

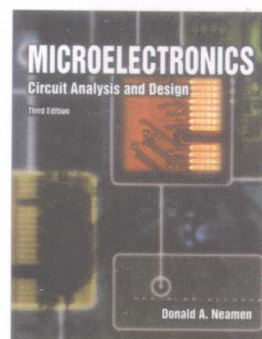
信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列

Mc
Graw
Hill Education

Microelectronics
Circuit Analysis and Design
(Third Edition)

电子电路分析与设计
——模拟电子技术
(第3版)

Donald A. Neamen 著
王宏宝 于红云 刘俊岭 译



Mc
Graw
Hill

清华大学出版社

信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列



Microelectronics
Circuit Analysis and Design
(Third Edition)

电子电路分析与设计
——模拟电子技术
(第3版)



Donald A. Neamen 著

王宏宝 于红云 刘俊岭 译

清华大学出版社
北京

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2007-2427

Donald A. Neamen

Microelectronics: Circuit Analysis and Design, 3th edition

ISBN: 0-07-125443-9

Copyright © 2007 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education(Asia) Co. and Tsinghua University Press.

本书中文简体字翻译版由清华大学出版社和美国麦格劳-希尔教育(亚洲)出版公司合作出版。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。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电子电路分析与设计——模拟电子技术(第3版)/(美)纽曼(Neamen, D. A.)著;王宏宝,于红云,刘俊岭译. —北京:清华大学出版社,2009.1

(信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列)

ISBN 978-7-302-17894-1

I. 电… II. ①纽… ②王… ③于… ④刘… III. 模拟电路—电子技术—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 088876 号

责任编辑: 王一玲 陈志辉

责任校对: 时翠兰

责任印制: 李红英

出版发行: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者: 北京市清华园胶印厂

装 订 者: 三河市李旗庄少明装订厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印 张: 27.25 字 数: 677 千字

版 次: 2009 年 1 月第 1 版 印 次: 2009 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 1~3000

定 价: 49.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话: (010)62770177 转 3103 产品编号: 029819-01

中译版序

清华大学出版社曾经于 2000 年引进 Donald A. Neamen 教授的《电子电路分析与设计》(Electronic Circuit Analysis and Design)(第 2 版),受到了国内广大高校师生的欢迎。2007 年本书推出了第 3 版,并由从事电子技术教学近 40 年的清华大学王宏宝教授主持翻译出版,应清华大学出版社之邀,本人再次推荐本书。

Microelectronics: Circuit Analysis and Design (第 3 版)包括半导体器件及其基本应用、模拟电子技术和数字电子技术 3 个部分,共 17 章。第 1 部分包括第 1~8 章,主要阐述半导体材料和二极管、二极管电路、场效应管及其放大电路、双极型晶体管及其放大电路、频率响应、输出级和功率放大电路等。第 2 部分包括第 9~15 章,主要阐述理想运放及其基本应用、集成电路的偏置电路和有源负载、差分及多级放大电路、反馈及稳定性、运算放大电路、运算放大电路的非理想效应、集成电路的应用和设计等。第 3 部分包括第 16 章和第 17 章,主要阐述 NMOS、CMOS、BiCMOS、ECL 逻辑电路的组成,不同类型门电路的工作原理和电气特性,触发器、时序逻辑电路、存储器的构成和逻辑功能等。

一、本书基本特点

1. 内容丰富,视野开阔,知识面较宽,涵盖了我国高等院校模拟电子技术和数字电子技术课程大部分教学基本要求,因而可作为电子技术基础及同类课程的参考书或教材。

2. 本书虽然篇幅较多,但各章结构合理、层次清楚、思路清晰、叙述详细、文字流畅。各章一般在叙述一个重要问题之后,均有例题及其评述或讨论,有些还给出设计举例、自测题等。使读者像面对一个循循善诱的老师一样,在启发引导下,由浅入深,循序渐进,因而易于阅读和学习。

二、内容编排特点

1. 半导体器件及其基本应用、模拟电子技术和数字电子技术 3 个部分的序言具有高度的概括性,阐明了本部分有关的基本知识、基本概念和基本方法,对于“教”与“学”均具有指导意义。

2. 在第 1 部分中,将场效应管及其放大电路置于晶体三极管及其放大电路之前,适应了集成电路的发展和当前芯片应用的现状。而且,在全书中均有意识地对场效应管的应用加以关注。

3. 每章均具有“设计举例”一节,设计题目均为结合本章基本内容的实际问题。例如,利用二极管、MOSFET 管和 BJT 管设计电子温度计,利用二极管和

稳压管设计直流电源,利用 FET 和 BJT 设计实用放大器,利用集成运放设计有源滤波器,利用 CMOS 和 ECL 电路的基本结构设计门电路,等等。特别注重理论联系实际,且叙述具有示范性,利于提高读者电子电路的设计能力。

4. 全书具有大量的例题、思考题、练习题、测试题、设计应用题和计算机仿真题,教学目的明确,层次分明,内容丰富。且大部分题目配有答案,利于自学。

综上所述,与国内出版的同类教材相比,本书具有明显的特色。它正好弥补国内同类教材因篇幅所限叙述不够详尽、内容较为浓缩、例题和习题较少、设计举例不多的缺憾。因此,无论对于教师还是对于学生,本书均具有很好的参考价值。

华成英

2008 年 7 月于清华园

目的和宗旨

《电子电路分析与设计》是电气工程与计算机科学专业的本科生电子学必修课程所用的教材。本书第3版的目的是为模拟电子电路及数字电子电路的分析和设计打下坚实的基础。

现在,多数电子电路的设计都使用集成电路(ICs)。集成电路将整个电路制造在单片半导体材料上,它包含数百万个半导体器件和其他元件,能执行很复杂的功能。微处理器就是这种电路的一个实例。这本教材的根本目的就是要熟悉组成集成电路的一些基本电子电路的工作原理、电路特性以及限制因素。

本书首先分析和设计分立晶体管电路,所研究的电路其复杂程度不断提高。而在本书的最后,将使读者能够分析和设计集成电路的部件单元,比如数字逻辑门电路。

本书是研究复杂电子电路的入门教材,因而没有介绍那些更先进的材料,比如砷化镓技术,砷化镓材料常应用在一些特殊的场合,在参考文献中介绍了它的几种特殊应用的实例。当然,本书也未涉及布线技术及集成电路制造技术,因为这些内容可以完全独立于本教材之外进行专门介绍。

计算机辅助分析和设计(PSpice)

计算机分析和计算机辅助设计(CAD)是电子工程中的重要环节。当前最为流行的一种电子电路仿真程序是由加州大学开发的侧重于集成电路的仿真程序(SPICE),其专门用于个人计算机的版本称为 PSpice。使用本教材的各位教师可结合课程的各个知识点介绍 PSpice 的应用。

本教材着重对电路进行手工分析和设计。然而,在有些地方应用 PSpice 的分析结果,它们与手工分析的结果相关联。

书中还有 PSpice 原理图以及计算机仿真结果。在大多数章的末尾有专门的计算机仿真题。然而,在教师的讲课过程中,可以随意要求将 PSpice 用于任何一道练习题和习题,以检验手工分析的结果。

在某些章节,特别是频率响应和反馈这两章,更是大量应用计算机分析。但是,即使在这样的情况下,也只是在充分了解了电路的基本特性以后才考虑使用计算机分析方法。计算机是电子电路辅助分析和辅助设计的工具,但不能代替对电路分析基本概念的准确理解。

设计的重要性

设计工作相当于工程的“心脏”。一个好的设计积累了电路分析的大量经验。在本教材中,当我们在进行电路分析的时候,将着重阐明电路的各种特性和性能,这些都为我们进行应用电路设计提供直觉知识。

本书有许多设计例题、设计练习题和章末尾的设计习题。许多设计例题和设计习题具有一组设计指标要求,由于此要求而可能产生唯一的解。尽管书中所介绍的设计类型可能并非是最严密的形式,但就作者看来,这是学习电子电路设计的第一步。在每章习题的末尾,有单独的一小节是应用设计题,它包含答案不确定、不唯一的开放式(open-ended)设计题。

必备条件

本书的适用对象是电气工程与计算机专业本科低年级学生。学习本书的必要先修知识应该包括电子电路的直流分析和正弦稳态分析以及 RC 电路的瞬态分析。有关各种网络的概念,例如,戴维南定理和诺顿定理,它们广泛应用于电子电路的分析中。有关拉普拉斯变换的一些基础知识也是非常有用的。但是关于半导体物理的相关知识不要求在学习本课程之前必须具备。

本书的体系结构

全书分为 3 个部分。第 1 部分由前 8 章组成,包括半导体材料、基本二极管原理、二极管电路、基本晶体管原理以及晶体管电路等内容。第 2 部分介绍更高级一些的电子电路,比如运算放大器电路、集成电路偏置技术以及其他实用的模拟电路。第 3 部分则介绍数字电子电路,包括 CMOS 集成电路。在书末还有 6 个附录(中译版略去了附录)。

第 1 部分 第 1 章介绍半导体材料和 PN 结,由此发展到二极管电路以及第 2 章的二极管应用电路。第 3 章讲解场效应晶体管,重点介绍金属-氧化物-半导体 FET(MOSFET)。第 4 章则讲解基本 FET 线性放大器。第 5 章讨论双极型晶体管。第 6 章则讲解基本双极型线性放大器及其应用。

讲解 MOSFET 的第 3 章和第 4 章以及讲解双极型晶体管的第 5 章和第 6 章在书中是相互独立的两部分内容。因而教师可以如本教材中所示先讲 MOSFET 内容后讲双极型晶体管内容,也可以采用更加传统一点的方法,即先讲双极型晶体管内容,后讲 MOSFET 内容,如下表所示。

最初几章内容可能的讲解次序

本书次序		传统次序	
章	内 容	章	内 容
1	PN 结	1	PN 结
2	二极管电路	2	二极管电路
3	MOS 晶体管	5	双极型晶体管
4	MOSFET 电路	6	双极型电路
5	双极型晶体管	3	MOS 晶体管
6	双极型电路	4	MOSFET 电路

第7章用单独一章内容讨论晶体管和晶体管电路的频率特性。第3章~第6章的重点是电路的分析和设计技术,所以在这其中的某一章如果混合讲解两种不同的晶体管将会引起不必要的混乱。然而,从第7章开始则在同一章中既讨论 MOSFET 电路,也讨论双极型电路。最后的第8章介绍输出级电路和功率放大器电路,从而结束本书第1部分的内容。

第2部分 从第9章~第15章的内容是介绍更高级一点的模拟电路。这一部分的重点放在运算放大器和构成集成电路(ICs)的一些基本电路模块上。第9章介绍理想运算放大器和理想运放电路。第10章介绍恒流源偏置电路和有源负载电路,这两种电路广泛应用于 ICs 中。第11章讨论差分放大器,它是运算放大器的核心电路。第12章讨论反馈。第13章则对构成运算放大器的各种电路进行分析和设计。第14章分析模拟 ICs 的非理想效应。第15章讨论模拟 ICs 的应用,比如有源滤波器和振荡器电路等。

第3部分 这一部分内容包括第16章和第17章,它们分析数字电路。第16章讨论 MOS 数字电路的分析和设计。这一章的重点是 CMOS 电路,它是构成最流行的数字电路的基础。首先介绍基本的数字逻辑门电路,然后介绍移位寄存器、触发器和基本的 A/D 和 D/A 转换器电路。第17章介绍双极型数字电路,包括射极耦合逻辑电路和传统的晶体管-晶体管逻辑(TTL)电路。

如果有的教师希望在讲解模拟电路之前先讲解数字电路,则可以将第3部分编写成与第2部分没有关联。因而,这些教师可以从第1、2、3章跳到第16章进行讲解。这种跳跃对于学生们来说可能有些困难,但也不是不可行的。

附录 (略)

第3版的特点

(1) 每章的开始都有一个简短的内容介绍,对于前一章的内容和新一章的内容起承上启下的作用。每章内容的讲解目的,即读者将从本章内容的学习中获得些什么,这些都在每章正文开始之前的本章内容简介中用圆点标记列表的形式展示出来,以便读者阅读。

(2) 在每章中的每个主要小节,开始时都用一小段文字再次阐述本节所要讲解的内容。

(3) 本书通篇包含大量的实用例题以加强对书中所讲理论和概念的理解。这些例题在分析和设计电路时都很详细,所以读者不必担心会遗漏掉什么步骤。

(4) 紧跟每个例题的后面必有一道练习题。练习题和例题非常相似,所以读者可以立刻检查自己对于刚刚学过的内容的理解程度。每道练习题都给出答案,因而读者不用到书末去寻找答案。这些练习题可以帮助读者在学习新的一小节内容之前加强对刚学过的这一小节内容的理解和掌握。

(5) 在每章主要小节的末尾有理解测试题。这些测试题一般比例题后面的练习题更加综合。这些测试题也能使读者在学习新的一节内容之前加强对所学知识的理解和掌握。同样,理解测试题也给出了答案。

(6) 解题技巧贯穿在每章的内容当中,以帮助读者很好地分析电路。尽管求解一道题可能存在不止一种方法,但这些解题技巧足以帮助读者初步亲自动手分析电路。

(7) 每章的最后一小节都有一个设计题。这种特定的电路设计和刚刚学过的这章内容有关。经过本书整个课程的学习,将使同学们学会设计并构建电子温度计电路。尽管每一个应用设计并非都是电子温度计,但是每个设计都向学生形象地阐明了如何在现实社会中

应用这些设计。

(8) 每章正文最后一小节是本章内容小结。它总结这一章所推导出的全部结论并且复习所讲解的基本概念。小结部分也是用圆点标记的列表形式列出,以便参考。

(9) 小结之后的内容是本章重点。这一小节阐述通过本章讲解已经实现的目标以及读者通过学习应该掌握的能力。它能帮助读者在学习下一章之前评估自己的进步。

(10) 每章结尾列出了复习题。这些复习题如同自测题一样能帮助读者检验对课文中提出的基本概念的掌握程度。

(11) 每章的最后罗列了大量的习题,以每一小节的标题为纲来进行编排。在第3版中收入了许多新的习题,还有一些设计题,而且分为不同的难易程度。带“D”字头的是设计类型的习题,带“*”号的设计题是难题。单独列出了计算机仿真题和答案不确定、不唯一的开放式(open-ended)设计题。

(12) 书末给出了部分习题的答案。知道了习题的答案,就可以帮助读者加强解题的能力。

(13) (略)

补充材料

本教材有多种、广泛的补充材料,不但有在线的,还有除教材正文以外的补充材料。本网站所包含的资源,既适用于教师也适用于学生。针对学生网站内容有两个新的特点:算法问题和图片。算法题使学生能够实践循环算法的一步一步解题过程,从而联想创造出无限多个问题。图片通过展示各个不同的领域,从 Fairchild 半导体到 Apple 公司,工作的工程师们的访谈过程,给同学们提供一些有关现实电子工程领域的直观知识。许多有用的链接也会出现在此网站上。

网站上有适合教师的安全可靠、使用方便的内容,包括教材中所有的插图、所有的题解以及实验数据的 PPT。此外,教师还可以获取 McGraw-Hill 专门为教师们准备的新工具 COSMOS 的演示版。

致谢

(略)

目录

序言 1 电子学导论

第 1 部分 半导体器件及其基本应用

第 1 章 半导体材料和二极管	7
第 2 章 二极管电路	50
第 3 章 场效应晶体管	98
第 4 章 基本 FET 放大器	171
第 5 章 双极型晶体管	235
第 6 章 基本的 BJT 放大器	304
第 7 章 频率响应	388
第 8 章 输出级和功率放大器	463

序言 2 电子电路设计

第 2 部分 模拟电子技术

第 9 章 理想运算放大器及运放电路	523
本章内容	523
9.1 运算放大器	523
9.2 反相放大器	528
9.3 加法放大器	534
9.4 同相放大器	536
9.5 运算放大器的应用	538
9.6 跨导运算放大器	551
9.7 运放电路的设计	552
9.8 设计举例：带测量放大器的电子温度计	557
9.9 本章小结	560
复习题	560
习题	561

第 10 章 集成电路偏置技术和有源负载	573
本章内容	573
10.1 双极型晶体管电流源	573
10.2 FET 电流源	590
10.3 带有源负载的电路	600
10.4 有源负载电路的小信号分析	605
10.5 设计举例: NMOS 电流源	611
10.6 本章小结	613
复习题	613
习题	614
第 11 章 差分放大器和多级放大器	626
本章内容	626
11.1 差分放大器	627
11.2 基本的 BJT 差分对	627
11.3 基本的 FET 差分对	648
11.4 带有源负载的差分放大器	656
11.5 BiCMOS 电路	665
11.6 增益级和简单的输出级	668
11.7 简化的 BJT 运算放大器电路	673
11.8 差分放大器的频率响应	676
11.9 设计举例: CMOS 差分放大器	681
11.10 本章小结	683
复习题	684
习题	685
第 12 章 反馈及其稳定性	703
本章内容	703
12.1 反馈电路综述	704
12.2 反馈的基本概念	705
12.3 理想反馈电路的拓扑结构	712
12.4 电压(串联-并联)放大器	720
12.5 电流(并联-串联)放大器	725
12.6 跨导(串联-串联)放大器	731
12.7 跨阻(并联-并联)放大器	736
12.8 环路增益	744

12.9	反馈电路的稳定性	749
12.10	频率补偿	757
12.11	设计举例: MOSFET 反馈电路	762
12.12	本章小结	764
	复习题	765
	习题	765
第 13 章	运算放大器电路	778
	本章内容	778
13.1	运放电路的一般设计原则	778
13.2	双极型运算放大器电路	780
13.3	CMOS 运算放大器电路	796
13.4	BiCMOS 运算放大器电路	805
13.5	JFET 运算放大器电路	812
13.6	设计举例: 与给定输出级相匹配的两级 CMOS 运放	815
13.7	本章小结	817
	复习题	818
	习题	819
第 14 章	运算放大器电路的非理想效应	826
	本章内容	826
14.1	实际运放的参数	826
14.2	有限的开环增益	830
14.3	频率响应	837
14.4	失调电压	842
14.5	输入偏置电流	852
14.6	其他非理想特性的影响	854
14.7	设计举例: 失调电压补偿网络	856
14.8	本章小结	857
	复习题	858
	习题	859
第 15 章	集成电路的应用和设计	866
	本章内容	866
15.1	有源滤波器	866
15.2	振荡器电路	877
15.3	施密特触发器电路	885

15.4	非正弦波振荡器和定时器电路	896
15.5	集成电路功率放大器	905
15.6	稳压器电路	910
15.7	设计举例:有源带通滤波器	917
15.8	本章小结	920
	复习题	921
	习题	921
部分习题答案		931

序言 3 数字电子学导论

第 3 部分 数字电子技术

第 16 章	MOSFET 数字电路	945
第 17 章	双极型数字电路	1038

理想运算放大器及运放电路

运算放大器(简称运放)是用来放大两个输入电压之间的差值并产生一个输出信号的集成电路。运算放大器广泛应用于模拟电路中,可以将其视为类似于双极型晶体管或场效应晶体管的另一种电子器件。

运算放大器这一术语来源于20世纪60年代早期对器件的原始应用。与电阻和电容相连的运放被应用在模拟计算机中进行数学运算来求解微分方程和积分方程。自那时以来运算放大器的应用已经得到了长足的发展。

本书对运放电路的讨论推迟到现在的主要原因是可以利用相对简单的晶体管电路来展开运放理想特性的研究,而不是简单地叙述假定的理想参数。一旦掌握了运放的理想性能,读者将会非常乐意地应用这些理想特性去设计运放电路。这就像学会了用受控源表示增益系数的晶体管等效电路之后,就会构建出用受控源表示器件增益的基本运算放大器的等效电路,可以利用这种等效电路来求解运放电路非理想的性能。

本章大部分内容都是讲解理想的运算放大器,有关运放的非理想的效应将在第14章进行讨论。

本章内容

- 讨论并构建理想运算放大器的参数和特性,确定理想运放电路的分析方法。
- 分析和了解反相运算放大器的特性。
- 分析和了解加法运算放大器的特性。
- 分析和了解包括电压跟随器即缓冲器的同相运算放大器的特性。
- 分析几种理想运放电路,包括差分放大器和测量放大器。
- 讨论跨导型运算放大器。
- 利用给定的设计指标设计几种理想的运放电路。
- 设计电子温度计,用测量放大器来提供所需的放大倍数。

9.1 运算放大器

本节内容:讨论和研究理想运算放大器的参数和特性,并确定理想运放电路的分析方法。

继最初的双极型集成电路开发不久,集成运算放大器电路就被开发出来了。Fairchild 半导体公司在 1965 年推出的 $\mu\text{A}-709$ 是最先获得广泛应用的通用运放之一。如今经典的 $\mu\text{A}-741$ 也是 Fairchild 公司在 20 世纪 60 年代后期推出的。在那之后,一大批同时应用双极型和 MOS 技术的改善性能的运算放大器被设计出来。大部分运算放大器都非常便宜(低于 1 美元),并且可以从很多供应商那里购买到。

从信号方面考虑,运放是具有两个输入端和一个输出端如图 9.1(a)所示的小信号电路器件。与所有的晶体管电路一样,运放也需要直流电源将晶体管偏置在放大区。大部分运放都同时采用正、负电源电压来偏置。和前面一样,正电压标记为 V^+ ,负电压标记为 V^- ,如图 9.1(b)所示。

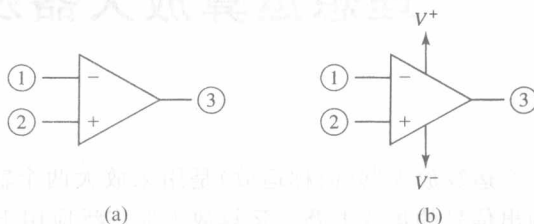


图 9.1

(a) 运放的小信号电路符号; (b) 带正、负电源的运放

构成一个运放电路通常需要 20 到 30 个晶体管。典型的集成运放参数接近于理想特性。正是由于这个原因,因而可以将运放看作“简单的”电子器件,这就意味着可以在广泛的范围内很容易地用集成运放来设计电子电路。

本章首先提出一组理想运放的参数,然后讨论各种运放电路的分析和设计,这将有助于对电子电路设计过程的理解。本章一般均假设运算放大器为理想运放。而在下面的章节中将会考虑差分放大器、电流源偏置以及反馈技术,这些技术带动了第 13 章中所要介绍的实际运算放大器电路的发展。一旦学习了实际的运放电路,也就理解了非理想特性的来源。运算放大器参数的非理想效应将在第 14 章进行介绍。此外,有关运算放大器的应用将在第 15 章进行详细的讲解。

9.1.1 理想参数

理想运算放大器能检测出两个输入信号之间的差值并放大该差值从而产生输出信号。其端电压为端子对地的测量电压。图 9.2 所示为理想运放的等效电路。

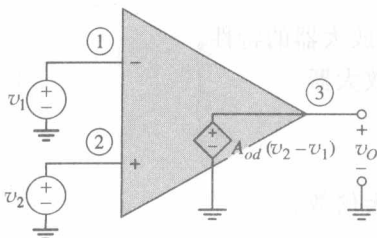


图 9.2 理想运放的等效电路

理想情况下,端子①和②之间的输入电阻 R_i 为无穷大,这意味着每个端子处的输入电流为零。理想运放的输出端表现为理想电压源的输出端,意味着小信号输出电阻 R_o 为零。

等效电路中的参数 A_{od} 为运算放大器的开环差分电压增益。输出信号和 v_1 反相和 v_2 同相。因而,端子①称为反相输入端,标记为“-”;端子②则称为同相输入端,标记为“+”。理想运放的开环增益 A_{od} 非常大且趋

向于无穷大。

由于理想运放只对两个输入信号 v_1 和 v_2 之间的差值做出响应,所以对于 $v_1 = v_2$,理想运放的输出信号为零。当 $v_1 = v_2 \neq 0$ 时,则称其为共模输入信号。对于理想运放来说,共模输出信号为零。这种特性称为共模抑制特性。

由于此类器件同时采用正、负电源电压偏置,所以大多数运放都为直接耦合器件(也就是输入端不加耦合电容)。因而图 9.2 所示的输入电压 v_1 和 v_2 可以是直流电压,直流输入会产生直流输出电压 v_o 。

在每次设计中都必须要考虑的运放的另一个特性是带宽或频率响应。在理想运放中该参数可以忽略。实际运放的频率响应和其他的非理想特性将在第 13 章和第 14 章中进行讨论。这些非理想参数将在第 13 章中分析完实际的运算放大器电路之后才会考虑。

本章讲解理想运放主要是为了了解运放电路的性能和特性。

9.1.2 理想参数的推导

为了推导理想运放的参数,这里先回顾一下 MOSFET 的小信号等效电路,并将该等效模型应用到特定的电路中。图 9.3(a)所示为 N 沟道增强型 MOSFET,图 9.3(b)所示则为其简化的低频小信号等效电路。在下面的分析中均假设晶体管的小信号输出电阻 r_o 为无穷大。

图 9.4 所示为包含两个外电路电阻 R_I 和 R_F 以及输入电压 v_i 的 MOSFET 等效电路。电阻 R_F 是反馈电阻,它将输出送回到晶体管的输入部分。因而该电路称为反馈电路。本例中将采用单个晶体管电路作为反馈电路的基本放大器。

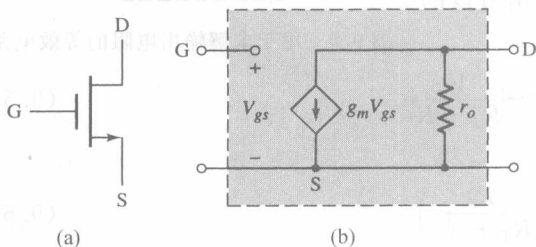


图 9.3

(a) N 沟道增强型 MOSFET; (b) 小信号等效电路

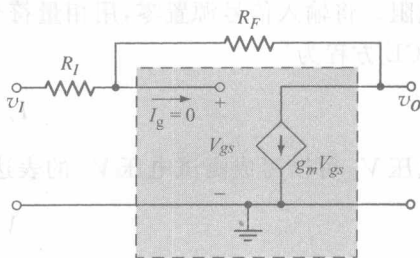


图 9.4 含输入电阻和反馈电阻的简化的 MOSFET 小信号等效电路

写出栅极处的 KCL 方程可得

$$\frac{v_i - V_{gs}}{R_I} = \frac{V_{gs} - v_o}{R_F} \quad (9.1(a))$$

重新整理上式可得

$$\frac{v_i}{R_I} + \frac{v_o}{R_F} = V_{gs} \left(\frac{1}{R_I} + \frac{1}{R_F} \right) \quad (9.1(b))$$

由于晶体管的输入阻抗为无穷大,所以流入器件的电流为零。

可得输出节点的 KCL 方程为

$$\frac{V_{gs} - v_o}{R_F} = g_m V_{gs} \quad (9.2(a))$$

可以从上式解得 V_{gs} 为

$$V_{gs} = \frac{v_o}{R_F} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_F} - g_m} \quad (9.2(b))$$

将式(9.2(b))代入式(9.1(b))可得电路总的电压增益为

$$\frac{v_O}{v_I} = -\frac{R_F}{R_I} \cdot \frac{1 - \frac{1}{g_m R_F}}{1 + \frac{1}{g_m R_F}} \quad (9.3)$$

如果令基本放大器(也就是晶体管)的增益 g_m 为无穷大,那么总的电压增益变为

$$\frac{v_O}{v_I} = -\frac{R_F}{R_I} \quad (9.4)$$

式(9.4)表明总的电压增益为两个外电路电阻的比值,这就是应用理想运放得出的一个结果。负号表明输入和输出信号之间存在 180° 的相移,这意味着晶体管的输入端对应着运放的反相端。式(9.3)和式(9.4)表示的电压增益称为**闭环电压增益**,这是因为将反馈也合并在了电路中了。相反,电压增益 A_{od} 称为**开环增益**。

基本放大器(晶体管)输入端电压 V_{gs} 由式(9.2(b))给出。同样,如果令增益 g_m 为无穷大,那么 $V_{gs} \approx 0$; 也就是说,基本放大器输入端的电压几乎处于地电位。该端子被称为**虚地端**,这是理想运放的另一重要特性。在下面几节中将会更加详细地讨论有关虚地的概念。

由图 9.5 所示的等效电路可以求得该电路的输出电阻。将输入信号源置零,用相量符号写出输出节点的 KCL 方程为

$$I_x = g_m V_{gs} + \frac{V_x}{R_I + R_F} \quad (9.5)$$

电压 V_{gs} 可以写成测试电压 V_x 的表达式为

$$V_{gs} = V_x \left(\frac{R_I}{R_I + R_F} \right) \quad (9.6)$$

将式(9.6)代入式(9.5)可得

$$\frac{I_x}{V_x} = \frac{1}{R_o} = \frac{1 + g_m R_I}{R_I + R_F} \quad (9.7(a))$$

即

$$R_o = \frac{R_I + R_F}{1 + g_m R_I} \quad (9.7(b))$$

如果增益 g_m 趋向于无穷大,则 $R_o \rightarrow 0$ 。含有负反馈的电路其输出电阻趋向于零。这也是理想运放电路的一个特性。

因而,具有较大增益的简化的 MOSFET 模型可以体现出理想运放的特性。

9.1.3 分析方法

通常,运算放大器不会在图 9.2(a)所示的开环状态下应用。而是采用反馈来闭合输出和输入之间的环路。本章仅限于对**负反馈**的讨论,负反馈将输出接回到运放的反相输入端,即端子①。下面将会看到这种负反馈结构可以使电路稳定;而在正反馈中输出端则是接回到运放的同相输入端,可以用来构成振荡器电路。

由负反馈分析所得如图 9.6 所示理想运放的特性可以归纳为:

1. 可以将内部的差分增益 A_{od} 视为无穷大。

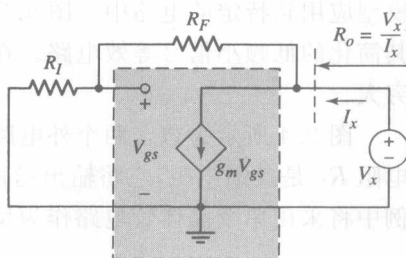


图 9.5 用于求解输出电阻的等效电路