
电工学的理论基础习题集

[苏]П.А.依昂金 陈彩屏 译 宫 莲 徐福媛 校

吉林电力出版社

内 容 提 要

本书是根据苏联莫斯科动力出版社1982年出版的П.А.依昂金(Ионкин)教授主编的《电工学的理论基础习题集》一书译出的,可与П.А.依昂金教授主编的《电工学的理论基础》一书配套使用。

本习题集内容丰富、习题量多。全书共分19章,共有1338道习题,电路部分995题,其中例题201题;电磁场部分343题,其中例题126题。每章前都有提要,各章中对于典型及难度较大的习题,都以例题的方式作了解答,全部习题都有答案。

本书对我国大专院校有关专业的师生及电工类广大技术人员均有较大的参考价值。

П. А. ИОНКИН
СБОРНИК ЗАДАЧ И УПРАЖНЕНИЙ ПО
ТЕОРЕТИЧЕСКИМ ОСНОВАМ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ЭНЕРГОИЗДАТ 1982

电工学的理论基础习题集

[苏] П.А.依昂金

陈彩屏 译 宫 莲 徐福媛 校

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

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 36印张 820千字

1989年1月第一版 1989年1月北京第一次印刷

印数00001—4330册 定价12.25元

ISBN 7-120-00399-2/TM·103

译 者 的 话

本书是根据苏联莫斯科动力出版社1982年出版的П.А.依昂金(Ионкин)教授主编的《Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники》一书译出的,内容丰富,习题量多。共有习题1338题,电路部分995题,其中例题201题;电磁场部分343题,其中例题126题。各章中对典型习题以及难度较大的习题,都以例题的方式,作了详细的演算,全部习题都有答案。本书包括了苏联高校工科电工原理课程教材各章的习题,对我国大专院校有关专业的师生及电工类广大技术人员都有较大的参考价值。

译文对原文中的某些符号作了改动,例如将阻抗 $\underline{Z}$ 改为 Z 等。原文中的印刷错误,已作订正,译文中未加“译者注”。

限于译者水平,译文中难免有不当之处,恳请读者批评指正。

译 者

1986年9月于岳麓山

前 言

本习题集由莫斯科动力学院电工原理教研室及电物理教研室编写，可与高等院校工科专业电工原理课程的教材配套使用。1977年12月28日苏联高等教育教学法局批准了电工原理课程大纲，本书包括了根据该大纲所编写的电工原理课程各章的习题。

本书的习题，既可供学生在教师指导下作课堂演算，也可作自学解题之用，包括高等院校的函授生在内，因此，从必要的教学指导考虑，对各章中典型的及难度较大的习题，都作了详细的演算，这类习题在题号后的括号内标以字母**P**。所有习题都以数字、公式或文字等形式直接给出答案。

本书各章及每章中的习题编排顺序，并不是不可变更的，使用本书的师生，可根据教学的方便，灵活地掌握。

在编写本习题集时，作者力图尽可能地结合电工实际，选用的参数也尽可能地反映实际工程装置的状况。有些习题是我们根据工业部门有代表性人员提出的实践问题，加以概括和理想化后列入的。当然，本习题集选有足够的、着重训练学生能用各种方法计算电路或电磁场问题的习题。

在文献目录中列出了一些近年出版的基本教科书，这些教材供高校日校和夜校的学生使用。

读者的批评意见及愿望，请寄动力出版社：113114，莫斯科，M-114，斯留卓夫沿岸街，10。

作 者

目 录

译者的话

前言

第一章 具有直流电势源与电流源的线性电路	1
概述	1
1.1 最简单的电路	7
1.2 最简单电路的过渡过程与稳定过程	12
1.3 基尔霍夫方程的应用	15
1.4 节点方程与树支电压方程的应用	20
1.5 回路方程的应用	25
1.6 叠加法·互易特性	28
1.7 电压与电流间的线性关系	30
1.8 电路图的变换	31
1.9 等效电源(有源二端网络)	33
1.10 用拓扑方法计算传输函数	35
1.11 信号流图的应用	38
第二章 具有正弦电势源与电流源的线性电路	41
概述	41
2.1 最简单电路的过渡过程与稳定过程	46
2.2 正弦量的瞬时值·复数的简单运算·电路元件的串联与并联	48
2.3 有分支的电路·矢量图与位形图·能量关系	51
2.4 二端网络的等效电路	59
2.5 谐振·匹配负载的运行	61
2.6 互感电路	65
2.7 变参数电路的图解	71
2.8 拓扑分析法·网络函数的计算	75
2.9 信号流图的应用	76
第三章 三相电路	79
概述	79
3.1 三相电源绕组的连接与引线的标记	83
3.2 对称负载	86
3.3 不对称负载	89
3.4 对称分量	96
3.5 旋转磁场	102
第四章 四端网络	105
概述	105
4.1 无源四端网络的方程与系数	109

4.2 特性参数(副参数)	117
4.3 等效电路	119
4.4 四端网络的连接	121
4.5 有源四端网络	123
4.6 传输函数	128
第五章 分布参数电路	134
概述	134
5.1 传输线参数	138
5.2 有损线	140
5.3 无损线	143
5.4 长线的等效电路	149
第六章 具有非正弦周期性电源的线性电路	152
概述	152
6.1 周期函数分解为傅立叶级数	155
6.2 线性电路中的周期性过程	157
6.3 功率·表征周期性曲线波形的系数·非正弦电流电路中的测量	160
6.4 非正弦电流电路中的谐振	165
6.5 对称三相电路的非正弦运行情况	167
第七章 滤波器	170
概述	170
7.1 k型滤波器	172
7.2 其他型式的滤波器	177
第八章 集中参数线性电路的过渡过程	183
概述	183
8.1 rL 电路中的过渡过程(经典算法)	188
8.2 rC 电路中的过渡过程(经典算法)	198
8.3 具有几个电抗元件电路的过渡过程(经典算法)	210
8.4 用运算法计算过渡过程	226
8.5 任意波形的电压源或电流源激励下的过渡过程	232
8.6 电感中电流和电容上电压发生跃变时的过渡过程	238
8.7 用状态变量法计算过渡过程	243
第九章 分布参数电路的过渡过程	252
概述	252
9.1 无损线上入射波与反射波的形成	254
9.2 从一条传输线进入另一条传输线的波过程	256
9.3 接通或断开支路时传输线上的波	259
9.4 脉冲的形成	261
9.5 无畸变传输线上的波	263
第十章 线性电路综合基础	265
概述	265

10.1 无损二端网络	268
10.2 有损二端网络·桥式二端网络	272
第十一章 非线性直流电路	276
概述	276
11.1 图解计算法	278
11.2 解析计算法	287
11.3 数值计算法	290
第十二章 恒定磁通磁路	296
概述	296
12.1 线性磁路	297
12.2 不考虑磁滞时的非线性磁路	298
12.3 考虑磁滞时的磁路计算·永久磁铁	303
第十三章 非线性交流电路	305
概述	305
13.1 图解计算法与图解—解析计算法	306
13.2 解析计算法	312
13.3 按电压和电流的有效值进行计算	318
第十四章 非线性电路中的过渡过程·自激振荡	320
概述	320
14.1 解析计算法和图解计算法	325
14.2 平衡状态的稳定性	332
14.3 在相平面上表示过渡过程	335
14.4 平均法	339
14.5 自激振荡	342
14.6 数值积分法	345
第十五章 场论	349
概述	349
15.1 对称场	352
15.2 场的分析	363
第十六章 电场	366
概述	366
16.1 真空中的静电场	371
16.2 电介质中的静电场	382
16.3 导电媒质中的恒定电场	390
16.4 实际媒质中的似稳电场	396
16.5 拉普拉斯方程与泊松方程	404
16.6 电场能量与电场力	409
第十七章 磁场	413
概述	413
17.1 均匀无限媒质中的恒定磁场	415

17.2 磁场的微分方程·矢量磁位与标量磁位	421
17.3 有磁性物体时的磁场	432
17.4 磁场能量与磁场力	441
第十八章 计算位场的特殊方法	445
概述	445
18.1 复变函数的应用	446
18.2 积分方程法	460
第十九章 电磁场	467
概述	467
19.1 乌莫夫——坡印亭定理	469
19.2 静止媒质与运动媒质中的电场强度·带电质点的运动	473
19.3 导电媒质中的电磁场·集肤效应	478
19.4 在电介质、波导、谐振腔、辐射中的波	490
第一章习题答案	496
第二章习题答案	501
第三章习题答案	507
第四章习题答案	511
第五章习题答案	513
第六章习题答案	515
第七章习题答案	517
第八章习题答案	519
第九章习题答案	524
第十章习题答案	530
第十一章习题答案	531
第十二章习题答案	535
第十三章习题答案	536
第十四章习题答案	538
第十五章习题答案	541
第十六章习题答案	543
第十七章习题答案	549
第十八章习题答案	553
第十九章习题答案	554
附录1.傅立叶级数分解	560
附录2.拉普拉斯变换原函数及其象函数表	561
附录3.1211、1411、1512、1561号钢磁化曲线	562
附录4.直角坐标、圆柱坐标与球坐标·矢量分析运算	563
电量与磁量国际单位制SI的单位	564
用于构成十进倍数和分数单位的词头	565
参考文献	566

第一章 具有直流电势源与电流源的线性电路

(А.И.多纳希科伊, П.А.依昂金, В.А.库左夫金,
В.Г.米罗诺夫, М.Д.皮罗哥娃)

概述

线性电路中最简单的无源二端元件, 有电阻、电感和电容元件。

对电阻元件而言, 其电压 u 和电流 i 之间的关系符合欧姆定律

$$u_r = ri_r, \text{ 或 } i_r = gu_r \quad (1.1)$$

式中 r ——电阻; $g=1/r$ ——电导。

将电磁能转变为热能的功率(焦耳——楞次定律)为

$$p = ri^2 \quad (1.2)$$

对电感元件而言, 其电压和电流满足电磁感应定律

$$u_L = L di_L / dt \quad (1.3)$$

式中 L ——电感; t ——时间。

电感元件中储存的磁场能量为

$$w = Li_L^2 / 2 \quad (1.4)$$

对电容元件而言, 其电压和电流之间的关系为

$$i_C = C du_C / dt \quad (1.5)$$

式中 C ——电容。

电容元件中储存的电场能量为

$$w = Cu_C^2 / 2 \quad (1.6)$$

在稳定状态下, 直流电路中的电流 I 和电压 U 是恒定的, 不随时间变化。由式(1.3)和式(1.5)看出, 在稳定状态下电感上没有电压, 电容中没有电流: $u_{Ly} = 0$; $i_{Cy} = 0$ 。

线性直流电路中的电源(有源元件), 可用两种等效电路中的任一种来表示它: 一种等效电路是由理想电势源 E 和内阻 $r_{\text{вн}}$ 串联所组成[图1.A.a)], 另一种等效电路是由理想电流源 J 和内电导 $g_{\text{вн}}$ 并联所组成[图1.A.б)]。理想电势源的 $r_{\text{вн}} = 0$, 其发出的功率为

$$P = EI \quad (1.7)$$

而理想电流源的 $g_{\text{вн}} = 0$, 其发出的功率为

$$P = UJ \quad (1.8)$$

对串联电路[图1.A.a)]有

$$U = E - r_{\text{вн}} I \quad (1.9)$$

而对并联电路[图1.A.б)]有

$$I = J - g_{\text{вн}} U \quad (1.10)$$

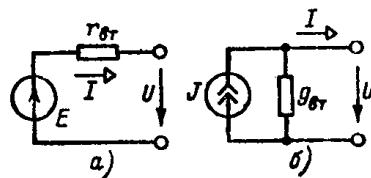


图 1.A

当它们表示同一电源时，则有

$$E = r_{BT}J \quad \text{及} \quad g_{BT} = 1/r_{BT} \quad (1.11)$$

电路的基本方程（状态方程） 基尔霍夫第一定律：同一节点上各支路的代数和等于零，即

$$\sum_k i_k = 0 \quad (1.12)$$

式中，离开节点的电流取正号。

基尔霍夫第二定律：任一闭合回路内各支路电压的代数和等于零，即

$$\sum_k u_k = 0 \quad (1.13)$$

式中，支路电压的方向与回路的巡行方向相同时取正号。

图1.B.a)是电路中的一部分（它是由多个电源的串联等效电路组成），在稳定状态下，一段电路上的直流电流，可用式（1.14）（广义欧姆定律）确定

$$I = \frac{U_{ab} + E_1 + E_2 - E_3}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4} = \frac{U_{ab} + \sum_{ab} E}{r_{ab}} = (U_{ab} + \sum_{ab} E)g_{ab} \quad (1.14)$$

式中 $\sum_{ab} E$ ——支路中电动势的代数和； r_{ab} ——支路中的总电阻； $g_{ab} = 1/r_{ab}$ 。

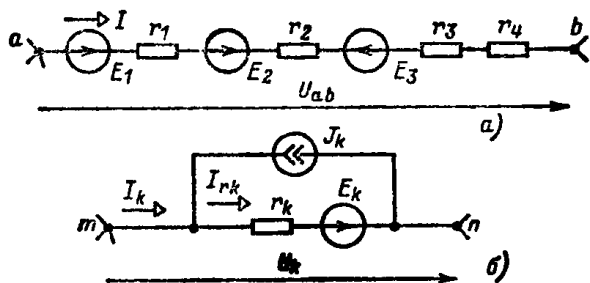


图 1.B

电路的代数算法 利用广义支路 [图 1.B.6)] 的概念，根据欧姆定律和基尔霍夫定律，可写出矩阵形式的方程。

广义支路的欧姆定律为

$$U = r(I + J) - E \quad (1.15a)$$

将 b 条支路都列写成欧姆定律的形式，则可得到欧姆定律的矩阵形式：

$$U^{(B)} = R^{(B)}[I^{(B)} + J^{(B)}] - E^{(B)} \quad (1.15b)$$

式中 $R^{(B)}$ ——支路电阻对角线矩阵：

$$R^{(B)} = \text{diag}[r_1, r_2, \dots, r_b] \quad (1.16)$$

$U^{(B)}$, $I^{(B)}$, $J^{(B)}$, $E^{(B)}$ ——分别为支路电压列矢量，支路电流列矢量，电流源列矢量，电势源列矢量：

$$U^{(B)} = [U_1, U_2, \dots, U_b]^T \quad (1.17)$$

$$I^{(B)} = [I_1, I_2, \dots, I_b]^T \quad (1.18)$$

$$J^{(B)} = [J_1, J_2, \dots, J_b]^T \quad (1.19)$$

$$E^{(B)} = [E_1, E_2, \dots, E_b]^T \quad (1.20)$$

欧姆定律还可写成另一种矩阵形式：

$$I^{(B)} = G^{(B)}[U^{(B)} + E^{(B)}] - J^{(B)} \quad (1.21)$$

式中

$$G^{(B)} = \text{diag}[g_1, g_2, \dots, g_b] \quad (1.22)$$

基尔霍夫第一定律的矩阵形式为

$$\mathbf{AI}^{(n)} = 0 \quad (1.23)$$

式中 $\mathbf{A}=[a_{ij}]$ ——节点关联矩阵，其行对应于节点，列对应于支路。若支路 j 连于节点 i 上，且它的方向是离开节点，则 $a_{ij}=+1$ ；若支路 j 连于节点 i 上而它的方向是指向节点，则 $a_{ij}=-1$ ；若支路 j 未连接在节点 i 上，则 $a_{ij}=0$ 。矩阵 $\mathbf{A}$ 的行数等于独立节点数。若对所有节点列写节点关联矩阵，则得到的是不定节点关联矩阵，以记号 $\mathbf{A}_n$ 表示。

基尔霍夫第一定律可写成另一矩阵形式：

$$\mathbf{QI}^{(n)} = 0 \quad (1.24)$$

式中 $\mathbf{Q}=[q_{ij}]$ ——基本割集矩阵，其行对应于割集，列对应于支路，选割集中的树支方向为割集方向。若割集 i 包括支路 j 且二者同方向，则 $q_{ij}=+1$ ；若割集 i 包括支路 j 而二者反方向，则 $q_{ij}=-1$ ；若割集 i 不包括支路 j ，则 $q_{ij}=0$ 。

基尔霍夫第二定律的矩阵形式为

$$\mathbf{BU}^{(n)} = 0 \quad (1.25)$$

式中 $\mathbf{B}=[b_{ij}]$ ——基本回路矩阵，其行对应于回路，列对应于支路，若支路 j 在回路 i 之中，且其方向与回路巡行方向相同，则 $b_{ij}=+1$ ；若支路 j 在回路 i 之中但其方向与回路巡行方向相反，则 $b_{ij}=-1$ ；若回路 i 未包括支路 j ，则 $b_{ij}=0$ 。

可将关系式 (1.23) 与 (1.25) 写成

$$\mathbf{AI}_r = \mathbf{AG}^{(n)}\mathbf{U}_r = \mathbf{AJ}^{(n)} \quad (1.26)$$

$$\mathbf{BU}_r = \mathbf{BR}^{(n)}\mathbf{I}_r = \mathbf{BE}^{(n)} \quad (1.27)$$

的形式，其中， $\mathbf{I}_r$ 和 $\mathbf{U}_r$ 分别为电阻上的电流列矢量和电压列矢量，它们的元素满足关系式 $U_{rk}=r_k I_{rk}$ 。

借助于图（网络）的树，选定一组独立回路与独立割集，则根据基尔霍夫第一定律和第二定律，可得到独立的方程。树包括图的所有节点，但没有一个回路，若将连支增补到树上，则得到原有的图。若图有 b 条支路， y 个节点，则树支数 $d=y-1$ ，而连支数 $k=b-(y-1)$ 。一个树可形成 d 个基本割集和 k 个基本回路，每一个基本割集由一个树支和若干连支所构成，每一个基本回路由一个连支和若干树支所组成。根据基尔霍夫定律对基本割集和基本回路所列写的方程，都是线性无关的。

若按先树支后连支的次序编号，则基本割集矩阵可分成二个子矩阵：

$$\mathbf{Q}=[\mathbf{1} \quad \mathbf{F}] \quad (1.28)$$

式中 $\mathbf{1}$ ——为 $y-1$ 阶单位矩阵； $\mathbf{F}$ ——为子矩阵，其列对应于连支。

对于同一个图（网络）所编写的矩阵 $\mathbf{A}$ ， $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{B}$ ，满足关系式

$$\mathbf{AB}^T = 0 \quad \text{或} \quad \mathbf{BA}^T = 0 \quad (1.29)$$

$$\mathbf{QB}^T = 0 \quad \text{或} \quad \mathbf{BQ}^T = 0 \quad (1.30)$$

由于选取节点电位为独立变量（节点电位法），所以采用节点方程有可能减少所要联立求解的方程个数，节点方程为

$$\mathbf{G}^{(y)}\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{J}^{(y)} \quad (1.31)$$

式中 $\boldsymbol{\varphi}$ ——为节点电位列矢量； $\mathbf{G}^{(y)}$ ， $\mathbf{J}^{(y)}$ ——分别为节点电导矩阵与节点电流矩阵：

$$\mathbf{G}^{(y)} = \mathbf{AG}^{(n)}\mathbf{A}^T \quad (1.32)$$

率平衡)：

$$\sum_{k=1}^b E_k I_k + \sum_{k=1}^b U_k J_k = \sum_{k=1}^b r_k I_k^2 \quad (1.45)$$

或写成矩阵形式

$$\mathbf{I}^T \mathbf{R}^{(B)} \mathbf{I} = [\mathbf{E}^{(B)}]^T \mathbf{I} + [\mathbf{U}^{(B)}]^T \mathbf{J}^{(B)} \quad (1.46)$$

根据叠加法，任一支路的电流和电压，等于各电源单独作用时所产生的电流和电压的代数和：

$$I_h = \sum_{i=1}^b g_{hi} E_i + \sum_{i=1}^b K_{hi}^{(i)} J_i, \quad h=1, 2, \dots, b \quad (1.47)$$

$$U_h = \sum_{i=1}^b r_{hi} J_i + \sum_{i=1}^b K_{hi}^{(u)} E_i, \quad h=1, 2, \dots, b \quad (1.48)$$

或写成矩阵形式

$$\mathbf{I}^{(B)} = \mathbf{G} \mathbf{E}^{(B)} + \mathbf{K}^{(i)} \mathbf{J}^{(B)} \quad (1.49)$$

$$\mathbf{U}^{(B)} = \mathbf{R} \mathbf{J}^{(B)} + \mathbf{K}^{(u)} \mathbf{E}^{(B)} \quad (1.50)$$

这里，当电路中只有电势源 E_i 作用时，有

$$g_{hi} = I_h / E_i, \quad K_{hi}^{(u)} = U_h / E_i \quad (1.51)$$

当电路中仅有电流源作用时，有

$$r_{hi} = U_h / J_i, \quad K_{hi}^{(i)} = I_h / J_i \quad (1.52)$$

矩阵 $\mathbf{G}$ ， $\mathbf{K}^{(i)}$ ， $\mathbf{R}$ 与 $\mathbf{K}^{(u)}$ 满足关系式

$$\mathbf{A} \mathbf{G} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{A} \mathbf{K}^{(i)} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{B} \mathbf{R} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{B} \mathbf{K}^{(u)} = \mathbf{0} \quad (1.53)$$

当电路中某一条支路的任何一个参数（电势源、电流源或电阻）发生变化时，任一分支路的电压与电流之间存在线性关系：

$$y = ax + b \quad (1.54)$$

式中 x ， y ——为电压或电流； a ， b ——为一常系数。

根据补偿定理，电路中任一个具有电流 I_h 的电阻 r_h [图1.B.a)]，可用一个电势源 $E_h = r_h I_h$ 代替 [图1.B.б)]；电流为 I_h 的任一支路，可用一个电流源 I_h 代替 [图1.B.в)]。

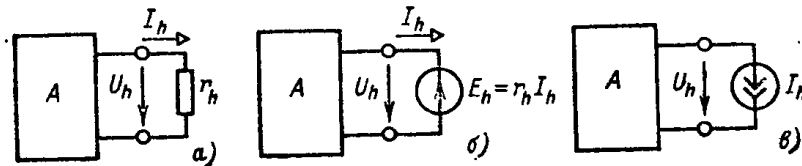


图 1.B

根据等效电源（有源二端网络）定理，可确定某一支路中的电流。接在无源支路 r 上的有源网络 [图1.Г.a)]，可用一个由电动势 U_x 和电阻 r_{bx} 串联的等效电源代替 [图1.Г.б)]， U_x 等于无源支路 r 开路时的端电压， r_{bx} 为有源网络的输入电阻；或用一个由电流源 I_k 与电导 g_{bx} 并联的等效电源代替 [图1.Г.в)]， I_k 的大小等于无源支路短路时的电流， g_{bx} 为有源网络的输入电导。电阻 r 支路上的电流与电压为

$$\left. \begin{aligned} I &= U_x / (r_{nx} + r) \\ U &= I_k (g_{bx} + g) \end{aligned} \right\} \quad (1.55)$$

式中

$$r_{bx} = U_x / I_k; \quad g_{bx} = 1 / r_{bx} \quad (1.56)$$

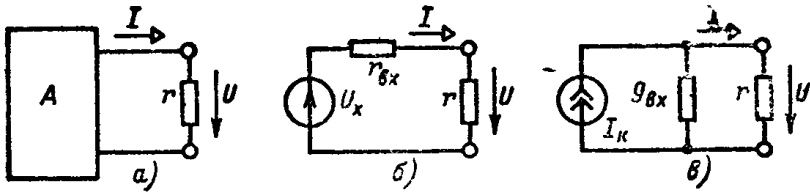


图 1.1

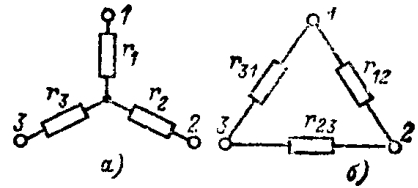


图 1.11

无源星形[图1.11.a)]与三角形[图1.11.б)]电阻的互换公式为

$$r_1 = \frac{r_{12}r_{31}}{r_{12} + r_{23} + r_{31}}, \quad r_2 = \frac{r_{12}r_{23}}{r_{12} + r_{23} + r_{31}}, \quad r_3 = \frac{r_{23}r_{31}}{r_{12} + r_{23} + r_{31}} \quad (1.57)$$

$$r_{12} = r_1 + r_2 + \frac{r_1 r_2}{r_3}, \quad r_{23} = r_2 + r_3 + \frac{r_2 r_3}{r_1}, \quad r_{31} = r_3 + r_1 + \frac{r_1 r_3}{r_2} \quad (1.58)$$

应用电路的拓扑分析法，可以不用列写出电路方程而直接根据电路图确定输入电阻、输入电导、互电阻、互电导，以及电流传输函数和电压传输函数。

传输函数或传输量 H ，是指测量仪表（电压表或电流表）读数与电源参数（ E 或 J ）之比，根据拓扑公式（梅森公式），有

$$H = \frac{\sum_k \Pi'_k \Delta'_k}{\Delta} \quad (1.59)$$

中式 Π'_k ——为路径传输量，也就是电源端与测量仪表端的连接路径之各支路电导乘积（取测量仪表的电导为1）； Δ'_k ——路径传输子式，或为路径 k 短接时的电路节点行列式； Δ ——为电压表、电流源开路而电流表、电势源短路后的电路节点行列式，

$$\Delta = \sum_{j=1}^n G_{j1} G_{j2} \cdots G_{j(n-1)} \quad (1.60)$$

其中 G_{ji} ——为树 j 的支路 i 电导； n ——为电路的树数。行列式 Δ 可按一对节点间路径的展开式进行计算：

$$\Delta = \sum_k \Pi_k \Delta_k \quad (1.61)$$

中式 Π_k ——为路径 k 的支路电导乘积； Δ_k ——为原有电路中路径 k 短接后的电路行列式。

若电路是由二个子电路所组成，它们有一个公共节点，则

$$\Delta = \Delta_1 \Delta_2 \quad (1.62)$$

中式 Δ_1 和 Δ_2 为二个子电路的节点行列式。

类似地也可计算路径传输子式 Δ'_k 。

当电路中存在几个电源时，利用叠加法再借助于拓扑公式，便可得出任一支路的电流和电压。

信号流图（有向图） 为了作出信号流图，应将电路的节点方程或回路方程写成果关系的形式，也就是对每个方程解出一个变量，而且每个方程所解出的变量都不相同。

图的节点变量 x_i 为因变量（电位，电流），而节点变量 x_j 为自变量，它们之间通过一

个传输量为 a_{ij} 的有向支路相连接(图1.E)并且

$$x_i = a_{ij} x_j \quad (1.63)$$

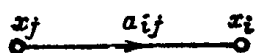


图 1.E

若节点上的支路方向都离开节点,则称这个节点为信号流图的发点;若节点上的支路方向都指向节点,则称这个节点为信号流图的收点。

在没有列写出节点方程与回路方程的情况下,可作出节点方程与回路方程的信号流图,为了作出节点方程的信号流图,应将式(1.35)写成果形式:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{g_{11}}{g_{11}} \varphi_1 + \dots + \frac{g_{1, y-1}}{g_{11}} \varphi_{y-1} + \frac{1}{g_{11}} J_1^{(y)} \\ \varphi_2 &= \frac{g_{21}}{g_{22}} \varphi_1 + \dots + \frac{g_{2, y-1}}{g_{22}} \varphi_{y-1} + \frac{1}{g_{22}} J_2^{(y)} \\ &\dots \dots \dots \\ \varphi_{y-1} &= \frac{g_{y-1, 1}}{g_{y-1, y-1}} \varphi_1 + \dots + \frac{1}{g_{y-1, y-1}} J_{y-1}^{(y)} \end{aligned} \quad (1.64)$$

将电路中的所有节点电位,都在信号流图中作出对应的节点,信号流图中每一对节点 φ_j 与 φ_i 都连接一个支路,当支路方向是由节点 φ_j 指向节点 φ_i 时,支路的传输量为 g_{ji}/g_{ii} ,当支路方向是由 φ_i 指向 φ_j 时,支路的传输量为 g_{ij}/g_{jj} ,用传输量为 $1/g_{ii}$ 的支路,将信号流图的节点 $J_j^{(y)}$ 与节点 φ_i 相连接。也可引入节点 J_j 与 E_j 来取代节点 $J_j^{(y)}$ 。

信号流图的传输量(梅森公式)为

$$H = \frac{\sum_k \Pi_k' \Delta_k'}{\Delta} = \frac{\sum_k \Pi_k' \Delta_k'}{1 - \sum_k P_k^{(1)} + \sum_k P_k^{(2)} - \sum_k P_k^{(3)} + \dots} \quad (1.65)$$

式中 Π_k' ——起于发点而终止于收点的路径中各支路传输量乘积; Δ_k' ——在原有信号流图中将与路径 k 有关的各支路移去后,所得到的图之行列式; Δ ——信号流图的行列式(反映信号流图的方程组的行列式); $\sum_k P_k^{(1)} = \sum_k L_k$ ——信号流图中全部回路的传输量之和; $\sum_k P_k^{(m)} = \sum_k L_{k_1} L_{k_2} \dots L_{k_m}$ ——所有可能组合的 m 重不接触回路传输量之和($m=2, 3, \dots$)。

本章的所有习题中,除特别声明的习题外,都认为电压表的内阻为无穷大,而电流表的内阻为零。

1.1. 最简单的电路

1.1. 已知图1.1电路的电阻 $r_1=30\Omega$, $r_2=60\Omega$, 电源电压 $U=120V$ 。

求电流表读数。

1.2. 已知图1.1电路的总电流 I , 导出并联电阻 r_1 与 r_2 中的分电流公式。

1.3. 用两并联支路的电阻 r_1 与 r_2 , 表示图1.1电路的输入电阻 $r_{ax}=U/I$ 。

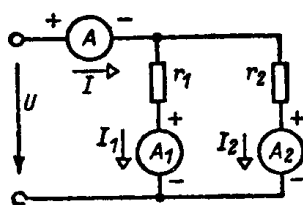


图 1.1

1.4. 在图1.1的电路中, 将电阻 r 串接在测量总电流 I 的电流表上, 试以电阻 r , r_1 和 r_2 表示输入电阻 $r_{\text{BX}} = U/I$.

1.5. 证明习题1.4中, 根据总电流 I 计算的并联支路电阻 r_1 与 r_2 中电流的分流公式, 与习题1.2的相同。

1.6. 根据基尔霍夫定律的一般形式, 对图1.7. a) 电路和图 1.8~1.10 电路中开关闭合后的电路, 列写出计算全部电流所必需的方程。

1.7 (P). 已知图1.7. a) 电路中正弦电源电压 $u_n(t)$ 的变化规律如图1.7. b) 所示, 直流电动势 $E = 80\text{V}$, 线性电阻器的电阻 $r = 1\text{k}\Omega$, 非线性电阻器的伏安特性不对称, 如图 1.7. c) 所示。

求各电阻器上的电压: 1) 在 t_1 时刻, 这时电压 $u_n(t)$ 达正的最大值 U_m ; 2) 在 t_2 时刻, 这时电压 $u_n(t)$ 达负的最大值 $-U_m$ 。

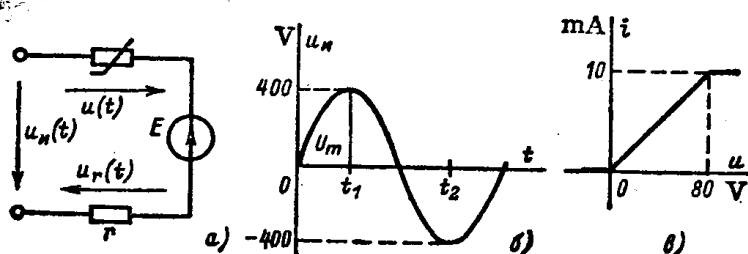


图 1.7

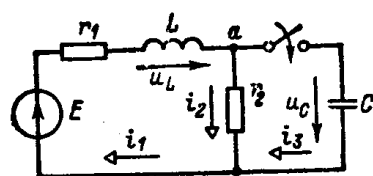


图 1.8

解: 设回路按顺时针方向巡行, 则根据基尔霍夫第二定律, 得方程

$$u(t) + u_r(t) - u_n(t) = -E \text{ 或 } u(t) = u_n(t) - u_r(t) - E,$$

1) 已知 $u_n(t_1) = 400\text{V}$, 根据伏安特性可确定电流 $i = 10\text{mA} = 10 \times 10^{-3}\text{A}$, 因此, $u_r = ri = 10\text{V}$, $u = 400 - 10 - 80 = 310\text{V}$ 。

2) 已知 $u_n(t_2) = -400\text{V}$, 根据伏安特性找出 $i = 0$, 因此, $u_r = 0$, $u = -400 - 80 = -480\text{V}$ 。

1.8(P). 已知图1.8电路中 $r_1 = r_2 = 10\Omega$, $L = 5\text{mH}$, $C = 10\mu\text{F}$, $E = 100\text{V}$ 。

$t = 0$ 时将开关合上, 若已知开关闭合的前后瞬间, 电感中的电流与电容上的电压保持不变, 求 $t = 0$ 时刻各支路的电流, 电容 C 上的电压和电感 L 上的电压。

解: 换路前电路已达稳态, 电压与电流不随时间改变, 根据式 (1.3) 知道电感上的电压 $u_L = 0$, 电流 $i_1 = E/(r_1 + r_2) = 100/(10 + 10) = 5\text{A}$, 电容 C 预先未充电, $u_c = 0$ 。根据题意, 换路后的瞬间电流 i_1 与电压 u_c 保持不变: $i_1 = 5\text{A}$, $u_c = 0$, 其他的电压、电流值, 则可从基尔霍夫定律所列写的方程中求得:

1) 对外回路应用基尔霍夫第二定律, 有 $r_1 i_1 + u_L + u_c = E$, 即 $10 \times 5 + u_L + 0 = 100$, 解出 $u_L = 50\text{V}$ 。

2) 对右边回路应用基尔霍夫第二定律, 有 $-r_2 i_2 + u_c = 0$, 即 $-10 i_2 = 0$, 解出 $i_2 = 0$ 。

3) 根据基尔霍夫第一定律, 对上面的节点 a , 有 $-i_1 + i_2 + i_3 = 0$, 解出 $i_3 = 5\text{A}$ 。

1.9. 已知图1.9电路的 $r = 10\Omega$, $L = 40\text{mH}$, $C = 100\mu\text{F}$, $E = 100\text{V}$ 。

求解内容同习题1.8。

1.10. 已知图1.10电路的 $r = 100\Omega$, $C = 2\mu\text{F}$, $J(t) = 2\sqrt{2} \sin(10^4 t + 135^\circ)\text{A}$, $e(t) = 100\sqrt{2} \sin(10^4 t + 45^\circ)\text{V}$ 。

求解内容同习题1.8。

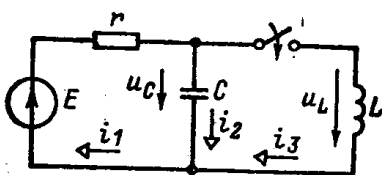


图 1.9

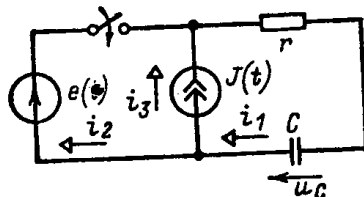


图 1.10

1.11. $t = 0$ 时, 将图1.11电路中的开关瞬时地从位置 a 转换到位置 b 。

已知 $L = 10\text{mH}$, $C = 100\mu\text{F}$, $r = r_s = 10\Omega$, $E = 30\text{V}$, $e = 5\sqrt{2} \sin(10^3 t + 135^\circ)\text{V}$ 。

求解内容同习题1.8。

1.12. 已知电源 (图1.12) 的电动势 $E = 2\text{V}$, 内阻 $r_{BT} = 0.02\Omega$, 求下列二种情况下的端电压 U_{ab} : 1) 电流等于 2A , 与电动势 E 同方向; 2) 电流等于 2A , 与电动势反方向。

1.13. 已知图1.13电路的 $E = 2\text{V}$, $r = 0.02\Omega$, $U_{ab} = 1.6\text{V}$ 。

求电流 I : 1) 当电动势方向与图上所标的相同; 2) 当电动势方向与图上所标的相反。

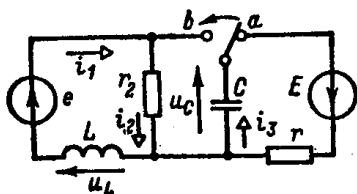


图 1.11

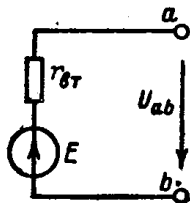


图 1.12

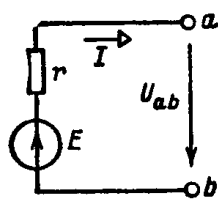


图 1.13

1.14. 利用含源支路的欧姆定律, 求出下列电路中各支路的电流, 并用基尔霍夫第一定律验算计算结果:

1) 当图1.20电路中各节点的电位为 $\varphi_a = 46\text{V}$, $\varphi_b = -32\text{V}$, $\varphi_c = 24\text{V}$, $\varphi_d = -8\text{V}$ 时, 求电流 I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , I_5 ;

2) 当图1.32电路中各节点的电位为 $\varphi_a = 2\text{V}$, $\varphi_b = -36\text{V}$, $\varphi_c = 8\text{V}$, $\varphi_d = -28\text{V}$ 时, 求电流 I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , I_5 。

1.15. 对图1.20和图1.32的电路, 根据习题1.14所给数据, 写出功率平衡式子。

1.16. 利用含源支路的欧姆定律与基尔霍夫第一定律, 求下列电路中各支路的电流, 并列基尔霍夫第二定律的方程式, 对结果进行检验: 1) 图1.28电路, 当电流 $I_1 = 8\text{A}$ 时; 2) 图1.32电路, 当电流 $I_1 = 1\text{A}$ 时。

1.17. 已知图1.17电路的 $r_1 = 0$, $r_2 = 2\Omega$, $r_3 = 2\Omega$, $r_4 = 2\Omega$, $r_5 = 4\Omega$, $E_1 = 6\text{V}$,