



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

现代电子技术

席德勋 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

现代电子技术

席德勋 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

(京)112 号

内容提要

本书为教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向 21 世纪课程教材和教育部“九五”规划国家教委重点教材。本书是南京大学教授根据其多年的教学经验及其在国外工作的感受写出。本书从实用的电子应用技术出发,以高速、高分辨率模拟电路、高速数字电路、新型有源滤波器和非线性电路为基点,介绍并分析高性能电路的构成方法和应用原理,其中的具体电路及应用实例十分丰富。该课作为电子技术基础的后续课,可使学生接受先进技术并掌握其应用方法,有利于培养适应 21 世纪需要的高科技人材。

本书可作为高等学校电子学专业的教科书,也可供其他专业选用和社会读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

现代电子技术/席德勋编著. —北京:高等教育出版社
1999

ISBN 7-04-007422-2

I. 现… II. 席… III. 电子技术 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 07863 号

现代电子技术

席德勋 编著

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010—64054588

传 真 010—64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 中国科学院印刷厂

纸张供应 山东高唐纸业集团总公司

开 本 787×960 1/16

版 次 1999 年 9 月第 1 版

印 张 24.5

印 次 1999 年 9 月第 1 次印刷

字 数 450 000

定 价 25.60 元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等

质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

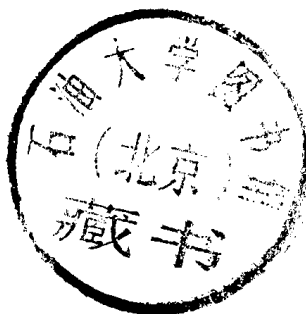
gc13/10



面向 21 世纪课程教材



普通高等教育“九五”
国家教委重点教材



前 言

当前正值我国科学技术和现代工业飞速发展的时代，无论在科学研究中（例如在作为基础科学的高能物理中对基本粒子的实验研究），还是在高新技术研究中（例如航空航天技术），对数据采集和处理过程的要求往往是：测量精度高、数据容量大、采集速度快、信息传送和处理速度快以及过程控制智能化。为了实现上述要求，无不采用最新的电子技术成就。为此，在高等学校中，有必要在学习“电子技术基础”的基础上，开设“现代电子技术”。

“现代电子技术”以高速高分辨率模拟电路、高速数字电路、新型有源滤波电路和非线性电路为基点，着重讲述近年来电子技术的成就和应用。为使学习者易于学习，书中除概述了一些电路的基本知识以和“电子技术基础”衔接外，在讲述新内容时引用了大量实用的电路和数据表。“现代电子技术”以讲授高速、高分辨率、高性能电路和模块的工作原理、构成方法及其应用为主，并适当进行数学推导和证明。在篇幅上，着重于模拟电路和模拟数字的相互转换，数字电路部分则着重于高速发射极耦合电路。这样不仅有利于培养学习者分析和运用电路的能力，也可使其得到适当的理论计算的训练。本课程内容较新，引用的参考文献达一百余篇，绝大多数是80年代以来的文献和书籍，其中一半是90年代的资料。

本书第一章至第三章是模拟部分，第四章至第六章为模拟数字转换部分，第七章至第十章为数字部分和非线性电路部分。第一章重点讲述高速电流放大及其噪声和畸变以及现代高速运算放大器的构成方法，使学习者能够了解高速运算放大器的结构特点和使用方法。第二章讲述仪器放大器和隔离放大器的原理、结构特点和用法（包括在生物医学测量中的应用）。第三章讲述各类有源滤波器和通用有源滤波器的特性和构成方法，还讲述了三种新型有源滤波器：运算跨导放大器有源滤波器、开关电容滤波器和开关电流滤波器，使学习者对新型集成电路滤波器有所了解。第四章着重讲述高速高分辨采样保持放大器的构成方法、特点和用法，还介绍了开关电流采样保持方法。第五章在模数转换器分类的基础上，主要讲述闪电式模数转换和分量程模数转换方法、数字校正方法、开关电容模数转换方法，模数转换电路性能参数的测试和高分辨率模数转换器。第六章讲述高速数模转换的构成方法和特性。第七章讲述发射极耦合逻辑的基本电路、连接技术、信号传输以及电路的应用。第八章讲述各种非线

性电路的原理、构成和应用，主要讲述对数-反对数电路（包括用于对数压缩的高速对数链）、高速乘法器和除法器、比较器和均方根直流转换。第九章着重讲述数字鉴频鉴相方法和频率合成技术。第十章讲述数字控制器、电压与频率的相互转换和高速高效率伺服系统。

“现代电子技术”的课堂讲授以各种电路的原理、构成方法、高性能的实现及其应用为主：课内讨论以分析电路特性为主：课外习题以适当的设计、计算为主。通过上述教学环节，希望学习者在学习“电子技术基础”的基础上，能对现代电子技术有一个基本了解，且有一定的分析和应用能力。

本书承信息与电子科学教学指导委员会凌燮亭教授仔细审阅，并提出了很多宝贵意见，吴培亨教授、程时昕教授、严志华教授和沈振宇教授对本书也提出了很多有益的建议，使作者受益匪浅，特此表示衷心感谢。

编 者

1997年7月1日

责任编辑	刘素馨
封面设计	张楠
责任绘图	李维平
版式设计	马静如
责任校对	马桂兰
责任印制	宋克学

目 录

第一章 高速运算放大	1
第一节 运算放大器基础	1
一、运算放大器的性能指标	2
二、运算放大器的选择	5
三、稳态应用	7
四、瞬态应用	8
第二节 高速电压反馈运算放大器	9
第三节 高速电流反馈运算放大器	13
一、闭环带宽和闭环增益	14
二、调整时间的测量	15
三、电流反馈放大器的应用	16
第四节 高速电流反馈运算放大器的噪声和畸变	17
一、运算放大器的噪声模型	17
二、交调畸变	18
第五节 现代高速运算放大器的结构	21
一、现代高速运算放大器的分类	22
二、高速运算放大器的结构	25
第二章 仪器放大器和隔离放大器	28
第一节 仪器放大器	28
一、仪器放大器的特性	29
二、增益设定方法	30
第二节 隔离放大器	34
一、隔离放大器的特性	34
二、光隔离放大器	35
三、电容隔离放大器	36
四、变压器隔离放大器	37
第三节 仪器放大器和隔离放大器的应用	39
一、直流-直流转换	39
二、心电信息的放大与传递	40
三、隔离转换器	41
四、数据获取系统	43

第三章 有源滤波器	47
第一节 有源滤波器的构成	47
一、无源滤波器	47
二、一阶有源滤波器	49
三、滤波器的阶跃响应	49
第二节 有源低通滤波器	50
第三节 有源高通滤波器	55
第四节 有源带通滤波器	60
第五节 状态变量滤波器	65
第六节 有源带阻滤波器	66
第七节 通用有源滤波器	69
一、通用带通滤波器的输入方式	70
二、转换方法	73
第八节 运算跨导放大器滤波方法	77
一、运算跨导放大器	77
二、一阶滤波器	81
三、二阶滤波器	84
四、偏流的控制	85
五、有源 RC 滤波器到运算跨导放大器电容滤波器的转换	85
第九节 开关电容滤波方法	89
一、开关电容电路原理	90
二、开关电容积分器	92
三、一阶阻尼开关电容滤波器	95
四、一阶高通开关电容滤波器	96
五、高阶开关电容滤波器	97
六、开关电容滤波器举例	103
第十节 开关电流滤波方法	104
一、电流存储原理	105
二、开关电流放大和跟踪保持	105
三、开关电流积分器	106
第四章 高速高分辨率采样保持放大器	109
第一节 采样保持放大器及其特性	109
一、跟踪模式	110
二、跟踪到保持过渡	111
三、保持模式	112
四、保持到跟踪过渡	113
第二节 高速开环采样保持放大器	113

一、开环采样保持	113
二、电流复用采样保持	114
三、差动跟踪采样保持	118
第三节 高精度采样保持放大器	119
第四节 积分保持放大器	122
第五节 开关电流采样保持放大器	123
一、开关电流存储单元	124
二、差动 BiCMOS 开关电流采样保持放大器	125
第六节 采样保持放大器的应用	126
一、数据获取系统	127
二、数据分配系统	127
三、峰值检波器	128
四、模拟流水线延迟	129
五、驱动闪电式模数转换器	130
第五章 高速高分辨率模数转换	131
第一节 模数转换器的结构及其性能指标	137
第二节 高速模数转换	141
一、逐次近似模数转换法	141
二、闪电式模数转换法	147
三、分量程模数转换方法	156
四、流水线模数转换方法	173
五、谐振隧道二极管模数转换方法	177
第三节 高分辨率模数转换	180
一、14 位高分辨率高速模数转换器	180
二、16 位高分辨率高速模数转换器	182
三、18 位高分辨率模数转换器	183
第四节 开关电容技术在模数转换器中的应用	188
一、误差补偿模数转换技术	188
二、电压转换开关方法	195
第五节 模数转换器性能参数测试	201
一、静态线性测试	201
二、动态线性测试	203
三、包络与拍频测试	204
四、离散傅里叶变换和快速傅里叶变换的应用	206
五、瞬态响应测试	209
第六章 高速数模转换	211
第一节 数模转换器的基本特性	211

第二节 高速数模转换	214
第三节 几种数模转换器	216
一、电压输出数模转换器	217
二、电流输出数模转换器	218
三、视频数模转换器	220
四、对数数模转换器	223
第七章 发射极耦合逻辑电路	225
第一节 发射极耦合逻辑基本电路	226
一、基本 ECL 门电路	226
二、ECL 门电路功能实现方法	228
三、ECL 触发电路	229
第二节 发射极耦合逻辑电路的设计原则	231
第三节 连接技术	236
一、传输线类型	237
二、ECL 电路传输线的用法	239
三、系统间的连接	244
第四节 传输线	250
一、传输线设计	251
二、微带和介质线的信号传输延迟	253
三、微带传输线技术中的时域反射测量	253
四、传输线并联负载效应	257
五、终端输出分析	261
六、串联阻尼分析	263
第五节 发射极耦合逻辑应用	264
一、ECL 和 TTL 接口	264
二、晶体控制振荡器	266
三、可编程计数器	269
第八章 非线性电路	273
第一节 对数和反对数放大器	273
一、对数放大器	273
二、反对数放大器	277
三、对数放大器的性能指标	277
四、通用对数放大器	278
五、逐级检波对数放大器	279
六、对数放大器的应用	284
第二节 乘法器和除法器	285
一、乘法特性	286

二、跨导乘法器	287
三、对数 - 反对数乘法器	291
四、脉冲调制乘法器	293
五、乘法器的性能指标	294
六、除法器	295
第三节 限幅器和比较器	298
第四节 峰值检波器和绝对值放大器	303
第五节 均方根直流转换	305
一、均方根直流转换方法	306
二、均方根直流转换器的特性	307
三、高精度宽带均方根直流转换器	308
四、均方根直流转换器的调整与应用	310
第九章 频率合成	313
第一节 基本锁相环	313
第二节 鉴相器	316
一、双平衡混频鉴相器	316
二、数字鉴频鉴相器和电荷泵	316
三、AD9901 鉴频鉴相器	318
第三节 AD9901 鉴相器应用	321
第四节 频率合成技术	325
一、直接数字合成技术	325
二、锁相环数字合成技术	327
第十章 数字控制	329
第一节 数字控制器和无波纹系统	329
一、采样器	329
二、采样定理	331
三、最快响应过程	333
四、快速无波纹控制	335
第二节 单片机数字控制器	337
一、频率稳定	337
二、适应式跟踪控制	343
第三节 电压与频率的相互转换	344
一、电压 - 频率转换原理	344
二、电压 - 频率转换器	346
三、频率 - 电压转换	348
四、电压 - 频率转换器的应用	349
第四节 步进电机驱动器	353

6 目 录

一、晶体管驱动	354
二、可控硅驱动方法	354
三、步进电机高速驱动方法	358
四、VMOS 驱动方法	361
现代电子技术习题	364
参考文献	371

第一章 高速运算放大

在现代电子技术中，对数据获取的速度和数据的精度要求越来越高，高性能放大器往往用来驱动模数转换器以及高速数模转换器输出的电流-电压转换器，因而宽带、直流耦合、低畸变以及小上冲、快调整时间成为放大器的重要性要求。以往，传统的闭环运算放大器都采用电压反馈方法，而高速运算放大器则大都用电流反馈方法，电流反馈放大器也叫互阻放大器，其特点是速度高。

第一节 运算放大器基础

时至今日，运算放大器已广泛应用于各种模拟组件。大多数运算放大器是单片集成器件，也有一些是混合集成器件。就其性能和封装而言，运算放大器有七种类型：高速放大器、单位增益放大器、精密放大器、双运算放大器、四运算放大器、低输入电流放大器以及廉价通用型运算放大器。性能上达到极限的是最快速运算放大器和最高精度运算放大器。前者分为三类：最高转换速率运算放大器（例如混合型的 AD9610，其转换速率为 $3\,500\text{ V}/\mu\text{s}$ ；单片型运算放大器 AD5539，转换速率为 $600\text{ V}/\mu\text{s}$ ）、最短调整时间运算放大器（例如单片型互补双极运算放大器 AD840、AD841、AD842 和 AD846，调整至稳态阶跃响应 $\pm 0.01\%$ 内的时间为 110 ns ；混合型运算放大器 AD9611 调整至 $\pm 0.1\%$ 的时间为 13 ns ）和最高增益带宽运算放大器（例如单片型运算放大器 AD5539，其增益带宽为 1.4 GHz ，互补双极型运算放大器 AD849 的增益带宽为 725 MHz ）；后者分为五类：最低不加失调失调电压运算放大器（例如 AD707，其失调电压低至 $15\text{ }\mu\text{V}$ ）、最低偏流运算放大器（例如顶端栅极场效应管输入的静电计运算放大器 AD549，其偏流小至 60 fV ）、最低漂移运算放大器（例如 AD707，漂移电压为 $100\text{ nV}/^\circ\text{C}$ ）、最高开环增益运算放大器（它用作积分器和高增益放大器时具有最高精度，例如 AD707，开环增益达到 13×10^6 ）和最高共模抑制运算放大器（例如 AD707 达到 130 dB ，AD OP-27/37 达到 114 dB ）。有些运算放大器兼顾了高速和高精度两者，例如互补双极型运算放大器 AD846，失调电压低，只有 $200\text{ }\mu\text{V}$ ，而且转换速率高，达到 $400\text{ V}/\mu\text{s}$ ；AD744 的输入偏流很低，只有 50 pA ，调整时间也很短，调整到阶跃响应稳态值的 $\pm 0.01\%$ 内只需 500

ns; AD OP-37 的漂移很小, 为 $600 \text{ nV}/^{\circ}\text{C}$, 增益带宽则达到 63 MHz ; 混合型运算放大器 AD381/382 偏流低 (50 pA), 调整时间也不长 (750 ns 达到阶跃响应稳态值的 $\pm 0.1\%$ 之内), 而且输出电流可达 50 mA 。有些高速放大器的输出电流很大, 可达 50 mA 或 100 mA , 例如混合型运算放大器 AD9611, 输出电流可达 40 mA , 而增益带宽为 280 MHz ; AD846 的输出电流最大为 50 mA , 转换速率达到 $400 \text{ V}/\mu\text{s}$; AD842 的调整时间为 100 ns (调整至阶跃响应稳态值的 $\pm 0.01\%$ 内), 转换速率达 $375 \text{ V}/\mu\text{s}$, 最大输出电流是 100 mA 。有些运算放大器不但精度高而且漂移低、增益高, 例如 AD OP-07 漂移为 $600 \text{ nV}/^{\circ}\text{C}$, 增益为 3×10^6 。使用者可根据不同要求选择不同类型的运算放大器。

一、运算放大器的性能指标

1. 绝对最大差电压

在大多数工作条件下, 反馈可以使运算放大器两输入端间的电压差维持在几乎是 0V , 然而在过载条件下, 或者在比较器中, 其输入端间的电压差是很大的。绝对最大差电压规定了不引起放大器永久性损坏的输入端间的最大电压差。

2. 共模抑制

理想的运算放大器只响应输入端间的差电压, 而对共模输入电压则不应当有输出。然而由于放大器两个输入端的增益略有不同, 或者失调电压的不同, 当有共模输入时, 就一定会有输出。共模抑制比 K_{CMR} 定义为共模输入电压对由它引起的共模误差电压的比。共模抑制一般用共模抑制比的对数来表示, 其单位为 dB 。即 $\text{CMR} = 20\lg K_{\text{CMR}}$ 。共模抑制说起来很复杂, 因为共模误差电压可能是共模输入电压的很强的非线性函数, 且会随温度变化。一般所列的共模抑制数据是在共模范围上的平均值, 而在小共模输入电压上的增量共模抑制可以比平均共模抑制大得多。共模抑制数据都是运算放大器工作在低频情况下得到的, 共模抑制将随工作频率的增高而减小。

3. 最大共模电压

最大共模电压是指产生小于共模误差规定值的最大共模输入电压。对电压跟随器而言, 它就是最大输入电压。

4. 电源电压引起的漂移

失调电压、偏置电流和差电流会随电源电压的变化而变化。通常, 由它们引起的直流误差比起温度漂移来要小得多。

5. 温度引起的漂移

当环境温度变化时, 失调电压、偏置电流和差电流都会改变, 在精密应用中, 这是最重要的误差来源。这些参数的温度系数定义为在说明的温度范围上

的平均斜率，漂移可能是温度的非线性函数，然而在限定的温度范围内往往是线性函数。温度引起的漂移通常在 25℃（室温）、高限温度和低限温度处进行测量，在室温时，把这些参量调至零，然后测量在两个极限温度下的各参量值。在这两个范围内的漂移量之和必须小于漂移速率（ $\text{nA}/^{\circ}\text{C}$ 或 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ）乘以总的温度范围。

6. 时间引起的漂移

失调电压、偏置电流和差电流会随着器件的“年龄”而改变，这种漂移又是随机的。例如引用的电压漂移可以是每月 15 μV ，而一年中的积累漂移都可以不超过 50 μV 。

7. 满功率响应

运算放大器的大信号响应和小信号响应实际上并不一样，由于转换速率在输出级中受到限制，放大器的输出对大信号响应和小信号响应的带宽不同。满功率响应有两种：全线性响应和满峰响应。前者指单位闭环增益时，在不产生超过规定的畸变的满输出条件下（通常畸变不超过 3%），输入的正弦信号的最高频率。后者是指满输出摆动时，输入正弦信号的最高频率，而不管输出是否畸变。

8. 初始偏置电流

偏置电流定义为任何一个使输出为零的具有无限大阻抗的输入电流（假定共模输入电压为零）。对不同的放大器，偏置电流输入可正可负。通常所列数据乃两者中数值较大者，而非其平均值，其初始值通常在 25℃ 时测得。

9. 初始差电流

差电流定义为两输入的偏置电流间的差值，又称为输入失调电流。放大器未经补偿的输入电路一般是对称的，所以两输入端的偏置电流趋于相等，而且它们都随着温度和电源电压的变化而改变，差电流往往只有输入端偏置电流的 10%。对放大器而言，只要它的两个输入有相等的输入阻抗，上述的偏流跟踪效应可以减少偏流及其变化引起的电压误差。

10. 输入阻抗

电压输入运算放大器的差分输入阻抗定义为在 25℃ 时假定误差电压为零或很接近于零的两输入端间的阻抗，在一级近似时，该动态阻抗可用一电阻和一电容并联表示。共模阻抗也用一电阻和一电容并联来表示，但它定义为在 25℃ 时每个输入端和电源公共端间的阻抗。对大多数电路，负输入端的共模阻抗并不重要（静电计电路例外），而正输入端的共模阻抗则定出了放大器信号输入正输入端时闭环输入阻抗的上限。共模阻抗是温度和共模电压的非线性函数。对场效应管输入放大器，温度每上升 10℃，共模电阻减小一半，它也是共模电压的函数，其值定义为共模变化从零到最大共模电压时的平均阻值，

增量电阻则可小于该平均值。

11. 输入失调电压

失调电压是输入端接入内阻为零的信号源时使放大器输出为零的输入电压。测量该值的办法是闭合环路并使放大器的增益很大, 在放大器输出端得到放大的误差电压后, 再除以测得的增益, 就可求出输入失调电压。初始失调电压于 25 °C 和额定电源电压条件下测得, 对大多数放大器, 可以用一外接电位器把初始失调电压调到零。

12. 输入噪声

输入电压和电流噪声特性的规定和分析几乎与失调电压和偏置电流一样, 长时期漂移也可以视为发生在很低频率下的噪声。在估计噪声性能时, 带宽或周期都必须考虑, 不同来源的均方根噪声应当用平方和开方计算。噪声一般是频率的函数, 有 $1/f$ 噪声、电阻噪声或结噪声。低频噪声的频带范围是 0.01 ~ 1 Hz 或者 0.1 ~ 10 Hz, 它用峰-峰值在 3.3σ 误差内表示, 这意味着所观测到峰-峰值的 99.9% 将落在该规定的范围内。宽带噪声则用均方根值来表示。对有些放大器, 则用频谱密度曲线以单位频率来表示: $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 或 $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

13. 开环增益

开环增益定义为放大器输出电压的变化对加到放大器两输入端间电压变化之比。增益是在直流条件下定义的, 然而在具体应用时, 增益又和频率有关, 为此, 开环增益是频率的函数。对互阻放大器, 输入是电流而输出是电压, 其增益用 Ω 表示。由于输入电流的小变化可以引起输出电压的大变化, 所以互阻可以做得非常大, 例如 AD846, 其互阻高达 100 M Ω 。只要放大器的内部输入阻抗很低, 闭环中的误差基本上取决于 R_F/R_T (R_F 是反馈电阻, R_T 是互阻)。在电压放大器中, 误差的增加主要取决于 $R_F/A_V R_I$, A_V 为开环增益, R_I 是外部输入电阻的阻值。在互阻放大器中, 误差和 R_I 无关, 因而减小 R_I 可增加闭环增益而又不影响带宽。

14. 过载恢复时间

过载恢复时间是在 50% 的过渡驱动引起的过载恢复到额定输出电压时所需要的时间。

15. 额定输出

额定输出电压是在额定输出电流时在产生钳位前的最小峰值输出电压; 额定输出电流是在额定输出电压时的最小电流保证值。负载阻抗小于规定值是可行的, 但最大输出电压将下降, 畸变可能增加, 开环增益将变小。

16. 调整时间

放大器输入一理想阶跃信号, 其输出达到规定的终值 (阶跃响应的稳态值) 偏差范围内的时间, 该偏差带对称于稳态值。调整时间包含两部分: 一是