

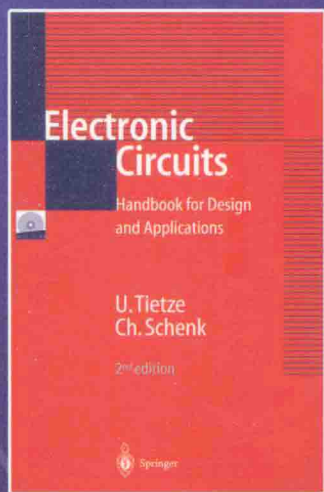
国外电子与通信教材系列

 Springer

电子电路设计 原理与应用(第二版)

(卷II 应用电路)

Electronic Circuits Handbook
for Design and Applications, Second Edition



Ulrich Tietze
[德] Christoph Schenk 著
Eberhard Gamm

邓天平 瞿安连 译



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

电子电路设计原理与应用

(第二版)

(卷II 应用电路)

Electronic Circuits Handbook for Design and Applications, Second Edition

[德] Ulrich Tietze Christoph Schenk Eberhard Gamm 著

邓天平 瞿安连 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

原德文畅销书 *Halbleiter-Schaltungstechnik* (《半导体电路技术》) 是为学生、工程师和科学工作者而写作的, 内容包括了电子电路设计的所有主要方面, 其宗旨是帮助读者通晓实际应用的电路, 并进而有能力自己设计电路。该书德文版自 1969 年以来已发行了 14 版, 其中的第 12 版内容已全部译为英文, 为德文版完整英文译本的第 2 版, 并以 *Electronic Circuits: Handbook for Design and Applications* 为书名出版。本中文译本译自上述英文译本的第 2 版。为适应不同读者的需求, 中文译本分为 3 卷出版。其中, 卷 I 为器件模型和基本电路, 卷 II 为应用电路, 卷 III 为通信电路。

本书既可作为高等学校电子科学与技术、电子信息工程、自动化及仪器仪表等专业本科生和研究生有关电子电路方面的教科书或参考资料, 也可以作为上述领域工程技术人员的参考书。

Translation from the English language edition *Electronic Circuits: Handbook for Design and Applications, Second Edition* by U. Tietze, Ch. Schenk, E. Gamm.

Copyright © 2008 Springer -Verlag Berlin Heidelberg. Springer London is a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved.

Authorized Simplified Chinese language edition by Publishing House of Electronics Industry. Copyright © 2013.

本书中文简体字翻译版由 Springer-Verlag Berlin Heidelberg 授予电子工业出版社。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。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2012-3040

图书在版编目(CIP)数据

电子电路设计原理与应用: 第 2 版. 卷 2, 应用电路/(德)蒂泽(Tietze,U.), (德)申克(Schenk,C.), (德)伽姆(Gamm,E.) 著; 邓天平等译. —北京: 电子工业出版社, 2014.12

书名原文: *Electronic Circuits Handbook for Design and Application, Second Edition*

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-24515-2

I. ①电... II. ①蒂... ②申... ③伽... ④邓... III. ①电子电路—高等学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 238052 号

责任编辑: 陈晓莉

印 刷: 北京市李史山胶印厂

装 订: 北京市李史山胶印厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 21.25 字数: 544 千字

版 次: 2014 年 12 月第 1 版 (原著第 2 版)

印 次: 2014 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 59.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

本书原作者的中文版前言

Preface

The purpose of this book is to help the reader to understand off the shelf circuits and to design his or her own circuitry. The book is written for students, practicing engineers, and scientists. It covers the fundamentals of digital and optoelectronic circuits. The book is a translation of parts of the 12th edition of the German bestseller *Halbleiter-Schaltungstechnik*.

The chapters dealing with digital circuit design begin with a description of *latching circuits* for pulse shaping and simple pulse generation. A discussion of *combinatorial circuits* follows, with an introduction to computational algebra for the formal description and the methods for simplifying Boolean equations. The internal circuitry of commercially available gates is then explained and the most common combinational circuits are presented.

Sequential circuits begin with the internal construction and the behavior of flip-flops and the systematic design of state diagrams. The most common sequential logic circuits are presented together with their implementation using PLDs and FPGAs. The designs of digital circuits are rounded off with a chapter on *semiconductor memories*. Here the most common variants are described and compared regarding their function and internal structure.

A chapter on *optoelectronic components* and circuits complemented the Chinese edition. Here particularly the methods for numerical and alphanumeric display are explained.

We hope that our chapter on amplifiers and communication circuits will soon be included in the Chinese translation, where we see the special strength of our book. Our homepage www.tietze-schenk.com offers updates, supplements and design examples. We encourage you to use our email address mail@tietze-schenk.com for feedback and comments.

Erlangen, May 2013

Ulrich Tietze, Christoph Schenk, Eberhard Gamm

中文版前言译文

本书面向学生、从业工程师和科学工作者，旨在帮助他们了解现有电路，并进而设计自己的电路。原书中还包括数字电路和光电子电路的基础知识。本书译自德文畅销书 *Halbleiter-Schaltungstechnik* 第 12 版中的部分内容。

关于数字电路设计的章节，首先讨论了用于脉冲整形和简单脉冲产生的锁存电路。接着引入逻辑描述的代数运算，通过化简布尔方程的方法，来进行组合逻辑电路的讨论。然后，对一些市场流行的逻辑门内部电路进行了说明，并介绍了一些最通用的组合逻辑电路。

时序电路首先从触发器的内部结构和性能，以及状态图的系统化设计入手，然后介绍最常用的时序逻辑电路，以及如何利用 PLD 和 FPGA 实现这些时序逻辑电路。数字电路设计以半导体存储器一章作为结束，其中介绍了最常用的几种存储电路形式，并比较了它们的功能和内部结构。

若收入光电子元件与电路一章将会使中文译本更为完整，这一章特别介绍了数字和字母的显示方法。

我们期盼有关放大器和通信电路部分的中文译本尽快出版，从中我们将看到这本书的非凡影响力。我们的主页 www.tietze-schenk.com 提供着不断更新的资料、补遗以及设计示例。我们的 Email 地址是 mail@tietze-schenk.com，欢迎大家通过 Email 反馈信息和意见。

乌利希·蒂泽，克里斯多夫·申克，艾伯哈特·伽姆

2013 年 5 月

于 埃朗根（德国）

译者前言

《电子电路设计原理与应用》的德文原版 *Halbleiter-Schaltungstechnik* (《半导体电路技术》)自 1969 年第一版问世以来,到 2013 年已发行了 14 版,作者为乌利希·蒂泽(Ulrich Tietze)、克里斯多夫·申克(Christoph Schenk)和艾伯哈特·伽姆(Eberhard Gamm)。该书历经 40 多年的不断修订,紧跟了电子技术的进步,在欧美一直畅销不衰。纵观全书有如下特点。

1. 重视基础

本书虽然没有对最基础的半导体物理进行讨论,但涉及基本电路分析时都用了较大篇幅,并在讨论中不回避数学推导。例如,对晶体管和基本放大电路均以大信号传输、小信号模型、频率响应和带宽、噪声,以及信号失真等五方面进行基本原理的分析,且视角和方法独特,考虑问题周到细致。对这些基本问题的掌握,将有助于正确应用集成电路构成性能优良的电子系统,做出创新性工作。此外,由于集成电路制造工艺的发展,以及设计方法学和设计工具的进步,越来越多的电路和系统设计工程师可能也会涉及集成电路本身的设计,所以深入了解集成电路内部结构原理和分析方法是有前瞻意义的。

2. 强调工程应用

为使读者尽快掌握电子技术应用,在第一部分的基础篇,对每一种基本电路都先从原理出发,并在量化分析的基础上推导模型的简化和工程近似的方法,然后用非常接近实际的典型数据(非真实数据)作为计算示例。在介绍典型集成电路时,特别注重于输入、输出特性的分析,这也是为了便于在工程设计中解决不同集成电路设计以及集成芯片之间的互连匹配问题。本书第二部分,用了多达 13 章的篇幅专门讨论电子电路在各方面的工程应用,其中包含大量特定功能模块的分析、设计实例。这些经实践考验过的电路,也许只要稍做修改就能应用到读者自己的电子设计中去。本书第三部分为通信电路,涉及基本理论、发射机与接收机、无源元件、高频放大器和混频器等内容,紧密结合通信电子电路应用的新进展进行了讨论。

3. 内容丰富

本书所讨论的内容涉及有关电子电路的几乎所有问题。书中给出了数百个电路计算示例和设计实例,包含 1771 幅图示说明和大量芯片参数的列表比较。全书内容全面,确如英文第二版的副标题: *Handbook for Design and Applications* 所示,可以作为电子电路设计和应用的手册。

历史上该书曾有俄文译本两版(1982 和 2007),波兰文译本三版(1976、1987 和 1996),匈牙利文译本三版(1974、1981 和 1990),西班牙文译本一版(1983)。英文译本共有三版:1978、1991 和 2008。其中,1978 年版以 *Advanced Electronic Circuits* 为书名出版,只包含了该书的第二部分;2008 年英文版书名为 *Electronic Circuits Handbook for Design and Applications*,译自德文第 12 版,为德文版完整英译的第 2 版。

Halbleiter-Schaltungstechnik 第 5 版曾于 1984 年在未经版权授权的情况下翻译为中文,以《高级电子电路》为书名出版。时光已历近 30 年,我们认为有必要将该书更新的版本介绍给我国的读者。

遗憾的是译者不通德文,本中文译本的翻译不得以 2008 年英译本第 2 版为基础,并参照 2010 年的德文 13 版做了部分订正。由于原书厚达 1543 页,为适应不同读者的需求,中文译本分为 3 卷出版。其中卷 I 摘取了原书第一部分的核心:第 1~5 章,主要是特色明显的器件特性、结构、模型和基本电路的论述。原书第 6~10 章为数字电路,因为我国现行数字电路

教材一般都讨论得更为详细，并且这几章内容与本书其他各章相关性不大，故决定舍去不译。中文译本卷II的内容与原书第二部分对应，主要介绍电子电路的应用，但删除了其中特色不甚突出的有关光电子元件的第23章。卷III的内容对应原书第三部分，为通信电路，内容较新，全部译出。此外，为节省篇幅，本书还略去了附录和索引。全部章节号均按中文译本的取舍分卷重新排列。

本书可作为高等学校电子科学与技术、电子信息工程、自动化及仪器仪表等专业本科生和研究生有关电子电路方面的教科书或参考资料，也可以作为上述领域工程技术人员的参考书。

参加本书翻译工作的有张林（卷I的第1、3、5章）、邓天平（卷I的第2章和卷II全部）、张浩（卷I的第4章）和李离（卷III全部），瞿安连审译并统一整理了全部书稿。

感谢电子工业出版社高等教育分社的领导和编辑们从对本书翻译动议的支持到购买版权、编辑和发行所做的努力，感谢谭海平社长的关心和陈晓莉编审细致入微的工作，感谢绘图员重绘了全部图表。没有大家的努力，本中文译本今天能够付梓是难以想象的。

由于译者学术水平和英语水平有限，译文肯定存在未发现的失误或不当之处，敬请读者给予批评指正。

瞿安连

2013年6月于华中科技大学

全书总目录

卷 I 器件模型和基本电路

- 第 1 章 二极管
- 第 2 章 双极型晶体管
- 第 3 章 场效应晶体管
- 第 4 章 放大器
- 第 5 章 运算放大器

卷 II 应用电路

- 第 1 章 运算放大器的应用
- 第 2 章 受控源和阻抗变换器
- 第 3 章 有源滤波器
- 第 4 章 信号产生器
- 第 5 章 功率放大器
- 第 6 章 电源电路
- 第 7 章 模拟开关和采样—保持电路
- 第 8 章 数模和模数转换器
- 第 9 章 数字滤波器
- 第 10 章 测量电路
- 第 11 章 传感器和测量系统
- 第 12 章 电子控制系统

卷 III 通信电路

- 第 1 章 基础知识
- 第 2 章 发射机和接收机
- 第 3 章 无源元件
- 第 4 章 高频放大器
- 第 5 章 混频器

目 录

卷 II 应用电路

第 1 章 运算放大器的应用	1
1.1 求和放大器	1
1.2 减法电路	1
1.2.1 换算为加法	1
1.2.2 使用单个运算放大器的减法运算	2
1.3 双极性系数电路	4
1.4 积分器	5
1.4.1 反相积分器	5
1.4.2 初始条件	7
1.4.3 求和积分器	8
1.4.4 同相积分器	8
1.5 微分器	9
1.5.1 基本电路	9
1.5.2 实际电路的实现	9
1.5.3 高输入阻抗微分器	10
1.6 求解微分方程	10
1.7 函数网络	12
1.7.1 对数电路	12
1.7.2 指数函数	15
1.7.3 用对数计算幂函数	16
1.7.4 正弦函数和余弦函数	16
1.7.5 任意函数网络	21
1.8 模拟乘法器	23
1.8.1 对数放大器构成的乘法器	23
1.8.2 跨导型乘法器	24
1.8.3 以电控电阻构成的乘法器	28
1.8.4 乘法器的调整	29
1.8.5 扩展为四象限乘法器	30
1.8.6 用乘法器构成除法器或平方根产生器	30
1.9 坐标变换	31
1.9.1 从极坐标变换到笛卡儿坐标	31
1.9.2 从笛卡儿坐标变换到极坐标	32

第 2 章 受控源和阻抗变换器	34
2.1 电压控制的电压源	34
2.2 电流控制的电压源	35
2.3 电压控制的电流源	36
2.3.1 负载浮置的电流源	36
2.3.2 负载接地的电流源	37
2.3.3 用晶体管构成精密电流源	39
2.3.4 浮置电流源	42
2.4 电流控制的电流源	43
2.5 负阻抗变换器 (NIC)	44
2.6 回转器	45
2.7 环行器	48
第 3 章 有源滤波器	51
3.1 低通滤波器的基本理论	51
3.1.1 巴特沃斯低通滤波器	54
3.1.2 切比雪夫低通滤波器	56
3.1.3 贝塞尔低通滤波器	58
3.1.4 理论小结	64
3.2 低通/高通滤波器的转换	65
3.3 一阶低通和一阶高通滤波器的实现	65
3.4 二阶低通和二阶高通滤波器的实现	67
3.4.1 LRC 滤波器	67
3.4.2 多路负反馈滤波器	67
3.4.3 单路正反馈滤波器	68
3.5 高阶低通和高通滤波器的实现	70
3.6 低通/带通滤波器的转换	72
3.6.1 二阶带通滤波器	72
3.6.2 四阶带通滤波器	73
3.7 二阶带通滤波器的实现	75
3.7.1 LRC 带通滤波器	76
3.7.2 多路负反馈带通滤波器	76
3.7.3 单路正反馈带通滤波器	77
3.8 低通/带阻滤波器的转换	78
3.9 二阶带阻滤波器的实现	79
3.9.1 LRC 带阻滤波器	79
3.9.2 有源双 T 带阻滤波器	79
3.9.3 有源文氏桥带阻滤波器	80
3.10 全通滤波器	81
3.10.1 基本原理	81
3.10.2 一阶全通滤波器的实现	83

3.10.3	二阶全通滤波器的实现	83
3.11	可调节的通用滤波器	84
3.12	开关电容滤波器	89
3.12.1	原理	89
3.12.2	开关电容积分器	89
3.12.3	一阶开关电容滤波器	90
3.12.4	二阶开关电容滤波器	91
3.12.5	用集成电路实现开关电容滤波器	92
3.12.6	使用开关电容滤波器的一般注意事项	92
3.12.7	可用型号概览	92
第 4 章	信号产生器	94
4.1	LC 振荡器	94
4.1.1	起振条件	94
4.1.2	Meissner 振荡器	95
4.1.3	哈特莱振荡器	96
4.1.4	考毕兹振荡器	97
4.1.5	发射极耦合的 LC 振荡器	97
4.1.6	推挽式振荡器	98
4.2	石英晶体振荡器	98
4.2.1	石英晶体的电特性	99
4.2.2	基频振荡器	100
4.2.3	谐波振荡器	101
4.3	文氏桥振荡器	102
4.4	微分方程振荡器	105
4.5	函数发生器	107
4.5.1	基本电路	108
4.5.2	实际电路的实现	108
4.5.3	频率可控制的函数发生器	109
4.5.4	同时产生正弦和余弦信号	111
第 5 章	功率放大器	113
5.1	以射极跟随器作为功率放大器	113
5.2	互补射极跟随器	114
5.2.1	B 类互补射极跟随器	114
5.2.2	AB 类互补射极跟随器	116
5.2.3	偏置电压的建立	117
5.3	互补达林顿电路	118
5.4	互补源极跟随器	119
5.5	限流电路	120
5.6	四象限工作	122
5.7	功率输出级的设计	123

5.8	具有电压增益的驱动电路	125
5.9	增大集成运算放大器的输出电流	126
第6章	电源电路	128
6.1	电源变压器的特性	128
6.2	整流电路	129
6.2.1	半波整流器	129
6.2.2	桥式整流器	130
6.2.3	中心抽头整流器	132
6.3	线性稳压器	133
6.3.1	基本稳压电路	133
6.3.2	输出固定电压的稳压器	134
6.3.3	输出电压可调的稳压器	136
6.3.4	降低落差电压的稳压器	136
6.3.5	负电压稳压器	138
6.3.6	浮置电压的对称分压	138
6.3.7	具有电压传感接入端的稳压器	139
6.3.8	实验工作台电源	139
6.3.9	集成稳压器	140
6.4	参考电压的产生	141
6.4.1	齐纳二极管参考电压源	141
6.4.2	带隙参考电压源	143
6.4.3	典型的参考电压源	144
6.5	开关型电源	145
6.6	次级开关稳压器	146
6.6.1	降压转换器	146
6.6.2	开关信号的产生	148
6.6.3	升压转换器	150
6.6.4	反向转换器	151
6.6.5	电荷泵转换器	151
6.6.6	集成开关稳压器	152
6.7	初级开关稳压器	154
6.7.1	单端转换器	154
6.7.2	推挽转换器	155
6.7.3	高频变压器	156
6.7.4	功率开关	157
6.7.5	开关信号的产生	159
6.7.6	损耗分析	160
6.7.7	集成驱动电路	161
第7章	模拟开关和采样-保持电路	164
7.1	原理	164

7.2	电子开关	165
7.2.1	场效应管开关	165
7.2.2	二极管开关	166
7.2.3	双极型晶体管开关	169
7.2.4	差分放大器开关	171
7.3	使用放大器的模拟开关	173
7.3.1	高电压模拟开关	173
7.3.2	可切换增益的放大器	173
7.4	采样-保持电路	174
7.4.1	基本原理	174
7.4.2	实际电路的实现	176
第 8 章	数模和模数转换器	178
8.1	采样定理	178
8.2	分辨率	182
8.3	DA 转换的原理	183
8.4	CMOS 技术实现的 DA 转换器	183
8.4.1	权电流求和	183
8.4.2	双掷开关构成的 DA 转换器	184
8.4.3	梯形网络	184
8.4.4	倒置工作的梯形网络	185
8.5	十进制加权的梯形网络	186
8.6	双极型技术实现的 DA 转换器	187
8.7	DA 转换器的特殊应用	188
8.7.1	有符号数的处理	188
8.7.2	乘法式 DA 转换器	190
8.7.3	除法式 DA 转换器	190
8.7.4	DA 转换器构成函数发生器	191
8.8	DA 转换器的精度	193
8.8.1	静态误差	193
8.8.2	动态特性	193
8.9	AD 转换的原理	196
8.10	AD 转换器的设计	196
8.10.1	并行转换器	196
8.10.2	两步转换器	198
8.10.3	逐次渐近法	200
8.10.4	计数法	203
8.10.5	过采样	207
8.11	AD 转换器的误差	211
8.11.1	静态误差	211
8.11.2	动态误差	211

8.12	各种类型 AD 转换器的比较	212
第 9 章	数字滤波器	214
9.1	数字传递函数	215
9.1.1	时域分析	215
9.1.2	频域分析	215
9.2	基本结构	218
9.3	有限冲激响应 (FIR) 滤波器的设计分析	220
9.3.1	基本方程	221
9.3.2	简单实例	222
9.3.3	滤波器系数的计算	225
9.4	FIR 滤波器的实现	235
9.4.1	用并行方法实现 FIR 滤波器	235
9.4.2	用串行方法实现 FIR 滤波器	236
9.5	无限冲激响应 (IIR) 滤波器的设计	237
9.5.1	滤波器系数的计算	237
9.5.2	级联结构的 IIR 滤波器	239
9.6	IIR 滤波器的实现	242
9.6.1	由简单模块构建	242
9.6.2	用大规模集成 (LSI) 器件设计 IIR 滤波器	245
9.7	FIR 和 IIR 滤波器的比较	247
第 10 章	测量电路	249
10.1	电压测量	249
10.1.1	阻抗变换器	249
10.1.2	电位差测量	250
10.1.3	隔离放大器	254
10.2	电流测量	256
10.2.1	浮置的零电阻电流表	256
10.2.2	高电位电流的测量	257
10.3	交流/直流变换器	258
10.3.1	平均绝对值测量	258
10.3.2	有效值测量	260
10.3.3	峰值测量	264
10.3.4	同步解调器	266
第 11 章	传感器和测量系统	270
11.1	温度测量	270
11.1.1	金属 PTC 热敏电阻	270
11.1.2	硅 PTC 热敏电阻	272
11.1.3	NTC 热敏电阻	272
11.1.4	电阻式温度检测器的应用	272
11.1.5	以晶体管作为温度传感器	276

11.1.6	热电偶	279
11.1.7	型号概览	283
11.2	压力测量	284
11.2.1	压力传感器的设计	284
11.2.2	具有温度补偿的压力传感器工作原理	286
11.2.3	压力传感器的温度补偿	288
11.2.4	商品化的压力传感器	290
11.3	湿度测量	291
11.3.1	湿度传感器	292
11.3.2	电容性湿度传感器的接口电路	292
11.4	传感器信号的传输	294
11.4.1	直接耦合的电信号传输	294
11.4.2	电气隔离的信号传输	297
11.5	传感器信号的校准	298
11.5.1	模拟信号的校准	298
11.5.2	计算机辅助校准	301
第 12 章	电子控制系统	304
12.1	基本原理	304
12.2	控制器的类型	305
12.2.1	P 控制器	305
12.2.2	PI 控制器	306
12.2.3	PID 控制器	308
12.2.4	具有可调参数的 PID 控制器	310
12.3	非线性系统的控制	311
12.3.1	静态非线性	311
12.3.2	动态非线性	312
12.4	锁相环	313
12.4.1	以采样-保持电路作为鉴相器	314
12.4.2	以同步解调器作为鉴相器	316
12.4.3	对频率敏感的鉴相器	318
12.4.4	可扩展测量范围的鉴相器	319
12.4.5	锁相环构成的倍频器	320
本书的主要符号		322

第 1 章 运算放大器的应用

因为运算放大器价格低廉而性能优良，所以目前大多数模拟信号处理都采用运放电路实现。需要电子电路处理的大多数信号都以模拟形式呈现，处理后一般也要求为模拟形式。因此，模拟信号处理通常为第一选择。

模拟处理的精度被限制在 0.1%~1% 的范围，如果需要更高精度，运用数字处理则更为有利。如果所要求的处理是复杂的、非线性的，或是需要记忆的，同样也是数字处理更优越。为了发挥数字信号处理的优势，在数字处理之前，必须先将信号数字化，处理之后再转换回模拟信号。因此，需要应用本卷第 8 章所讨论的模拟数字转换器(ADC)和数字模拟转换器(DAC)。ADC 的输入和 DAC 的输出分别需要对模拟信号进行放大和滤波，在这种情况下，模拟信号处理也是必不可少的。

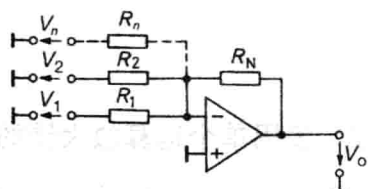
在下面各节中将分类讨论几种最重要的运算电路，其中包括 4 种基本算术运算电路、微分和积分运算电路，以及超越函数和其他一些函数的电路综合。为了尽可能清晰地说明这些电路的工作原理，我们首先假定运放具有理想特性。而在实际使用运放时，必须注意到电路参数选择方面的限制和附加条件，这些内容已经在本书卷 I 的第 5 章中深入讨论过。下面，我们只是更加详细地讨论这些效应对具体电路性能所起的特定作用。

1.1 求和放大器

将运放连接为如图 1.1 所示的反相放大器，可以实现几个电压的相加。输入电压通过与之串联的电阻连接到运放的反相输入端，因为反相输入结点表现为虚地状态，所以由基尔霍夫电流定律(KCL)直接得到的输出电压关系式为

$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} + \frac{V_o}{R_N} = 0$$

如果以上述方式将直流电压添加到信号电压中，则反相求和放大器也可以作为宽范围调零放大器使用。



$$\text{输出电压: } -V_o = \frac{R_N}{R_1} V_1 + \frac{R_N}{R_2} V_2 + \dots + \frac{R_N}{R_n} V_n$$

图 1.1 反相求和放大器

1.2 减法电路

1.2.1 换算为加法

改变被减数的符号，则可把减法运算转换成加法问题，所要求的电路如图 1.2 所示。运放 OA1 将输入电压 V_2 反相，则输出电压为：

$$V_o = \alpha_p V_2 - \alpha_N V_1 \tag{1.1}$$

如果两个电阻比相等，即

$$\alpha_p = \alpha_N = \alpha$$

则输出电压为放大的差值:

$$V_o = \alpha(V_2 - V_1) = A_D(V_2 - V_1)$$

如果由于制造公差, 电阻比不相等, 即使两个输入电压相等

$$V_1 = V_2 = V_{CM} \tag{1.2}$$

结果仍得到输出电压为:

$$V_o = \alpha_p V_{CM} - \alpha_N V_{CM} = V_{CM}(\alpha_p - \alpha_N)$$

其中

$$\alpha_p = \alpha + \frac{1}{2}\Delta\alpha \quad \text{和} \quad \alpha_N = \alpha - \frac{1}{2}\Delta\alpha$$

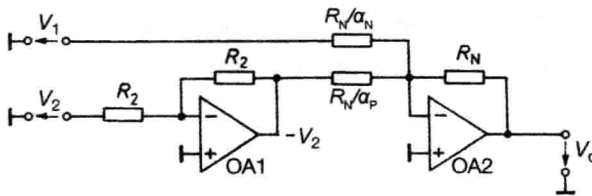
于是得到:

$$V_o = V_{CM}\Delta\alpha = V_{CM}A_{CM}$$

由此, 可计算出共模抑制比:

$$G = \frac{A_D}{A_{CM}} = \frac{\alpha}{\Delta\alpha} = \frac{1}{\text{公差}} \tag{1.3}$$

因此, 共模抑制比等于单项增益间相对匹配的倒数。如果使用公差等于 $1\% = 0.01$ 的电阻, 可以预期共模抑制比为 $G = 1/0.01 = 100$ 。



$$\text{输出电压: } V_o = \alpha(V_2 - V_1)$$

$$\text{系数条件: } \alpha_N = \alpha_p = \alpha$$

图 1.2 采用求和放大器的减法电路

1.2.2 使用单个运算放大器的减法运算

可以利用叠加原理计算图 1.3 所示减法放大器的输出电压, 其输出电压为

$$V_o = k_1 V_1 + k_2 V_2$$

若 $V_2 = 0$, 则电路为一个反相放大器, 且 $V_o = -\alpha_N V_1$, 得到 $k_1 = -\alpha_N$ 。当 $V_1 = 0$ 时, 电路表现为一个在输入端接有分压器的同相放大器。 V_p 的电位为

$$V_p = \frac{R_p}{R_p + R_p / \alpha_p} V_2 = \frac{\alpha_p}{1 + \alpha_p} V_2$$

它又被放大到 $(1 + \alpha_N)$ 倍, 结果输出电压为

$$V_o = \frac{\alpha_p}{1 + \alpha_p} (1 + \alpha_N) V_2$$

如果两个电阻比相同, 即 $\alpha_N = \alpha_p = \alpha$, 则有

$$V_o = \alpha V_2$$

即 $k_2 = \alpha$ 。我们现在可得一般情况下的输出电压, 形式为

$$V_o = \alpha(V_2 - V_1)$$