

电工学的理论基础

第二卷

〔苏〕П.А.依昂金 主编 王景熙 唐忠德 译

水利电力出版社

711/1
6.2

电 工 学 的 理 论 基 础

第 二 卷

〔苏〕П.А.依昂金 主编 王景熙 唐忠德 译

水 利 电 力 出 版 社

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ТОМ 2

Под Ред. Проф. П. А. ИОНКИНА

«ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1976

电工学的理论基础

第二卷

[苏] П. А. 依昂金 主编

王景熙 唐忠德 译

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 19.25印张 431千字

1986年10月第一版 1986年10月北京第一次印刷

印数0001—4150册 定价3.95元

书号 15143·6030

内 容 提 要

本书是根据苏联高等教育出版社1976年出版的《电工学的理论基础》第二卷译出。原书主编 П.А. 依昂金系莫斯科动力学院教授，五十年代曾参加修订 К.А. 克鲁格教授编写的《电工原理》。

全书的第一卷为线性电路理论部分，第二卷为非线性电路及电磁场理论部分，论证严密。书中还附有大量例题。是一本较好的教科书，对我国大专院校有关专业师生及科学技术人员均有较大的参考价值。

本书第二卷由王景熙、唐忠德两位讲师翻译，滕福生教授通校了全稿。

目 录

第一部分 非线性电路

第七篇 非线性电路的稳定过程及其计算方法

第二十章 非线性直流电路和磁路的基本特性与计算方法	1
§ 20.1 典型的非线性特性的图形表示	1
§ 20.2 计算线性元件与非线性元件串联无分支电路的图解法	3
§ 20.3 计算线性元件与非线性元件并联电路的图解法	4
§ 20.4 计算线性元件与非线性元件串-并联电路的图解法	5
§ 20.5 计算具有非线性元件分支电路的图解法	6
§ 20.6 计算具有线性及非线性元件电路的图解—解析法 线性多端网络方程的应用	7
§ 20.7 计算非线性分支电路的迭代法 非线性多端网络的概念	10
§ 20.8 计算具有非线性三端网络的图解法	16
§ 20.9 求解非线性问题的一些特点	18
§ 20.10 磁路的状态方程和与电路相比拟	18
§ 20.11 计算无分支磁路和有分支磁路的图解法	20
§ 20.12 具有空气隙的环形永久磁铁磁路的计算	24
第二十一章 交流非线性电路的特点及其计算方法	26
§ 21.1 在交流电流和电压下的非线性元件及其特性曲线	26
§ 21.2 计算非线性电路的解析方法	28
§ 21.3 计算非线性电路的图解法	30
§ 21.4 计算非线性电路的图解—解析法	32
§ 21.5 计算非线性电路的迭代法	34
第二十二章 交流非线性电路稳定过程的分析	35
§ 22.1 分析具有对称特性的非线性电抗元件的电路	35
§ 22.2 含非线性电抗元件电路有直流分量时的电压和电流瞬时值	41
§ 22.3 铁芯线圈的等效电路和向量图	50
§ 22.4 铁芯变压器的等效电路和向量图	51
§ 22.5 非线性电路中的谐振现象	54
§ 22.6 交流电路中的半导体非线性电阻元件	59

第八篇 非线性电路中的过渡过程 自激振荡

第二十三章 非线性电路中的过渡过程	65
§ 23.1 非线性电路中过渡过程的特点	65

§ 23.2	计算简单非线性电路中的过渡过程	65
§ 23.3	振幅慢变化法	70
§ 23.4	状态变量法	73
§ 23.5	采用分段线性逼近法计算复杂的非线性电路	78
§ 23.6	过渡过程在相平面上的表示	81
§ 23.7	关于非线性电路稳定性的概念	85
§ 23.8	电路中过渡过程模拟的概念	86
第二十四章	自激振荡	89
§ 24.1	自激状态的特点	89
§ 24.2	非线性元件具有下降伏—安特性曲线的电路中的准谐波振荡	90
§ 24.3	具有非线性电阻电路中的弛张振荡	94

第二部分 电磁场理论基础

第九篇 电磁场的特性和基本方程

引 言	98
第二十五章 电磁场基本方程	100
§ 25.1 麦克斯韦第一方程(磁场的涡旋)	100
§ 25.2 麦克斯韦第二方程(电场的涡旋)	101
§ 25.3 电磁场的源	102
§ 25.4 场向量与媒质参数间的关系	102
§ 25.5 电磁场的能量	102
§ 25.6 电磁场向量的边界条件	103
§ 25.7 全电流线的闭合性 电荷守恒律	103
§ 25.8 乌莫夫-坡印亭定理	104
§ 25.9 各种坐标系中的梯度、散度和旋度方程的推导	107

第十篇 静电场的基本特性和计算方法

第二十六章 静电学的基本方程	111
§ 26.1 简评微分形式的静电方程	111
§ 26.2 静电场的源	111
§ 26.3 静电场的涡旋	112
§ 26.4 泊松方程和拉普拉斯方程	112
§ 26.5 静电场中的边界条件	113
§ 26.6 两种介质分界面上的边界条件	115
§ 26.7 导体表面的边界条件	115
§ 26.8 作用于导体的力	116
§ 26.9 多个带电导体的电场能量	117
§ 26.10 唯一性定理 镜像法	118

第二十七章 应用积分和微分形式的静电方程计算场	119
§ 27.1 泊松方程和拉普拉斯方程的特解	119
§ 27.2 电偶极子的电场	120
§ 27.3 带电线段的电场	121
§ 27.4 无限长均匀带电轴线的电场	122
§ 27.5 两根带异性电荷轴线的场	123
§ 27.6 不共轴平行圆柱体的电场和电容	125
§ 27.7 圆柱—平面系统的电场和电容	126
§ 27.8 双导线的电场和电容	127
§ 27.9 考虑大地影响时双导线的电场和电容	128
§ 27.10 一般情况下, 含电位系数、电容系数和部分电容的方程	130
§ 27.11 三相换位线路的导线电容	131
§ 27.12 二芯及三芯电缆的电位系数	133
§ 27.13 同轴电缆的电场和电容	133
§ 27.14 带电轴与两介质平分界面或圆柱形分界面平行时的电场(希尔问题)	134
§ 27.15 积分方程法	137
§ 27.16 均匀电场中的圆柱体	139
§ 27.17 拉普拉斯方程的特解和与之相应的电场	140
§ 27.18 分离变量法 在均匀电场中的球形导体	140
§ 27.19 均匀电场中的介质球	144
§ 27.20 复电位法	145
§ 27.21 位于同一直线上的电荷的场	148
§ 27.22 电力线与等位线所限定的无电荷多角形内的场 克里斯托弗—施瓦兹公式	150
§ 27.23 把曲座标线所限定的区域映射为上半平面 雅可比椭圆函数	152
§ 27.24 矩形的映射	155

第十一篇 恒定电流场与恒定磁场及其计算方法

第二十八章 恒定电流场及其算法	156
§ 28.1 微分形式的欧姆定律	158
§ 28.2 微分形式的焦耳—楞次定律	159
§ 28.3 微分形式的基尔霍夫定律	161
§ 28.4 导体中的恒定电流场与介质中静电场的对比	165
§ 28.5 载流导体周围介质中的电场	168
§ 28.6 非完全绝缘媒质中的电场	168
§ 28.7 恒定电流场的复电位	169
第二十九章 恒定磁场及其计算方法	171
§ 29.1 积分形式的恒定磁场方程	171
§ 29.2 微分形式的恒定磁场方程	172
§ 29.3 磁场向量的边界条件	173
§ 29.4 磁场的向量磁位	173

§ 29.5	电流元的磁场	175
§ 29.6	用向量位表示磁通和磁场能量	176
§ 29.7	磁链 自感和互感	177
§ 29.8	平行载流长导线的磁场 与磁导率不同的两媒质平分界面或圆柱形分界面平行的 载流导体	179
§ 29.9	圆形截面单导线的向量位	181
§ 29.10	双导线线路的磁场和电感	183
§ 29.11	同轴电缆的磁场和电感	184
§ 29.12	换位三相线路的电感	186
§ 29.13	两线路的互感	186
§ 29.14	磁场的机械力	187
§ 29.15	电流元的相互作用	188
§ 29.16	磁场的标量位	190
§ 29.17	标量磁位的多值性	191
§ 29.18	线电流的标量磁位 磁偶极子	192
§ 29.19	磁场的积分方程算法	193
§ 29.20	磁导率为无限大的物质中恒定电流的平行平面磁场	195
§ 29.21	$\mu = \infty$ 的铁磁物质平表面上方的线电流 (希尔第一问题)	198
§ 29.22	圆形管道中的线电流 (希尔第二问题)	198
§ 29.23	直角内和直角外的线电流 (图29.7)	199
§ 29.24	矩形管道内的线电流	200
第三十章	近似算法与静态场及稳定场的模拟	201
§ 30.1	图解法	201
§ 30.2	网格法	202
§ 30.3	迭代法	205
§ 30.4	类比法	205
§ 30.5	固体的导电媒质模型	206
§ 30.6	电解模型	207
§ 30.7	电阻网格	208

第十二篇 交 变 电 磁 场

第三十一章	复数形式的电磁场基本方程	210
§ 31.1	复数形式的麦克斯韦方程	210
§ 31.2	复数形式的乌莫夫-坡印亭定理	211
§ 31.3	唯一性定理	212
§ 31.4	均匀介质中的平面波	213
第三十二章	集肤效应和临近效应	217
§ 32.1	均匀导体中的简谐平面波 它与介质中波的关系	217
§ 32.2	薄板中的集肤效应	221
§ 32.3	圆导线中的集肤效应	223

§ 32.4	集肤效应和邻近效应的近似算法	227
§ 32.5	导电媒质中交变电磁场的模拟	230
第三十三章	单元辐射子的辐射	232
§ 33.1	电磁位的微分方程	232
§ 33.2	单元电辐射子 (赫兹偶极子)	236
§ 33.3	单元磁辐射子	242
§ 33.4	准稳场 瞬时值的基尔霍夫定律	243
§ 33.5	量子振荡器的辐射	245
第三十四章	波导和空腔谐振器的理论基础	251
§ 34.1	电波的分类	251
§ 34.2	横磁波 ($E \equiv TM$)	251
§ 34.3	横电波 ($H \equiv TE$)	257
§ 34.4	相速和群速	260
§ 34.5	矩形谐振腔	261
§ 34.6	电磁波沿同轴线 (电缆) 的传播	262
§ 34.7	用集肤效应法计算导体中的损耗	265
§ 34.8	关于电磁场过渡过程的计算	268
第三十五章	在实际介质、铁磁材料和各向异性媒质中的交变电磁场	269
§ 35.1	实际介质中的电磁场 媒质的复参量	269
§ 35.2	铁磁材料中的电磁场	269
§ 35.3	饱和对涡流的影响	271
§ 35.4	磁介质中的电磁场	273
§ 35.5	运动媒质中的电磁现象	275
附录		
附录 I	解电路方程的数值法	278
III.1	稳定过程的线性电路方程	278
III.2	过渡过程的线性电路方程	287
III.3	非线性电路方程	289
附录 II	略	292

第一部分 非线性电路

第七篇 非线性电路的稳定过程及其计算方法

第二十章 非线性直流电路和磁路的基本特性与计算方法

§ 20.1 典型的非线性特性的图形表示

如前所述, 在实际情况下, 所有电路和磁路都是非线性的; 只有电流和电压值在有限的范围内, 才能认为它们是线性的。例如, 当电流过大时, 会出现导线金属显著发热, 电阻随之有很大改变, 这将引起金属物理状态的变化(例如, 熔化)。在高电压作用下, 介质特性会受到破坏。电路在正常工作时, 虽然电流和电压值都在允许范围内, 但是, 在许多情况下也必须考虑电路某些元件参数的非线性^①。

需要区分几种最典型的非线性。如像非线性元件的伏—安特性曲线, 它可能是连续的和间断的, 单调的和非单调的, 单值的和非单值的, 对称的和非对称的。

电路中有受热达较高温度的金属导体(炽热灯泡, 电热器等等)元件(图20.1), 按气体放电原理工作的电真空器件(图20.2), 都是具有单调连续伏—安特性曲线的非线性的典型例子。含有半导体器件的电路, 可能有断续(实际上有跃变)的特性曲线。例如电路的伏—安特性曲线有非单值性, 则是由有铁芯的元件存在磁滞而引起的。电路的非线性不仅会由无源元件引起, 如已经指出那样, 其中的电能转化为其它形式的能。而且也会由有源元件引起, 在其中其它形式的能变为电能。图20.3表示了各种直流发电机外特性的情况。

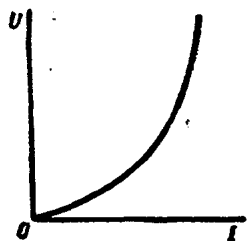


图 20.1

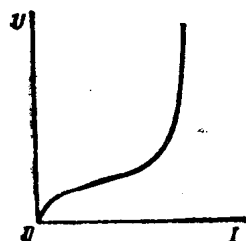


图 20.2

① 这里讲的只是非线性电路的稳态。

如果可以用图解法进行计算，则用电源输出端的电压与负载电流的图形关系——外特性曲线，便可以不必去绘制电源的等效电路图。此时规定：端电压为正时，电流的正值对应于输出电能，负值则对应于吸收电能。

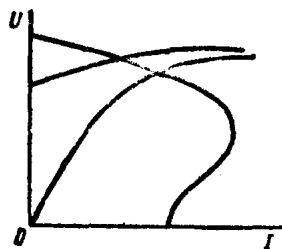


图 20.3

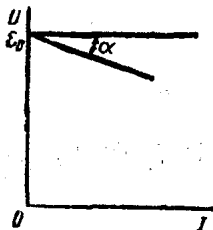


图 20.4

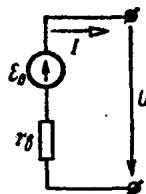


图 20.5

如果电（能）源的外特性是线性的，或者对于某段范围的电流和电压值是线性化了的（图20.4），并由下式描述

$$U = \mathcal{E}_0 - r_0 I,$$

则特性的起始纵坐标 $(U)_{I=0} = \mathcal{E}_0$ 对应着等值二端网络的有源参数，即电势，而特性曲线倾角的正切 $\operatorname{tg} \alpha$ ，确定了它的内阻，即有源二端网络的无源参数（图20.5）：

$$r_0 = m_r \operatorname{tg} \alpha,$$

式中 m_r ——电阻的标度。

外特性曲线与横轴的交点确定了短路电流：

$$I_{sc} = (I)_{U=0} = \mathcal{E}_0 / r_0$$

如果计算可以用图解法完成，则用任一二端网络的入端电压与电流的图形关系，即伏—安特性曲线，便可不必去作该二端网络的等效电路图。如果伏—安特性曲线（或其一段）是线性的（图20.6），并由式 $U = \mathcal{E}_0 + r_0 I$ 描述，则特性曲线的起始纵坐标，对应着二端网络等效电路图的电动势：

$$U_0 = (U)_{I=0} = \mathcal{E}$$

而 $\operatorname{tg} \alpha$ 则确定了无源参数（输入电阻）： $r_0 = m_r \operatorname{tg} \alpha$ （图20.7）。如果线性伏—安特性曲线通过坐标原点，则 $\mathcal{E}_0 = 0$ ，可将电路看成是无源电路。最后，如果二端网络有外特性曲线 $U_1(I)$ ，则改变电流方向时，可把特性曲线表示为 $U_2(I)$ ，反之亦然（图20.8）。

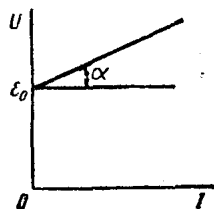


图 20.6

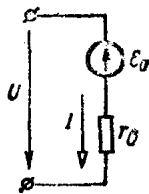


图 20.7

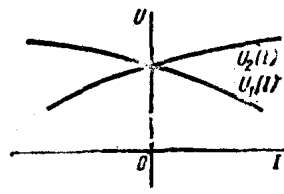


图 20.8

§ 20.2 计算线性元件与非线性元件 串联无分支电路的图解法

图20.9表示两个非线性元件 $r_1(I_1)$ 和 $r_2(I_2)$ 的串联，它们的伏—安特性曲线 $I_1(U_1)$ 和 $I_2(U_2)$ ，如图20.10所示。

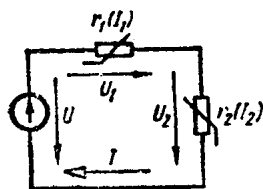


图 20.9

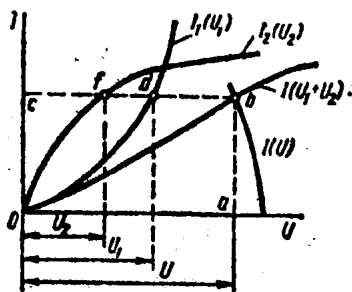


图 20.10

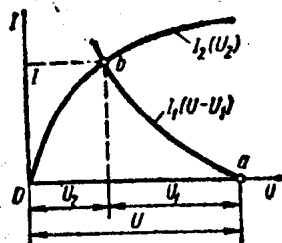


图 20.11

设电路的端电压等于 U 。要求确定电流 I 和非线性元件上的电压 U_1 和 U_2 。

为此，作出全电路的辅助特性曲线，表示电流 I 与总电压 U 的关系。由于无分支电路中 $I_1 = I_2 = I$ ，所以要作 $I(U_1 + U_2)$ 的特性，应将同一电流值 I 的电压 U_1 与 U_2 相加（图20.10）。此后，如果在横轴上取一线段 oa ，按电压标度 m_U ，它等于电压 U ，并过 a 点引平行于纵轴的直线 ab ，与曲线 $I(U_1 + U_2)$ 相交，则得到线段 ab ，按电流标度 m_I ，它等于电流 I 。然后须由 b 点引平行于横轴的直线 bc 。结果得到线段 cd 和 cf ，按电压标度 m_U ，它们分别等于电压 U_1 和 U_2 。

可类似地研究由多个非线性元件串联组成的电路。

也可以用别的作图方法，计算图20.9的串联电路。可以把所给电路，表示成具有电势 $\mathcal{E} = U$ 和非线性电阻 $r_1(I_1)$ 的非线性有源二端网络，以及具有非线性电阻 $r_2(I_2)$ 的无源非线性二端网络串联的形式。

因为非线性元件的端电压 U_2 ，一方面是由该元件的伏—安特性曲线 $I_2(U_2)$ 所决定，另一方面也由电势 $\mathcal{E} = U$ 与非线性元件 $r_1(I_1)$ 的端电压 U_1 之差所决定，所以特性曲线 $I_2(U_2)$ 与 $I_1(U - U_1)$ 的交点 b （图20.11），与式 $U_2 = U - U_1$ 和 $I_1 = I_2 = I$ 相对应，并确定了所研究电路的工作状态。

如果已给出电源的外特性曲线 $U_1(I)$ ，如图20.13的形状，负载的伏—安特性曲线，是一条通过座标原点的直线 $U_2(I)$ 。设要确定图20.12电路的电流和各段电压。特性曲线 $U_1(I)$ 和 $U_2(I)$ 的交点 a ，显然对应着 $U_1 = U_2 = U$ ，以及 $I_1 = I_2 = I$ ，这就确定出待求量。

如果无分支电路有几个电源和负载，则首先应在同一电流情况下，将电源的端电压相加，确定出全部电源的外特性曲线，和确定出所有负载的伏—安特性曲线，然后用上述解法，求出电流和电压。

● 原书误为 $I_1(U - U_1)$ 。——译者注

最后应指出：如果电源(见图20.9)的端电压是电流 I 的函数[图20.10中曲线 $I(U)$]，则在这种情况下，特性曲线 $I(U)$ 和 $I(U_1+U_2)$ 的交点 b ，也可以用来求工作状态。

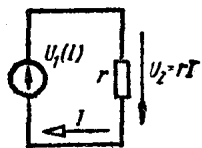


图 20.12

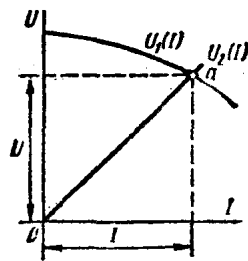


图 20.13

§ 20.3 计算线性元件与非线性元件 并联电路的图解法

由于多条支路并联的特征是它们的端电压相等，使用图解法时，要把同一电压对应的电流相加，以得到总的外特性。

为了说明这一方法，例如，要求两个并联电源[图20.14a)]之间的电流分配，它们的外特性曲线如图20.14b)。首先应利用所给的外特性曲线[图20.14b)]，把电流 I_1 与 I_2 相加。如果要由已知外电路的电流 I ，来确定电源支路中的电流 I_1 和 I_2 ，需要由特性曲线 $U(I_1+I_2)$ 上对应于给定电流值 I 的一点，引平行于横轴的直线，这条直线与各电源的原来特性曲线的交点，就确定了每个电源的电流值。各电源支路的电流主要决定于特性曲线的形状，并且只有在特性曲线相同时，它们才有相同的值。当特性曲线差别很大时，电源支路的电流，和电势的方向可能不同。

图20.15所示为非线性元件 $r_1(I_1)$ 和 $r_2(I_2)$ 的并联，它们的伏—安特性曲线 $I_1(U_1)$ 和 $I_2(U_2)$ 如图20.16所示。

设已知电路的端电压为 U ，则由伏—安特性曲线 $I_1(U_1)$ 和 $I_2(U_2)$ ，很容易求出电流 I_1 与 I_2 ，再由方程 $I_1+I_2=I$ ，求出电路未分支部分的电流。如果已知电流 I ，则为了确定电压 U 和电流 I_1 、 I_2 (图20.16)，就必须作出辅助特性曲线 $I_1+I_2=I_2(U)$ 。由于并联时 $U_1=U_2=U$ ，所以根据方程 $I_1=I-I_2$ ，应对同一电压值 $U_1=U_2$ ，把曲线 $I_1(U_1)$ 和 $I_2(U_2)$ 的纵坐标相加。在纵轴上取一线段 oc ，按标度 m_I ，它等于电流 $I=I_{12}$ ，并由 c 点

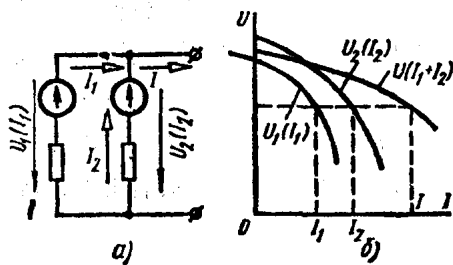


图 20.14

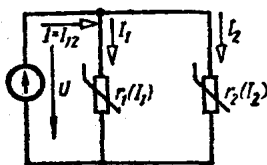


图 20.15

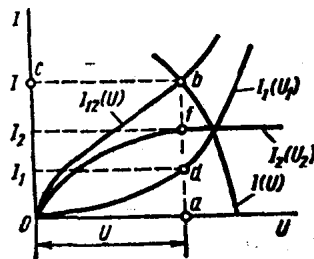


图 20.16

引平行于横轴的直线，与曲线 $I_1 + I_2 = I_{12}(U)$ 相交，很容易求得电压 $U = oa/m_v$ 。引平行于纵轴并与非线性元件伏-安特性曲线相交的直线 ba ，可直接确定电流 I_1 与 I_2 (图20.16)。如果电源的外特性曲线由 $U(I)$ 确定 (见图20.16)，则特性曲线 $I_{12}(U)$ 与 $I(U)$ 的交点 b (图20.16)，就确定了电路的工作状态。

如果有几个电源和负载相并联，则宜于首先逐个把所有电源及所有负载的特性曲线相加，把电路看成是等效的电源与负载串联，然后，再确定电路的工作状态。

§ 20.4 计算线性元件与非线性元件

串-并联电路的图解法

应用上面讨论过的计算原理，可以确定任一含有多个元件串-并联电路的工作状态。

图20.17表示两个非线性元件与一个线性元件串-并联的电路。设已知电压 U 和非线性元件的伏-安特性曲线以及线性元件的电阻 r_3 。要求求出支路电流和元件上的电压。在这种情况下，根据相应元件的连接特点，依次把沿座标轴分得的电压和电流相加。首先，由给定的电阻 r_3 ，作出伏-安特性曲线，它是一条通过坐标原点的直线 (图20.18)。

对应于同一电压值 $U_2 = U_3 = U_{23}$ ，将曲线 $I_2(U_2)$ 和直线 $I_3(U_3)$ 的纵座标相加，作出并联电路的伏-安特性曲线 $I_2 + I_3 = I_1(U_{23})$ 。再对应于同一电流值将曲线 $I_1(U_1)$ 和 $I_2 + I_3 = I_1(U_{23})$ 的横座标相加，就得出整个电路的伏-安特性曲线 $I_1 = I_1(U_1 + U_{23}) = I_1(U)$ 。然后以某一标度 m_v ，在横座标轴上截取代表电压 U 的线段 oa ，并由 a 引平行于纵轴的直线，与曲线 $I_1(U)$ 相交。结果得到线段 ab ，它以标度 m_i 确定出电流 I_1 。由 b 点引平行于横轴的直线，与曲线 $I_1(U_1)$ 和 $I_2 + I_3 = I_1(U_{23})$ 相交，再由交点 d 向横轴作垂线，根据方程 $U = U_1 + U_{23}$ 和 $I_1 = I_2 + I_3$ ，线段 db 和 $cb (= og)$ 以标度 m_v 分别确定出第一个元件上的电压 U_1 和分支电路上的电压 U_{23} ，而线段 ge 和 gf 则以标度 m_i 确定出电流 I_2 和 I_3 。

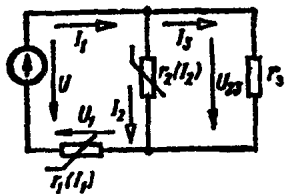


图 20.17

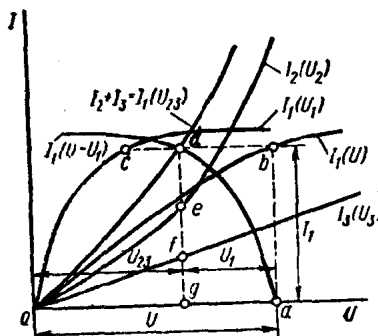


图 20.18

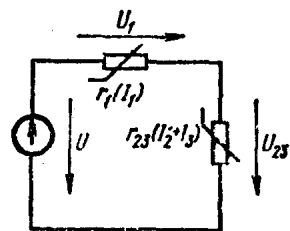


图 20.19

还能用别的作图方法，计算所研究的电路。为此，要把图20.17的电路图，画成具有电势源 $\mathcal{E} = U$ 和非线性电阻 $r_1(I_1)$ 的非线性有源二端网络，以及等效于具有元件 $r_2(I_2)$ 和 r_3 并联支路的非线性无源二端网络相串联的形式 (图20.19)。曲线 $I_1(U - U_1)$ 和 $I_2 + I_3 = I_1(U_{23})$ 的交点 d (见图20.18)，确定出这个电路的工作状态。

§ 20.5 计算具有非线性元件分支电路的图解法

上述方法也可以用于计算更复杂的电路，尤其是用在很容易把它们化为串-并联电路的情况。

图20.20表示有分支的电路图，图中有三个已知的电势 $\mathcal{E}_1$ 、 $\mathcal{E}_2$ 、 $\mathcal{E}_3$ 及三个非线性元件，为了简化起见，这三个非线性元件取成对称的和相同的（具有同样的伏-安特性曲线）。要求确定电流 I_1 、 I_2 和 I_3 。

在选定电流的正方向后，根据基尔霍夫第二定律可写出如下方程：

$$U_{21} = \mathcal{E}_1 - U_1 = \mathcal{E}_2 - U_2 = -\mathcal{E}_3 + U_3,$$

式中 U_1 、 U_2 和 U_3 ——分别为三个非线性元件上的电压。

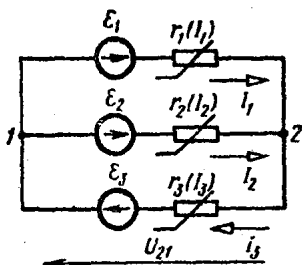


图 20.20

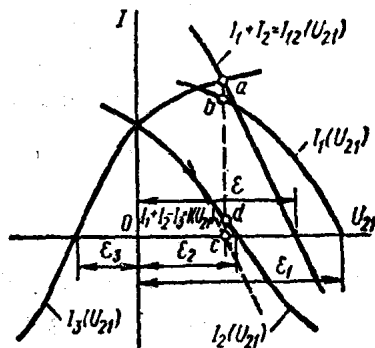


图 20.21

利用给定的伏-安特性在图20.21上作出曲线：

$$I_1 = I_1(U_{21}) = I_1(\mathcal{E}_1 - U_1);$$

$$I_2 = I_2(U_{21}) = I_2(\mathcal{E}_2 - U_2);$$

$$I_3 = I_3(U_{21}) = I_3(-\mathcal{E}_3 + U_3).$$

要确定各支路的电流，可将对应于同一电压值 U_{21} 的电流 I_1 和 I_2 相加，作出辅助特性曲线 $I_1 + I_2 = I_{12}(U_{21})$ （图20.21）。由于支路电流必须满足基尔霍夫第一定律（ $I_1 + I_2 = I_3$ ），曲线 $I_3(U_{21})$ 与 $I_{12}(U_{21})$ 的交点 a 的纵坐标，以标度 m_I 确定了电流 I_3 ，而它的横坐标则以标度 m_U 确定了电压 U_{21} 。然后，从 a 点引平行于纵轴的直线，与曲线 $I_1(U_{21})$ 和 $I_2(U_{21})$ 相交。最后得到线段 cb 和 cd ，它们确定了电流 I_1 与 I_2 。

解决这个问题的另一种方法，就是作特性曲线 $I_1 + I_2 - I_3 = I(U_{21})$ ，来代替曲线 $I_{12}(U_{21})$ （图20.21中的虚线）。根据基尔霍夫第一定律， $I_1 + I_2 - I_3 = 0$ ，所以曲线 $I(U_{21})$ 与横轴的交点 c ，就是这个问题的解答。

所述的计算方法，可以推广到由任意个有源及无源非线性元件串-并联组成的更复杂的电路。例如，在图20.22的电路中，用等效二端网络代替并联支路，然后使电路成为二端网络的串联（图20.23）。

计算具有非线性元件的复杂电路，可以归结为计算有源及无源非线性元件串-并联电

路的图解法，其方法是将电源电势“转移”到别的支路中去。❶

图20.24所示为一个具有非线性元件的五条支路的桥形电路。如果接在某一节点，例如，节点3（或节点1）的每条支路，接入一个电势为 $\mathcal{E}$ 的电压源，其指向是离开节点（图20.24中这些电势用虚线表示），则节点1与3之间的电位差为零，这两个节点便可合并，而其余所有支路的电流仍然不变，因为各个回路中电势之和以及节点电流均未改变。最后由所作的变换得出了把元件联成串-并联的电路（图20.25）。这种电路就可以用上面研究过的方法来计算。

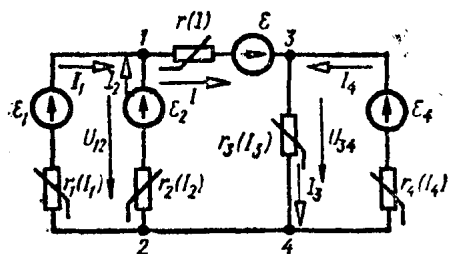


图 20.22

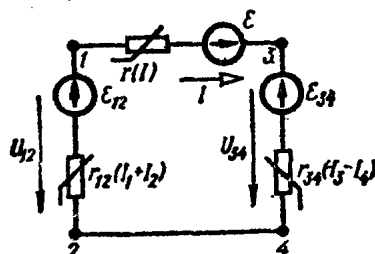


图 20.23

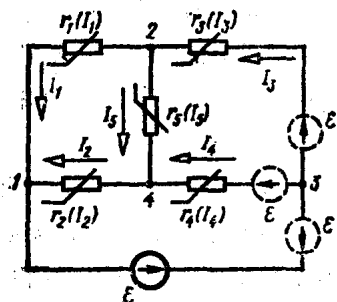


图 20.24

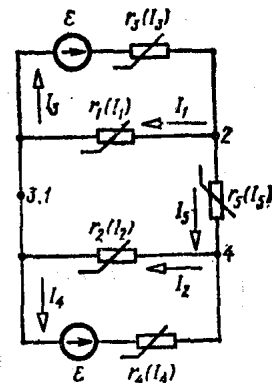


图 20.25

§ 20.6 计算具有线性及非线性元件电路的图解—解析法

线性多端网络方程的应用

如果非线性元件的伏-安特性曲线已知，或者数学上可用近似的解析关系式 $U = U(I)$ 、 $r(I)$ 、 $r(U)$ 等表示，则利用等效电路图，求解方程组来确定电路的工作状态。

当电路工作状态的近似解已知时，可以用一线性特性来代替每个非线性元件（图20.26）的伏-安特性曲线，该线性特性可由在预计的工作状态点 a ，作该非线性特性曲线的切线而获得（图20.27）。这条切线的起始纵座标，用标度 m_v 确定了线性等效图的电势[图20.28 a)]，而电压与电流增量之比，或者在极限情况下电压对电流的导数，以 $m_r = m_v/m_i$ 的标度，确定了等效图的微分电阻 r_o 。这个电阻值与 a 点处伏-安特性曲线的切线和横轴间夹角

❶ 这是指含有理想电压源支路的情况。——译者注

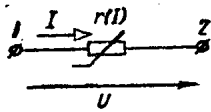


图 20.26

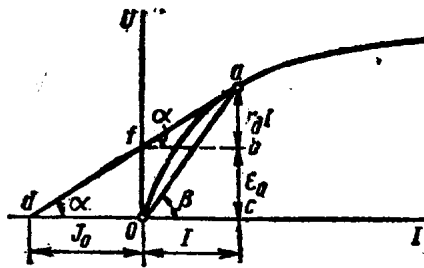


图 20.27

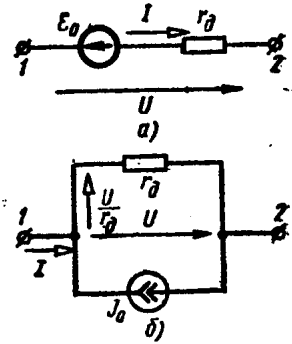


图 20.28

的正切成正比:

$$r_d = dU/dI = m, \operatorname{tg} \alpha.$$

计算非线性电路,有时要用到静态电阻,它由电压与电流之比确定,按标度 m_r ,这个电阻正比于 $\operatorname{tg} \beta$ 。

由图20.27可得,在 a 点的工作状态下,非线性元件上(见图20.26)的电压 $U = \mathcal{E}_0 + r_d I$ 。此式除以 r_d ,不难得到比值 $U/r_d = \mathcal{E}_0/r_d + I$,即对应具有电流源 J_0 的等效电路图[图20.28b)]。应着重说明,电流 J_0 的数值等于标度为 m_r 的线段 od (见图20.27),即切线 af 的延长线截取横轴的长度,这很容易由三角形 dof 直角边之比加以证明。

如果非线性元件(见图20.26)有另一种伏—安特性曲线(图20.29),则在等效电路图20.28a) b)中,在电流 I 及电压 U 的正方向不变的情况下,电势 $\mathcal{E}_0$ 和 J_0 要改变方向,这不难由图20.29中作的图形证明。

在无源元件伏—安特性曲线的某一段上,当电流增加而电压减小(图20.30)时,线性等效电路图的微分电阻则为负值。在等效电路图中,负电阻与电源等效。在无源非线性元件情况下,电路(电势型电路)元件消耗的能量部分地由负电阻返回电路。因此,从外部电源供给的能量,由功率 UI 来确定。这种能量的再分配,由电势型和电阻型电路元件的不同性质所决定;而这些元件必须在给定的那段伏—安特性曲线上,反映非线性元件的性质。

将所有电路元件的特性线性化以后,就得到了线性电路,对它可采用计算线性电路的一切方法。

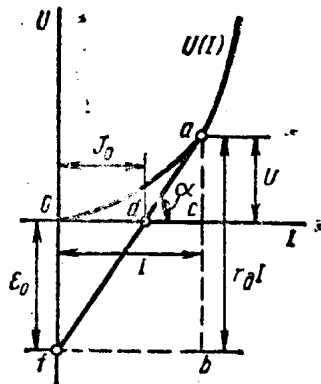


图 20.29

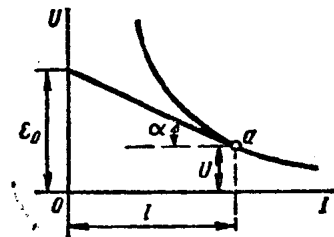


图 20.30