

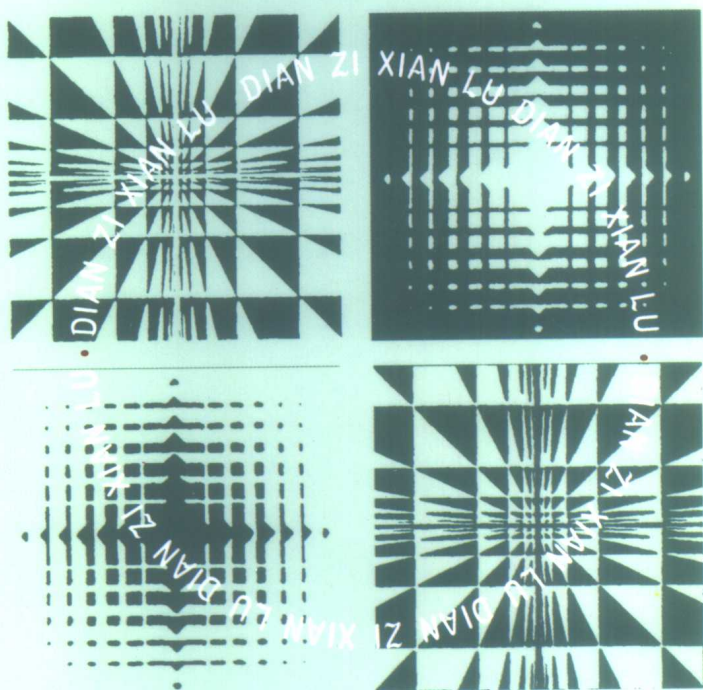


面向21世纪课程教材

DIAN ZI XIAN LU

电子线路

王楚 余道衡 编著



PEKING
UNIVERSITY
PRESS

北京大学出版社

面向 21 世纪课程教材

电 子 线 路

王 楚 余道衡 编著

北京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电子线路/王楚,余道衡编著. —北京:北京大学出版社,2003.5

(面向 21 世纪课程教材)

ISBN 7-301-06255-9

I. 电… I. ①王… ②余… III. 电子线路-高等学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 024158 号

书 名: 电子线路

著作责任者: 王 楚 余道衡 编著

责任编辑: 王 艳

标准书号: ISBN 7-301-06255-9/TN · 0018

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021

电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

排 版 者: 高新特激光照排中心 62637627

印 刷 者: 北京大学印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

730×980 16 开本 26.75 印张 509 千字

2003 年 5 月第 1 版 2003 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 0001—3000 册

定 价: 38.00 元

内 容 提 要

本书是电子与信息科学类专业的一本教科书。对现代电子线路的组成和应用,作了系统的介绍。

全书共分九章。第一章是绪论,第二、三、四章讲述反馈理论、运算放大器及应用,第五、六、七章讲述强正反馈(自激环路),包括脉冲电路基础、振荡器、寄存器与计数器,第八、九章讲述反馈控制电路,包括直流电源和自动频率控制。

本书适合电子与信息科学类专业学生作为参考书或教材选用,也可供其他专业大学生、研究生及从事电子与信息科学方面的工程技术人员参考。

序

本书是电子与信息科学类专业的一本参考书。作者认为对于主要课程,大学生不宜局限于只读教师的讲稿,而应阅读、钻研几本有不同见解的参考书,并养成查阅资料的习惯。对于本书的主要命题,还应注意通过实验观察,养成深入思考的习惯。我们希望这本书能对现代电子线路的组成与应用,作较系统的介绍。因此,本书不是按某一门课的通用教学大纲编写的,只是为本科生和研究生应该和可能具有的素养提供一本可供阅读的参考书。

本书是以《电路分析》^①为基础写成的。《电路分析》包含线性电路的解法、傅氏变换、拉氏变换与非线性电路的基本分析方法。作者把整流、放大、调制与解调等简单的分立元件单元电路,作为典型的非线性电路写在《电路分析》中。本书则以反馈理论为主线,侧重于集成模块的组成与应用。与通常的教科书比较,在体系上略有不同。

本书大致可分为以下三个主题:

(1) 反馈理论与放大器(第二章至第四章)。

反馈理论历来是有关课程的主题和难题。其困难在于很难把抽象的逻辑概念,简单地与具体的电路结构建立对应关系。在第二章,较严格地介绍反馈理论,并力图通过若干实例阐明其内涵。其中有些论述,常不是大学生能立即领悟的,宜在学习过程中不断复习回顾之。第三章介绍的电流镜和跨导线性环,已成为组成现代电路的基本单元,它们是《电路分析》未曾介绍的基本电路。第三章和第四章可视为反馈理论的例子,但读者还应注意放大器的主要技术指标及其实用意义。

(2) 强正反馈(自激)环路(第五章至第七章)。

本书所说的强正反馈环路,是指能产生自持(自激)运动的电路。第五章侧重于直耦强正反馈环路,即通常所说的触发器。第六章侧重于交流耦合强正反馈环路,即通常所说的振荡器。第七章只是为便于读者了解常见的电子学系统,对计数器和移位寄存器作初步介绍,还引进了离散信道电路和数字电路的概念。

有些教材把本书的第五章和第七章,划分到《脉冲数字电路》中。作者认为就电路的组成而言,更宜于与第六章组成一个完整的主题。在这个主题中,侧重于

^① 王楚,余道衡.《电路分析》.北京大学出版社,2000年9月.

讨论不能用逻辑分析和逻辑设计概括的基本电路问题。在《数字逻辑电路》^①中,侧重于逻辑分析与逻辑设计。

(3) 反馈控制电路(第八章与第九章)。

在第八章,以稳压电路为重点,再次把“反馈”与自动调节系统联系起来。同时,也较具体地说明了“电源”在电子学系统中的作用。第九章则扼要地介绍频率自动控制环路和锁相环的基本原理与分析方法,蕴含了非线性自动控制系统的基本概念。锁相环的设计,还要依据系统的使用目的与信号处理理论,这个问题已超出本书的范围。

本书的第一章(绪论)是供学生阅读的资料。其中§1.1、§1.2与§1.5,只把《电路分析》中与本书直接关联的概念,作一简明的归纳。§1.3与§1.4介绍了有关集成电路常识。写这一章的目的,是希望读者在学习和研究电子线路的过程中能经常回味与思考。一般地说,这一章不是为教师讲解准备的。

综上所述,本书的区划与某些教材不同,书中的某些论述也可能有差异,这只是希望能引起读者的思考。基于这一目的,书中有较多的习题与思考题,某些题不一定有标准答案,读者也不一定全做。作者认为,若能看一遍题并引起思考,感受到一些值得反复思考和钻研的课题,就是前进了一步。有些题是可以用实验检验的,作者鼓励读者把解题与实验观察联系起来。

本书的编写属于“信息与电子科学类专业内容和体系改革研究”项目的子课题。该课题还包括作者编写的《电路分析》,及王楚、沈伯弘编写的《数字逻辑电路》。这三本书是作者长期从事教学研究和实践的总结,也是一次教学改革试验。作者欢迎广大教师和读者提出自己的见解,指出本书的缺点和错误,以期进一步改进。

王楚 余道衡

2002年秋

^① 王楚,沈伯弘.《数字逻辑电路》.高等教育出版社.

常用符号说明

(一) 基本电量

E	直流电动势	\bar{P}	平均功率
e	交流电动势	Q	电荷
\dot{E}	复电动势	V	直流电压
I	直流电流	v	交流电压
i	交流电流	ΔV	电压改变量
ΔI	电流改变量	\dot{V}	复电压
\dot{i}	复电流	W	能量
P	功率	ϕ	磁通

(二) 元器件及电路参量

A	运算放大器	M	互感
A	运算放大器的增益	n	变压器的匝数比
B	电纳	R, r	电阻
C	电容	dr	分布电阻
dC	分布电容	T	三极管
D	二极管	X	电抗
G, g	电导	Y	导纳
dG	分布电导	$Y(j\omega)$	复导纳
K	增益	Y_m	跨导纳增益
k	变压器耦合系数	Z	阻抗
K_V	电压增益	$Z(j\omega)$	复阻抗
K_I	电流增益	Z_m	跨阻抗增益
K_P	功率增益	Z_c	特性阻抗
L	电感; 自感	Z_i	输入阻抗
M	场效应管	Z_o	输出阻抗

(三) 下标及示例(以上基本符号配合下标组成一系列符号)

b	三极管的基极	D, d	场效应管的漏极; 差模
c	三极管的集电极; 共模	e	三极管的发射极

G	场效应管的栅极	1	网络的 1-1' 端口
h	高端	2	网络的 2-2' 端口
i, i_i	输入端口; 电流	0	终端短路
L, l	负载端; 低端	∞	终端开路
max	最大	例如	
min	最小	I_c	集电极电流
o	输出端口	I_{cQ}	静态工作点对应的集电极
Q	静态工作点		电流
S	场效应管的源极	I_{cmax}	最大集电极电流
T	T 型网络	K_V	电压增益
V, v	电压	Z_i	输入阻抗
x	信号源	Z_{ic}	共模输入阻抗
Π	Π 型网络		

(四) 信号参量

f, F	频率	Δt	脉冲宽度
$h(t), H(s)$	脉冲响应及其拉氏变换像函数	v	信号在传输线上的传播速度
$H(j\omega), H(s)$	信号通过系统的传输函数及其拉氏变换像函数	$\delta(t)$	单位脉冲信号
$j(t), J(s)$	阶跃响应及其拉氏变换像函数	θ, ϕ	相角
$s (= \sigma + j\omega)$	复频率	λ	波长
t	时间	τ	时延
T	周期	Δt_r	上升时间
		$\omega (2\pi f)$	角频率或圆频率

(五) 器件参量

BV_{ebo}	集电极开路时 e-b 间的击穿电压	I_{cM}	集电极最大允许电流
BV_{ceo}	基极开路时 c-e 间的击穿电压	P_{cM}	集电极最大允许耗散功率
BV_{DS}	栅极开路时 D-S 间的击穿电压	P_{DM}	漏极最大耗散功率
f_β	共发射极交流电流放大系数的截止频率	$r_{bb'}$	基区体电阻
f_T	特征频率	R_d	二极管直流等效电阻
g_m	跨导增益	r_d	二极管交流等效电阻
h_{ie}, h_{re}	共发射极接法的 H 参数	R_T	热阻
h_{fe}, h_{oe}		T_{jM}	最高结温
		V_B	击穿电压
		V_{b0}	三极管 b-e 结导通电压
		V_0	二极管导通电压

V_p	场效应管夹断电压	μ	场效应管的放大系数
V_T	场效应管开启电压	$\overline{i_n^2}$	噪声电流方均值
V_Z	稳压二极管的稳定电压	$\overline{v_n^2}$	噪声电压方均值
β	共发射极交流电流放大倍数	$\overline{v_{bb'}^2}$	$r_{bb'}$ 上噪声电压方均值

(六) 其他符号

b	支路	SNR	信噪比
CMRR	共模抑制比	T	热力学温度
j	虚数符号	η	效率
n	节点;电子	θ	通角
P	空穴		

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 放大器概述	(1)
1.1.1 理想受控源	(1)
1.1.2 放大器的组成与常用指标	(3)
1.1.3 放大器的频率响应——波特图	(4)
1.1.4 非线性失真与转换速率	(6)
§ 1.2 电子线路的稳定性与抗扰性	(9)
1.2.1 电子线路的稳定性	(9)
1.2.2 电子线路的抗扰性	(10)
§ 1.3 集成电路常识	(11)
1.3.1 单片集成电路	(11)
1.3.2 混合集成电路	(14)
1.3.3 集成电路的计算机辅助分析与设计	(15)
§ 1.4 电子线路的计算机辅助分析	(16)
1.4.1 引言	(16)
1.4.2 PSPICE 程序简介	(18)
1.4.3 电子线路的设计过程	(19)
§ 1.5 噪声系数与噪声温度	(20)
1.5.1 噪声系数	(20)
1.5.2 放大器的噪声系数	(21)
1.5.3 噪声温度	(23)
思考题	(23)
习题	(24)
第二章 反馈	(26)
§ 2.1 反馈的概念	(26)
2.1.1 引言——反馈与闭环系统	(26)
2.1.2 反馈放大器的逻辑模型	(28)
2.1.3 环路的分析方法	(31)
2.1.4 环路的激励	(33)
§ 2.2 反馈放大器的增益	(37)

2.2.1	反馈放大器的频率响应	(37)
2.2.2	环路属性的判别与产生自激的条件	(39)
2.2.3	闭环增益的灵敏度	(42)
* 2.2.4	反馈对非线性失真的影响	(45)
§ 2.3	反馈放大器的输出等效电路	(46)
2.3.1	反馈环路的电路模型	(46)
2.3.2	电压采样反馈环路	(48)
2.3.3	简单的电压基准	(52)
2.3.4	电流采样反馈环路	(55)
* 2.3.5	综合采样反馈环路	(57)
§ 2.4	反馈环路的输入阻抗	(58)
2.4.1	输入端口并联的环路	(58)
2.4.2	反相放大器	(59)
2.4.3	输入端口串联的环路	(61)
附录 2	环路的二端口网络模型	(63)
思考题	(65)
习题	(69)
第三章	运算放大器	(73)
§ 3.1	电流镜与跨导线性电路	(73)
3.1.1	电流镜	(73)
3.1.2	电流镜应用举例	(76)
3.1.3	跨导放大器	(77)
3.1.4	Widlar 电流镜	(78)
3.1.5	跨导线性电路	(79)
§ 3.2	运算放大器	(81)
3.2.1	通用型运算放大器之组成	(81)
3.2.2	高增益通用型运算放大器	(84)
* 3.2.3	低失调低漂移运算放大器	(88)
* 3.2.4	仪器放大器	(91)
3.2.5	电流反馈运算放大器	(92)
§ 3.3	频率响应与转换速率	(96)
3.3.1	线性系统的传递函数	(96)
3.3.2	反馈环路的频率响应补偿	(99)
3.3.3	宽带放大器	(102)
3.3.4	放大器的转换速率和调整时间	(106)

§ 3.4 二阶有源滤波器	(109)
3.4.1 基本概念	(109)
3.4.2 二阶滤波器的传递函数	(110)
3.4.3 状态变量滤波器	(112)
3.4.4 OTA-C 二阶滤波器	(115)
* § 3.5 非线性运算电路	(116)
3.5.1 理想的非线性反馈环路	(116)
3.5.2 乘法器与除法器	(117)
3.5.3 平方与平方根电路	(119)
3.5.4 指数与对数电路	(120)
3.5.5 线性检波电路(精密整流电路)	(122)
* § 3.6 运算放大器的参数	(124)
3.6.1 运算放大器的常用参数	(124)
3.6.2 失真度	(127)
3.6.3 噪声	(127)
附录 3 关于有源滤波器的补充	(128)
思考题	(133)
习题	(137)
第四章 功率放大器与调谐放大器	(142)
§ 4.1 功率放大器概述	(142)
4.1.1 引言	(142)
4.1.2 放大器的转换效率	(143)
4.1.3 乙类(甲乙类)推挽放大器	(145)
* 4.1.4 脉冲信号的转换效率	(147)
§ 4.2 功率运算放大器	(148)
4.2.1 共发射极输出级	(148)
4.2.2 共集电极输出级	(150)
* 4.2.3 功率放大器与负载的耦合	(151)
§ 4.3 射频信号与调谐放大器	(152)
4.3.1 基本的调制方式	(152)
4.3.2 调谐放大器	(155)
* 4.3.3 中频放大器	(157)
* § 4.4 射频功率放大器	(159)
4.4.1 概述	(159)
4.4.2 丙类射频功率放大器	(161)

4.4.3 丙类功率放大器的工作状态	(163)
4.4.4 丁类和戊类放大器	(164)
附录 4 接收机中的混频电路	(165)
思考题	(177)
习题	(180)
第五章 脉冲电路基础	(183)
§ 5.1 比较器与基本的逻辑电路	(183)
5.1.1 电压比较器与逻辑信号	(183)
5.1.2 非门和恒等门	(185)
5.1.3 与门和与非门	(188)
5.1.4 或门和或非门	(190)
* 5.1.5 异或门与鉴相	(192)
* § 5.2 集成门和集成比较器	(193)
5.2.1 DTL 电路和 TTL 电路	(193)
5.2.2 并联扩展电路	(195)
5.2.3 集成比较器	(197)
5.2.4 比较器应用举例	(199)
§ 5.3 双稳态电路	(201)
5.3.1 施密特触发器	(201)
5.3.2 逻辑电路中的双稳态触发器	(205)
* 5.3.3 双稳态电路的触发过程	(208)
* 5.3.4 集成迟滞比较器	(210)
§ 5.4 单稳态触发器和多谐波振荡器	(211)
5.4.1 延迟反馈自激励模型	(211)
5.4.2 阻容延迟电路模型	(213)
* 5.4.3 集成定时器	(216)
* 5.4.4 集成单稳态触发器	(218)
* 5.4.5 压控多谐波振荡器	(221)
§ 5.5 扫描与同步	(224)
5.5.1 扫描与同步	(224)
5.5.2 示波器的扫描电路	(226)
思考题	(229)
习题	(230)
第六章 振荡器	(234)
§ 6.1 简谐振动的建立与稳定	(234)

6.1.1	引言	(234)
6.1.2	自激振荡的建立过程——范德堡方程	(235)
6.1.3	谐波含量对振荡频率的影响	(239)
6.1.4	静态偏置与激励方式	(241)
6.1.5	自生偏置与调幅振荡	(243)
* 6.1.6	振荡器的自动电平调整	(247)
§ 6.2	LC 振荡器	(248)
6.2.1	差分放大器组成的振荡器	(248)
6.2.2	三点式振荡器	(251)
* § 6.3	RC 振荡器	(256)
6.3.1	文氏桥振荡器	(256)
6.3.2	正交振荡器与 OTA-C 振荡器	(257)
6.3.3	相移振荡器与环形多谐波振荡器	(259)
6.3.4	函数发生器	(261)
§ 6.4	振荡的模式与频率稳定性	(263)
6.4.1	石英谐振器	(263)
6.4.2	晶体多谐波振荡器——多模振荡器	(265)
6.4.3	似简谐晶体振荡器——选模振荡器	(266)
* 6.4.4	多模振荡器的模式竞争	(268)
* 6.4.5	简谐振荡器的同步——注入锁定	(270)
* 6.4.6	振荡器的噪声——相位噪声	(271)
* 6.4.7	振荡器的频率稳定度	(273)
* § 6.5	负阻电路	(273)
6.5.1	负阻器件	(273)
6.5.2	负阻似简谐振荡器	(275)
6.5.3	负阻多谐波振荡器(张弛振荡器)	(277)
6.5.4	负阻电路的稳定性	(280)
	思考题	(281)
	习题	(285)
第七章	寄存器与计数器	(288)
§ 7.1	锁存器与寄存器	(288)
7.1.1	时钟脉冲控制的锁存器	(288)
7.1.2	同步时序逻辑电路简介	(289)
7.1.3	集成寄存器	(291)
§ 7.2	计数器	(293)

7.2.1	二进制加法计数器	(293)
7.2.2	十进制加法计数器	(295)
7.2.3	分频与时钟	(298)
* § 7.3	简单的数字式仪表	(298)
7.3.1	数字式频率计	(298)
7.3.2	V-F 变换数字电压表	(300)
7.3.3	字符显示器	(300)
§ 7.4	移位寄存器	(303)
7.4.1	移位寄存器	(303)
7.4.2	扭环移位寄存器	(305)
7.4.3	开关电容移位寄存器	(307)
* § 7.5	模拟量与数字量的变换	(309)
7.5.1	模拟信号与数字信号	(309)
7.5.2	采样电路	(310)
7.5.3	模拟-数字变换器	(311)
7.5.4	数字-模拟变换器	(313)
* § 7.6	模拟移位寄存器	(314)
7.6.1	电荷耦合器件	(314)
7.6.2	开关电容模拟移位寄存器	(316)
附录 7	CMOS 门	(317)
	思考题	(323)
	习题	(324)
第八章	直流电源	(326)
§ 8.1	电路系统的电源	(326)
8.1.1	稳压电路与恒流电路	(326)
8.1.2	电压调整器的指标	(328)
8.1.3	有温度补偿的电压基准	(331)
§ 8.2	稳压电源之组成	(333)
8.2.1	集成多端电压调整器	(333)
8.2.2	参数选择	(335)
8.2.3	稳压电源的布线	(337)
* 8.2.4	保护与控制电路	(338)
* 8.2.5	电源管理	(340)
§ 8.3	三端电压调整器	(341)
8.3.1	输出固定电压的三端电压调整器	(341)

8.3.2 输出电压可调的三端电压调整器	(344)
*8.3.3 跟踪式电压调整器	(345)
§ 8.4 开关式电压调整器	(346)
8.4.1 串联降压电压调整器	(346)
8.4.2 开关电源的参数选择	(350)
8.4.3 并联与升压电压调整器	(351)
8.4.4 变压器耦合开关电压调整器	(352)
*8.4.5 脉宽调制器与丁类放大器	(354)
附录 8 可控硅整流器	(356)
思考题	(360)
习题	(362)
第九章 自动频率控制	(364)
§ 9.1 鉴频器与鉴相器	(364)
9.1.1 引言	(364)
9.1.2 斜率鉴频器	(366)
9.1.3 乘积鉴相器与相位鉴频器	(368)
9.1.4 正交鉴相器与脉冲鉴相器	(372)
§ 9.2 自动频率控制环路	(375)
9.2.1 自动频率控制环路概述	(375)
9.2.2 AFC 环路的线性模型	(376)
9.2.3 环路的稳定性与参数设计	(379)
9.2.4 环路滤波器的优化	(382)
9.2.5 AFC 环路的捕捉与跟踪	(383)
9.2.6 搜索与静差控制	(384)
§ 9.3 锁相环	(385)
9.3.1 锁相环概述	(385)
9.3.2 锁相环的线性模型	(388)
9.3.3 一阶环路与锁相环的静态参数	(390)
9.3.4 环路滤波器	(393)
9.3.5 锁相环的捕捉过程与监控	(396)
附录 9 锁相环应用两例	(399)
思考题	(403)
习题	(404)
参考书目	(406)
名词索引	(407)

第一章 绪 论

§ 1.1 放大器概述

1.1.1 理想受控源

电子线路总是由一些模块组成. 常用的模块有电源、放大器、振荡器、频谱与波形变换电路、数字运算与逻辑控制部件, 以及控制管理软件等. 本书不讨论系统中的软件, 也不涉及数字电路的逻辑设计, 只侧重于讨论通用的集成模块.

电子线路常是指由非线性器件组成的电路. 其中一类是直接用于频谱与波形变换的电路, 例如整流、调制与解调电路等, 通常叫做非线性电路. 另一类是利用三端器件组成的准线性放大器, 即: 在满足一定的技术指标的条件下, 其某些特性可用线性等效电路来分析. 在各种实用的模块中, 放大器常是重要的组成部分.

在《电路分析》^①中已经说明, 理想的放大器可抽象为四种理想受控源, 它们是: 电压控制电压源 (Voltage Controlled Voltage Source), 简称 VCVS; 电压控制电流源 (Voltage Controlled Current Source), 简称 VCCS; 电流控制电压源 (Current Controlled Voltage Source), 简称 CCVS; 电流控制电流源 (Current Controlled Current Source), 简称 CCCS. 图 1-1 是四种理想受控源的等效电路. 四种受控源的增益分别叫做电压增益 (A)、跨导 (互导) 增益 (g_m)、互阻 (跨阻) 增益 (r_m) 和电流增益 (A_c).

四种理想放大器的特点是:

- (1) 都是线性受控源;
- (2) 具有无穷大的输入阻抗或输入导纳, 只能接收电压信号或电流信号;
- (3) 在输出端口呈现为理想电压源, 或理想电流源.

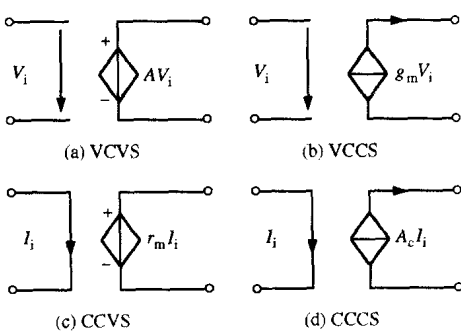


图 1-1 四种理想受控源

^① 王楚, 余道衡. 《电路分析》. 北京大学出版社, 2000 年 9 月.