译出版了一套“外国教材精选”系列丛书,90 年代又陆续推出了《信号与系统》、《离散时间信号处理》等多本很有影响的外国优秀教材的中译本。这些都取得了良好的经济效益和社会效益。当前在国家教育主管部门正大力倡导在计算机等信息学科积极引进并直接采用外国优秀教材进行教学的时候,我们将一如既往,争取在较短的时间内将这套丛书的中译本奉献给大家。我们感谢广大读者过去对我社组织翻译出版的外国教材的青睐,并继续期望得到你们的支持。如有任何建议和要求,请与我们联系。E-mail: Shadwell-qin@163.com 或 Lp-zhao@Yahoo.com

西安交通大学出版社

2001.8

译者的话

本书第一作者约翰·G·普罗克斯(John G. Proakis)教授现为美国东北大学电气工程与计算机科学系主任。他在数字通信、通信系统和数字信号处理等领域出版过的几本书在国内也很有影响,属这些领域的知名教授。有关这本书的情况已集中在“中译本出版者的话”中作了介绍,更详细的可参看作者“前言”。

在本书的翻译过程中曾得到我校电子与信息工程学院信息与通信工程系教授朱世华博士的很多帮助,尤其是在专业术语的译名上多次商讨与请教,对此表示衷心的感谢。另外我校英语系王监龙教授、信息与通信工程系主任张传生教授也提供过不少帮助和支持,在此一并表示感谢。最后,对我的家人孙漪教授在我长达4年单调的翻译工作中所给予的支持、鼓励和忍耐表示深深的谢意和歉疚。

这是我在通信系统方面翻译的第一本书,恐有不妥之处,希望读者批评指正。

刘树棠
于西安交通大学
2001.8

出版者的话

——关于这套丛书

计算的目的在于它的内涵,而不在数字。

—— R·W·海明(Hamming),选自《面向工程师和科学家的数值方法》(*Numerical Methods for Engineers and Scientists*, McGraw-Hill, Inc.)

正是由于心灵的驱使,我们才推出了这套“BookWare 系列丛书”(BookWare Companion Series™)。

新技术和现代方法正日益融入业已浓缩并具有重要理论的课程,因此,很多教师现在要问:“我们只是将这些最新技术教授给学生呢?还是教会他们如何推理”?我们深信,这两方面不应互相排斥。事实上,本丛书就是基于这样的信念:计算机求解和基本理论是能够互补的。应用恰当,计算结果可以阐明理论,并帮助学生以各种富有意义的方式进行思考、分析和推理。它也能够帮助学生理解新的信息和现有知识之间的关系和联系,以及培养他们解决问题的技巧、感性认识和积极主动思考的能力。为此使命,这套“BookWare 系列丛书”便应运而生了。

具体地说,本丛书是专为这样的教师——他们想要把计算机辅助学习融合到课程之中去——而编写的;也是为想比仅从教科书中学到更多知识的学生编写的。教师可以从中发现,功能很强的软件工具是支撑他们课程活动的各种手段,而不会限制他们的应用。学生会发现,可以迅速获得各种相关的习题和例题,并具有电子接入方法。对教师和学生来说均为重要的是这套丛书基于这样的前提:如果学生积极主动地学习,他们会学得更好。“BookWare 系列丛书”定会受到学生的青睐,为他们提供一种对现实问题的感受,展示解决实际问题的清晰方法,并在理解和应用这些方法上挑战自我。

为了更好地满足你的需要,我们将继续寻找使这套丛书日臻完善的方法。为达此目的,请加入到我们的“BookWare Companion Resource Center”中来,我中

心的网址是:<http://www.brookscole.com/engineering/bookware/>^①。

你推荐的方法都会使这套丛书更加令人满意,在课堂教学中与同仁们分享你如何使用技术的见解,为下一版提出具体的习题或例题,或者将你的想法告诉我们。务请不吝赐教。

我们恭候你的回音,谢谢你的持续不断地支持。

Bill Stenquist	出版人	<i>bill.stenquist@brookscole.com</i>
Heather Woods	责任编辑	<i>heather.woods@brookscole.com</i>
Nathan Wilbur	市场经理	<i>nathan.wilbur@brookscole.com</i>
Christina DeVeto	市场助理	<i>christina.deveto@brookscole.com</i>

① 译者注:原书提供的网址是 <http://www.brookscole.com/engineering/ee/bookware.html>

前 言

在当今市场上很多教科书都是讨论在模拟和数字通信系统中的基本论题,其中包括编码和解码算法、调制和解调技术等。根据需要,这些教科书中的大多数都是集中于构成各种模块(例如编码器、解码器、调制器和解调器等)设计和性能分析的基本理论上,而这些模块又是组成一个通信系统的基本单元。然而,相当少的教科书(尤其是为大学本科而写的那些教科书)包含有激励学生学习的应用例子。

本书的意图

这本书的目的是用作任何一本在通信系统方面较全面的教科书的参考书或补充教材。这本书提供了利用 MATLAB®的普及型学生版本可以在计算机(一般个人电脑就够了)上解题的大量和种类繁多的练习。本书主要是针对电气工程、计算机工程和计算机系的高年级本科生、研究生准备的,因此认为这些学生(或用户)已经熟悉 MATLAB 的基本知识。由于在 MATLAB 方面已有多种辅导性的书或手册指南,所以这些专题未包括在本书之内。

从设计方面来说,各种论题的处理都是很简要的。对每一个论题给出讨论的初衷和简短的叙述,建立必要的符号,然后用例子阐明基本概念。希望所采用的基本教材和授课教师都要对所讨论的论题提供一定的深度。例如,在介绍匹配滤波器和相关器中,就说到这些器件可以对被加性白高斯噪声(AWGN)污损的信号得到最佳解调,但是对此我们并不给出证明;这样的证明一般在大多数有关通信系统方面的教科书中都会给出。

本书的组成

本书由 9 章所组成。头两章是有关信号与线性系统和随机过程方面的内容,它们给出了在通信系统学习中所要求的基本背景内容。第 3 章涵盖了模拟通信技术,而余下的 6 章都是集中在数字通信方面。

第 1 章:信号与线性系统

本章对线性系统分析中的一些基本方法和技术提供一个复习,其中既包括

时域特性也包括频域特性。由于频域分析技术在通信系统分析和处理中使用得最多,所以重点放在频域分析上。

第 2 章:随机过程

这一章要说明产生随机变量和随机过程样本的方法,包括具有给定概率分布函数的随机变量的产生,高斯和高斯-马尔科夫过程样本的产生,以及平稳随机过程在时域和频域中的特性。

第 3 章:模拟调制

这一章要讨论在有加性噪声和无加性噪声时,模拟调制和解调技术的性能。被研究的系统包括幅度调制(AM)(譬如双边带 AM、单边带 AM 和常用的 AM)和角调制(如频率调制 FM 和相位调制 PM)。

第 4 章:模拟/数字转换

本章要研究以一种有效的方式用于将模拟源信号转换为数字序列的各种方法。转换的结果就可以用数字方式传输或存储信号。既考虑有损数据压缩方法(如脉冲编码调制 PCM),也要讨论无损数据压缩(如 Huffman 编码)。

第 5 章:基带数字传输

本章要介绍经由 AWGN 信道传输数字信息的基带数字调制和解调技术。二进制和非二进制的调制技术都要考虑。要讨论这些信号的最佳解调,并对这类解调器的性能进行评价。

第 6 章:带限信道的数字传输

这一章要讨论带限信道的特性和针对此类信道的信号波形设计问题。要说明信道失真会导致码间干扰(ISI),这会引入在信号解调中的差错,然后将处理有关为补偿信道失真的信道均衡器的设计问题。

第 7 章:载波调制的数字传输

将讨论 4 种类型的载波调制信号,它们都是适合于在带通信道内进行传输的。它们是:幅度调制信号、正交幅度调制信号、相位键控和频率键控。

第 8 章:信道容量和编码

本章将考虑对通信信道建立一个适当的数字模型,并介绍一个称之为“信道容量”的基本量,它给出了这条信道能够传输的信息量的限制。特别是考虑两种

信道模型:二进制对称信道(BSC)和加性白高斯噪声(AWGN)信道。在处理分组和卷积码以实现经由这些信道的可靠通信中,都将用到这些信道模型。

第9章:扩频通信系统

本章要讨论扩频数字通信系统的基本原理。特别是直接序列扩频(直扩,DS)系统和跳频(FH)系统将分别与相位键控(PSK)和频率键控(FSK)调制一起给予考虑。在扩频系统中要用到的伪随机噪声(PN)序列的产生也将被讨论。

关于软件方面

有关本书的 MATLAB 文件可从 BookWare Companion Resource Center 的在线网址 <http://www.brookscole.com/engineering/bookware/>^①上得到。在大多数例子中,我们都对这些 MATLAB 文件添加有很多评注,以使这些文件更容易理解。应该值得提及的是,在开发这些文件时,我们的主要目的是在 MATLAB 代码的可读性上,而不在它的高效性上。在用最为高效的代码而使文件不易阅读和理解时,就选取一些更易阅读而稍欠高效的代码。

关于〈BookWare 系列丛书资源中心〉

该中心的在线网址支撑着全套丛书,中心将使更新的版本一直是最新的。在网址上你会找到本书可下载的 MATLAB 文件。我们打算始终保持这些文件是最现行的,以使得 Web 网的大多数优势都能付之应用。在本资源中心你也会发现其他的资源,例如有关丛书的附加信息,与其他有用的 MATLAB 网址链接,以及从 BookWare 的作者和其他工程教育工作者那里获得的在课堂内教学方面的一些想法。

随着时间的推移,我们计划要将这个网址扩大到一种信息交换厅(clearing-house)以供交流可靠的一些教学思想和正在进行中的评论。你有没有这样的想法将你的独一无二的习题或例子愿意让我们在本书的下次版本中考虑?

若是这样,请访问我们的网址,并点击 Open Manuscript (开放式原稿),与作者们、同仁们、学生和出版者一起加入正在进行中的讨论。本资源中心位于:

<http://www.brookscole.com/engineering/bookware/>^②

约翰·G·普罗克斯
马苏德·萨勒赫

① 译者注:原书提供的网址是 <http://www.brookscole.com/engineering/ee/bookware.htm>。

② 同上。

目 录

中译本出版者的话

出版者的话

译者的话

前 言

第 1 章 信号与线性系统

- 1.1 概述 (1)
- 1.2 傅里叶级数 (1)
 - 1.2.1 周期信号和 LTI 系统 (12)
- 1.3 傅里叶变换 (16)
 - 1.3.1 采样定理 (21)
 - 1.3.2 LTI 系统的频域分析 (26)
- 1.4 功率和能量 (30)
- 1.5 带通信号的低通等效 (33)
- 习题 (40)

第 2 章 随机过程

- 2.1 概述 (43)
- 2.2 随机变量的产生 (43)
- 2.3 高斯和高斯-马尔科夫过程 (47)
- 2.4 随机过程的功率谱和白色过程 (53)
- 2.5 随机过程的线性滤波 (59)
- 2.6 低通和带通过程 (64)
- 习题 (70)

第 3 章 模拟调制

- 3.1 概述 (74)
- 3.2 幅度调制(AM) (74)

3.2.1	DSB-AM	(75)
3.2.2	常规 AM	(83)
3.2.3	SSB-AM	(90)
3.3	AM 信号的解调	(96)
3.3.1	DSB-AM 解调	(96)
3.3.2	SSB-AM 解调	(103)
3.3.3	常规 AM 解调	(108)
3.4	角调制	(115)
	习题	(126)

第 4 章 模拟/数字转换

4.1	概述	(129)
4.2	信息的度量	(129)
4.2.1	无噪声编码	(130)
4.3	量化	(135)
4.3.1	标量量化	(135)
4.4	脉冲编码调制	(144)
4.4.1	均匀 PCM	(144)
4.4.2	非均匀 PCM	(150)
	习题	(156)

第 5 章 基带数字传输

5.1	概述	(159)
5.2	二进制信号传输	(159)
5.2.1	AWGN 信道的最佳接收机	(159)
5.2.2	二进制通信系统的 Monte Carlo 仿真	(166)
5.2.3	其他二进制信号传输方法	(169)
5.2.4	二进制信号的信号星座图	(178)
5.3	多幅度信号传输	(180)
5.3.1	四幅度电平的信号波形	(180)
5.3.2	AWGN 信道的最佳接收机	(181)
5.3.3	多幅度电平的信号波形	(187)
5.4	多维信号	(191)
5.4.1	多维正交信号	(191)
5.4.2	双正交信号	(199)

习题	(206)
----	-------

第 6 章 带限信道的数字传输

6.1 概述	(209)
6.2 数字 PAM 信号的功率谱	(209)
6.3 带限信道特性和信道失真	(213)
6.4 码间干扰的特性	(224)
6.5 带限信道的通信系统设计	(228)
6.5.1 对于零 ISI 的信号设计	(229)
6.5.2 可控制 ISI 的信号设计	(232)
6.5.3 部分响应信号检测的预编码	(237)
6.6 线性均衡器	(242)
6.6.1 自适应线性均衡器	(250)
6.7 非线性均衡器	(255)
习题	(259)

第 7 章 载波调制的数字传输

7.1 概述	(263)
7.2 载波幅度调制	(263)
7.2.1 PAM 信号的解调	(265)
7.3 载波相位调制	(268)
7.3.1 相位解调与检测	(272)
7.3.2 差分相位调制与解调	(278)
7.4 正交幅度调制	(285)
7.4.1 QAM 的解调和检测	(286)
7.4.2 在 AWGN 信道中 QAM 的差错概率	(287)
7.5 载波频率调制	(292)
7.5.1 频率键控	(292)
7.5.2 FSK 信号的解调和检测	(293)
7.5.3 FSK 非相干检测的差错概率	(298)
7.6 通信系统中的同步	(303)
7.6.1 载波同步	(303)
7.6.2 时钟同步	(309)
习题	(312)

第 8 章 信道容量和编码

8.1 概述	(317)
8.2 信道模型和信道容量	(317)
8.2.1 信道模型	(317)
8.2.2 信道容量	(318)
8.3 信道编码	(328)
8.3.1 线性分组码	(330)
8.3.2 卷积码	(344)
习题	(359)

第 9 章 扩频通信系统

9.1 概述	(362)
9.2 直接序列扩频系统	(363)
9.2.1 信号解调	(364)
9.2.2 差错概率	(366)
9.2.3 DS 扩频信号的两个应用方面	(367)
9.3 PN 序列的产生	(373)
9.4 跳频扩频	(379)
9.4.1 FH 信号的差错概率	(380)
9.4.2 利用信号分集解决部分频带干扰问题	(385)
习题	(390)

参考文献

第 1 章 信号与线性系统

1.1 概述

本章要复习有关在通信系统分析中所用到的一些线性系统分析的基本方法和技术。在通信系统研究中有两个基本问题是一定要清楚的,这就是线性系统及其在时域和频域的特性和随机信号的概率与分析。大多数通信信道,以及发射和接收装置中的很多部分都可以用线性时不变(LTI)系统来建模,所以来自于线性系统分析中的一些著名方法和技术都能在分析中使用。重点放在频域分析方法上,因为在通信系统分析中这是最常用的技术。本章讨论由傅里叶级数和傅里叶变换开始,然后再包括功率和能量的概念、采样定理,以及带通信号的低通表示等。

1.2 傅里叶级数

一个线性时不变系统的输入/输出关系由如下卷积积分定义

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t - \tau)d\tau \quad (1.2.1)$$

式中: $h(t)$ 记为系统的冲激响应, $x(t)$ 为输入信号, $y(t)$ 则为输出信号。如果 $x(t)$ 是一个由下式给出的复指数信号

$$x(t) = Ae^{j2\pi f_0 t} \quad (1.2.2)$$

那么输出就为

$$\begin{aligned} y(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} Ae^{j2\pi f_0(t-\tau)}h(\tau)d\tau \\ &= A\left[\int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)e^{-j2\pi f_0\tau}d\tau\right]e^{j2\pi f_0 t} \end{aligned} \quad (1.2.3)$$

换句话说,该输出是一个与输入信号具有相同频率的复指数,然而,输出的(复)振幅是输入(复)振幅乘以

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)e^{-j2\pi f_0\tau}d\tau$$

应该注意到,上式这个量是该 LTI 系统冲激响应 $h(t)$ 和输入信号频率 f_0 的函数。因此,计算 LTI 系统对指数输入的响应是特别容易的。这样,在线性系统分析中就想找一些将信号展开成复指数之和的各种方法。**傅里叶级数和傅里叶变换就是利用复指数来展开信号的技术。**

当采用信号集合 $\{e^{j2\pi nt/T_0}\}_{n=-\infty}^{\infty}$ 作为展开式的基时,傅里叶级数就是周期为 T_0 的周期信号的正交展开。利用这个基,任何周期为 T_0 的周期信号^① 都可表示为

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n e^{j2\pi nt/T_0} \quad (1.2.4)$$

式中 x_n 称为该信号 $x(t)$ 的**傅里叶级数系数**,并由下式给出

$$x_n = \frac{1}{T_0} \int_{\alpha}^{\alpha+T_0} x(t) e^{-j2\pi nt/T_0} dt \quad (1.2.5)$$

这里 α 是任意常数,可按使该积分式计算简单来选取。频率 $f_0 = 1/T_0$ 称为该周期信号的**基波频率**,而 $f_n = nf_0$ 称为**第 n 次谐波**。在大多数情况下, $\alpha = 0$ 或者 $\alpha = -T_0/2$ 都是一种好的选取。

这种形式的傅里叶级数称为**指数形式的傅里叶级数**,它既能用于实值,也能用于复值信号 $x(t)$,只要它们都是周期的。一般而言,傅里叶级数 $\{x_n\}$ 是复数,即便当 $x(t)$ 是一个实值信号也是这样。

当 $x(t)$ 是一个**实值周期信号**时,有

$$\begin{aligned} x_{-n} &= \frac{1}{T_0} \int_{\alpha}^{\alpha+T_0} x(t) e^{j2\pi nt/T_0} dt \\ &= \frac{1}{T_0} \left[\int_{\alpha}^{\alpha+T_0} x(t) e^{-j2\pi nt/T_0} dt \right]^* \\ &= x_n^* \end{aligned} \quad (1.2.6)$$

由此显然可得

$$\begin{cases} |x_n| = |x_{-n}| \\ \angle x_n = -\angle x_{-n} \end{cases} \quad (1.2.7)$$

因此,实值信号的傅里叶级数系数具有**Hermitian 对称性**,即它们的实部是偶函数,它们的虚部是奇函数(或者等效地说,它们的幅值是偶函数,相位是奇函数)。

傅里叶级数的另一种形式称之为**三角函数形式的傅里叶级数**,它仅能适用于实值周期信号。定义

$$x_n = \frac{a_n - jb_n}{2} \quad (1.2.8)$$

^① 傅里叶级数存在的充分条件是 $x(t)$ 满足狄里赫利(Dirichlet)条件。详情请参考文献[1]。