

高等学校教学参考书

电 工 基 础

(修订本)

中 册

俞 大 光 编

高等教育出版社

再版序言

本版主要依据 1962 年 5 月高等工业学校教学工作會議審訂的“电工基础教学大綱（試行草案）”（240 学时）进行修訂。中册內容包括該大綱的第一部分“电路和磁路”的后半部，計有集中参数非綫性电路与磁路中的稳定状态、集中参数电路中的过渡过程和分布参数电路等三篇。

目前，全国各高等工业院校都在进一步研究如何使教学內容能符合少而精的原則，以期学生在德、智、体諸方面得到全面发展。本书修訂时也力求貫徹“少而精”原則：对一些次要內容作了删除和精簡，另外还把一些比較次要的內容改用小字排印，作为在教学中可以灵活掌握的部分。由于修訂者教学經驗不足，調查研究不够，故为慎重起見，在这方面暫時还只能作出点滴的改进。

在本版中删除的內容主要有非綫性电路中的三相部分、倍頻器、具有电容負載的整流电路、均匀綫上的杂散波和終端短路綫上波的多次反射等。

在过渡过程方面，本版作了較大的改动和补充：（1）在用經典法解集中参数綫性电路过渡过程中，采取了由簡單到复杂、最后才总结出一般方法的次序，以便于初学者接受。（2）积分变换法中采取了由傅里叶变换过渡到拉普拉斯变换这一逐步引伸的讲法，使前后內容連貫得較好，以期达到溫故而知新的目的；又前者着重頻譜概念的敘述，而后者則着重計算方法的介紹，两者各有分工。（3）积分变换法中的数学部分作了比較詳尽的闡述，这是因为高等数学教学大綱（草案）中沒有这一內容（无綫电技术和电子学类专业除外）。（4）在集中参数电路部分适当穿插了屬於“强迫跃变”的題例，而在分布参数电路部分則补充了算

子解法,这样做有可能使拉普拉斯变换法的优越性更加突出。(5)分布参数电路部分作了较大改动,全章通过终端开路的无损失线与恒定电压的接通作为实例,讲述确定待求积分函数的方法,并引出发出波和反射波的概念,然后适当引伸到比较一般的情况。(6)补充了微分电路和积分电路、脉冲过渡函数、线性电路过渡过程各计算方法的比较,以及解非线性电路过渡过程的分段线性化法等新内容。通过以上的改动和补充,与旧版比较,本版在过渡过程方面的内容就有了相当大的加强,这样做符合近代电工技术发展的需要。

旧版中的一些错误和不够确切的地方,修订时都尽可能作了改正或重写。和上册一样,本版在各章之末均附有该章摘要和习题,在训练计算方法的重要节次之末也附有简单的习题,这些内容都是供教学参考用的。全书共附习题 111 条,其答案列于书末,供读者演题完后备核对用。另外,在名词方面,仍参照教学大纲试行草案上已有的和在有关课程中已较通行的,以及修订者认为较确切的作了修改。中册修订本中的符号下标除国际通用者外试行采用汉语拼音字母;插图中的元件也按新规定的画法绘制,这两点与上册修订本有所不同,请读者注意。最后,书末还编有中、俄、英名词索引,供初学读者查考。

本书的修改工作承哈尔滨工业大学校方及电工基础教研室的大力支持,该室周长源、高象贤、马国强等同志参加了修改工作,卢平、詹庆华、吕碧湖、许承斌等同志协助整理全稿、绘制插图、演算习题及编制索引等工作,他们均投入了大量劳动;修改稿除经重庆大学江泽佳同志和中国科学院黄宏嘉同志仔细审阅外,并经高等工业学校电工课程教材编审委员会电工学及电工基础课程教材编审小组复审通过。编者谨向以上各个单位和同志致以衷心的感谢。

俞大光

1964 年 11 月

中册目录

再版序言	vii
------------	-----

第二篇 集中参数非线性电路与磁路中的稳定状态

第八章 非线性电阻电路	1
§ 81. 非线性电阻元件	1
§ 82. 由非线性电阻串并联所组成的直流电路的计算	6
§ 83. 较复杂的非线性直流电路的解法	11
§ 84. 非线性电阻电路的有条件线性化法	16
§ 85. 只含有电阻元件的非线性交流电路	20
提要	23
总习题	24
第九章 磁路	26
§ 86. 磁场与磁路	26
§ 87. 铁磁物质的磁化	29
§ 88. 磁路诸定律与磁路的特点	34
§ 89. 恒定磁通无分支磁路的计算	39
§ 90. 恒定磁通分支磁路的计算	44
§ 91. 永久磁铁	47
§ 92. 交流磁通磁路的特点	51
§ 93. 略去磁滞与涡流影响时交变磁通磁路的分析	52
§ 94. 磁滞对电流或磁通波形的影响·磁滞损失	56
§ 95. 涡流的磁效应·涡流损失	60
§ 96. 正弦交变磁通磁路在应用等效正弦量概念时的实用算法	67
§ 97. 交变磁通磁路的定律及其应用	71
提要	74
总习题	76
第十章 含有非线性电感与电容的周期电流电路	78
§ 98. 非线性电感	78
§ 99. 铁心线圈电路	81
§ 100. 铁磁共振电路	86
§ 101. 具有直流基础的铁心线圈	90
§ 102. 非线性电容器及其电路	95

提要·····	97
总习题·····	97

第三篇 集中参数电路中的过渡过程

第十一章 线性电路中的过渡过程及其经典算法·····	99
----------------------------	----

§ 103. 电路中过渡现象的产生·换路定律·····	99
§ 104. 自由分量与强制分量·衰减常数与时间常数·····	104
§ 105. 电阻电感串联电路中的过渡过程·····	108
§ 106. 电阻电容串联电路中的过渡过程·····	115
§ 107. 微分电路与积分电路·····	121
§ 108. 电阻电感电容串联电路中的过渡过程——非振荡情况·····	123
§ 109. 电阻电感电容串联电路中的过渡过程——临界非振荡情况·····	132
§ 110. 电阻电感电容串联电路中的过渡过程——振荡情况·····	133
§ 111. 线性电路过渡过程的经典算法的一般情况与讨论·····	141
提要·····	149
总习题·····	150

第十二章 解线性电路过渡过程的积分变换法与叠加法·····	154
-------------------------------	-----

§ 112. 傅里叶变换·····	154
§ 113. 拉普拉斯变换·····	160
§ 114. 积分变换的几个基本性质·····	163
§ 115. 从象函数求原函数·拉普拉斯反变换·····	168
§ 116. 欧姆定律与基尔霍夫定律的算子形式·····	172
§ 117. 利用拉普拉斯变换计算过渡过程·····	174
§ 118. 起始条件化为零值的方法·····	181
§ 119. 单位阶跃电压与单位脉冲电压对无源二端网络的作用·····	183
§ 120. 应用杜阿密尔积分解过渡过程·····	187
§ 121. 线性电路过渡过程各种计算方法的比较·····	193
提要·····	195
总习题·····	197

第十三章 非线性电路中的过渡过程·····	201
-----------------------	-----

§ 122. 非线性电路中的过渡过程及其计算方法·····	201
§ 123. 直接积分法·····	201
§ 124. 图解积分法·····	203
§ 125. 有条件的线性化法·····	205
§ 126. 分段线性化法·····	209
§ 127. 有限增量法·····	211
§ 128. 非线性电路平衡工作状态稳定性的概念·····	214

§ 129. 张弛振荡·····	218
提要·····	220
总习题·····	221
第四篇 分布参数电路	
第十四章 分布参数电路中的稳定状态·····	223
§ 130. 电路参数的分布性与分布参数电路·····	223
§ 131. 均匀线的微分方程·····	224
§ 132. 均匀线在正弦电压作用下的稳定状态·····	226
§ 133. 行波·····	231
§ 134. 传播常数与波阻抗·····	235
§ 135. 波的反射与无反射线·····	238
§ 136. 均匀线的开路与短路工作状态·····	242
§ 137. 无畸变线·····	246
§ 138. 无损失线·····	249
§ 139. 均匀线的集中参数等效电路·····	257
§ 140. 对称四端网络的传输常数与特性阻抗·····	261
提要·····	267
总习题·····	270
第十五章 分布参数电路中的过渡过程·····	272
§ 141. 无损失均匀线微分方程的通解·····	272
§ 142. 终端开路的无损失线与恒定电压的接通·····	275
§ 143. 均匀线换路时波的发出·····	278
§ 144. 波的反射与透射·····	283
§ 145. 几个极简单情况下的反射波与透射波·····	287
§ 146. 均匀线方程的算子解法·····	296
提要·····	301
总习题·····	306
习题答案·····	308
参考书·····	311
名词索引与中俄英名词对照·····	312

第二篇 集中参数非线性电路与 磁路中的稳定状态

第八章 非线性电阻电路

§ 81. 非线性电阻元件

在以前各章中分析电路时,曾认为电阻、电感和电容等电路参数都是不随电流和电压而改变的常量。从本章开始将要研究另一类电路问题;这种电路中所包含的某些元件,其参数不再是常量,而是电流或电压的函数。这种电路的分析方法,与前比较,有很大差别。本章先研究只含有这类电阻元件的电路。

当电阻元件中通过电流 i 时,其两端间电压 u 将是电流的函数:

$$u=f(i).$$

u 和 i 的数量关系一般需要从实验求得,常常把它画成曲线,如图81-1所示。图中的纵横坐标分别代表电压和电流,并以伏特和安培或其辅助单位标注。我们称这种表征电压和电流之间关系的曲线为伏安特性曲线。

在以前各章中,认为电阻上电压和电流的关系是遵循欧姆定律的:

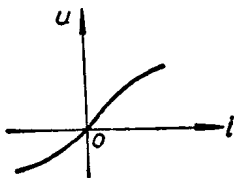


图 81-1

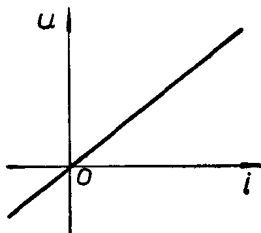


图 81-2

$$u = ri,$$

其中 r 是常量。也就是说，认为电阻上的 u 和 i 成线性关系，其伏安特性曲线是一根通过原点的直线(图 81-2)；具有这种性质的电阻元件称为线性电阻元件。此外还有一类元件，其中的电压和电流不成线性关系： r 不是常量，伏安特性曲线不是直线，这类元件我们称之为非线性电阻元件。

非线性电阻元件在计算电路图中仍用一般的电阻符号表示，但在电阻符号一旁添一直线，以便与线性电阻相区别，如图 81-3 所示。



图 81-3

造成电阻非线性的原因之一是热效应。我们在物理学中已经知道金属导体的电阻要随温度而变动。例如，当金属中所通过的电流有所变动时，金属所产生的热量也要变动，因而温度就有所升降，电阻值也就有所增减。白炽灯、真空管和热敏电阻等，其热效应特别显著，特称为热效非线性电阻。

常用于照明的白炽灯多半是钨丝灯，其伏安特性曲线如图 81-4 中曲线 1，可见当电压升高时，电阻加大。还有一种碳丝灯，性质恰恰与此相反，其伏安特性曲线如图 81-4 中曲线 2。

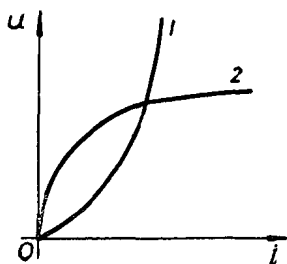


图 81-4

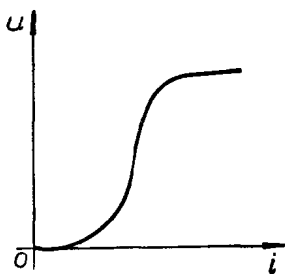


图 81-5

真空管是把钨丝密封在充以氩气的玻璃管中制成的，管内气压约为 80 毫米汞柱左右。由于管中氩气的冷却条件会随钨丝中电流产生的热量作适当的改变，所以其伏安特性曲线有如图 81-5 所示形状；在某一电压范围内，电流几乎保持不变。实用上常把真空管与负载串联，以便在某一电压范围内保持负载电流稳定不变。

热敏电阻是一种对温度的反应极为灵敏的元件。这种元件可用金属細絲制成，其特性曲线与鎢絲灯相似(图 81-4 曲线 1)；也可用半导体作成，其特性曲线如图 81-6 所示。热敏电阻的伏安特性与环境温度有关，图上所示例子是环境温度 0°C 时所得者。热敏电阻用于自动化、远距离控制和测量技术等方面。

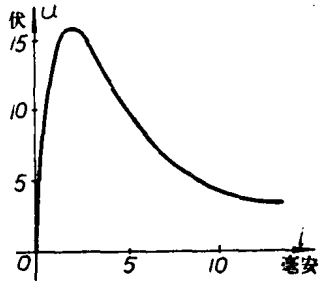


图 81-6

热敏电阻有一个共同特点，即当电流迅速变动时，由于元件本身有一定的热容量，故其温度不可能追随电流的迅速变动而作相应的变动。换句话说，这种非綫性电阻是具有热慣性的，故也称为有慣性的非綫性电阻。当然，慣性的大小，与元件的热容量有关。例如当白熾灯中通以具有一定有效值的工频交流时，在半周内电流值的变动很大，但温度仍保持不变，电阻也就保持一定量值。只有当电流的有效值变动时，温度才发生变动，电阻值才随之而改变。

热敏电阻，不具有方向性，故其伏安特性都是与原点对称的。这样的电阻，称为对称非綫性电阻。

另一类电阻的非綫性是由某些物质特有的电子运动规律所决定的，而与所散逸的热量和具有的温度无直接关系；但其电阻值仍依赖于电流或电压的量值，甚至还与电流电压的方向有关。这种非綫性电阻不具有热慣性，称为无慣性非綫性电阻。电弧、砂礫陶、电子管和半导体管等的电阻都属于这类非綫性电阻。

电弧是一种常見的弧光放电现象。放电时产生大量的热，因此能利用它造成高温电弧炉，是冶金方面的重要电气设备。另外，它还作为探照灯和弧光放映机的光源。

电弧的伏安特性曲线如图 81-7 所示。图中 U_1 为起弧电压，当电弧燃起以后，维持电弧的电压 U_2 远较起弧电压为低。

如果电弧的两个电极具有相同的形状，并系由同一材料制成，则伏安特性曲线即与原点对称，这种电弧的电阻即为对称非綫性电阻。

砂礞陶是一种半导体,是由处理过的石墨与金刚砂(SiC)混合焙制而成的物质。它可以作避雷器用。当它所受电压上升并越过某一量值时,其电阻急剧下降;但在所受电压较低时,这种电阻元件呈显甚高的电阻。因此,若将用这种物质做成的避雷器并联在发电机或变压器上,则当遇雷击时,由于电压的突然上升致使避雷器电阻大大降低,形同短路,因而分流了绝大部分的雷击电荷,电机变压器等就可以免致损坏。但在正常运行时,避雷器的电阻极大,所以消耗的电流和功率都十分微小。砂礞陶的电阻也是对称非线性电阻。

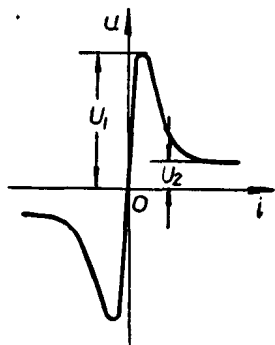


图 81-7

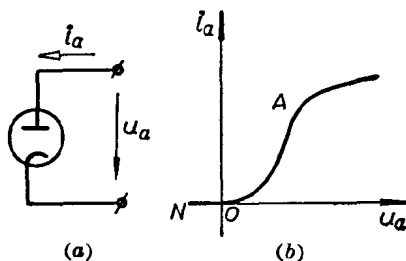


图 81-8

电子管是近代自动和运动控制、计算装置、有线通讯和无线电技术中的重要元件。最简单的电子管是二极管真空管 [图 81-8(a)], 阳极电流 i_a 和阳极电压 u_a 之间的关系如图 81-8(b) 中曲线 NOA 所示。当阳极电压 u_a 为负时, 管中无电流通过。电子管的伏安特性曲线对原点不对称, 即其电阻与电压方向有关, 故为不对称非线性电阻。这种装置可以用来将方向交变的电流(交流)变为方向不变的电流, 这种作用称为整流。大功率的整流是用所谓汞弧整流管来实现的, 它是一种充气管, 由于其中的导电是利用离子, 故称为离子管。

在二极管内增加一个栅极则成为三极管(图 81-9), 三极管中可借栅极电位 φ_g 的改变来控制阳极电流 i_a , 即在不同的 φ_g 值下, 表示阳极电压 u_a 和阳极电流 i_a 关系的伏安特性曲线也各不相同, 如图 81-10 所示。对于阳极电路来说, 三极管的电阻仍为非线性电阻, 但其伏安特性却可以控制; 这种非线性电阻称可控非线性电阻。正由于这种可控性质, 三极管才获得了广泛的应用。

半导体二极管广泛用作整流元件; 它可通过一些特殊工艺制成, 例如, 通过在一块锗(或硅)的样品两边掺入不同杂质的方法制成。掺入阳性杂质如硼、铜、镓等就形成P型半导体, 掺入阴性杂质如砷、锑、磷等就形成N型半导体。这样, 在同

一块半导体中 P 型部分与 N 型部分的交界处就形成阻挡层。

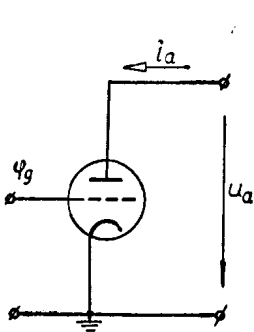


图 81-9

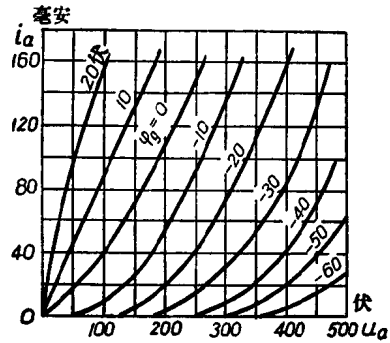


图 81-10

当在此样品施以电压而其方向为从 P 型部分指向 N 型部分时[图 81-11(a)], 则产生正向电流; 加反向电压时虽然也能形成反向电流, 但由于阻挡层的作用, 电流很快就达到饱和。其伏安特性如图 81-11(b) 所示。

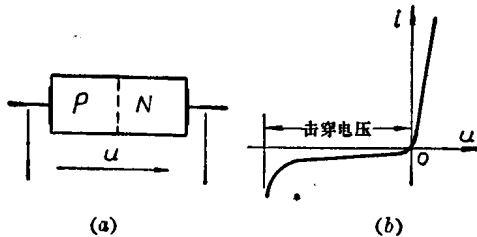


图 81-11

小型整流器中常应用工艺上较简单的硒半导体; 在整流式电表则较多地应用氧化亚铜半导体。

半导体三极管又称为晶体管, 它的电阻是一种可控的非线性电阻。图 81-12(a) 是一种晶体管的示意图。用 N 型半导体作为基极 (图中以 b 表示); 其两边则做成 P 型半导体, 一边作为发射极 (以 e 表示), 另一边作为集电极 (以 c 表示)。图 81-12(b) 是晶体管的一种接法, 此时改变基极电流 i_b , 便可以控制集电极和发射极之间电压 u_{ec} 与集电极电流 i_c 之间的特性。对集电极电路而言, 晶体管的电阻是一个可控非线性电阻。晶体管的伏安特性曲线如图 81-12(c) 所示。与电子管相比, 晶体管具有体积小、强度大、寿命长和不需灯丝等优点, 在许多应用中它已取代了电子管的地位。

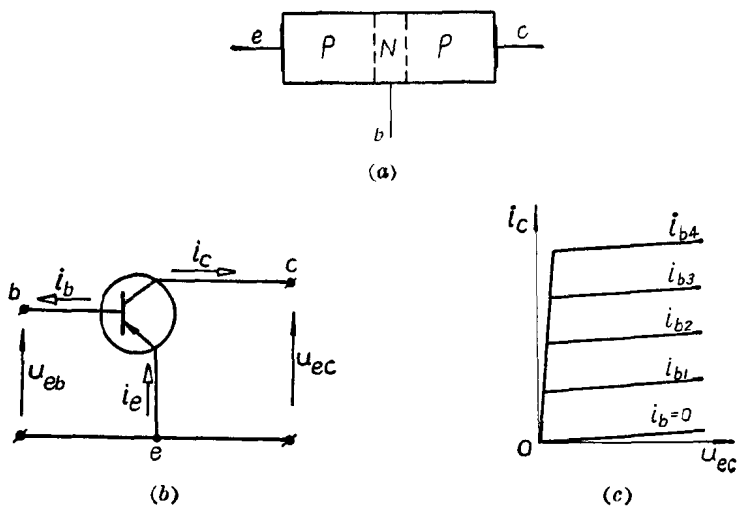


图 81-12

§ 82. 由非綫性电阻串并联所組成的直流电路的計算

包含非綫性元件的电路称为非綫性电路。在实际上，遇到的非綫性电路中往往只有一部分是非綫性元件，而其余都是綫性元件。但不論电路中具有多少非綫性元件，两条基尔霍夫定律(任一节点 $\sum i = 0$ ，任一迴路 $\sum u = 0$)依然成立，且仍是計算这类电路的基本定律。

对于非綫性电阻元件的电阻，不可能給出一个能适合于元件各种工作情况的固定数值；一般只給出它們的伏安特性曲綫。因此，在計

算时，常常采用图解方法。

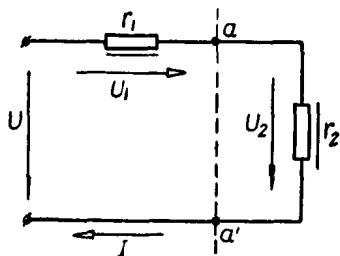


图 82-1

設在图 82-1 所示的串联电路中，电阻 r_1 和 r_2 都是非綫性的，其伏安特性曲綫已給定[图 82-2 中的 $U_1(I)$ 和 $U_2(I)$ 两曲綫]。現在来求此串联电路在电压 U 作用下的电流。

根据基尔霍夫第二定律，有：

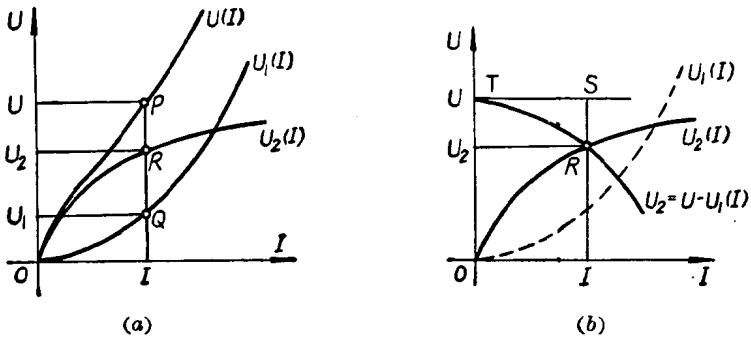


图 82-2

$$U = U_1 + U_2; \quad (82-1)$$

而在串联电路中各元件通过同一电流,故把图 82-2(a)中曲线 $U_1(I)$ 和曲线 $U_2(I)$ 在相同的电流横坐标上的纵坐标相加,便得到表示电路总电压与电流关系的曲线 $U(I)$ 。这就是两电阻 r_1 与 r_2 串联后所得等效非綫性电阻的伏安特性曲线。按已知的电压 U 作一水平线,交 $U(I)$ 于 P 点, P 点的横坐标即为电路的电流 I 。过 P 点的铅直线分别与 $U_1(I)$ 和 $U_2(I)$ 曲线相交于 Q 和 R 点, Q 和 R 点的纵坐标便是各元件上的电压 U_1 和 U_2 。这种方法称为曲线相加法。

两个以上的电阻相串联的电路,其计算方法与此相仿,这时,只要把各元件的伏安特性曲线在相同的电流横坐标上加起来,便可得出电路总的伏安特性曲线,从而由已知电压决定电流;求出电流后,再由各元件的伏安特性曲线,即可得到各段电路的电压。

我們还可利用另一方法来处理图 82-1 的电路。把此电路分为两部分,如图上虚线 aa' 左右两部分。 aa' 右侧是非綫性电阻元件 r_2 , 其端电压和电流间应满足其伏安特性

$$U_2 = U_2(I), \quad (82-2)$$

即图 82-2(b)上曲线 $U_2(I)$ 所示的关系。 aa' 左侧可看成是一个由定电压源(电压为 U)和非綫性电阻 r_1 所组成的电源,其端电压和电流的关

系, 可从(82-1)式移項而得:

$$U_2 = U - U_1(I). \quad (82-3)$$

在图 82-2(b)上作一水平綫 TS , 其纵坐标为 U 。再画出 r_1 的伏安特性曲綫 $U_1(I)$ (图中虛綫), 在不同的电流值 I 下, 将 TS 和 $U_1(I)$ 相减, 便得表示(82-3)式的曲綫。此曲綫其实就是非綫性电源的外特性。現在(82-2)和(82-3)两式都是表达同一电压 U_2 和电流 I 之間的关系, 它們應該同时被滿足; 联立求解这两方程, 便得解答。因而, 从图来看, 两曲綫

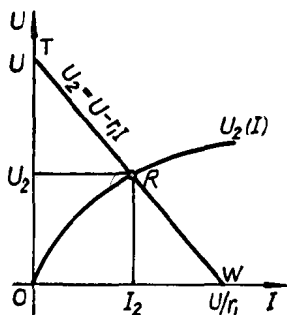


图 82-3

的交点 R 便是該解答; 其纵坐标代表 U_2 , 横坐标代表 I 。过 R 点作鉛垂綫与 TS 相交于 S , 則 SR 綫段就代表 U_1 。这种方法称为曲綫相交法。

在有綫性电阻元件时, 曲綫相交法显示出更大的优越性。例如, 假設图 82-1 电路中 r_1 是綫性的, r_2 是非綫性的; 如用曲綫相加法, 則除画出伏安特性 $U_2(I)$ 外, 还需要画出綫性电阻 r_1 的伏安特性(通过原点的一条直綫), 再逐点相加。如用曲綫相交法, 把 r_1 与 U 放在一起, 成为一个綫性电源; 其外特性仍是(82-3)式, 但可写成

$$U_2 = U - r_1 I, \quad (82-4)$$

其中 U 和 r_1 都是常量, 故此式是一个直綫方程。只需求出綫上任意两点, 便可决定此直綫。例如, 根据(82-4)式, 設 $I=0$, 則 $U_2=U$, 得 T 点; 設 $U_2=0$, 則 $I=\frac{U}{r_1}$, 得 W 点, 把 T 、 W 两点相連, 便得上述直綫(其实, T 、 W 两点就是电源的开路和短路工作点)。直綫 TW 与已画出的伏安特性曲綫 $U_2(I)$ 相交于 R 点, 其坐标便是所要求的解答。

如果电路中有多个电阻相串联, 則可把其中所有綫性电阻相加, 得到一个等效綫性电阻, 而所有非綫性电阻用曲綫相加法求出其等效非

线性电阻的伏安特性曲线。这样,就相当于是把上述电路化成一个线性电阻与一个非线性电阻元件相串联的电路,从而可利用曲线相交法求解。若电路中所有电阻元件都是非线性的,则可以取一个电阻与外电压一起,作出伏安特性曲线;此曲线与其余的电阻元件的合成伏安特性曲线相交,交点的坐标便是所要求的解答。这种做法由于在图中进行相加的曲线少了一根而显得方便一些。

当电路是由各电阻元件并联组成(图 82-4)时,若已知外施电压 U ,则完全可以不必进行作图。因为电压 U 也就是各电阻元件所受的电压,通过线性电阻 r_1 的电流 I_1 则可用欧姆定律算出:

$$I_1 = \frac{U}{r_1}; \quad (82-5)$$

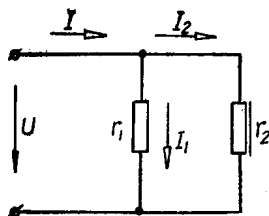


图 82-4

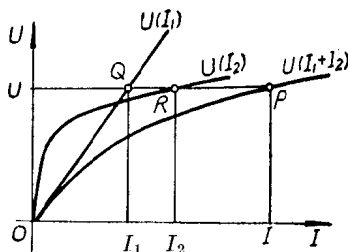


图 82-5

而通过非线性电阻 r_2 的电流 I_2 则可从它的伏安特性曲线上查出,这样,便可应用基尔霍夫第一定律算出总电流 I :

$$I = I_1 + I_2. \quad (82-6)$$

如果已知的不是外施电压 U ,而是电流 I ,即要研究电流 I 在两个支路中的分配问题,则需要作图。作图的原则是依据基尔霍夫第一定律,在相同的电压纵坐标下把曲线 $U(I_1)$ 和 $U(I_2)$ 的横坐标相加(图82-5),得到曲线 $U(I_1+I_2)=U(I)$ 。然后按已知的电流画一铅直线,此线与曲线 $U(I)$ 的交点 P 的纵坐标即为所求的电压 U 。通过 P 点的水平线与曲线 $U(I_1)$ 和 $U(I_2)$ 交于 Q 和 R 两点,这两点的横坐标各代表支路电流 I_1 和 I_2 。

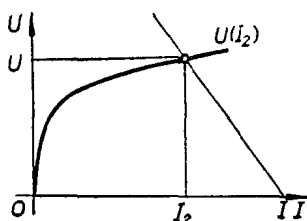


图 82-6

并联电路也可以按曲线相交法求解，其原理与串联电路中所用的相似，读者可从图 82-6 中揣摩掌握。

在计算兼有串联和并联的混联电路时，可以连续运用上述串联和并联电路的计算法。下面举实例来说明。

例题 82-1 图 82-7 中的非线性电阻 r_1 、 r_2 和 r_3 的伏安特性曲线如图 82-8 中曲线 1、2 和 3 所示。已知 $E=10$ 伏， $r_0=1$ 欧。试计算各非线性电阻消耗的功率和电源内的功率损失。

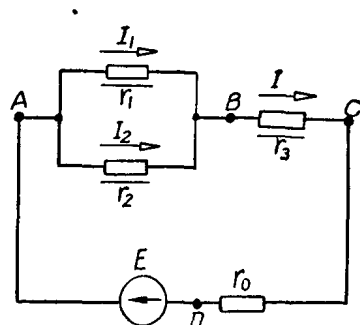


图 82-7

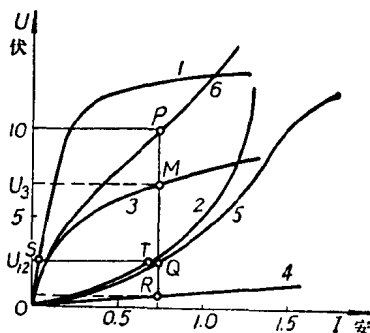


图 82-8

解：内电阻 r_0 的伏安特性可以画出如曲线 4。

由于电阻 r_1 和 r_2 系并联，故将曲线 1 和 2 的横坐标(电流坐标)相加，得到曲线 5，也就是 r_1 和 r_2 的并联可以拿一个等效非线性电阻 r_{12} 来代替，其伏安特性如曲线 5 所示。

由于电阻 r_3 和 r_0 系与并联等效非线性电阻 r_{12} 串联，故将曲线 3、4、5 的纵坐标(电压坐标)相加，得到曲线 6。

按已知电动势 $E=10$ 伏作一水平线，此线和 6 的交点 P 的横坐标为 $I=0.73$ 安，即为电路的总电流，也就是 r_3 、 r_0 中的电流。

过 P 点作铅直线，与曲线 3、4 和 5 分别交于 M、R 和 Q，它们的纵坐标为 $U_3=7$ 伏、 $U_0=0.7$ 伏和 $U_{12}=2.3$ 伏，即为电阻 r_3 、内电阻 r_0 和并联电阻 r_1 及 r_2 上的电压。

过 Q 点作水平线，与曲线 1 和 2 分别交于 S 和 T，它们的横坐标为 $I_1=0.05$ 安

和 $I_2 = 0.68$ 安, 即为电阻 r_1 和 r_2 中的电流。

根据各电阻上的电压和电流計算功率如下:

$$\text{电阻 } r_1 \text{ 消耗功率 } P_1 = U_{12} I_1 = 2.3 \times 0.05 = 0.115 \text{ 瓦},$$

$$\text{电阻 } r_2 \text{ 消耗功率 } P_2 = U_{12} I_2 = 2.3 \times 0.68 = 1.564 \text{ 瓦},$$

$$\text{电阻 } r_3 \text{ 消耗功率 } P_3 = U_3 I = 7 \times 0.73 = 5.110 \text{ 瓦},$$

$$\text{电源內的功率损失 } P_0 = U_0 I = 0.7 \times 0.73 = 0.511 \text{ 瓦}.$$

若以电源中轉換来的电功率 $EI = 10 \times 0.73 = 7.3$ 瓦作校驗, 則因 $\Sigma P = P_1 + P_2 + P_3 + P_0 = 7.3$ 瓦, 沒有誤差。但实际上对电阻 r_0 中的电压降若按欧姆定律計算則应为 $U'_0 = r_0 I = 0.73$ 伏, 与 $U_0 = 0.7$ 伏比較, 存在有 5% 左右的誤差。在图解計算法中这种誤差是难免的。

习题 82-1 有一个非綫性电阻元件, 其伏安特性由下表数据給出:

U (伏)	2.1	3.5	4.6	5.4	6.0	6.6	7.0	7.4	7.6	7.9
I (安)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

該电阻元件接于电动势为 10 伏、內阻为 1 欧的直流电源。求此电阻上的电压、电流和功率各为多少? 若該元件接到一个电流为 10 安、內电导为 1.25 1/欧 的定激源, 問此时电阻中的电流、电压和功率又各为多少?

习题 82-2 上題給定的非綫性电阻元件与一个 8 欧的綫性电阻 并联后再接到电动势为 10 伏、內阻为 1 欧的直流电源上去。試求各支路电流。

§ 83. 較复杂的非綫性直流电路的解法

上节只討論了由非綫性电阻串并联所組成的电路的图解法, 其实, 这种方法还可以推广到含源支路串并联的非綫性电路中去。我們首先作出每一支路的伏安特性曲綫, 然后应用曲綫相加和曲綫相交的方法求解。現在我們来分析图 83-1(a) 所示电路。設其中各非綫性电阻的伏安特性相同, 如图 83-1(b) 所示。

首先写出各支路电压和电流的方程:

$$\text{第一支路} \quad U_{ab} = E_1 - U_1(I_1), \quad (83-1)$$

$$\text{第二支路} \quad U_{ab} = -E_2 + U_2(I_2), \quad (83-2)$$

$$\text{第三支路} \quad U_{ab} = U_3(I_3); \quad (83-3)$$

把此三式画成曲綫, 便是各支路的伏安特性曲綫。对于第三支路, 由 (83-3) 式可見, 其伏安特性曲綫就是非綫性电阻元件的伏安特性曲綫, 可直接从图 83-1(b) 移来, 如图 83-1(c) 中曲綫 $U_{ab}(I_3)$ 。在作第一支路的伏安特性曲綫时, 可采用上节所述的非綫性电阻伏安特性曲綫相交法, 根据 (83-1) 式, 即先在图 83-1(c) 上作一