

跨导型放大器

● 原理 ● 电路 ● 应用

(国家自然科学基金资助项目)

赵玉山 编著



电子工业出版社

B.7637
776

跨导型放大器

●原理●电路●应用

(国家自然科学基金资助项目)

赵玉山 编著

电子工业出版社

DT16/19
(京) 新登字055号

内 容 简 介

本书讲述跨导型电子放大器的基本概念, 双极型和MOS型集成跨导运算放大器的内部电路、性能特性及研究进展; 讨论跨导型放大器的线性、非线性应用原理, 并提供丰富的应用电路实例; 对跨导型放大器的滤波器应用作了重点分析, 系统介绍OTA-C连续时间滤波器的设计方法。此外, 还讨论了跨导运算放大器的宏模型, 以便于进行电路和系统的计算机模拟。

本书适宜从事集成电路研究与生产、电子技术应用、电路和系统设计等领域的科技人员阅读; 也可作为高等学校有关专业硕士研究生和高年级本科生的教材或教学参考书。

跨导型放大器

• 原理 • 电路 • 应用

编著者 赵玉山

特约编辑 张成全

*

电子工业出版社出版

北京市海淀区万寿路173信箱(100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

北京市燕山联营印刷厂印刷

*

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 10.125 字数: 263千字

1995年3月第一版 1995年3月北京第一次印刷

印数: 2000册 定价: 15.00元

ISBN 7-5053-2779-8/TN·807

前 言

跨导型放大器是一种电压输入、电流输出的电子放大器，它包括跨导运算放大器 (Operational Transconductance Amplifier) 和有源跨导元件 (Transconductance Element, Transconductor)。1972年，国外开始推出双极型跨导运放产品，国内随后也有了类似产品。然而由于本身性能的缺陷及人们对它缺少研究，长期处于停滞不前的状态。

近年来，随着电流模式信号处理方法的兴起，跨导型放大器引起人们新的注意，其电路设计和应用探索正在成为一个活跃的研究领域，使电路工作者感到极大兴趣。这一局面的出现，有以下几方面原因：第一，现有主要电子器件 (双极型晶体管和场效应晶体管) 都是电流输出型器件，用其设计电流输出的跨导放大器，不仅结构紧凑、电路简单，而且可消除极间电容借助密勒效应对高频特性的困扰，使增益和带宽彼此独立，可以兼得。第二，电流量具有很强的信号处理能力，例如，模拟技术中的几种最基本信号处理功能 (加/减、乘以常数、积分等)，用电流信号实现比用电压信号简便得多。因此用电流输出型有源器件构成的电路和系统，在简化结构、降低功耗、扩展频域等方面可望提供极富吸引力的新成果。第三，MOS集成电路技术的发展，推动着新型跨导放大器的研究与进展。基于MOS晶体管本身性能特点及研究者的努力，早期双极型跨导运放的性能缺陷已为MOS型器件所克服，为其应用创造了良好的自身条件。

冷静思考，跨导型放大器的重新崛起，也是合乎科学技术发展规律的。因为从网络理论看，电子放大器是一种线性受控电源；按照控制量、被控制量是电压，还是电流划分，应该有四种

受控电源，即人们熟知的VCVS、CCCS、VCCS、CCVS；与之相对应，集成放大器也应该有四种类型、即电压型、电流型、跨导型、跨阻型；这四种放大器的关系理应是各有所长、各有所用、相互补充、共同发展、形成一个完整、协调的集成放大器家族。因此原来那种电压型放大器一枝独秀、其他类型放大器默默无闻的局面在理论上和技术上都是不完善的，终究要被打破的。果然，电流模式信号处理方法和技术的发展，给跨导型、电流型放大器注入了强大活力，不仅为有源器件电路综合技术开拓了新天地，也使集成放大器的发展获得了新的生长点。可以预见，随着研究工作的深入和技术的发展，跨导型放大器将在未来电子系统中扮演重要而恰当的角色。

作者在近年来对跨导型放大器不断学习和研究基础上，博采国内、外有关研究成果写成本书，目的在于：阐明跨导型放大器的基本概念、性能特色和应用原理；推荐国内、外在该领域的优秀研究成果；揭示其广泛的应用潜力和巨大发展前景；期望本书能使我国集成电路研究与生产、电子技术应用、电路与系统设计等领域的工作者对跨导放大器增添兴趣，促使这一新型有源器件更快地发展。

本书共分七章，第一章阐明跨导型放大器的基本概念，作为入门。第二章介绍早期双极型跨导运算放大器的典型电路及存在问题。第三章介绍近期MOS型跨导放大器的研究进展与研究成果，阐明不同电路的设计原理，是本书的重点内容之一。第四章讨论跨导放大器的简单模型和宏模型，以备读者在进行计算机模拟时使用。第五、六、七章内容均属跨导型放大器的应用，其中，第五章对各种线性、非线性应用原理进行分析，是有关应用方面的基础知识。第六章讨论一个专门课题：OTA-C连续时间模拟滤波器的设计方法，它是近年来跨导型放大器应用研究最为活跃、发表论著成果最为丰硕的一个领域。第七章列举双极型跨导运算放大器典型应用实例，供读者在使用时参考。纵观本书内

容，既注重基本电路及应用原理的理论分析，又兼顾典型产品及应用实例的简要说明；既注意介绍早期发展情况，又着力展示近期研究成果。读者不难从本书找到适合不同要求的应用实例，也可以从中发现饶有兴趣的研究课题。

天津大学电子工程系庞维珍教授参加本书第一、二章的编写，并对全书定稿提出很多宝贵意见。自动化系硕士研究生孙平、赵文钦作了部分电路的计算机模拟，绘制全书插图并誉写全部书稿。

由于作者学识水平所限，书中难免存在缺点和错误，希望广大读者和专家们指正。

编著者

1994年4月于天津大学

目 录

第一章 跨导型放大器的基本概念	1
§ 1.1 四种基本类型放大器性能与模型	1
1.1.1 电压型放大器	2
1.1.2 跨导型放大器	3
1.1.3 电流型放大器	4
1.1.4 跨阻型放大器	5
1.1.5 四种类型放大器的区别和联系	6
§ 1.2 电压型和跨导型集成运算放大器比较	8
1.2.1 双极型晶体管等效电路	9
1.2.2 有源负载电压放大级	10
1.2.3 简化结构电压型集成运算放大器	11
1.2.4 简化结构跨导型集成运算放大器	14
1.2.5 两种集成运算放大器性能比较	15
参考文献	17
第二章 双极型跨导运算放大器电路	19
§ 2.1 结构框图和基本单元电路	19
2.1.1 结构框图	19
2.1.2 射极耦合差动式跨导放大级	20
2.1.3 电流镜电路	23
2.1.4 差动式电流传输电路	25
§ 2.2 CA3060跨导运算放大器	27
2.2.1 主要特点	27
2.2.2 电路分析	27
§ 2.3 CA3080跨导运算放大器	29
2.3.1 主要特点	29
2.3.2 电路分析	30

§ 2.4	LM13600跨导运算放大器	31
2.4.1	主要特点.....	31
2.4.2	电路分析.....	31
§ 2.5	双极型跨导运算放大器的参数	35
	参考文献.....	38
第三章	MOS型跨导运算放大器研究.....	39
§ 3.1	概述	39
§ 3.2	结构框图和基本单元电路	40
3.2.1	结构框图.....	40
3.2.2	MOS晶体管的基本电特性.....	42
3.2.3	基本源耦差分对.....	46
3.2.4	MOS电流镜.....	48
§ 3.3	基本型CMOS跨导运算放大器	52
3.3.1	电路结构.....	52
3.3.2	直流传输特性.....	53
3.3.3	共模输入电压允许范围.....	55
§ 3.4	尾电流提升CMOS跨导运算放大器	56
3.4.1	尾电流提升原理.....	56
3.4.2	电路结构.....	58
3.4.3	主要性能.....	59
§ 3.5	具有源极反馈电阻的CMOS跨导运算放大器.....	61
3.5.1	源极反馈电阻.....	61
3.5.2	电路结构.....	62
3.5.3	主要性能.....	63
§ 3.6	带辅助源耦对的CMOS跨导放大器	65
3.6.1	辅助源耦对负反馈原理.....	65
3.6.2	带辅助源耦对的跨导放大器.....	67
3.6.3	主要性能.....	70
§ 3.7	辅助电压源交叉耦合CMOS跨导放大器	70
3.7.1	交叉耦合原理.....	70
3.7.2	交叉耦合差动式跨导放大器.....	71

3.7.3 主要性能.....	74
§ 3.8 非对称源耦输入级CMOS跨导运算放大器	74
3.8.1 非对称源耦对.....	74
3.8.2 非对称源耦对跨导放大级.....	77
3.8.3 具有非对称差动输入级的跨导运算放大器.....	80
§ 3.9 带补偿电流源的CMOS跨导运算放大器	83
3.9.1 补偿电流源作用原理.....	83
3.9.2 带补偿电流源的差动跨导放大级.....	84
3.9.3 输入级带补偿电流源的跨导运算放大器.....	85
3.9.4 主要性能.....	85
§ 3.10 CMOS对管交叉耦合跨导运算放大器.....	87
3.10.1 CMOS对管交叉耦合原理.....	87
3.10.2 CMOS对管交叉耦合跨导放大级.....	90
3.10.3 CMOS对管交叉耦合跨导运算放大器.....	92
§ 3.11 基于四管跨导元件的跨导运算放大器	94
3.11.1 四管跨导元件	94
3.11.2 基于四管跨导元件的跨导运放电路	96
3.11.3 主要性能.....	97
§ 3.12 多输入端CMOS跨导运算放大器	97
3.12.1 特性与模型.....	97
3.12.2 一种多输入端CMOS跨导运算放大器电路.....	99
3.12.3 主要性能	101
参考文献.....	102
第四章 跨导运算放大器的模型	104
§ 4.1 概述	104
§ 4.2 OTA的电路符号和简单模型	106
4.2.1 OTA的符号.....	106
4.2.2 小信号理想模型.....	107
4.2.3 简单非理想模型.....	108
4.2.4 偏置电路模型.....	109
§ 4.3 OTA基本非线性宏模型	110

4.3.1	宏模型电路结构	110
4.3.2	宏模型电路描述	111
4.3.3	宏模型参数确定方法	113
§ 4.4	OTA改进非线性宏模型	116
4.4.1	电路描述与参数选取	116
4.4.2	饱和特性的模拟方法	118
	参考文献	120
第五章	跨导运算放大器应用原理	121
§ 5.1	概述	121
§ 5.2	压控电压放大器	122
5.2.1	基本反相及同相放大器	122
5.2.2	全OTA电压放大器	126
5.2.3	带输出缓冲级的电压放大器	127
5.2.4	带扩大输入范围及调零措施的电压放大器	128
5.2.5	负反馈电压放大器	129
5.2.6	常规电压型运算放大器	131
§ 5.3	压控模拟电阻	132
5.3.1	接地模拟电阻	132
5.3.2	扩大电压范围的接地模拟电阻	135
5.3.3	浮地模拟电阻	136
5.3.4	扩大电压范围的浮地模拟电阻	137
§ 5.4	压控回转器	139
5.4.1	接地回转器	140
5.4.2	浮地回转器	141
§ 5.5	压控模拟电感	142
5.5.1	接地模拟电感	142
5.5.2	扩大电压范围的接地模拟电感	144
5.5.3	浮地模拟电感	145
5.5.4	一种新颖的浮地模拟电感	146
§ 5.6	压控频变负电阻	148
5.6.1	接地频变负电阻	148

5.6.2	浮地频变负电阻	149
§ 5.7	压控电容乘法器	150
5.7.1	接地电容乘法器	151
5.7.2	浮地电容乘法器	153
§ 5.8	加法器和积分器	154
5.8.1	加法器	154
5.8.2	积分器	156
5.8.3	带输入衰减器和输出缓冲级的积分器	157
5.8.4	积分-加法器	158
§ 5.9	模拟乘法器	159
5.9.1	基本模拟乘法器	159
5.9.2	改进的模拟乘法器	161
§ 5.10	幅度调制器	163
§ 5.11	一阶有源滤波器	164
5.11.1	一阶低通滤波器	165
5.11.2	一阶高通滤波器	169
5.11.3	一阶低通-高通滤波器	170
5.11.4	一阶斜坡均衡器	172
5.11.5	一阶相位均衡器	176
§ 5.12	二阶有源滤波器	180
5.12.1	双二阶函数	180
5.12.2	单OTA双二阶滤波器	181
5.12.3	双OTA双二阶滤波器	183
5.12.4	三OTA双二阶滤波器	184
5.12.5	五OTA通用双二阶滤波器	187
5.12.6	多OTA通用双二阶滤波器	189
§ 5.13	压控正弦波振荡器	191
5.13.1	OTA理想正交振荡器	191
5.13.2	双OTA正交振荡器	193
5.13.3	三OTA正交振荡器	194
5.13.4	基于带通滤波器的正弦波振荡器	196

§ 5.14	非线性函数发生器	198
5.14.1	乘法器与除法器	198
5.14.2	平方器和指数器	201
5.14.3	开平方器	202
5.14.4	分数指数器	203
5.14.5	分段线性函数发生器	204
§ 5.15	人工神经网络	207
5.15.1	人工神经网络硬件实现方法	207
5.15.2	神经元的模型	208
5.15.3	具有N个突触和一个集总细胞体的神经元电路	209
5.15.4	具有N个突触和N个分布细胞体的的神经元电路	210
5.15.5	OTA突触及非线性负载电路	212
§ 5.16	各种应用中的 OTA跨导压控电路	215
5.16.1	单OTA跨导压控电路	215
5.16.2	多OTA同步跨导压控电路	217
	参考文献	219
第六章	OTA-C连续时间模拟滤波器设计方法	222
§ 6.1	概述	222
6.1.1	几种可全集成滤波器比较	222
6.1.2	关于二阶OTA-C滤波器常见设计方法	224
6.1.3	关于高阶OTA-C滤波器直接实现法	225
§ 6.2	由有源RC网络生成 OTA-C 滤波器	226
6.2.1	基本设计步骤	226
6.2.2	由单运放有源RC电路生成OTA-C滤波器	226
6.2.3	由双运放有源RC电路生成OTA-C滤波器	228
6.2.4	由三运放有源RC电路生成OTA-C滤波器	230
§ 6.3	信号流图法设计双二阶 OTA-C 滤波器	233
6.3.1	基本设计步骤	233
6.3.2	基本电路模块及其信号流图	235
6.3.3	二阶低通函数的四种信号流图及电路模拟	235
6.3.4	双二阶函数的信号流图及电路模拟	239

§ 6.4	方块图法设计双二阶 OTA-C 滤波器	243
6.4.1	基本设计步骤	244
6.4.2	基本电路模块及其方块图	244
6.4.3	特征方程式的方块图和电路模拟	247
6.4.4	含传输零点的方块图和电路模拟	250
§ 6.5	基于参数可控要求的双二阶滤波器	
	模块设计法	257
6.5.1	基本设计步骤	257
6.5.2	基本模块	257
6.5.3	双二阶传输函数的基本模块表示法	259
6.5.4	根据参数可控要求选取模块系数	260
§ 6.6	多环反馈法设计高阶 OTA-C 滤波器	265
6.6.1	任意 n 阶传输函数的信号流图和方块图	266
6.6.2	通用 n 阶 OTA-C 滤波器电路	269
§ 6.7	模拟无源 LC 梯形电路法设计高阶 OTA-C	
	滤波器	271
6.7.1	基本设计步骤	271
6.7.2	按原型 LC 梯形电路作状态变量框图	271
6.7.3	模拟 LC 梯形电路的 OTA-C 电路	274
	参考文献	275
第七章	跨导运算放大器应用电路实例	277
§ 7.1	3080 型号 OTA 应用电路	277
7.1.1	双通道线性多路传输器	277
7.1.2	采样-保持电路	280
7.1.3	调幅电路	281
7.1.4	四象限模拟乘法器	284
7.1.5	双通道数据选择/译码器	285
7.1.6	高增益电压放大器及高精度电压跟随器	287
7.1.7	脉冲产生与整形电路	289
§ 7.2	13600 型号 OTA 应用电路	291
7.2.1	压控电压放大器	291

7.2.2	自动增益控制放大器	292
7.2.3	立体声音量控制电路	293
7.2.4	调幅电路	294
7.2.5	压控电阻器	294
7.2.6	一阶压控滤波器	296
7.2.7	二阶压控滤波器	296
7.2.8	正弦波压控振荡器	299
7.2.9	脉冲波压控振荡器	299
7.2.10	施密特触发器	301
7.2.11	采样-保持电路	302
7.2.12	峰值检测和保持电路	302
7.2.13	斜坡和保持电路	303
7.2.14	电压基准电路	304
7.2.15	对数放大器	305
7.2.16	对数电流源	306
7.2.17	零稳态功耗定时器	307
7.2.18	脉宽调制器	308
7.2.19	多路选择器	309
	参考文献	310

第一章 跨导型放大器的基本概念

跨导型放大器是电子放大器的四种基本类型之一。按照电路结构划分,跨导型放大器有两种,一种是跨导运算放大器^①,另一种是有源跨导元件^②(或称跨导放大器)。两者的主要区别是:跨导运算放大器由多级电路组成,均采用双边对称结构,且大多数具有增益可调节性能。有源跨导元件一般由单级电路构成,采用单边电路或对称式电路结构,不要求增益可调节性能。本书重点讨论跨导运算放大器的有关知识,学好了这方面的内容,有源跨导元件的问题可以迎刃而解。

本章介绍跨导型放大器的基本概念,主要内容有:四种基本类型放大器的特性与模型,电压型和跨导型集成放大器的性能比较。

§ 1.1 四种基本类型放大器性能与模型

从网络角度看,电子放大器是一种线性受控电源。按照控制量、被控制量是电压还是电流划分,存在四种受控电源,即人们熟知的电压控制电压源(VCVS)、电压控制电流源(VCCS)、电流控制电流源(CCCS)和电流控制电压源(CCVS)。与之相对应,电子放大器也应该有四种类型,即电压型、跨导型、电流型和跨阻型。这四种放大器的关系应该是各有所长,各有所用,互相补充,共同发展,形成一个完整的电子放大器家族。

① 英文名称是Operational Transconductance Amplifier.

② 英文名称有Transconductance Element, Transconductor, Voltage to Current Transducer等。

本节讨论四种基本类型放大器的性能与模型，以便了解它们的相互区别与联系。

1.1.1 电压型放大器

电压放大器将电压输入信号放大，提供电压输出信号，是一种电压控制电压源。电压放大器的增益是输出电压与输入电压的比值，是一个没有量纲的纯数。电压放大器在直流（或低频）信号下的电路模型如图1-1所示。

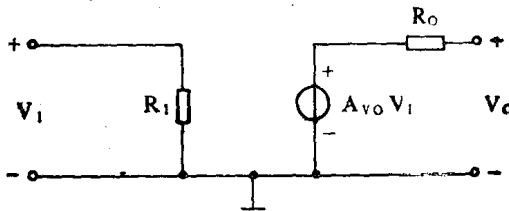


图 1-1 电压放大器的模型

图1-1模型电路中包含一个增益为 A_{vo} 的电压控制电压源，一个衡量从信号源吸取电流大小的输入电阻 R_i ，一个衡量向负载提供输出电流时输出电压稳定程度的输出电阻 R_o 。

具体应用中，电压放大器的输入端与具有内阻 R_s 的信号源 V_s 相连，输出端接有负载电阻 R_L 。这时，输出电压只是受控电压 $A_{vo}V_i$ 的一部分，其表达式为

$$V_o = A_{vo}V_i \frac{R_L}{R_o + R_L} \quad (1-1)$$

电压增益的表达式为

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = A_{vo} \frac{R_L}{R_o + R_L} \quad (1-2)$$

当 $R_L = \infty$ 时， $A_v = A_{vo}$ 。所以， A_{vo} 称为开路电压增益， A_v 则称为负载电压增益。为了使 A_v 尽可能接近 A_{vo} 的数值， R_o 必须远小于 R_L 。换句话说，对于给定的负载电阻 R_L ，在设计电压放大器时，必须使其输出电阻远小于 R_L 。

另一方面,放大器有限的输入电阻也会使 R_s 在输入端引起分压作用,使得只是有源电压信号 V_s 的一部分到达放大器的输入端,即

$$V_1 = \frac{R_1}{R_s + R_1} V_s \quad (1-3)$$

为了使得耦合到放大器输入端的电压信号 V_1 尽可能接近源电压信号 V_s ,必须使放大器的输入电阻远大于信号源电阻。

理想电压放大器的条件是 $R_o = 0$ 和 $R_1 = \infty$,在这种条件下, A_v 恒等于 A_{v0} ,而其电流增益和功率增益恒等于无穷大。

1.1.2 跨导型放大器

跨导型放大器将电压输入信号放大,提供电流输出信号,是一种电压控制电流源。跨导放大器的增益是输出电流与输入电压的比值,具有电导的量纲西门子(S)。由于决定增益的输出电流和输入电压不是在同一节点测量的,而是分别在输出端和输入端测量的,因此称其增益为跨导,称这种放大器为跨导型放大器。跨导放大器对直流(或低频)信号的模型如图1-2所示。

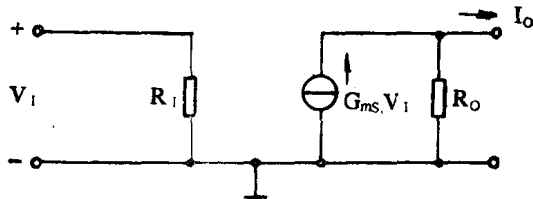


图 1-2 跨导放大器的模型

在图1-2中, $G_{ms}V_1$ 是增益为 G_{ms} 的电压控制电流源; R_o 是输出电阻,它衡量随负载电阻变化输出电流的稳定程度; R_1 是输入电阻。

当在输入端连接具有内阻 R_s 的电压源 V_s ,而在输出端连接负载电阻 R_L 时,跨导放大器输出电流和跨导增益的表达式分别为