

高等学校教材

# 核电子学基础

上册

周志成 编著

原子能出版社

## 内 容 简 介

本书为高等院校核物理专业核电子学课程的基础教材,分上、下册出版。上册内容包括:电路基础、晶体管基础知识、脉冲讯号放大、集成运算放大器以及稳压电源。下册内容包括:脉冲电路、数字集成电路和数字集成电路的应用。

本书也可供使用、维修和研制核电子仪器的工人和技术人员参考。

高等学校教材

核电子学基础

(上册)

周志成 编著

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张 16 ·字数 375 千字

1986年6月北京第二版·1986年6月北京第一次印刷

印数1—2600·统一书号: 15175·636

定价: 2.45 元

# 符 号 说 明

1. 本书皆采用通用符号。
2. 大写字母表示直流量、静态参数；小写字母表示变化量、动态参数。
3. 图中讯号除注明外皆为对地电压。
4. 角码采用通用符号。

## 角 码

$c$	集电极	$L$	负载
$b$	基极	$D$	漏极
$e$	发射极	$G$	栅极
$o$	输出	$S$	源极
$i$	输入、电流	max	最大
$v$	电压	min	最小

## 常用符号

$\alpha$	共基极交流电流放大系数	$\tau_L$	低电平输出讯号的边沿时间
$\bar{\alpha}$	共基极直流电流放大系数	$\tau_o$	反转时间
$\beta$	共射极交流（短路）电流放大系数	$\tau_{off}$	三极管的关闭时间
$\bar{\beta}$	共射极直流电流放大系数	$\tau_{on}$	三极管的开通时间
$\gamma$	积分非线性系数	$\tau_{pd}$	平均传输延迟时间（平延时间）
$\Delta$	顶部下降、误差、变化量	$\tau_{rf}$	闭环上升时间
$\Delta f$	频带宽度、通频带	$\tau_s$	存贮时间、建立时间
$\delta$	脉冲宽度	$\tau_{st}$	迭通延迟时间
$\delta_o$	上冲量	$\varphi$	相移角、幅角
$\delta_{(0)}$	0电平噪声容限	$\varphi_{A0}$	开环增益相移
$\delta_{(1)}$	1电平噪声容限	$\varphi_b$	反馈相移
$\rho = CMRR$	共模抑制比、电阻率	$\varphi_H$	高半功率点相移
$\tau$	时间常数	$\varphi_{LG}$	回路增益相移
$\tau_b$	基极恢复时间	$\varphi_{LGM}$	相移余量
$\tau_o$	二极管反向恢复时间、充电时间常数	$\varphi_p$	极点相移
$\tau_d$	延迟时间、放电时间常数	$\varphi_{pp}$	峰值相移
$\tau_F$	触发器的反转时间（平延时间）	$\varphi_z$	零点相移
$\tau_f$	下降时间	$\omega$	角频率
$\tau_H$	高电平输出讯号的边沿时间	$\omega_d$	阻尼振荡角频率
$\tau_i$	输入讯号的时间常数	$\omega_H$	高半功率点角频率
		$\omega_o$	固有（自然）角频率

$\omega_p$  峰值角频率  
 $1(t)$  单位阶跃电压  
 $A$  脉冲面积、增益  
 $A_c$  共模增益  
 $A_d$  差模增益  
 $A_f$  闭环增益  
 $A_{f0}$  理想化闭环增益  
 $A_{fpp}$  闭环峰值增益  
 $A_{if}$  闭环电流增益  
 $A_{io}$  开环电流增益  
 $A_o$  开环增益  
 $A_v$  电压增益  
 $A_{vf}$  闭环电压增益  
 $A_{vo}$  稳态增益、中频增益、开环增益  
 $B$  变压器  
 $BV_{ceo}$  集射击穿电压  
 $BV_{cbo}$  射基击穿电压  
 $BV_{DS}$  漏源击穿电压  
 $BV_{GS}$  栅源击穿电压  
 $b$  反馈系数  
 $C$  电容  
 $C_b$  基极对地分布电容  
 $C_{bc}$  集电结电容  
 $C_{be}$  发射结电容  
 $C_D$  扩散电容  
 $C_e$  发射极旁路电容  
 $C_i$  输入电容  
 $C_L$  负载电容  
 $CMRR$  共模抑制比  
 $C_o$  分布电容、石英晶体的静态电容  
 $CP$  时钟脉冲  
 $C_q$  石英晶体的动态电容  
 $D$  漏极、二极管  
 $D_z$  稳压二极管  
 $d$  非线性畸变电压  
 $f$  重复频率、频率  
 $f_H$  高半功率点频率、开环频宽  
 $f_{H1}$  单位增益频宽

$f_L$  低半功率点频率  
 $f_p$  极点频率、转折频率、石英晶体的并联谐振频率  
 $f_{po}$  全功率响应频率  
 $f_{pp}$  峰值频率  
 $f_s$  石英晶体的串联谐振频率  
 $f_z$  零点频率  
 $f_\alpha$  晶体管的 $\alpha$ 截止频率  
 $f_\beta$  晶体管的 $\beta$ 截止频率  
 $G$  栅极、门电路  
 $GM$  增益余量  
 $g_m$  跨导  
 $H$  传输系数、禁止端  
 $I$  直流电流  
 $I_b$  基极电流、基极偏置电流、反向电流  
 $I_{b1}$  临界基极(饱和)电流  
 $I_c$  集电极电流  
 $I_{cbo}$  集电极反向饱和电流  
 $I_{ceo}$  发射极反向饱和电流(穿透电流)  
 $I_{cm}$  集电极最大允许电流  
 $I_{cs}$  集电极饱和电流  
 $I_D$  漏极电流  
 $I_{DSS}$  漏极饱和电流(饱和漏电流)  
 $I_e$  发射极电流  
 $I_f$  正向电流、反馈电流  
 $I_G$  栅极电流  
 $I_{kv}$  滞后电流  
 $I_L$  负载电流  
 $I_{Lm}$  最大输出电流  
 $I_o$  输出电流、二极管反向饱和电流、恒流源  
 $I_{oi}$  输出失调电流  
 $I_p$  峰值电流  
 $I_R$  参考电流  
 $I_{Rc}$  输入交叉漏电流  
 $I_r$  反射电流  
 $I_s$  输出端吸入电流

- $i_s$  输入短路电流  
 $I_{s1}$  选通电流  
 $I_v$  谷值电流  
 $i_e$  有效输入电流  
**J-FET** 结型场效应管  
 $K$  开关、反射系数  
 $k$  充电系数, 阻尼系数, 波尔茨曼常数  
 $L$  拉氏变换符号、电感  
**LG** 回路增益  
 $L_n$  电子扩散长度  
 $L_p$  空穴扩散长度  
 $L_s$  石英晶体的等效电感  
 $l$  放电系数  
**MOS-FET** 绝缘栅场效应管  
 $N_f$  晶体管的噪声系数  
 $N_o$  扇出系数  
 $n$  计数率  
 $P_{m}$  集电极最大允许耗散功率  
 $p$  极点  
 $Q$  电荷、石英晶体、集成电路输出端  
 $Q_b$  基区存贮电荷  
 $Q_{b1}$  基区超额存贮电荷  
 $Q_c$  充电电荷  
 $Q_d$  放电电荷  
 $Q_e$  集电区存贮电荷  
 $q$  电子电荷量、 $q = 1.60 \times 10^{-19}$  库伦  
 $R$  电阻  
 $R_b$  二极管反向电阻、基极偏流电阻  
 $R_c$  集电极电阻  
 $R_D$  漏极电阻  
 $R_e$  发射极电阻  
 $R_f$  二极管正向电阻、反馈电阻  
 $R_g$  栅极电阻  
 $R_{GS}$  栅源内阻  
 $R_i$  输入电阻  
 $R_{i1}$  输入低于低电平讯号时的输入电阻  
 $R_{iH}$  输入高电平讯号时的输入电阻  
 $R_{iL}$  输入低电平讯号时的输入电阻  
 $R_L$  负载电阻  
 $R_o$  输出电阻  
 $R_{oH}$  输出高电平讯号时的输出电阻  
 $R_{oL}$  输出低电平讯号时的输出电阻  
 $R_s$  石英晶体的等效摩擦电阻  
 $R_s$  电源内阻  
 $R_p$  电位器  
 $r_b$  基区体电阻  
 $r_{bc}$  共射极输入电阻  
 $r_c$  集电结反向电阻  
 $r_e$  发射结正向电阻  
 $r_{eb}$  共基极输入电阻  
 $r_i$  输入电阻  
 $r_{if}$  闭环输入电阻  
 $r_o$  输出电阻  
 $r_{of}$  闭环输出电阻  
 $r_s$  内阻  
 $r_z$  稳压管内阻  
 $S$  源极、稳定度、饱和深度、转换速率  
 $S_L$  电源长期稳定度  
 $S_T$  电源输出电压温度系数  
 $s$  复变数  
 $T$  重复周期、晶体管、绝对温度  
 $T_d$  阻尼周期  
 $t_{p1}$  峰值时间  
 $V$  直流电压  
 $V_{\sim}$  交流电压  
 $\tilde{V}$  交流电压有效值  
 $V_A$  MOS 集成门电路中的转换电压, 相当于关门电平  $V_{o11}$   
 $V_B$  MOS 集成门电路中的转换电压, 相当于开门电平  $V_{o1}$   
 $V_b$  基极电压、反向电压  
 $V_{BB}$  基极电源电压  
 $V_{be}$  发射结电压降  
 $V_{be1}$  三极管截止阈电压

$V_{b.c.o}$  三极管导通阈电压  
 $V_{b.c.s}$  基极饱和压降  
 $V_{c.b}$  集电结压降  
 $V_{c.c}$  集电极电源电压  
 $V_{c.c.s}$  集电极饱和压降  
 $V_{c.n}$  RC电路中经过 $n$ 次充放电后，  
 电容上的平衡电压  
 $V_D$  甄别阈电压，二极管压降  
 $V_{DD}$  漏极电源电压、隧道二极管电  
 路电源电压  
 $V_{D.O}$  二极管导通压降  
 $V_{D.S}$  漏源电压  
 $V_e$  发射极电压  
 $V_{BE}$  发射极电源电压  
 $V_F$  峰值投影电压  
 $V_f$  正向电压  
 $V_G$  门电路输出电压  
 $V_{GG}$  栅极电源  
 $V_{GS}$  栅源电压  
 $V_H$  高电平  
 $V_{h.v}$  滞后电压（回差）  
 $V_L$  低电平、负载电压  
 $V_m$  脉冲幅度  
 $V_N$  输入噪声电压  
 $V_0$  直流分量、交流电压的平均值  
 $V_{o.f.f}$  关门电平  
 $V_{o.H}$  输出高电平  
 $V_{o.L}$  输出低电平  
 $V_{o.n}$  开门电平  
 $V_{o.s}$  输入失调电压  
 $V_{o.s.f}$  等效输入失调电压  
 $V_p$  夹断电压、峰值电压  
 $V_{p.p}$  最大输出电压  
 $V_R$  参考电压  
 $V_r$  导通阈电压、反射电压  
 $V_T$  开启电压  
 $V_v$  谷值电压  
 $V_z$  稳压管压降  
 $V_o$  截止深度

$u_C$  电容两端电压  
 $u_f$  反馈讯号  
 $u_i$  输入讯号  
 $u_{i.c}$  共模输入讯号  
 $u_{i.c.c}$  输入共模误差电压  
 $u_{i.d}$  差模输入讯号  
 $u_L$  电感两端电压  
 $u_n$  有效输入讯号  
 $u_o$  输出讯号  
 $u_{o.b}$  反向输出讯号  
 $u_{o.f}$  正向输出讯号  
 $u_R$  电阻两端电压  
 $Z$  阻抗、特性阻抗  
 $Z_f$  反馈阻抗  
 $Z_i$  输入阻抗  
 $Z_{i.f}$  闭环输入阻抗  
 $Z_L$  负载阻抗  
 $Z_o$  输出阻抗  
 $Z_{o.f}$  闭环输出阻抗  
 $z$  零点

#### 单位

A 电流单位，安培  
 mA 毫安 ( $10^{-3}A$ )  
 $\mu A$  微安 ( $10^{-6}A$ )  
 F 电容单位，法拉  
 $\mu F$  微法 ( $10^{-6}F$ )  
 pF 微微法 ( $10^{-12}F$ )  
 H 电感单位，亨利  
 mH 毫亨 ( $10^{-3}H$ )  
 $\mu H$  微亨 ( $10^{-6}H$ )  
 Hz 频率单位，赫兹  
 kHz 千赫 ( $10^3Hz$ )  
 MHz 兆赫 ( $10^6Hz$ )  
 s 时间单位，秒  
 ms 毫秒 ( $10^{-3}s$ )  
 $\mu s$  微秒 ( $10^{-6}s$ )  
 ns 毫微秒 ( $10^{-9}s$ )  
 V 电压单位，伏特

mV 毫伏 ( $10^{-3}\text{V}$ )

$\mu\text{V}$  微伏 ( $10^{-6}\text{V}$ )

dB 分贝

$\Omega$  电阻单位, 欧姆

k $\Omega$  千欧 ( $10^3\Omega$ )

M $\Omega$  兆欧 ( $10^6\Omega$ )

$\Omega\text{-cm}$  电阻率单位, 欧姆-厘米

S 跨导单位, 姆欧

## 前 言

测量放射性原子核的辐射，是通过射线探测器将核辐射转换成电流或电压讯号，再由电子学仪器测量来实现的。这类电子学仪器有它本身的特殊性，所以称为核电子仪器，与其它电子仪器相区别。核电子学是专门研究这类仪器所用电路的学科，广义地讲它是用电子学方法获取并处理核辐射及原子核所携带的信息的学科。因此它包括了如何使核电子仪器与计算机相配合而构成的实验系统的内容，等等。

核电子学基本上属于脉冲电路和数字电路范围，包括脉冲讯号的放大，数据的获取与处理等。本书不讨论射线探测器给出的微弱慢变化电流讯号的测量问题，它将在《核电子学》一书内讨论。

本书是核物理专业核电子学课的基础教材，它取代了基础课中的无线电基础课教材。这样既可充分利用有限的学时数，紧密配合专业课，又能充实必要的有关集成电路的内容。

在讲授本课前，需要介绍一下有关放射性的知识，使学员对核电子仪器所接收的脉冲讯号的特点（即讯号的幅度和讯号出现的时间具有统计规律的特征）有感性的认识。

本书的全部内容可分三大部分：电路基础、分立元件电路、集成电路。本书的前两章为电路基础，第三章至第五章为线性放大电路，第六章至第八章为脉冲电路。内容选择尽量考虑了与后续课《核电子学》的配合，为分析核电子电路的特殊问题打下基础。

考虑到核物理专业的学生学习核电子学的主要目的，在于掌握有关电路原理及功能的知识，以便使用这些仪器来进行实验测量工作，本书对于电路计算和设计等内容只作简单的介绍。

应该指出，电子电路课程必须有实验课紧密配合，但本书不包括实验课内容。本书全部讲授约需200学时。如果学生已有电路基础知识，则可从第三章开始讲授。

本书是在北京大学核物理专业近几年一直使用的《核电子学基础》讲义的基础上修改而成的。北京大学夏松江同志审校全书。四川大学许祖润、吉林大学贾文彪、清华大学钱永庚、兰州大学王化民、复旦大学张宝全等同志，对本书提出了宝贵的意见，特此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，出书时间又紧迫，缺点错误在所难免，敬请读者在使用过程中提出宝贵意见。

北京大学 周志成

一九七九年十二月



## 再版说明

根据1983年6月核工业部教育司在北京召开的《核电子学基础》修订再版会议的精神，对本书进行了修改。上册内容作了较大的改动和增删，主要修改和增删的部分为：

第三章负反馈放大器一节全部重写，标题改为反馈放大器。

删去第四章集成运算放大器中的单元电路一节的全部内容。

第五章标题改为稳压电源，增加了倍压整流电路及高压稳压电路的内容。

增加了关于晶体管命名方法及书中所引用的一些晶体管参数的内容。

下册中只对部分内容作了删改，补充了一些具体例子。

由于时间仓促，有些符号（如上升时间 $\tau$ ，应改为 $t_r$ 等）未作修改，请读者见谅。

编者

1984年2月

# 目 录

符号说明	i
第一章 电路基础	1
§ 1 电路的基本知识	1
一、线性网络	1
二、电压源与电流源	1
三、克希霍夫定律	2
四、叠加原理	4
五、等效电源定理 (戴文宁定理)	5
六、讯号	6
思考题与练习题	8
§ 2 基本线性网络的瞬变响应	8
一、运算法	9
二、RC 电路	13
三、脉冲分压器	28
四、电感微分电路	29
五、延迟线	30
思考题与练习题	34
第二章 晶体管基础知识	37
§ 1 半导体及其导电机构	37
思考题与练习题	40
§ 2 PN 结	40
思考题与练习题	41
§ 3 晶体二极管	41
一、晶体二极管的电压-电流特性	41
二、PN 结电容	44
三、晶体二极管的参数	44
四、晶体二极管的应用	44
思考题与练习题	48
§ 4 晶体三极管	49
一、晶体三极管的基本结构	49
二、晶体三极管内载流子的运动	50
三、晶体三极管的特性曲线	51
四、晶体三极管的参数	56
思考题与练习题	60

§ 5 场效应管	61
一、结型场效应管	61
二、绝缘栅场效应管	64
三、场效应管的参数	66
思考题与练习题	67
第三章 脉冲讯号放大	68
§ 1 单管放大器	68
一、静态工作点	68
二、放大原理	69
三、等效电路	71
四、电压增益(电压放大倍数)	75
五、输入电阻与输出电阻	77
六、工作点的稳定	79
七、单管放大器的频率响应与瞬变响应	82
八、场效应管放大器	90
思考题与练习题	91
§ 2 差分放大器	92
一、工作原理	93
二、电压增益	94
三、共模抑制比	96
思考题与练习题	97
§ 3 多级放大器	97
一、电压增益	98
二、上升时间	98
思考题与练习题	99
§ 4 反馈放大器	100
一、负反馈放大器	103
二、常用的负反馈放大电路	113
思考题与练习题	128
第四章 集成运算放大器	130
§ 1 理想的运算放大器	131
§ 2 一个实际的运算放大器	133
思考题与练习题	139
§ 3 运算放大器应用的理论基础	139
一、反相型反馈放大器	139
二、同相型反馈放大器	145
三、运算放大器的应用举例	149
思考题与练习题	154
§ 4 运算放大器的运算误差及漂移	155

一、开环增益 $A_0$ 、输入阻抗 $Z_i$ 、 $Z_{ic}$ 及输出阻抗 $Z_o$ 引起的误差	155
二、失调引起的误差及漂移	156
三、共模增益引起的误差	160
思考题与练习题	162
§ 5 运算放大器的稳定性	162
一、运算放大器的频率响应	163
二、反馈放大器的稳定条件	165
三、负反馈放大器的稳定条件	166
四、补偿方法	168
五、影响负反馈放大器稳定性的外界因素	180
六、模拟电路的稳定性举例	183
思考题与练习题	184
§ 6 运算放大器的闭环频率响应和瞬变响应	185
一、负反馈放大器的频率响应	185
二、负反馈放大器的瞬变响应	191
三、瞬变响应与频率响应之间的关系	198
四、大讯号响应	200
思考题与练习题	202
第五章 稳压电源	204
§ 1 整流滤波直流电源	204
一、半波整流滤波电路	204
二、全波整流滤波电路	206
三、倍压整流电路	207
思考题与练习题	209
§ 2 低压稳压电源	209
一、硅稳压二极管稳压电路	210
二、串联型稳压电源	211
思考题与练习题	218
§ 3 高压稳压电源	219
一、直流变换器	219
二、直流高压的稳定	222
思考题与练习题	222
附录一 半导体器件型号命名方法	223
附录二 一些晶体管的参数	224

# 第一章 电路基础

## § 1 电路的基本知识

在电学中我们已经学过了有关电阻、电容、电感这一类元件的特性以及由这些元件组成的简单电路；也学过了欧姆定律，它反映了电路中电压、电流、电阻三者之间的关系以及分析复杂电路的基本定律如克希霍夫定律等。在这节中，我们将在电学的基础上介绍一些对分析电路有用的概念和常用的定理。

### 一、线性网络

电路是由各种元件构成的，当不考虑电路内部的具体结构或结构很复杂时，电路又可称为网络。

通常元件分成两大类：线性元件及非线性元件。

线性元件是指它的参数值（如 $R$ 、 $C$ 、 $L$ ）为一常数，与加在其两端的电压和流过的电流无关，也与时间无关。既然元件的参数为常数，那末元件两端的电压与流过的电流的关系（简称伏安特性）必定是一个线性（代数或微分）方程，否则就是非线性元件，如晶体管等。

由线性元件组成的电路或网络称为线性电路或线性网络。这一章中我们讨论的都是线性网络，有关的定理等仅适用于线性网络或电路。

一个网络可以有几个引出线，此引出线称为端口。如有两个端口作为讯号输入，两个端口作为讯号输出，那末就称这个网络为四端网络；如只有两个端口则称为二端网络。如果网络仅由电阻等不产生能量的元件组成则此网络称为无源网络；如网络内包括电动势等的能源器件则此网络称为有源网络。

### 二、电压源与电流源

最简单的有源二端网络是电压源和电流源，如图1-1所示。

电压源如图中（a）所示，电动势为 $V$ ，内阻为 $r_s$ ， $R_L$ 为负载电阻。由图可知，负载电

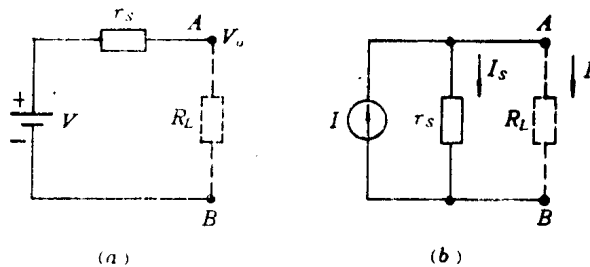


图1-1

(b图中“ $I$ ”应为“ $I_o$ ”。)

阻  $R_L$  两端的电压  $V_o$  为

$$V_o = \frac{R_L}{r_s + R_L} V \quad (1.1)$$

当  $r_s \ll R_L$  时,  $V_o \approx V$ , 电压源的输出电压  $V_o$  几乎不随负载电阻  $R_L$  的大小而变, 这时, 称这个电压源为恒压源; 如果  $r_s = 0$ , 则为理想的恒压源。

(1.1) 式的比例系数  $R_L/(r_s + R_L)$  称为分压系数, 其意思是电阻  $R_L$  上的电压是由电动势  $V$  在串联电阻  $r_s + R_L$  上分配得到的。一般而言, 如电动势  $V$  加在  $N$  个串联电阻上, 则其中第  $m$  个电阻上的电压为

$$V_m = \frac{R_m}{\sum_{i=1}^N R_i} V \quad (1.2)$$

式中  $R_m / \sum_{i=1}^N R_i$  即为分压系数。

电流源如图 1-1 (b) 中所示, 电流源产生的电流为  $I$ , 内阻为  $r_s$ , 负载电阻为  $R_L$ 。由图可知

$$V_{AB} = I(r_s \parallel R_L) = I \cdot \frac{r_s R_L}{r_s + R_L}$$

式中  $r_s \parallel R_L$  表示电阻  $r_s$  与  $R_L$  并联,  $r_s \parallel R_L = r_s R_L / (r_s + R_L)$ 。因而, 流过负载电阻  $R_L$  的电流  $I_o$  为

$$I_o = \frac{V_{AB}}{R_L} = \frac{r_s}{r_s + R_L} \cdot I \quad (1.3)$$

而流过内阻  $r_s$  的电流  $I_s$  为

$$I_s = \frac{V_{AB}}{r_s} = \frac{R_L}{r_s + R_L} \cdot I \quad (1.4)$$

当  $r_s \gg R_L$  时

$$I_o \approx I \quad (1.5)$$

$$I_s \approx 0 \quad (1.6)$$

上两式的意思是: 当电流源内阻  $r_s \gg R_L$  时, 电流源产生的电流  $I$  几乎全部流过负载电阻, 而与负载电阻的大小无关, 这时, 称这个电流源为恒流源。如果  $r_s$  为无穷大, 则为理想的恒流源。

(1.3) 及 (1.4) 式中的系数  $r_s/(r_s + R_L)$  及  $R_L/(r_s + R_L)$  称为分流系数。一般而言, 由 (1.3) 及 (1.4) 式可知, 如有  $N$  个电阻并联, 流过第  $m$  个电阻的电流  $I_m$  为

$$I_m = \frac{V_{AB}}{R_m} = \frac{(R_1 \parallel \dots \parallel R_N)}{R_m} \cdot I \quad (1.7)$$

式中  $(R_1 \parallel \dots \parallel R_N) / R_m$  即为分流系数。

### 三、克希霍夫定律

克希霍夫定律包括两个内容:

### (一) 克希霍夫第一定律

我们以图1-2的电路为例来说明。在电路中凡是有两个以上元件的联接点称为节点，如图中的A或D点等。联接两个相邻节点的一个元件或几个元件的组合称为支路如图中AD或AFE，AD称无源支路，AFE称有源支路。由若干个支路串成的闭合路径称为回路，如图中ABCD A，ADEF A等都是。

克希霍夫第一定律的内容是：流进一个节点的电流总和等于流出这个节点的电流总和。对于图1-2中的节点A来说，电流 $I_1$ 、 $I_2$ 都是流进A点的，电流 $I_3$ 是由A点流出的。根据第一定律，则有下列关系：

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1.8)$$

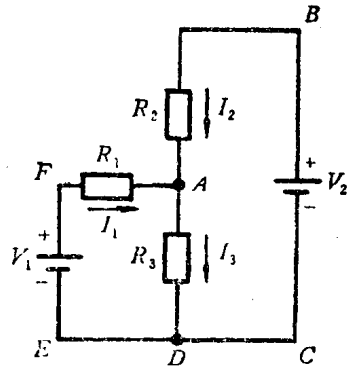


图1-2

### (二) 克希霍夫第二定律

在电路中，有许多闭合的回路。如图1-2中ABCD A、ADEF A和ABCDEF A都是闭合回路。克希霍夫第二定律的内容是“在一个闭合回路中，电动势的代数和等于电阻上的电压降的代数和。”代数和的意思是在进行求和时，要考虑到电动势和电压降上的正负极性。在决定它们的极性时，可以规定顺时针方向为正方向。因此电动势按顺时针方向由负到正为正电动势，反之则负；电流以顺时针方向流动为正，反之则负；电流以顺时针方向流过电阻时，在此电阻上的电压降为正，反之则负。

对图1-2中的闭合回路ABCDEF A，可以写出

$$(+V_1) + (-V_2) = (I_1 R_1) + (-I_2 R_2)$$

即

$$V_1 - V_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2 \quad (1.9)$$

作为一个例子，我们来计算图1-2中的电流 $I_1$ 与 $I_2$ 。

根据第一定律可以写出在节点A的电流方程：

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1.10)$$

根据第二定律可以写出各个有关的回路方程。因为仅要求电流 $I_1$ 和 $I_2$ ，所以考虑闭合回路ADEF A及ABCD A得

$$V_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3 \quad (1.11)$$

$$-V_2 = -I_2 R_2 - I_3 R_3 \quad (1.12)$$

于是问题变成解上述三个联立方程。

解之得：

$$I_1 = \frac{V_1(R_2 + R_3) - V_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} \quad (1.13)$$

$$I_2 = \frac{V_2(R_1 + R_3) - V_1 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} \quad (1.14)$$

最后要说明一下，如果求出的电流为负值，那就表示实际的电流方向与图中假定的方向相反。

#### 四、叠 加 原 理

图1-3为一个简单的电路，现在来求流过电阻 $R$ 的电流值 $I$ 。根据克希霍夫第二定律，写出它的回路方程为

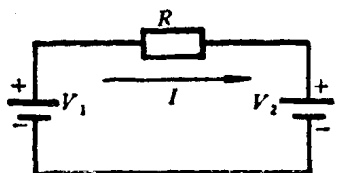


图1-3

$$V_1 - V_2 = IR \quad (1.15)$$

于是

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R} = \frac{V_1}{R} - \frac{V_2}{R} \quad (1.16)$$

由上式可以看出，流过电阻 $R$ 的电流 $I$ ，实际上可以看成由电动势 $V_1$ 及 $V_2$ 分别作用于电阻 $R$ 的结果。因此可以将图1-3分成如图1-4那样两个独立的电路。当电动势 $V_1$ 作用于电阻 $R$ 时， $V_2$ 不起作用，可将它拿走而用一根导线代替，如图1-4中所示，此导线称为短路线。而当电动势 $V_2$ 作用于电阻 $R$ 时， $V_1$ 不起作用也代以短路线。这样，分别求出电流 $I_1$ 和 $I_2$ ，再将它们求和，所得到的结果便是两个电动势 $V_1$ 和 $V_2$ 同时作用于电阻 $R$ 的电流。由图1-4显然可得

$$I_1 = \frac{V_1}{R} \quad (1.17)$$

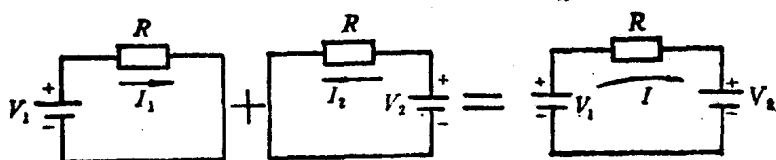


图1-4

$$-I_2 = -\frac{V_2}{R} \quad (1.18)$$

$$I = I_1 + (-I_2) = \frac{V_1}{R} - \frac{V_2}{R} \quad (1.19)$$

由上面简单的例子可以看出：在线性电路中，任一支路的电流（或电压）是由电路中各个电动势（或电流源）单独作用时在该支路中产生的电流（或电压）的代数和。这就是叠加原理，要注意，在应用这个原理时，一个电动势（或电流源）起作用时必须将其它电动势代以短路线或将电流源开路。



## 五、等效电源定理（戴文宁定理）

应用上面讨论的克希霍夫定律，虽然能够分析复杂的电路，但要列出一组方程然后才能求解。叠加原理可以简化其求解的步骤。有时在实际应用中，电路不需要解出每个支路的电流、电压值，只需求某一支路内的电流或电压值，这时我们应用所谓等效电源定理来求解，就会显得更为方便。

以图1-5的电路作为例子来说明这个定理，我们只求流过负载电阻  $R_3$  的电流  $I_3$ 。

先求出  $A$ 、 $B$  两点间的电压  $V_{AB}$

$$V_{AB} = \frac{V(R_2 // R_3)}{R_1 + (R_2 // R_3)} \quad (1.20)$$

其中  $R_2 // R_3$  表示电阻  $R_2$  与  $R_3$  并联， $R_2 // R_3 = R_2 R_3 / (R_2 + R_3)$  因而流过电阻  $R_3$  的电流  $I_3$  为

$$I_3 = \frac{V_{AB}}{R_3} = \frac{V R_2}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} \quad (1.21)$$

为了说明等效电源定理，我们将上式改写一下，将分子分母都除以  $(R_1 + R_2)$ ，得

$$I_3 = \frac{\frac{V R_2}{R_1 + R_2}}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3} \quad (1.22)$$

令  $V' = V R_2 / (R_1 + R_2)$ ， $r_s = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = R_1 // R_2$

则

$$I_3 = \frac{V'}{r_s + R_3} \quad (1.23)$$

根据 (1.23) 式可以画出如图 1-6 所示的电路。现在来比较一下 (1.23) 与 (1.21) 式，可

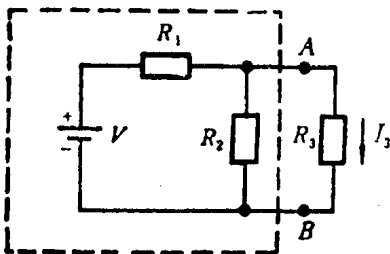


图1-5

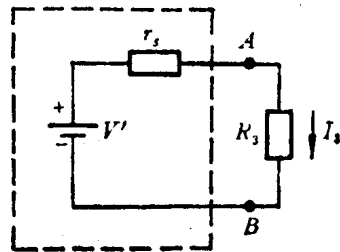


图1-6

以看出这两个等式是完全等价的，因而由 (1.23) 式所得到的电路图1-6也完全与图 1-5 等价。但是比较这两个图可以看出，图1-6比图1-5简单得多，对于只要求流过电阻  $R_3$  中的电流  $I_3$  来说，由图1-6来求显然要比由图1-5简单。现在我们将注意力集中到这两个图中的虚线