

国外大学优秀教材 —— 微电子类系列 (影印版)

Johan H. Huijsing

运算放大器

—— 理论与设计

OPERATIONAL
AMPLIFIERS

Theory and Design

Johan H. Huijsing

Kluwer Academic Publishers



清华大学出版社

国外大学优秀教材 —— 微电子类系列 (影印版)

运算放大器 —— 理论与设计

Operational Amplifiers-Theory and Design

Johan H. Huijsing

清华大学出版社
北京

Reprint from the English language edition:

Operational Amplifiers -Theory and Design by Johan H. Huijsing

Copyright 2001 by Kluwer Academic Publishers, being a part of Springer Science + Business Media

This reprint has been authorized by Springer Science + Business Media for publication in China Mainland only.

All Rights Reserved.

本书影印版由 **Springer Science + Business Media** 授权清华大学出版社在中国境内（不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区）独家出版、发行。

未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2006-3019

版权所有，翻印必究。举报电话：010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术，用户可通过在图案表面涂抹清水，图案消失，水干后图案复现；或将表面膜揭下，放在白纸上用彩笔涂抹，图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

运算放大器：理论与设计 = Operational Amplifiers: Theory and Design / (荷) 惠意欣 (Huijsing, J. H.) 著. —影印本. —北京：清华大学出版社，2006.10

(国外大学优秀教材——微电子类系列(影印版))

ISBN 7-302-13881-8

I. 运… II. 惠… III. 运算放大器—教材—英文 IV. TN722.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 115277 号

出 版 者：清华大学出版社

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

社总机：010-62770175

地 址：北京清华大学学研大厦

邮 编：100084

客户服务：010-62776969

责任编辑：王一玲

印 刷 者：北京市世界知识印刷厂

装 订 者：北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者：新华书店总店北京发行所

开 本：185×230 印张：30.5

版 次：2006 年 10 月第 1 版 2006 年 10 月第 1 次印刷

书 号：ISBN 7-302-13881-8/TN·362

印 数：1~3000

定 价：45.00 元

出版前言

微电子技术是信息科学技术的核心技术之一，微电子产业是当代高新技术产业群的核心和维护国家主权、保障国家安全的战略性产业。我国在《信息产业“十五”计划纲要》中明确提出：坚持自主发展，增强创新能力和核心竞争力，掌握以集成电路和软件技术为重点的信息产业的核心技术，提高具有自主知识产权产品的比重。发展集成电路技术的关键之一是培养具有国际竞争力的专业人才。

微电子技术发展迅速，内容更新快，而我国微电子专业图书数量少，且内容和体系不能反映科技发展的水平，不能满足培养人才的需求，为此，我们系统挑选了一批国外经典教材和前沿著作，组织分批出版。图书选择的几个基本原则是：在本领域内广泛采用，有很大影响力；内容反映科技的最新发展，所述内容是本领域的研究热点；编写和体系与国内现有图书差别较大，能对我国微电子教育改革有所启示。本套丛书还侧重于微电子技术的实用性，选取了一批集成电路设计方面的工程技术用书，使读者能方便地应用于实践。本套丛书不仅能作为相关课程的教科书和教学参考书，也可作为工程技术人员的自学读物。

我们真诚地希望，这套丛书能对国内高校师生、工程技术人员以及科研人员的学习和工作有所帮助，对推动我国集成电路的发展有所促进。也衷心期望着广大读者对我们一如既往的关怀和支持，鼓励我们出版更多、更好的图书。

清华大学出版社
2003.9

Operational Amplifiers-Theory and Design

影 印 版 序

我们非常高兴向同行们推荐 Johan H. Huijsing 教授所著的《运算放大器——理论与设计》一书。运放 (OpAmps) 作为独立器件, 在个人数据助理、通信、汽车电子、音影产品、仪器仪表、传感器等领域有广泛的应用。同时运放也是模拟系统的重要组成部分, 利用运放可以实现 A/D、D/A、有源滤波等多种功能。近几年中, 我国以运放为代表的模拟集成电路产品每年都有大幅度增长。在可以预见的未来, 随着数字集成电路技术的不断进步和集成电路市场的发展, 兼有模拟集成电路和数字集成电路的 SoC 或混合集成电路将会越来越受到重视, 这对集成电路研发人员提出了更高的要求。毫无疑问, 在很多产品领域, 高水平运放电路的设计, 不但直接影响产品性能, 也将影响到企业的创新能力。我们相信本书在中国的出版, 将会对提高该领域的教学、研究和产品设计水平产生积极的影响。

对于很多业内人士来说, Johan H. Huijsing 教授并不陌生, 他多年从事运放理论、设计和应用研究, 已经发表数百篇学术论文和几十项专利, 单独或合作完成十多本学术著作。在模拟电路领域有很高的国际知名度和影响力。由于他在技术科学方面的贡献, 荷兰政府曾经授予他 Simon Stevin Meester 奖。

Johan H. Huijsing 教授长期在著名的荷兰德尔夫特工业大学 (Delft University of Technology) 从事研究和教学, 也在知名企业 Philip 等公司研究部门担任过高级研究员或研究顾问, 这就使他的著作具有较高的学术视野和实际应用价值。

本书能够使电路设计者对运放的理论和设计有更加清晰和深入的理解。其核心是将所有的运放按拓扑形式分成九类主要结构, 系统介绍了运放电路的设计。这种分类方法有助于电路设计人员很快地识别、理解和选择合适的运放结构体系。这九类放大器涵盖了从一级至四级或更多级的放大器结构。书中对很多著名的设计形式进行了全面的评价, 给出了所有九类放大器在高频情况下的补偿技术, 特别给出了具有 “Rail-to-Rail” 输入输出范围的低压低功率结构; 对全差分运放和浮点运放的设计进行了深入讨论。同时, 结合对参数的测量技术, 通过宏模型和误差矩阵的形式对运放进行了表征。

全书共分 9 章, 第 1 章根据抽象化的线性有源网络单元的输入和输出端口的对外接地方式定义了四种基本形式的运放。第 2 章给出了上述四种基本形式运放的全部的线性参数, 通过这些参数可以对放大器进行定量描述。本章同时介绍了运放的宏模型和测量技术。第 3 章根据四种基本放大器的重要应用背景, 对放大器的误差来源进行系统的处理。第 4 章对输入级进行了分析和估算, 所考虑的重要方面包括偏压、补偿、噪声、共模抑制。同时, 对低压输入级的 “Rail-to-Rail” 输入电压范围进行了大量讨论。第 5 章给出了对推挽输出

级的分类，探索了三种可能的拓扑形式：电压跟随级、混合跟随级、“Rail-to-Rail”通用放大器级，给出了带有前反馈和后反馈偏置的 AB 类技巧。第 6 章的主要内容是将运放分为九类主要的结构体系。分类由两种二级运放、六种三级运放、一种四级或多级运放组成。给出了从一级到四级的所有九类放大器在高频情况下的补偿技术。第 7 章给出了九种主要类型放大器的设计范例，详细介绍了许多著名的运放。其中包括简单的 CMOS 运放、高频双极运放、精确双极型运放和 BiCMOS 运放；低压 CMOS 运放和双极型运放、带有高输出能力的 CMOS 和 BiCMOS 运放。第 8 章对含有共模反馈的全差分放大器的设计进行了分析讨论，特别是着重介绍了低压体系结构。第 9 章介绍了浮点运放实现的方法。

这本书读者对象为微电子专业、信号与系统专业、传感器与测试专业的硕士与博士研究生、高年级本科生，器件和电路系统设计工程师与技术管理人员。书中给出了一定数量的习题和模拟练习，以便于大家在学习过程中进行自我评估。

刘泽文，王志华

2006 年 9 月于清华大学微电子所

SUMMARY

A systematic circuit design of operational amplifiers is presented. It is shown that the topology of all operational amplifiers can be divided in nine main overall configurations. These configurations range from one gain stage up to four or more gain stages. Many famous designs are completely evaluated.

High-frequency compensation techniques are presented for all nine configurations. Special focus is on low-power low-voltage architectures with rail-to-rail input and output ranges.

The design of fully differential operational amplifiers and operational floating amplifiers is being developed. Also, the characterization of operational amplifiers by macromodels and error matrices is presented, together with measurement techniques for their parameters.

Problems and simulation exercises have been supplied for self-evaluation.

INTRODUCTION

The goal of this book is to equip the circuit designer with a proper understanding of the theory and design of operational amplifiers (OpAmps). The core of the book presents the systematic design of operational amplifiers. All operational amplifiers can be classified into a periodic system of nine main overall configurations. This division enables the designer to quickly recognise, understand, and choose optimal configurations.

Chapter 1 defines four basic types of operational amplifiers on the basis of the external ground connections of the input and output ports of generalized linear active network elements. Whether an input or output port needs to be isolated from ground has a big impact on the circuit design of the input and output stages, as will be shown in later chapters.

A complete set of linear parameters, by which each of the above four basic types of operational amplifiers can be quantified, is given in Chapter 2. This provides the reader with a sense of which parameters are most important. Chapter 2 also presents macromodels and measurement techniques for OpAmp parameters.

A systematic treatment of sources of errors in important applications of the above four basic types of operational amplifiers is presented in Chapter 3.

Input stages are evaluated in Chapter 4. Important aspects such as bias, offset, noise, and common-mode rejection are considered. Low-voltage input stages with a rail-to-rail input voltage range are extensively discussed.

A classification of push-pull output stages is presented in Chapter 5. Three possible topologies are explored: voltage follower stages, compound stages, and rail-to-rail general amplifier stages. Designs are presented with feedforward and feedback biasing class-AB techniques.

Emphasis is on voltage and current efficiency.

A classification of operational amplifiers into nine main overall configurations is presented in Chapter 6. The classification consists of two two-stage OpAmps, six three-stage OpAmps, and one four- or multi-stage OpAmp. High-frequency compensation techniques are developed for all configurations ranging from one gain stage up to four or more gain stages. Methods are presented for obtaining a maximum bandwidth over power ratio for certain capacitive load conditions. Slew-rate and distortion are also considered.

Chapter 7 presents design examples of each of the nine main configurations. Many well-known OpAmps are fully elaborated. Among them are simple CMOS OpAmps, high-frequency bipolar OpAmps, Precision bipolar and BiCMOS OpAmps, low-voltage CMOS and bipolar OpAmps, and OpAmps with a high output drive capability in CMOS as well as in BiCMOS technology.

The design of fully differential operational amplifiers with common-mode feedback is developed in Chapter 8. Special focus is on low-voltage architectures.

When the output port as well as input port are designed such that they are both isolated from ground, the most universal linear active network element is created: the operational floating amplifier. The concept of this OpAmp gives the designer the freedom to work with current signals as well as voltage signals. Realizations of operational floating amplifiers are developed in Chapter 9 also in relation to instrumentation amplifiers.

Problems and simulation exercises have been supplied for most of the chapters to facilitate self-evaluation of the understanding and design skills of the user of this book.

NOTATION

<i>OpAmp</i>	operational amplifier
<i>OA</i>	operational amplifier
<i>OIA</i>	operational inverting amplifier
<i>OVA</i>	operational voltage amplifier
<i>OCA</i>	operational current amplifier
<i>OFA</i>	operational floating amplifier
<i>GA</i>	general amplifier stage
<i>VF</i>	voltage follower stage
<i>CF</i>	current follower stage
<i>CM</i>	current mirror stage
<i>IA</i>	instrumentation amplifier
<i>a</i>	temperature coefficient
<i>A_v</i>	voltage gain
<i>A_{vo}</i>	DC voltage gain
<i>β</i>	current gain of bipolar transistor
<i>B_v</i>	voltage attenuation of feedback network
<i>C</i>	capacitor value
<i>C_{ox}</i>	specific capacitance of gate oxide
<i>C_M</i>	Miller capacitor value
<i>C_P</i>	parallel capacitor value
<i>D</i>	distortion
<i>f</i>	frequency
<i>f_T</i>	transit frequency of a transistor
<i>f_o</i>	zero-dB frequency
<i>g_m</i>	transconductance of a transistor
<i>i</i>	small-signal current
<i>I</i>	current
<i>I_B</i>	bias current
<i>I_C</i>	collector current
<i>I_D</i>	drain current
<i>I_E</i>	emitter current
<i>I_S</i>	supply current
<i>I_Q</i>	quiescent current

k	Boltzman's Constant
K	$= \mu C_{ox} W/L$
L	length of gate in MOS transistors
M	CMOS transistor
R	resistor value
S	signal
S_r	slew rate
T	generalized transistor
Q	bipolar transistor
v	small-signal voltage
V	voltage
V_B	bias voltage
V_{CC}	positive supply voltage with bipolar transistors
V_{DD}	positive supply voltage with MOS transistors
V_{EE}	negative supply voltage with bipolar transistors
V_G	generator voltage
V_{GS}	gate-source voltage
V_{GT}	active gate-source voltage ($V_{GS} - V_{TH}$)
V_S	total-supply voltage
V_{SN}	negative supply voltage
V_{SP}	positive supply voltage
V_{SS}	negative supply voltage with MOS transistors
V_T	thermal voltage kT/q
V_{TH}	threshold voltage of MOS device
W	width of gate in MOS transistors
μ	mobility of charge carriers

Extrinsic device parameters

R_L
C_L
C_M
R_D R_C
R_G R_B
R_S R_E

Intrinsic Small-signal transistor parameters $r_{ds} \ r_{ce} \ r_o$ $r_{gs} \ r_{be}$ $r_s \ r_e$ $C_{ds} \ C_{ce}$ $C_{gs} \ C_{be}$ $g_m \ g_m$ $\mu_n \ \mu_p$ $\beta_n \ \beta_p$

读者意见反馈卡

尊敬的读者：

感谢您购买本书！为了了解您的需求，以便我们为您提供更好的服务，请您在百忙之中填写下面的表格，并寄给我们。

请附您的资料（或附名片，如您是教师或学生，请特别注明您的专业/系列）

姓名： 职务：

工作或学习单位：

通信地址：

电话： 传真： E-mail：

1. 您获得此书的途径：

- ☐ 校内书店 ☐ 校外书店 ☐ 商场 ☐ 邮购
☐ 学校教材科 ☐ 其他

2. 一般情况下，哪些因素影响您购买图书：

- ☐ 作者及出版社 ☐ 封面设计及版式 ☐ 封面（封底）的内容
☐ 价格 ☐ 插图及表格 ☐ 内容实用性
☐ 其他

3. 您在采用了影印教材的同时，是否需要该书的翻译版？

- ☐ 是 ☐ 否

4. 您认为目前市场上比较短缺的图书有：

- ☐ _____ ☐ _____ ☐ _____
☐ _____ ☐ _____ ☐ _____

5. 您认为值得引进的外版书有：

- ☐ _____
☐ _____
☐ _____

6. 您对我们的工作有何意见、建议和要求：

- ☐ _____
☐ _____
☐ _____

如您是教师或学生，还请填写以下内容：

7. 您正在讲授或学习的相关课程有:

☐ _____ ☐ _____ ☐ _____
☐ _____ ☐ _____ ☐ _____

使用的教材为:

☐ _____	☐ 作者: _____	☐ 出版社: _____
☐ _____	☐ 作者: _____	☐ 出版社: _____
☐ _____	☐ 作者: _____	☐ 出版社: _____
☐ _____	☐ 作者: _____	☐ 出版社: _____
☐ _____	☐ 作者: _____	☐ 出版社: _____
☐ _____	☐ 作者: _____	☐ 出版社: _____

8. 是否正在采用或准备采用影印版教材?

☐ 是 ☐ 否

如果是, 书名: _____

出版社: _____ 原出版社: _____

课程名: _____ 学生人数: _____

9. 是否正在采用或准备采用翻译版教材?

☐ 是 ☐ 否

如果是, 书名: _____ 原出版社: _____

课程名: _____ 学生人数: _____

10. 是否准备采用本书或本书的翻译版作为您的教材?

本 书: ☐ 是 ☐ 否, 原因是: _____

翻译版: ☐ 是 ☐ 否, 原因是: _____

11. 您选用影印教材的主要原因是:

☐ 影印教材体系内容新颖	☐ 影印教材习题丰富且有特色
☐ 通过外版教材学习专业外语	☐ 其他 (您可以写详细些)

如有任何疑问和要求, 请与我们联系:

清华大学出版社

地址: 北京, 清华大学, 学研大厦, A604 室

邮编: 100084

电话: (010) 62770175-3208, 4608

传真: (010) 62770278

E-mail: hanbh@tup.tsinghua.edu.cn

国外大学优秀教材——微电子类系列（影印版）

书 目

书 名	书 号	定 价	购买册数
1. Phase-Locked Loops Design, Simulation, and Applications, Fifth Edition 锁相环设计、仿真与应用（第5版） Roland E. Best	7-302-07729-0	68.00 元 （含盘）	
2. Semiconductor Physics and Devices Basic Principles, Third Edition 半导体物理与器件——基本原理（第3版） Donald A. Neamen	7-302-07530-1	75.00 元	
3. CMOS Digital Integrated Circuits Analysis and Design, Third Edition CMOS 数字集成电路——分析与设计（第3版） Sung-Mo Kang, Yusuf Leblebici	7-302-09060-2	59.00 元	
4. Analysis and Design of Digital Integrated Circuits In Deep Submicron Technology, Third Edition 数字集成电路分析与设计——深亚微米技术（第3版） David A. Hodges, Horace G. Jackson, Resve A. Saleh	7-302-09061-0	55.00 元	
5. Design of Integrated Circuits for Optical Communications 光通信集成电路设计 Behzad Razavi	7-302-10720-3	48.00 元	
6. Design of Analog CMOS Integrated Circuits 模拟 CMOS 集成电路设计 Behzad Razavi	7-302-10886-2	68.00 元	
7. An Introduction to Semiconductor Devices 半导体器件导论 Donald A. Neamen	7-302-12451-5	69.00 元	
8. Fundamentals of Semiconductor Devices 半导体器件基础 Betty Lise Anderson, Richard L. Anderson	7-302-12450-7	78.00 元	
9. IC Mask Design Essential Layout Techniques 集成电路版图设计 Christopher Saint, Judy Saint	7-302-07730-4	58.00 元	
10. IC Layout Basics A Practical Guide 集成电路版图基础 Christopher Saint, Judy Saint	7-302-08356-8	45.00 元	

书 名	书 号	定 价	购买册数
11. RF Microelectronics 射频微电子 Behzad Razavi	7-302-07522-0	35.00 元	
12. Complete Digital Design 完整的数字设计 Mark Balch	7-302-07731-2	45.00 元	
13. The Art of Analog Layout 模拟电路版图的艺术 Alan Hastings	7-302-08226-X	72.00 元	
14. Digital Integrated Circuits A Design Perspective, Second Edition 数字集成电路——设计透视 (第 2 版) Jan M. Rabaey	7-302-07968-4	68.00 元	
15. Operational Amplifiers Theory and Design 运算放大器——理论与设计 Johan H. Huijsing	即将出版		

有任何问题, 欢迎垂询:

100084 清华大学出版社 学研大厦 A604

传真: 010-62770278

电话: 010-62770175-4103, 3208

E-mail: hanbh@tup.tsinghua.edu.cn

CONTENTS:

SUMMARY	xvii
INTRODUCTION	xix
NOTATION	xxi

1. DEFINITION OF OPERATIONAL AMPLIFIERS ...	1
Nullor Concept.	1
Classification based on number of floating ports	2
1.1 Operational Inverting Amplifier (OIA)	3
Current-to-Voltage Converter	3
1.2 Operational Voltage Amplifier (OVA)	4
Non-inverting Voltage Amplifier	4
Voltage Follower (VF)	5
1.3 Operational Current Amplifier (OCA)	6
Current Amplifier	6
Current Followers (CF)	7
1.4 Operational Floating Amplifier (OFA)	8
Voltage-to-Current Converter	9
Voltage and Current Follower (VCF)	10
1.5 Conclusion	10
1.6 References	12
2. MACROMODELS	15
2.1 Operational Inverting Amplifier (OIA)	15
Definition of: offset voltage and current, input and output impedance, gain	16
2.2 Operational Voltage Amplifier (OVA)	17
Definition of: input bias current, input common-mode rejection ratio	17
2.3 Operational Current Amplifier (OCA)	19
Definition of: output bias current, output common-mode current rejection ratio	19
2.4 Operational Floating Amplifier (OFA)	20