

电工学的理论基础

第一卷

[苏]П.А.依昂金 主编 杨存葆 罗曼仪 冯纪明 译

水利电力出版社

电工学的理论基础

第一卷

[苏]П.А.依昂金 主编 杨存葆 罗曼仪 冯纪明 译

水利电力出版社

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Том 1

Под ред. проф. П. А. Ионкина

«Высш. школа» 1976.

电工学的理论基础

第一卷

[苏] П. А. 依昂金 主编

杨存森 罗曼仪 冯纪明 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

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 27.25印张 617千字

1985年12月第一版 1985年12月北京第一次印刷

印数0001—6390册 定价5.55元

书号 15143·5752

内 容 简 介

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》第一卷译出。原书主编И.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》。

全书共分两卷。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。线性电路部分从元件及网络拓扑入手,并以后者贯穿全书,书中还附有大量的例题。这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。

译 者 的 话

本书是根据苏联高等教育出版社1976年出版、П.А.依昂金(Ионкин)主编的《电工学的理论基础》(Теоретические Основы Электротехники)一书译出的。主编依昂金是苏联莫斯科动力学院教授,在五十年代曾参加修订К.А.克鲁格教授编写的《电工原理》,至今三十多年来长期从事该课程的教学实践,不断充实与更新课程的内容。

全书内容分为线性电路理论基础、非线性电路理论基础及电磁场理论基础三部分,论证严密。在讲授次序上是从路到场。线性电路部分是从元件及网络拓扑入手,并以后者贯穿全书,书中还附有大量的例题。这是一本比较好的教科书,对我国大专院校有关专业师生及广大工程技术人员都有较大的参考价值。

原书共有两卷,第一卷为线性电路部分,第二卷为非线性电路及电磁场部分。译本亦分为两卷,将先后出版。

译本第一卷由杨存葆副教授、罗曼仪讲师、冯纪明讲师翻译,杨存葆通校了第一卷全稿。译本第二卷由王景熙讲师和唐忠德讲师翻译,滕福生教授通校了第二卷全稿。限于译者水平,难免有不当之处,恳请读者批评指正。

1984年9月

前 言

近几十年, 无论专业电工技术, 或普通学科的内容都发生了重大的变化, 这同样导致《电工学的理论基础》教程大纲的显著变动。由于上述原因, 作者不仅在所编教科书的内容上, 而且在教程的个别问题、章节甚至篇的叙述方法上, 都寻求作某些合理的变更。

为了便于阅读, 教科书分为两册。第一册“线性电路的理论基础”的内容约占“电工学的理论基础”教程大纲的2/3。第二册“非线性电路的理论基础”、“电磁场的理论基础”的内容相应为该教程大纲的其余部分。

由于计算技术在专业和基础学科中应用的重要发展, 导致了作者对教科书中研讨电路理论基础的各篇进行了重大的修改。

电路基本定律和计算方法的叙述, 主要运用矩阵、拓扑概念和线形图来进行, 它们被广泛应用于电子计算机的计算, 并且以大学生在数学和物理教程中所学得的知识为基础。删除了旧版教科书中的第一篇《电磁场和电路的基本概念和关系式》。这一篇中个别最重要的问题, 直接在它们得到理论上进一步应用的有关章节中去叙述。

电路理论基础的叙述从电路和网络元件及基本拓扑性质开始; 引入线形图和子图的概念; 研讨线形图的拓扑矩阵、拓扑矩阵的某些性质、对偶的性质。在第二篇中, 叙述含恒定电势源和电流源线性电路的基本性质和计算方法。与第一版不同, 这里是从最简单电路中过渡过程和稳态过程的经典分析方法开始叙述(第三章), 而在此后, 只更详细地研讨在恒定电压和电流下, 任意布局的电路稳态过程的分析方法和基本性质。

在线性电路理论的第三(基础)篇中, 研讨含同频率谐波电压源和电流源电路的性质与计算方法。这里, 同样从最简单电路中过渡过程和稳态过程的经典分析方法开始叙述(第六章), 此后, 研讨含无互感二端元件电路中稳态过程的分析方法, 包括拓扑分析方法和信号流(有向)图的应用。

含互感电路过程分析的一章中, 包括含电子管非互易元件的网络分析问题。

用减少与对称分量法有关内容的篇幅, 来压缩多相电路一章。

与旧版有所不同, 完全在正弦电流和电压的一篇中来叙述四端和多端网络。在这一篇中, 包括四端网络的特性阻抗和传输系数问题, 以及四端网络的线形图和在三端网络与最简网络连接的情况下, 应用线形图来确定组合系数。有关滤波器的一章有所扩充, 在滤波器中, 除k型滤波器外, 还叙述了m型滤波器和无电感滤波器的基本性质。

在线性电路过渡过程一篇中, 除经典法、算符法和频率法以外, 还叙述了基本原理, 并说明了状态变量法的应用。在具有分布参数电路过渡过程一章中, 研讨在形成脉冲情况下的波过程, 以及发生在无畸变传输线、无电感和无漏电电缆中的过渡过程。

第六篇专讲具有集中参数的线性电路的综合初步。其中研讨电路的函数性质, 以及给出二端和四端网络的综合基础。

在第七和第八篇中，叙述非线性电路中的过程。

在第七篇中，研讨在恒定电流和电压情况下，非线性电路和磁路的基本性质与计算方法；研讨在交流电流和电压情况下，非线性电路的状态特征和基本计算方法；此外，还在具有各种非线性元件的交流电路中进行稳态过程的分析。

在第八篇中，叙述非线性电路中过渡过程的分析方法和自振原理的元件。

与旧版有所不同，电磁场理论基础的叙述，由陈述电磁场基本方程开始。除教程大纲规定的那些问题以外，后续章节还包括有两种介质分界的圆柱表面的Сирл问题的解答，和以凯尔迪什—赛多夫公式为基础，应用复数位理论来计算场。此外，还研讨集肤效应和邻近效应的近似计算，以及回转磁介质中的平面波。

可以指出如下新的场论问题：

- 1) 对于静电场和恒定磁场的计算，应用积分方程的方法；
- 2) 近似计算方法和场的模型（网格法、相似法等等）；
- 3) 量子振荡发生器的辐射（量子振子、感应辐射、量子转移等等）；
- 4) 导磁介电体中的电磁场；
- 5) 运动介质中的电磁现象。

教程的许多篇都附加了一些例题，这些例题的内容与所叙述的正文是有机地结合的。

（以下为编著者的分工和对有关人士的致谢，从略。——译者）

译 者

目 录

译者的话
前 言

第一篇 电路的元件和基本拓扑性质

第一章 电路及其元件	1
§ 1.1 电路的分类及其元件	1
§ 1.2 电路网络和网络元件	3
§ 1.3 有源二端元件	3
§ 1.4 无源二端元件	7
§ 1.5 具有集中参数电路的基本方程	13
§ 1.6 电路的三端元件	15
第二章 基本拓扑概念和关系式	25
§ 2.1 电路的线形图及其分子图	25
§ 2.2 基尔霍夫定律	29
§ 2.3 线形图的拓扑矩阵及其性质	30
§ 2.4 对偶电路	39

第二篇 含恒定电势源及电流源电路的基本性质与计算方法

第三章 最简单电路的过渡过程和稳态过程的分析	42
§ 3.1 电路分析问题的提出	42
§ 3.2 含电阻 r 和电感 L 的电路	43
§ 3.3 含电阻 r 和电容 C 的电路	47
§ 3.4 含电阻 r 、电感 L 和电容 C 的电路	50
§ 3.5 含电阻 r 、电感 L 和电容 C 的电路中电容器的放电	54
§ 3.6 含电阻 r 、电感 L 和电容 C 的电路分析通论	55
第四章 分析稳态电路的代数法	56
§ 4.1 基尔霍夫方程的应用	56
§ 4.2 节点方程的应用	61
§ 4.3 树支电压方程的应用	65
§ 4.4 回路方程的应用	68
第五章 电路的基本性质和变换	73
§ 5.1 功率的平衡	73
§ 5.2 叠加原理	75
§ 5.3 互易性质(原理)	80

§ 5.4	补偿定理、电压和电流之间的线性关系	82
§ 5.5	等效电源(有源二端网)定理	88
§ 5.6	网络的最简等效变换	91
§ 5.7	去除节点的网络变换	93
§ 5.8	去除回路网络变换	100
§ 5.9	对称网络的变换	102

第三篇 具有谐波电势源和电流源电路的性质与计算方法

第六章	最简单电路中过渡过程和稳态过程的分析	111
§ 6.1	正弦(谐波)电压和电流	111
§ 6.2	谐波电势发电机的概念	112
§ 6.3	电阻 r 、电感 L 和电容 C 中谐波电流	114
§ 6.4	含电阻 r 和电感 L 的电路	119
§ 6.5	含电阻 r 和电容 C 的电路	124
§ 6.6	含电阻 r 、电感 L 和电容 C 的电路	127
§ 6.7	含变压器的电路	135
§ 6.8	r - L - C 电路的分析通论	139
第七章	含无互感二端元件电路的稳定过程	140
§ 7.1	表征电路稳定过程的复数	140
§ 7.2	交流电路中的能量过程	144
§ 7.3	含谐波电势源和电流源电路的复数(符号)形式的状态方程式	148
§ 7.4	位形图	153
§ 7.5	含谐波电势源和电流源电路的基本性质与变换	156
§ 7.6	参数变化时的电路分析	157
§ 7.7	谐振现象的分析	162
§ 7.8	输入和传递函数的基本代数表达式	167
第八章	分析无互感二端元件电路的拓扑方法	171
§ 8.1	计算节点导纳矩阵及割集导纳矩阵行列式的拓扑公式	171
§ 8.2	计算节点行列式元素的代数余子式的拓扑公式	173
§ 8.3	节点行列式及其元素的代数余子式的展开	177
§ 8.4	计算传输函数的拓扑公式(梅森公式)	182
§ 8.5	计算回路行列式及其元素的代数余子式的拓扑公式	187
§ 8.6	应用信号流(有向)图进行电路分析	191
§ 8.7	电路信号流图的构成	196
第九章	带有互感和电子元件(三端网络)电路的分析	201
§ 9.1	最简单的互感电路	201
§ 9.2	线性状态下的变压器 电感耦合回路	205
§ 9.3	带互感的分支电路	211
§ 9.4	含有互感电路的等效电路及其变换	215
§ 9.5	非互易元件电路的计算	219

§ 9.6 计算具有非互易元件电路的拓扑公式	227
第十章 多相电路	232
§ 10.1 基本概念与定义	232
§ 10.2 对称三相电路及其计算方法	235
§ 10.3 不对称三相电路的计算	239
§ 10.4 旋转磁场 异步电动机的工作原理	242
§ 10.5 三相电路的功率测量	245
§ 10.6 对称分量法的基本概念	247
第十一章 正弦电流及电压下的多端网络	250
§ 11.1 多端网络的定义	250
§ 11.2 四端网络的基本方程	251
§ 11.3 四端网络各系数的确定	254
§ 11.4 四端网络的等效电路	255
§ 11.5 四端网络的有载状态	258
§ 11.6 有源四端网络的基本方程和等效电路	259
§ 11.7 四端网络的特性阻抗和传输系数	261
§ 11.8 四端网络的线形图及其最简连接	265
第十二章 分布参数电路	267
§ 12.1 对称均匀链式网络	267
§ 12.2 分布参数电路的基本方程	268
§ 12.3 稳态下传输线中的波	271
§ 12.4 开路、短路以及带负载的有损线的稳态过程	272
§ 12.5 无损线	276
§ 12.6 驻波	281
§ 12.7 无畸变线 测量线路	284

第四篇 具有非谐波周期电压与电流电路的基本性质及计算方法

第十三章 具有非谐波周期电源的线性电路稳态过程的分析	286
§ 13.1 谐波分析与函数展开	286
§ 13.2 线性电路中稳态过程的计算	288
§ 13.3 非正弦状态的特性	289
§ 13.4 非正弦电流与电压的有效值 表征电流曲线与电压曲线波形的系数	291
§ 13.5 非正弦电流与电压的功率	292
§ 13.6 有分支电路中电感和电容对电流及电压曲线形状的影响	293
§ 13.7 对称多相电路中的非正弦状态	295
第十四章 滤波器的理论基础	297
§ 14.1 基本概念和定义	297
§ 14.2 对称电抗滤波器	299
§ 14.3 k型滤波器	302
§ 14.4 m型滤波器	309

§ 14.5 无感 rC 滤波器	313
--------------------------	-----

第五篇 线性电路中的过渡过程及其计算方法

第十五章 以经典法与状态变量法分析过渡过程	316
§ 15.1 经典法计算分支电路的过渡过程	316
§ 15.2 电路的过渡特性及冲激特性	320
§ 15.3 在任意形式电势源和电流源激励下过渡过程的计算	324
§ 15.4 计算具有电容回路和电感割集的电路过渡过程的特点	327
§ 15.5 状态变量法的基本原理	331
§ 15.6 电路状态微分方程的编写	333
§ 15.7 状态方程的求解方法	337
第十六章 应用拉普拉斯变换和傅立叶变换计算过渡过程	342
§ 16.1 拉普拉斯变换	342
§ 16.2 算符形式的电路方程	347
§ 16.3 以算符形式计算过渡电压和过渡电流	351
§ 16.4 电压与电流的自由分量和强制分量的计算	354
§ 16.5 零初始条件电路的化简	358
§ 16.6 傅立叶变换和频谱特性	360
§ 16.7 应用傅立叶变换计算过渡过程	366
§ 16.8 电路的时域特性与频域特性之间的某些关系	370
第十七章 分布参数电路的过渡过程	371
§ 17.1 分布参数电路过渡过程的特征	371
§ 17.2 正向波电压的计算	374
§ 17.3 传输线终端的电流和电压	376
§ 17.4 反向波电压的计算	378
§ 17.5 波从一条传输线到另一条传输线的传播	380
§ 17.6 接通或断开支路时传输线中的波	383
§ 17.7 利用传输线形成脉冲	386
§ 17.8 无畸变线中的波	390
§ 17.9 无电感及无漏电电缆中的过程	390

第六篇 集中参数线性无源网络综合初步

第十八章 网络函数的性质	394
§ 18.1 网络综合的任务	394
§ 18.2 网络函数的一般性质	394
§ 18.3 LC 、 rC 、 rL 和 rLC 电路输入函数的性质	399
§ 18.4 四端网络函数的性质	403
第十九章 二端网络与四端网络的实现方法	407
§ 19.1 电路元件参数的归一	407
§ 19.2 二端网络的实现	408
§ 19.3 LC 和 rC 桥式四端网络的实现	414
§ 19.4 LC 和 rC 链式四端网络的实现	416
附录 名词对照表	419

第一篇 电路的元件和基本拓扑性质

第一章 电路及其元件

§ 1.1 电路的分类及其元件

以电能与其它形式能量, 和(或者)电信息与其它形式信息的分配、相互转换及传输为目的的装置的总体称为**电路**。在存在电流的情况下, 电路完成其本身的功能。电路中的电磁过程及其参数可以借助于物理课中已知的积分概念: 电流、电压(电位差)、电荷、磁通、电势、电阻、电感、互感和电容来描述。

与电路不同, 许多电工装置中的物理过程用微分概念: 电场强度矢量和电位移矢量、磁场强度矢量和磁感应矢量、电荷密度和电流密度矢量、电导率等等来表征。用微分概念分析装置中发生的过程, 将在电磁场理论中讨论。

应该指出, 正是在场论中给出了描述电路的积分概念(如电流和电压)的定义。在一般情况下, 电路参数(电阻、电感、电容)的计算同样只能借助于场论中所运用的概念。

在某些情况下, 同一个装置既能用电路理论方法, 又能用场论方法分析。例如, 电能传输线可以作为分布参数电路, 或者作为电磁场的定向系统。选择何种方法, 取决于具体的分析目的、必要的精确度和其它因素。

电路由实现既定函数并称为**电路元件**的单独部件(对象)所组成。

电能(信号)源和电能(信号)接受器是电路的基本元件。

能(信号)源, 如发电机或电子式振荡发生器、蓄电池、伽伐尼电池、温差电池等等的作用是将各种形式的能量转变为电能。

能量(信号)的接受器用来将电能转变为其它形式的能量。电动机、加热器、电灯、阴极射线管、永磁式扬声器等等都属于接受器。

除了基本元件以外, 电路还包括各种辅助元件, 这些辅助元件将电源和接受器连接在一起(连接的导线、传输线); 抑制或者放大确定的信号分量(滤波器、放大器); 改变电路其它部分的电压和电流的水平(变压器); 改善或改变电路段及电路元件的特性和参数(校正装置、相位环节)等等。

按其功能, 分为**传输和变换电能**之用的电路(在电力中应用的电路)以及**传输和变换信息**之用的电路(通讯技术中的电路、无线电技术的电路、自动和远动装置的电路等等)。

电路可按其组成的元件类型分类, 例如, **电阻电路**——由电阻器和能源组成的电路、**电子电路**——包含电子管和晶体管的电路, 等等。

从电路的每个元件里, 能够分出确定的引出端(极、端钮)数目, 借助于这些引出端, 该元件与其它元件相连接。

电路元件一般分为**二端**和**多端**(三端、四端等等)的。二端元件具有两个引出端; 能

源（除多相电源和受控源以外）、电阻器、电容器、电感线圈都属于二端元件。

最常见的三端元件——即电子管（真空三极管）和晶体管（半导体三极管）。

变压器（两个绕组）、带辅助磁化的电感线圈（带辅助磁化的扼流圈）、积分运算放大器可以作为四端元件的实例。

具有四个以上引出端的电路元件同样得到应用（例如，多绕组变压器、各种微膜——电子网络的硬件、多极电子管）。电路元件又分为有源元件和无源元件。能源属于有源元件。能够放大电信号的电子管、晶体管、运算放大器通常也称为有源元件。消耗和（或者）积蓄能量的元件（电阻器、电感线圈、电容器、变压器）属于无源元件。

电路的实际元件可以用与这些元件端钮上的电压和电流有关的代数方程或微分方程来描述。在元件中物理过程理想化的情况下，这种描述能够给出一定的精确度；此时，从某种观点来看，不考虑次要的过程。

如果电路元件用线性代数方程或线性微分方程来描述（在上述理想化情况下），则称它为线性元件。与电压和电流以及它们导数有关的系数是元件的参数。线性元件的参数可以是常数（即时不变的元件）或者可以随时间按某种规律变化（非固定不变的、参量的元件）。

如果电路元件用非线性代数方程或非线性微分方程来描述，则称它为非线性元件。非线性元件同样是参量的元件。

在多数情况下，元件的参数视为集中的（具有集中参数的元件）；此时，元件端钮上的电压和电流不是空间坐标（取决于元件的几何尺寸）的函数。元件的参数也可能是分布的（具有分布参数的元件）；这种元件用依赖于空间坐标的电压和电流的方程来描述。可以将能量和信息的传输线、多层薄膜电阻—电容的微型结构作为具有分布参数的元件实例。

电路元件可以满足或者不满足互易原理^①。依此，分为互易元件和非互易元件。互易元件的实例——电阻器、电感线圈、电容器、变压器；电子管、晶体管等等属于非互易元件。

只包含线性元件的电路称为线性电路。这样电路的基本性质——叠加原理的适用性，它归结为，线性电路同时施加若干个激励的响应等于每一个单独的激励所决定的响应之和。

如果电路包含一个或者几个参量的元件，则称它为参量的（即时变的）电路。类似地，如果电路包含一个或一个以上的非线性元件，则称它为非线性的电路。在一般情况下，对于非线性电路不能应用叠加原理。

包含具有集中参数元件的电路称为集中参数电路。包含具有分布参数元件的电路称为分布参数电路。

严格地说，任何电路都是依赖于电路状态的分布参数电路，也就是非线性电路。可是

① 互易原理简述如下：由电路段 2 的激励在电路段 1 引起的响应，等于由段 1 相同的激励在段 2 引起的响应。后面给出该原理的数学公式及其图例说明。

在多数情况下，由于电磁过程的高速度，一段电路上的电压和电流的变化同时也引起电路其它所有各段的确定的变化；电路参数对其状态的依赖性常常是不重要的。因此，在多数情况下，实际电路可以视为具有集中参数的线性电路。

只包含互易元件的电路称为**互易电路**（由电阻器、电容器、电感线圈、变压器和能源所组成的电路）。如果电路中具有非互易元件，则称电路为**非互易电路**（含电子管、晶体管、运算放大器的电路）。

同样可以说明有源和无源的电路。如果对于某些端钮而言，它是能源，则认为电路是**有源的**。这种电路包含有源元件。在相反情况下，称电路为**无源的**。

§ 1.2 电路网络和网络元件

电路由其组成的元件的总体及其连接方式来描述。

如上所述，为了简化元件的数学描述，将电路的实际元件理想化。但是，理想化的方程式应该正确地反映任何一个实际元件的基本物理现象。

可以认为电路理想化元件的数学模型——网络元件，与电路理想化元件相当。描述网络元件的方程与电路实际元件的理想化方程是相同的。也能象数学抽象那样引入网络元件；此时，它们不必对应于电路的任何实际元件。但是，电路的任何实际元件可以借助于一个或者用确定方式连接的网络元件的总体来代表，而具有必要的精确度。在描述这个网络和电路元件的方程相一致的条件下，这样网络元件的总体（在特殊情况下，一个网络元件）称为电路元件的**替代网络**或**等效网络**。

假定的几何表示图形与每一个网络元件相对应。此时，实际电路元件的连接方式很易用相应网络元件的连接表示。反映电路实际元件连接及其性质的连接网络元件的几何图形称为电路的**网络**。

网络中分成**支路**——段，在任意瞬时，该段的特征是在起点和终点有同一电流，和节点——支路的交（终止）点。支路电压恒等于其节点的电位差^①。

习惯上，实际电路的支路和节点对应于网络的支路和节点。包含多端元件的电路网络中，某些节点和支路不能反映电路的节点和支路。此外，为了计及电路的结构参数和布线参数（例如，元件端钮之间的寄生电容、分布电容、引出线的电感），就引入网络的某些支路。

适应于电路，支路常确定如电路的段，在给定的瞬时，段的任意截面的电流具有同一数值，而节点——支路的连接“处”。

§ 1.3 有源二端元件

网络的任意二端元件，可以假定如图1.1所示。端点1和2将给定元件连接于其它元

① 网络的支路和节点——拓扑概念（见第二章）。

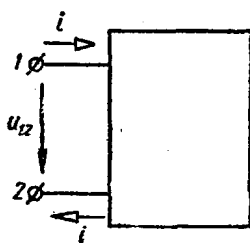


图 1.1

件。这些端点之间的电压和元件的电流分别用 u 、 i 表示。电压的计量单位为伏特 V，电流——安培 A。实心（空心）箭头为电压（电流）的正方向。

电压 u 和电流 i 一般是时间 t 的函数：

$$u = u(t); i = i(t)。$$

对于任意确定的瞬时，电压和电流可以是正的、负的或等于零。为了使电压和电流的符号具有确切的含义，应选定正方向。

电压 u （图1.1）与端钮 1 和 2 的电位差恒等，也就是

$$u = \varphi_1 - \varphi_2。$$

对于任一瞬时，如果电压 $u > 0$ ($u < 0$)，则意味着，节点 1 的电位 φ_1 高于（低于）节点 2 的电位 φ_2 ①。

电压正方向可以用双下标表示。这样，图1.1选择电压 u_{12} 的方向作为正方向。此时

$$u_{12} = -u_{21}。$$

电流 i 等于可迁移的带电质点穿过电路段横断面的电荷 q 的变化速率，也就是

$$i = dq/dt。$$

在一般情况下，电荷 q 是可迁移的带正电质点的电荷 q_+ 与可迁移的带负电质点的电荷 q_- 的绝对值之和。电荷量的计量单位是库仑 C。带正电质点的移动方向，要不然带负电质点移动的相反方向作为电流方向。如果在指明正方向的情况下，在某些瞬时，电流 $i > 0$ ($i < 0$)，则意味着，电流方向和正方向相一致（和正方向相反）。

电压和电流正方向可任意选择。描述元件（整个网络）的电压和电流之间联系的任何关系式只对所选正方向才有意义。

二端元件中，通过端点 1 处导线横断面的电流等于通过端点 2 处导线横断面的电流（计及相应方向的情况下）。所以，今后二端元件的电流在网络中将只指明一次。

对于图1.1所取电压和电流的正方向，乘积 ui 表示二端网络需求的瞬时功率：

$$p(t) = u(t)i(t)。$$

能量 $W(t)$ 变化的速率表征功率，也就是

$$p(t) = \frac{dW(t)}{dt}。$$

输入电路的能量

$$W(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^t u(\tau) i(\tau) d\tau，$$

式中 τ 为积分变量。

如果对于任意瞬时 t ，能量 $W(t) \geq 0$ ，则相应的二端元件是能量的需求者，且称为无源的。

① 网络任意节点的电位计算，是对电位取为零的某点而言。

有源二端元件产生能量。对于这种二端元件, $W(t) < 0$ 。

如果改变图1.1中电流正方向为相反方向, 则积分

$$W(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau) i(\tau) d\tau$$

将确定产生的能量。在该情况下, $W(t) > 0$ 相应于电源 (有源二端元件), 而 $W(t) \leq 0$ ——需求能量 (无源二端元件)。

可以认为二端网络元件: 电势 (电压) 源和电流源, 与实际能源相当。

电势源 电势 (电压) 源用电势值 $e(t)$, 即当通过电源的电流不存在时端钮上的电位差 (电压) 来描述。电势由电源固有的局外力在电源内部将单位正电荷从低电位端移到高电位端时所做的功来确定。

实际电势源的端电压 $u(t)$ 取决于通过电源的电流。如果可以忽略这个关系, 也就是当任何电流通过电源时, 电源的端电压等于电势 $u(t) = e(t)$, 则电势源称为理想的 (图1.2a) 给出了理想电势源的符号; 圆圈内箭头标明电源内部局外力作用的正方向 (电势的正方向)。

具有电动势

$$e(t) = \mathcal{E} = \text{常数}$$

的电源称为**恒定电势源**。相反的情况, 称为**交变电势源**。网络上所表示的恒定电势源处, 指示 $\mathcal{E} > 0$ 的电势正方向箭头的起点 (终点) [图1.2a)] 对应于负 (正) 端。如图1.2b) 所示恒定电势源的表示也是可以的。

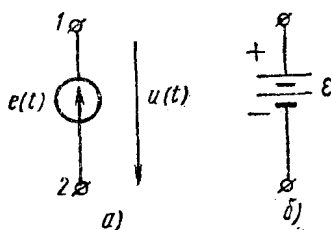


图 1.2

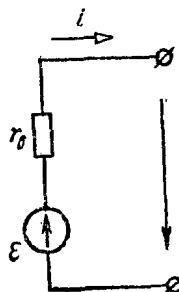


图 1.3

实际电源的端电压 u 与通过电源的电流 i 的依赖关系可以是各种各样的。具有恒定电势源的最简情况, 这种关系用方程

$$u = \mathcal{E} - r_0 i \quad (1.1)$$

表示。

图1.3替代电源的网络对应于方程 (1.1)。在该网络中, 与理想电势源 $\mathcal{E}$ 串联连接的元件 r_0 称为电源的**内阻**, 且用关系式 $u_0 = r_0 i$ 描述。

因此, 在方程 (1.1) 中计及电源的内阻压降: 实际源的端电压 u 比电势所小的数值。理想电势源有 $r_0 = 0$ 。

关系式 (1.1) 的图形示于图1.4a) 中。电流

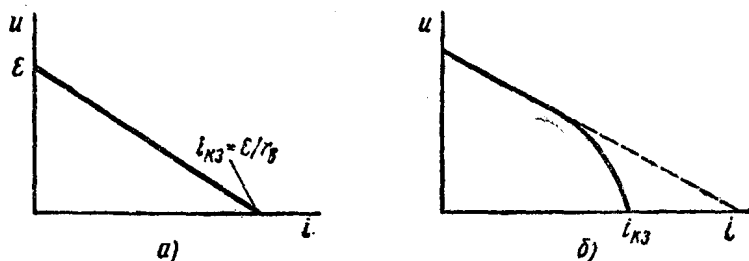


图 1.4

$$i_{K3} = \mathcal{E} / r_s$$

——电源的短路电流，即端电压 $u = 0$ 时的电流。

对于实际电源，关系 $u(i)$ 称为外特性，它与图1.4a)的线性关系是不同的。图1.4b)中给出了实际恒定电势源的外特性实例；在所规定的电流变化范围内，该特性接近于线性，且用方程(1.1)描述。

在某些情况下，含电压 $u(t)$ 的交变电势源的内阻上的电压确定为 $u_s = r_s i$ 。此时，电源的替代网络类似于图1.3网络。

电流源 与电势源不同，电流源以端钮短接时（不存在电源的端电压时）的电流 $i(t)$ 来描述。如果电流源的电流 $i(t)$ 不依赖于电压，也就是对于任意端电压 $i(t) = J(t)$ ，则电流源称为理想的。理想电流源的符号示于图1.5①。圆圈中分开的双箭头表示电流源电流的正方向。

如果 $J(t) = \text{常数}$ ，则电源称为恒定电流源；在相反情况下——交变电流源。

实际电源的电流 i 依赖于其端电压 u 。这样，由方程(1.1)得

$$i = (\mathcal{E} / r_s) - (u / r_s) = J - g_s u, \quad (1.2)$$

式中 $J = \mathcal{E} / r_s$ ， $g_s = 1 / r_s$ ——内电导。

图1.6替代网络对应于方程(1.2)。在该网络中，与理想电源 J 并联连接的元件 g_s 称为内电导，且用关系式 $i_s = g_s u$ 描述。

理想电流源有 $g_s = 0$ 。

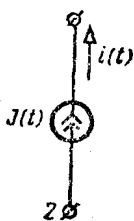


图 1.5

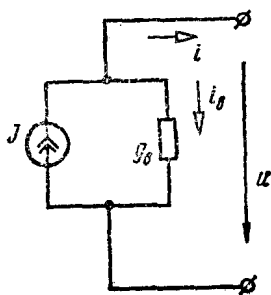


图 1.6

在许多情况下，替代实际交变电流源的网络能够用类似于图1.6的网络表示。

电源的等效性 可以说有两个替代实际电源的网络（图1.3和1.6）。如果 $J = \mathcal{E} / r_s$

① 理想电流源的电流 $J(t)$ 称为电激流。——译者注