

高等学校教学用书



电 工 基 础

第一册

电路理论基础

Г. В. 澤維凱, И. А. 伊昂金著
周 孔 章 等 譯

高等教育出版社



本書系根据苏联国立动力出版社 (Государственное энергетическое издательство) 1955 年出版的澤維凱 (Г. В. Зевеке) 和伊昂金 (П. А. Ионкин) 合著的“电工基础” (Основы электротехники) 第一册“电路理論基础” (Основы теории цепей) 譯出的。原書是莫斯科莫洛托夫动力学院电工理論基础教研組教师們的集体著作, 是在旧版 (1952 年版“电工原理”) 主編克魯格教授逝世之后修訂出版的。

第一册的内容包括: 直流电路、直流非綫性电路、磁路、靜电电路和正弦交流电路, 基本上符合莫洛托夫动力学院講授电工基础課程第一学期所用的教学大綱。

原書經苏联高等教育部批准作为动力工程系及电机工程系的教科書。

本書由东北工学院电力系电工原理教研組下列教师翻譯。原序、緒論、第四章及第十二章 12-6 节到 12-15 节由周孔章同志担任。第一章、第九章到第十二章 12-5 节由湯肇善同志担任。第二章及第六章到第八章由沈庆堃同志担任。第三章及第五章由陈紹龙同志担任。第十三章到第十五章由佟英泰同志担任。

本書的譯稿并經周孔章和湯肇善二同志校閱。

电 工 基 础

第一册

电路理論基础

Г. В. 澤維凱, П. А. 伊昂金著

周孔章等譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版營業許可證出字第〇五四號)

上海劳动印制廠印刷 新華書店總經售

統一書號 15010·506 開本 787×1092 1/16 印張 117/8 字數 245,000

一九五七年八月第一版

一九五七年八月上海第一次印刷

印數 1-6,200

定價 (10) 半 1.50

目 录

原序

緒論..... 1

第一篇 在直流电流和电压下

电路的性質及其計算方法

第一章 綫性电路的一般計算方法和基本性質.....4	3-4 四端網絡及其基本方程式.....42
1-1 电路元件和电路圖元件.....4	3-5 四端網絡系数的決定.....43
1-2 电源的等值电路圖.....6	3-6 四端網絡在負載下的情况.....45
1-3 欧姆定律应用在电路圖中具有电动势源的部分.....8	3-7 四端網絡的等值电路圖.....47
1-4 沿無分支电路电位的分布情形.....9	3-8 有源四端網絡的基本方程式和等值电路圖.....48
1-5 最簡單無分支电路的功率平衡.....9	3-9 具有漏电流的輸电綫中电压和电流的分布.....49
1-6 应用克希荷夫定律計算有分支的电路.....11	第四章 有电容器的电路.....51
1-7 节点电位法.....15	4-1 有电容器的电路的一般特性.....51
1-8 回路电流法.....17	4-2 有电容器的电路之基本定律.....52
1-9 疊加原理.....20	4-3 含有电容器的有分支电路的計算.....53
1-10 互易特性.....21	4-4 部分电容.....55
1-11 支路的入端电导和互电导.....22	第五章 非綫性电路.....57
1-12 补偿定理.....24	5-1 最簡單的非綫性电路的元件和等值电路圖.....57
1-13 电压和电流間的綫性关系.....24	5-2 計算具有非綫性元件的無分支电路的圖解法.....59
1-14 关于电流和电压間相关增量的定理.....26	5-3 計算具有非綫性元件的并联电路的圖解法.....60
第二章 綫性电路圖的轉換.....26	5-4 計算具有無源非綫性元件和無源綫性元件的混联 电路的圖解法.....60
2-1 概說.....26	5-5 研究非綫性电路情况的解析方法示例.....61
2-2 含有混联电阻的电路圖的轉換.....27	5-6 具有非綫性元件的有分支电路的計算.....62
2-3 电阻的三角形联接与三射綫星形联接的互相轉 換.....29	5-7 計算具有綫性与非綫性元件的电路时,有源二端 網絡及四端網絡理論的应用.....65
2-4 电阻的多射綫星形联接轉換成等值多角形联接.....31	5-8 具有非綫性元件的最簡單無分支电路中电路状态 稳定性的概念.....68
2-5 具有电动势源及电流源的并联支路的轉換.....32	第六章 磁路.....71
2-6 具有电动势源的电路圖轉換成具有节点电流(电 流源)的等值电路圖.....34	6-1 磁路的基本概念和基本定律.....71
第三章 二端網絡和四端網絡.....36	6-2 無分支磁路的計算.....74
3-1 二端網絡概說.....36	6-3 有分支磁路的計算.....76
3-2 有源二端網絡的定理及其在計算有分支电路方面 的应用.....36	6-4 含有空气隙的环形永久磁鉄的磁路的計算.....78
3-3 从有源二端網絡到無源二端網絡的能量傳輸.....40	6-5 含有永久磁鉄的無分支非均匀磁路的計算.....80

第二篇 在正弦电流和正弦电压下

电路的性質及其計算方法

第七章 正弦电流和正弦电压.....81	7-4 电流、电动势及电压的有效值.....84
7-1 交变电流.....81	7-5 用向量和复数来表示正弦時間函数.....84
7-2 关于交流发电机的概念.....82	7-6 同頻率正弦時間函数的加法.....85
7-3 正弦电流.....84	第八章 正弦电路的基本概念.....87

8-1 电路及其电路圖	81	12-7 电路中感应耦合的元件間之能量傳輸	133
8-2 电阻中的正弦电流	89	12-8 無功功率的守恒定律	134
8-3 电感中的正弦电流	89	12-9 無鉄心的变压器(空气心变压器)	135
8-4 电容中的正弦电流	91	12-10 理想变压器	137
8-5 电阻、电感和电容的串联	92	12-11 綫圈和变压器有鉄心时所引起的現象	138
8-6 阻抗	93	12-12 鉄心綫圈的向量圖和等值电路圖	140
8-7 导納	95	12-13 鉄心变压器的等值电路圖	140
8-8 功率	97	12-14 具有变压器的电路的計算	143
8-9 無源二端網絡	100	12-15 自耦变压器	144
✓8-10 关于集膚效应和鄰近效应的概念	102	第十三章 圓圖	145
8-11 电容器的参数和等值电路圖	103	13-1 最簡單的圓圖	145
8-12 綫圈和变阻器的参数和等值电路圖	104	13-2 圓的复数方程式	147
第九章 正弦电流电路的計算	106	13-3 無分支电路和有源二端網絡的圓圖	148
9-1 受电器的串联	106	13-4 任意有分支电路的圓圖	150
9-2 受电器的并联	107	13-5 有源和無源四端網絡的圓圖	151
9-3 受电器的混联	108	第十四章 三相电路	152
9-4 复杂的有分支电路	109	14-1 关于多相电源和多相电路的概念	152
9-5 位形圖	111	14-2 星形联接与多角形联接	154
第十章 电路中的諧振	112	14-3 三相电路的对称情形	155
10-1 無分支电路的諧振	112	14-4 具有各种联接电路圖的三相电路的一些性質	157
10-2 無分支电路的頻率特性	114	14-5 三相电路的对称情形的計算	157
10-3 具有两个并联支路的电路的諧振	115	14-6 具有靜止負載的三相电路的不对称情形的計算	158
10-4 具有两个并联支路的电路的頻率特性	118	14-7 三相輸电綫的等值电路圖	161
10-5 关于复杂电路中諧振的概念	119	14-8 三相电路中功率的測量	164
第十一章 在正弦电流和电压下的能量傳輸	119	14-9 旋轉磁場	165
11-1 在傳輸能量时,輸电綫始端和終端电压間的关系	119	14-10 异步电动机及同步电动机的作用原理	166
11-2 沿綫傳輸最大功率的条件	121	第十五章 对称分量法	168
11-3 从有源二端網絡向無源二端網絡傳輸最大功率的条件	122	15-1 三相制的对称分量	168
11-4 無源四端網絡	123	15-2 关于三相电路中电流和电压的对称分量的若干性質	169
✓第十二章 具有互感的电路	124	15-3 对称三相电路对于各不同序电流的阻抗	171
✓12-1 有感应耦合的电路元件	124	15-4 对称电路的电流的决定	173
12-2 互感电动势	126	15-5 在不对称三相电路中电压和电流的对称分量	174
12-3 有互感的受电器的串联	128	15-6 具有不对称負載的电路的計算	175
12-4 有互感的受电器的并联	129	15-7 輸电綫中有不对称部分的电路的計算	177
12-5 有互感的有分支电路的計算	129	15-8 用电流和电压的对称分量表示三相电路中的功率	179
12-6 感应耦合的等值替換	131		

参考書刊

中俄文对照索引

第二册目录

原序

第二篇 在正弦电流和正弦电压下

电路的性质及其计算方法(續完)

第一章 具有分布参数的电路	181	1-9 無畸变的綫	193
1-1 長綫中的电流和电压	181	1-10 有負載的情况表为空載情况和短接情况的疊加	195
1-2 均匀長綫方程式	181	1-11 有損耗的綫的空載,短接和有負載的情况	196
1-3 均匀長綫中的稳定状态	182	1-12 無損耗的綫	199
1-4 均匀長綫方程式的双曲綫函数解	185	1-13 駐波	201
1-5 均匀長綫的特性	187	1-14 無損耗的綫的入端阻抗和入端導納的圓圖	206
1-6 長綫的入端阻抗	189	1-15 長綫看作四端網絡	208
1-7 波的反射系数	191	1-16 对称四端網絡的特性阻抗和傳播系数	210
1-8 接以特性阻抗的有損耗的綫	191	1-17 鏈形电路圖	212

第三篇 在非正弦电流和电压下

电路的性质及其计算方法

第二章 非正弦电流	214	4-5 在含有非綫性电抗的电路中电压和电流曲綫的 形状	245
2-1 非正弦电动势和非正弦电流	214	4-6 頻率三倍器	247
2-2 周期性非正弦曲綫分解成三角級数	214	4-7 在含有热电阻的电路中电流和电压曲綫的形状	249
2-3 周期性非正弦电动势和电流的極大值、有效值 及平均值	216	4-8 用慣性非綫性元件代替实际的非綫性元件	249
2-4 表明非正弦周期性曲綫形状的系数	217	4-9 当計算綫圈和变压器时鉄心的非綫性特性曲綫 的估計	250
2-5 具有周期性包綫的非正弦曲綫	218	4-10 关于慣性非綫性电路計算方法的概念	253
2-6 非周期性曲綫	220	4-11 关于慣性非綫性磁路計算方法的概念	255
2-7 具有非正弦电动势和非正弦电流的电路之計算	222	4-12 鉄磁諧振現象	256
2-8 在非正弦电动势及非正弦电流下的諧振	225	4-13 电压鉄磁諧振	257
2-9 周期性非正弦电流的功率	226	4-14 电流鉄磁諧振	258
2-10 三相制中的高次諧波	227	4-15 电压稳定器	259
第三章 頻率滤波器	228	4-16 具有非單一电源的电路	260
3-1 滤波器	228	4-17 在具有直流和交流电动势的电路中的整流器	260
3-2 低通滤波器	229	4-18 在具有直流和交流电动势的电路中的鉄心綫圈	261
3-3 高通滤波器	234	4-19 頻率二倍器	263
3-4 單通帶滤波器	235	4-20 在具有無慣性电阻的电路中直流电动势对于电 流的交流分量的影响	264
3-5 單除帶滤波器	238	4-21 三極电子管的等值电路圖	265
第四章 非綫性交流电路	239	4-22 产生調制振蕩的原理	266
4-1 非綫性交流电路的一般特性	239	4-23 在具有非綫性电感的电路中直流分量对交流分 量的影响	267
4-2 具有單一电源的电路	240	4-24 鉄磁功率放大器	269
4-3 在具有單向电阻的电路中电流曲綫的形状	241		
4-4 最簡單的整流器	242		

第四篇 电路中的过渡过程及其计算方法

第五章 用經典法計算具有集中参数的电路中的 过渡过程	271	5-2 过渡、強制和自由状态	271
5-1 在电路中过渡过程的發生和开閉定律	271	5-3 r, L 电路的短接	273
		5-4 r, L 电路接通到直流电压	275

(3)

5-5 r, L 电路接通到正弦电压	276	7-3 具有矩形波前的波的發生	326
5-6 r, C 电路的短接	277	(a) 具有矩形波前的波	326
5-7 r, C 电路接通到直流电压	278	(G) 以电阻接向有负载的线	327
5-8 r, C 电路接通到正弦电压	280	(B) 终端有负载的线的开断	328
5-9 在無分支的 r, L, C 电路中的过渡过程	281	7-4 寻求改接时所發生的波的普遍情形	328
5-10 电容器的非周期放电	282	7-5 杂散波	329
5-11 电容器非周期放电的临界情形	284	7-6 有矩形波前的波从电阻的反射	330
5-12 电容器的周期(振荡)放电	284	7-7 决定反射波电压和电流的普遍方法	331
5-13 非周期的 r, L, C 回路接通到直流电压	287	7-8 在含有集中电容和电感的线中过渡过程的定性 研究	335
5-14 振荡的 r, L, C 回路接通到直流电压	287	7-9 在接于电阻的线中波的多次反射	336
5-15 非周期的 r, L, C 回路接通到正弦电压	288	7-10 已充电的线接于电阻时波的多次反射	338
5-16 振荡的 r, L, C 回路接通到正弦电压	289	第八章 非线性电路中的过渡过程和自生振荡	339
5-17 用經典法計算过渡过程的一般情形	292	8-1 非线性电路中过渡过程的一般特性	339
5-18 电路接通到連續变化的电压(丢阿蔑尔公式)	297	8-2 非线性电路中过渡过程的计算方法	340
5-19 电路接通到任意形式的电压	298	8-3 鉄心綫圈接通到直流电压	341
第六章 用运算法和福里哀积分法計算具有集 中参数的电路中的过渡过程	301	8-4 鉄心綫圈接通到正弦电压	345
6-1 运算法的基本原理	301	8-5 有电容负载的整流器接通到正弦电压	348
6-2 最簡單函数的变换式	302	8-6 具有电弧, 电感和电阻的电路接通到正弦电压	349
6-3 函数的微商和积分的变换式	303	8-7 特性曲线具有下降区段的非线性电阻	350
6-4 分解定理	304	8-8 关于具有非线性电阻的电路中状态的稳定性的 概念	351
6-5 欧姆定律和克希荷夫定律的运算形式	306	8-9 含有氛灯的电路中的弛張振荡	353
6-6 等值运算电路图	309	8-10 不衰减的正弦振荡的获得	354
6-7 含有互感的支路中的过渡过程	313	8-11 过渡过程在相平面上的映像	355
6-8 接通公式	316	8-12 正弦振荡發生器的相迹	358
6-9 过渡过程的計算归結成为零值初具条件	318	8-13 决定自生振荡之振幅的諧波平衡法	360
6-10 依据变换式决定自由电流法	319	附录	
6-11 用福里哀积分法計算过渡过程	320	参考書目	
6-12 計算过渡过程的各种方法的比較	322	中俄文对照索引	
第七章 具有分布参数的电路中的过渡过程	324		
7-1 在具有分布参数的电路中过渡过程的發生	324		
7-2 均匀長綫方程式的通解	324		

緒 論

今天,電能在工業所有各個部門中、在運輸業方面、在農業方面以及在日常生活里都有着最廣泛的應用。

蘇維埃國家的天才締造者弗拉基米爾·依里奇·列寧曾說過:“共產主義——這就是蘇維埃政權加上全國電氣化……。只有當國家電氣化了,只有當我們在工業、農業和運輸業方面奠定了現代大規模工業的基礎的時候,我們才取得了最後的勝利”。(列寧全集俄文版第31卷484頁)。

在廣義上講,電磁現象實際應用的遼闊領域稱為電氣工程。

因為電氣工程所有各個部門彼此之間都有聯繫,所以在高等電氣工程的教育體系中,就有必要設立“電工理論基礎”這一課程作為學習電氣工程各種專業課程的基礎。

現在,電氣工程的專業課程對於“電工理論基礎”課程提出了下列兩方面的要求:一方面要計算和研究用電流、電壓、功率、磁通等來表明過程,另一方面要計算和研究發生於電磁場中的現象。第一類問題屬於電路的計算和研究,第二類問題則屬於電磁場的計算和研究。

電氣工程的發展需要在學習與研究電磁現象的理論方面及其實際應用方面進行巨大的工作。

許多發現和發明應該歸功於俄國的學者和工程師們,他們曾經為電氣工程的最重要部門奠定了基礎。

M. B. 羅蒙諾索夫創立了關於大氣電的新穎學說,並且發現了質量和運動守恆定律。在

A. 伏特發明伽伐尼電堆之後,就有了可能獲得電流。B. B. 彼得羅夫在研究電路中的現象時發現了電弧(1802年),他並且指出電弧有實際應用於照明,金屬的熔化及焊接的可能。

M. 法拉第和 Д. X. 楞次在發展關於電磁現象學說方面起了極其重要的作用。

1831年法拉第發現電磁感應現象。

1833年 Д. X. 楞次發現了確定感應電流與其電磁及電力的相互作用之間關係的定律。特別是,他確定了電磁慣性原理。1844年 Д. X. 楞次單獨地(與焦耳無關)確定了如下的定律:當有電流流過時,導體中所發生的熱量與導體的電阻和電流的平方成正比例。

全世界第一個電磁電報是 И. И. 希林格于1832年所建立的。

Г. 克希荷夫在1845年表述了有分支電路的基本定律,這對於電氣工程在理論和實際方面的發展具有巨大的意義。

И. H. 亞布洛契科夫所發明的電燭(1876年)奠定了電氣照明的基礎。

第一盞炭絲白熾燈是 A. H. 洛迪金所創制的。

在十九世紀後半葉的其他俄國學者之中,必須指出 A. T. 斯托列托夫和 И. A. 烏莫夫兩人:斯托列托夫最先詳細地研究了鐵的磁性,並且發現了光電效應;烏莫夫則為物體中電磁能量運動方程式的推導奠定了基礎。

因此,在從1800年到1875—1880年這一時期之內,正是由於實用電工技術的發展,特別是由於出現了電報,電鑄和電氣照明技術,直流

电路的理論也隨之而日益發展。在這個時期里，曾經確定了电路理論的基本概念，並創立了一些計算电路的最重要方法[文獻 1, 6]。

1876 年，И. H. 亞布洛契科夫開始應用交變電流。在他的電燭中，應用交變電流使炭精的燃燒趨於穩定，且便於從一個電源向許多燈盞供電。

隨着電能消費的擴大，就提出了遠距離輸電的問題。要解決這個問題，必須採用不同的電壓來輸送電能和分配電能。對於交變電流，這個問題很容易用變壓器來解決，變壓器也是 И. H. 亞布洛契科夫發明的。

由於 M. O. 多利沃-多布羅沃爾斯基的發明，交變電流已為大家所公認，並在電力方面獲得了廣泛的應用。M. O. 多利沃-多布羅沃爾斯基研究出了現在已經到處應用的三相制，在 1889 年制出了第一部三相電動機，並研究出了三相电路中的所有各個環節，而在 1891 年他用三相電流將電能輸送到 175 公里的距離。交變電流的應用要求解決許多問題，而成為研究電工理論基礎整個領域的根本，於是，電工理論基礎整個領域在二十世紀初葉就得到了交流電理論的名稱。У. И. 史坦因美茲引用復數量來計算电路的方法是交流電理論發展上的特別重大事件。

除了必須解決屬於电路和磁路的理論問題之外，實用電工技術還提出了關於電磁場計算的問題。電機和電磁器具的設計需要計算磁場，要使通電的部分獲得可靠的絕緣就必須計算電場。要計算交變電流沿導體橫截面的分布，則需要解決關於計算電磁場的問題。

1873 年麥克斯韋在其“論電與磁”的經典著作中，用數學形式闡明了電磁場的理論基礎，這是法拉第關於電磁場的物理現實這一觀念之推廣和進一步的發展。在 1887—1889 年間

И. 赫茲試驗成功的關於電磁波的發生和傳播的工作，以及 И. H. 列別捷夫證明光波的壓力的工作，都用實驗證明並且發展了麥克斯韋所探討的電磁場理論。

A. C. 波波夫在 1895 年發明了無線電通訊，這在人類文化生活上開辟了一個新的紀元。無論是對於电路理論的研究，或者是對於電磁場理論的研究，無線電的發展都具有巨大的推動作用。

因此，由於電氣工程各個部門的發展，到二十世紀初葉，不僅將电路和磁路理論的問題而且將電磁場理論的實用問題都同時從物理課中划分出來，而成為獨立的課程。

這樣，在 1904 年 B. Ф. 米特開維奇教授便在彼得堡工程學院開始講授“電現象和磁現象的理論”課程。1905 年 K. A. 克魯格教授在莫斯科高等工業學校開始講授“交流電理論”課程，他寫的教程於 1906 年出版問世。在俄國企圖將電工理論基礎問題綜合成一整體的第一本書籍，是 1916 年出版的 K. A. 克魯格所著的“電工基礎”。

因此，在電氣工程發展的过程中必須指出第二個階段（1880—1917 年），這是“電工理論基礎”形成為獨立課程的一個階段。

雖然在俄國具有曾為全世界電氣工程付出了卓越貢獻的、杰出的俄國學者和發明家們的工作成果，但由於革命前俄國經濟的落后，電氣工業並沒有得到應有的發展。只有在偉大的十月社會主義革命之後，我們的國家（指蘇聯——譯者）在共產黨和蘇維埃政府領導之下才建立了強大的電氣工業，使我們完全不需要從國外輸入電氣工程的各种設備。在勝利地超額完成了俄羅斯國家電氣化計劃（ГОЭИПО 計劃）之後，在戰前各五年計劃的年代中，電的應用在國民經濟所有各個部門里獲得了巨大的發展。今

天,我們正在为实现苏联共产党第十九次代表大会的历史性決議进行着偉大的工作。全世界最大的發电站在建造中。在尺寸和技术数据方面都是空前未有的电机也的生产。所有工艺程序都在广泛地推行自动化。国民經济所有各个部門都采用了最新的技术。苏联在 1954 年建成了世界上第一座利用原子能为和平事業服务的發电站,并已正式發電。只有具备了建立在高度科学水平上的精深的理論基础,才可能完成这些宏偉的任务。

从本世紀的二十年代开始,电工理論基础發展得極为迅速。几乎对于电气工程所有各个部門都具有重要意义的一般电路理論获得了广闊的發展。

在电路理論的領域中,对于电气工程許多新的部門極为重要的一部分,就是所謂非綫性电路的理論。非綫性电路是这样一种电路,它的元件所具有的参数(电阻、电感、电容)与流过其中的电流或加于元件上的电压之大小或方向有关。

电磁場理論也获得了广闊的發展。已經研究出一些关于电磁場方面新的計算方法和新的实验研究方法,也研究了电磁場中帶电質点动力学的問題。在物理領域內,对于不同媒介質中的电磁过程曾經有成效地进行了研究而且在繼續研究着:此外,在扩大电磁場的应用范围方面也进行了許多工作而且还在繼續进行着。

从定性和定量兩方面来研究發生于各种电气设备中的电磁現象和过程,就是“电工理論基础”这一課程的对象。

在所有那些为了各种技术目的而設計的現代电气设备中,总是进行着这样或那样的能量变换。發电机和电动机是用来使机械能与电能

互相变换的。利用变压器就可以將一种电压之下的电能变换成另一种电压之下的电能。

在电灯泡里进行着由电能变换成光能的过程。在許多电气设备中,其各个个别元件之間也發生着电能的重新分配。

导体、电介質和鉄磁質是制造各式各样的电气设备所用的主要材料。

具有高电导系数的导电材料有这样一种特性,就是它能傳导电流而沒有显著的电能損耗,因此,这种材料被广泛地用来在一定的方向之下輸送电能。要集中电場的能量并縮小电場的体积,通常可以利用具有高介电系数的电介質之电容器。要集中磁場的能量并縮小磁場的体积,則照例采用具有高导磁系数的鉄磁材料。

“电工理論基础”这一課程的目的就是要尽可能在充分普遍形式之下教給学生关于电磁現象和过程的各种定性和定量关系的知識,并且提供出一些解决各种电气工程專門方面的問題的基本方法。

所研究的电磁現象和过程的定性和定量兩方面有着不可分臈的联系。因此,在高等学校中“电工理論基础”这一課程的學習,就必須以从物理和数学課中所获得的知識作为基础。这些知識,在“电工理論基础”課程中,將随着探求那些發生在电路和磁路以及电磁場中的現象和过程之分析方法、計算方法和实验研究方法,而得到扩大与發展。

無論是研究电路和磁路中的物理过程,或者是研究各种设备的电磁場,唯一的科学的認識方法就是辯証的方法:“从活的观察——列宁說——到抽象的思維,再从抽象的思維到实践,这就是認識真理、認識客觀現實的辯証方法”。

第一篇 在直流电流和电压下 电路的性质及其计算方法

第一章 线性电路的一般计算方法和基本性质

1-1. 电路元件和电路图元件

确保能在其中产生电流的那些设备的集合体称为电路。

电路用来分配电能并使电能与其他类型的能量作相互的变换。电能产生器和电能接受器以及联接于其间的导线是电路的基本元件。

电能产生器(原电池, 蓄电池和发电机等)变化学能, 机械能, 热能和其他类型的能量为电能。相反地, 电能接受器(电灯, 电热器具和电动机等)则变电能为热能, 光能和机械能等。

在不随时间而变的电流和电压下, 从电能产生器中获得电能而在电能接受器中将其变形的电路称为直流电路。

术语“电能接受器”在后面将用较简短但意义相同的术语——受电器, 负载和用户——来代替。而术语“电能产生器”则用较简短的术语——电能源, 供电电源或电源——来代替。

在图 1-1 中用符号表示出最简单的电气设

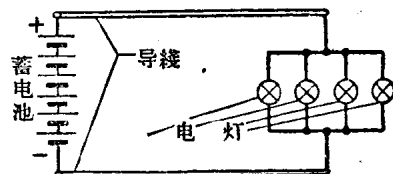


图 1-1.

备, 其中具有蓄电池类的电源和电灯类的受电器。电源和受电器的端钮之间用两条导线联接

起来。电源, 联接导线以及受电器共同构成了闭合的回路。在这个回路中由于电源电动势的作用, 产生了连续的单向电荷运动。

电源、两条导线和受电器这三个元件的集合体就是最简单的直流电路。实际上, 常会遇到具有许多电源和许多受电器的更为复杂的直流电路。不论是在简单的电路中也好, 或是在复杂的电路中也好, 在恒定的电流和电压下所有的磁场和电场都是不随时间而变的。因此, 在这种电路中不会产生自感电动势和互感电动势, 而且在导线周围的电介质中不会产生位移电流。

为了简化电路的讨论过程, 我们用计算电路图或理想电路来代替原来的电路。同时, 我们再利用两种基本的电路图元件: 具有电动势 E 和内阻 r_0 的电源以及受电器和导线的电阻 r (图 1-2)。

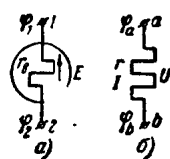


图 1-2.

电动势 E 决定于当电源内没有电流时其两端钮(1 和 2)间的电位差或电压, 而与产生此电动势的物理本质(接触电动势, 温差电动势等)

无关:

$$E = \varphi_1 - \varphi_2 = U. \quad (1-1)$$

取从低电位到高电位的方向为电动势的方向, 并用箭头表示之。

如在电源的端钮上接以受电器(负载), 则

在闭合回路中产生电流。这时，由于电源内部的电压降落 U_o ，亦即由于内阻 r_o 上的压降：

$$U_o = r_o I,$$

端钮 1 和 2 之间的电压或电位差就不等于电源的电动势了。

圖 1-3 表示有负载电源的一条最典型的所谓外特性曲线 $U = \varphi_1 - \varphi_2 = U(I)$ 。观察这条特性曲线可以看出，当

电流由零升到 $I \approx I_1$ 时，电源的端电压按直线规律下降

$$U = E - U_o = E - r_o I。$$

换句话说，在上述的电流变化范围内，电源的内电压降落与电流成正比例。当电流继续增加时，它的数值就不能与电源内电压降落成正比例了，即外特性曲线不再是一条直线。电压降低的原因是多种多样的，举例来说，对于某些电源来说，是由于电动势的降低所引起的，对于另一些电源来说，则是由于内阻的增大所引起的，而对于第三类电源来说，则又可能是同时由于电动势的降低和内阻的增大所引起的。

电源所发出的功率由下面的公式决定：

$$P_u = EI。 \quad (1-2)$$

谈到功率的问题，应该注意到在电工方面已建立起来的关于这个术语的不正确的用法。例如，我们常常说“发生功率”、“输出功率”、“消耗功率”、“传输功率”和“损失功率”等等，而实际所发生的、输出的、消耗的、传输的和损失的不是功率而是能量。功率只说明各个能量过程中的强度，是以单位时间内的能量（发生的、输出的、传输的等等）来量计的。因此，正确的说法是：发生能量的功率、传输能量的功率、消耗能量的功率等等。为了遵守已有的传统起见，在后面我们常采用上述不正确的但却简短的表

达方法。

作为理想电路元件的受电器的电阻 r (圖 1-2, 6) 可以说明电能的消耗，亦即说明电能转换成其他形式的能量，能量变换的功率为

$$P = rI^2。 \quad (1-3)$$

在一般情形下，受电器的电阻 r 与这个受电器中的电流 I 有关，即 $r(I)$ 。

根据欧姆定律，电阻上的电压为

$$U = rI。 \quad (1-4)$$

应该指出，还在 1801—1802 年，科学院士 B. B. 彼得罗夫就非常接近于发现电压 U 和电流 I 之间的这个定律 (1-4) 了。迟到 1826 年，欧姆才给出这个定律的公式 [文献 2]。

在电路的计算上，除了电阻以外还采用电导的概念：

$$g = \frac{1}{r}。$$

实际上，所给出的常不是电阻对电流的依从关系 $r(I)$ ，而是这个电阻上的电压对电流的依从关系 $U(I)$ ，或者是相反的关系，即电流对电压的依从关系 $I(U)$ 。特性曲线 $U(I)$ 称为伏安特性曲线。

在圖 1-4 中表示出了金属丝电灯的伏安特性曲线 $U_1(I)$ 和炭丝电灯的伏安特性曲线 $U_2(I)$ 。观察

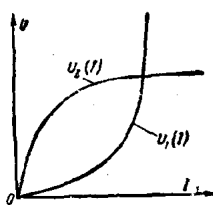


圖 1-4。

这些特性曲线可以看出，每种电灯的电压与电流的关系都不是线性的。金属丝电灯的电阻随电流的增大而增大，而炭丝电灯的电阻则随电流的增大而减小。

含有非线性特性曲线的元件的电路称为非线性电路。

如电源的电动势，内阻和受电器的电阻都与电流和电压无关，则电源的外特性曲线 $U(I)$

和受电器的伏安特性曲线都是线性的(圖 1-5)。

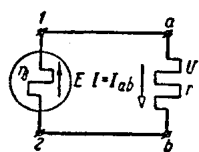
仅由具有线性特性曲线的元件所组成的电路称为线性电路。

大多数的实际电路都可列入线性电路。因此,研究线性电路的性质和计算方法,不仅在理论上而且在实际上也是十分重要的。

1-2 电源的等值电路图

由基本元件所组成的电路图应该视为实际电路的计算模型,亦即能利用它来分析电路的情况。

最简单的电路及其电路图由一个具有电动势 E 和内阻 r_e 的电源和具有电阻 r 的受电器所组成(圖 1-6)。在电路的外部(对电源来说),



亦即在电阻 r 中,电流的方向从高电位 $\varphi_a = \varphi_1$ 的 a 点流向低电位 $\varphi_b = \varphi_2$ 的 b 点。

在电路图中,电流的方向用空的箭头(→)表示,

或者在字母 I 的旁边标以双下标——第一个字母对应于高电位的点,而第二个字母则对应于低电位的点。这样,对于圖 1-6 中的电路图就有 $I = I_{ab}$ 。

我们来证明,具有已知电动势 E 和内阻 r_e 的电源可以用两种基本的等值电路图来代替(圖 1-7 和 1-8)。

电源的端电压低于电动势 E , 所低的数值

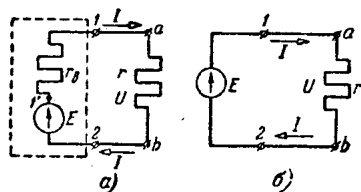


圖 1-7.

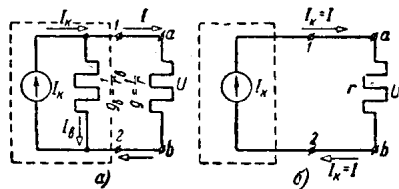


圖 1-8.

等于电源的内电压降落:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = E - U_e = E - r_e I. \quad (1-5)$$

另一方面,由等式 $\varphi_1 = \varphi_a$ 和 $\varphi_2 = \varphi_b$, 知电阻 r 上的电压为:

$$U = \varphi_a - \varphi_b = r I. \quad (1-6)$$

从式 (1-5) 和 (1-6) 可以推出, $E - r_e I = r I$, 或

$$E = r_e I + r I \quad (1-7)$$

和

$$I = \frac{E}{r_e + r}.$$

由此可见,电源的内阻 r_e 和受电器的电阻 r 都在限制电流的大小。

在等值电路图中,可以用与受电器电阻相串联的电阻 r_e 来代表内阻。根据这些电阻上各电压间的关系,容易得到圖 1-7 所示的代表电源的两种不同等值电路图。

在圖 1-7, a 的等值电路图中,电压 U 与负荷电流有关,其值决定于电动势 E 与电压降落 U_e 之差。如 $r_e \ll r$, 亦即电源所处的状态接近于所谓空载状态,则实际上可以略去它的内电压降落,而令 $U_e = r_e I \approx 0$, 于是得到圖 1-7, b 中的等值电路图。这种没有内电阻 ($r_e = 0$) 的电源称为电动势源(电压源或具有给定电压的电源),并用内中带有箭头的圆圈和字母 E 表示之。这种电源的端电压与受电器的电阻无关,等于电动势 E 。其外特性曲线为一平行于横坐标轴的直线(圖 1-3 中的虚直线 ab)。

电源也可以用圖 1-8 中另外两个互不相同的等值电路图来表示。为了论证这一原理,我

們在方程式(1-7)的右边和左边各除以 r_e 。結果可得:

$$\frac{E}{r_e} = I + \frac{U}{r_e} = I + Ug_e$$

或 $I_k = I + I_e$, (1-8)

其中 $I_k = \frac{E}{r_e}$ 为电源短接时的电流;

$I_e = \frac{U}{r_e} = Ug_e$ 为某一假想电流, 等于电源端电压与内阻之比;

$$I = \frac{U}{r} = Ug \text{ 为負荷电流。}$$

圖 1-8, a 所示的等值电路圖就滿足上述的方程式(1-8), 此时, 内电阻 r_e 与負载电阻 r 相并联。

如 $g_e \ll g$ 或 $r_e \gg r$, 亦即电源所处的状态接近于所謂短路状态, 則可取电流

$$I_e = Ug_e \approx 0$$

結果得到圖 1-8, b 的等值电路圖。

这种具有内导 $g_e = 0$ ($r_e = \infty$) 的电源称为电流源具有給定的电流, 并以帶有箭头的圓圈和字母 I_k 表示之。电流源的电流 I_k 与負载电阻 r 无关, 它等于 $\frac{E}{r_e}$ 。

电流源的外特性曲綫为平行于縱坐标軸的直綫(圖 1-8 中的虛直綫 cd)。

因此, 在許多情形下, 实际的电源可以视为电动势源亦可视为电流源, 这要依电源内阻 r_e 与受电器电阻 r 的对比来决定。

但当电源内阻 r_e 与受电器电阻 r 的数值为同級时, 則电源可以视为电动势源, 亦可视为电流源。为此, 必須將电阻 r_e (圖 1-7, a) 或电导 $g_e = \frac{1}{r_e}$ (圖 1-8, a) 从电源内取出, 并分别与电阻 r 或电导 $g = \frac{1}{r}$ 相联合。

电动势源和电流源称为等值电路圖的有源元件而电阻和电导則称为無源元件。

当拟定这种或那种实际电路的等值电路圖时, 要尽可能考虑到电路的每一部分和整个电路的已知的电的性質。

例如, 我們来研究双导体輸电綫的等值电路圖的拟定, 这种綫在圖 1-9, a 中用圖形表示

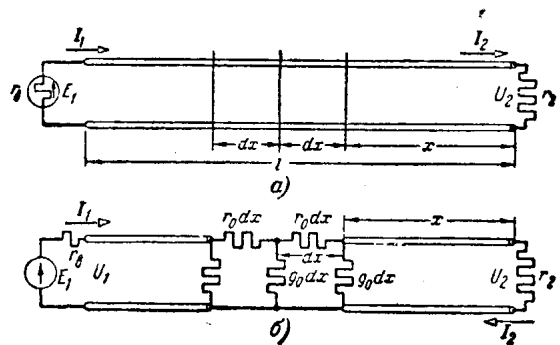


圖 1-9.

出来。在綫的始端接以具有电动势 E_1 和内阻 r_e 的电源, 而在綫的終端接以受电器, 其电阻等于 r_2 。

显然, 受电器的电压低于綫的始端的电压, 所低的数值等于导綫电阻上的电压降落。綫的終端的电流小于电源的电流, 所小的数值等于兩导綫之間的漏电流(由于絕緣不绝对完善)。

設每条导綫的單位長度具有电阻 $\frac{r_0}{2}$, 而在綫的同一單位長度内綫間的电导等于 g_0 。

將全綫分为長度为 dx 的許多元段(圖 1-9, a)。这种綫的每一元段具有来綫和回綫的合成电阻

$$r_0 dx = \frac{r_0}{2} dx + \frac{r_0}{2} dx$$

并具有电导 $g_0 dx$ 。

結果, 全綫可用由許多元段相联而成的电路圖来代替, 每一元段具有电阻 $r_0 dx$ 和电导 $g_0 dx$ (圖 1-9, b)。在这个等值电路圖中, 我們用电动势源 E_1 和电阻 r_e 来代表电源。

利用以上所得到的电路圖(圖 1-9, b), 根据給定的始端(或終端)电压和电流, 就能求出

綫上任意一点的电压和电流(第3-9节)。

如綫的漏电流远小于受电器的电流,则可以略去漏电流而从等值电路圖(圖1-9, 6)中取消所有的电导 $g_0 dx$ 。結果,我們得到一个在所有元段中均合同一电流的簡單的無分支电路圖。这种电路圖表示在圖1-10中,其中綫的电阻 $r_a = r_0 l$ 和电阻 r_e

及 r_2 相串联。利用圖1-10中的电路圖,可以决定不考虑漏电流时綫的始端和終端的

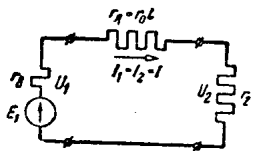


圖 1-10.

电压与功率間的关系(第3-8节)。

必須学会根据电路的电的性质和由給出的問題所决定的条件来正确地选择等值电路圖,并学会利用它們来研究实际电路的情况。

1-3. 欧姆定律应用在电路圖中具有电动势源的部分

大家知道,为了單值地决定电路中各点的电位,必須任意选定一任意点的电位。例如在圖1-7, a 所示的电路圖中,譬如說,假定 $\varphi_2 =$ 常数 $= a$, 則

$$\varphi_1 = \varphi_2 + E = a + E. \quad (1-9)$$

在最簡單电路的外部,电流由电位高的点流向电位低的点,而在一般情形下,則在电路的任何的無源元件中,电流也是由电位高的点流向电位低的点。因此,点1的电位 φ_1 高于点2的电位:

$$\varphi_1 = \varphi_2 + rI.$$

同样

$$\varphi_{1'} = \varphi_1 + r_e I. \quad (1-10)$$

从等式(1-9)和(1-10),我們有:

$$\varphi_2 + E = \varphi_1 + r_e I,$$

由此得到电流:

$$I = \frac{\varphi_2 - \varphi_1 + E}{r_e}. \quad (1-11)$$

对于复杂电路中的無分支部分,其中具有任意个电动势源和电阻并已給出这一部份的端电位差,則可以用类似方法写出其中电流的方程式(圖1-11)。电路圖中含电动势源部分的电流

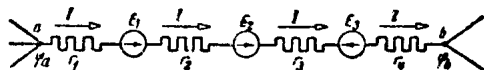


圖 1-11.

I , 可能由点 a 流向点 b , 也可能是相反的。如事先不知道电流的方向,則在列出类似(1-11)的表达式时,应该任意地选定电流的方向。

在电路圖这一部分中,此种任意选定的方向称为正方向,像实际的方向一样也用空箭头表示或在字母 I 的旁边标以下标。

茲取此部分电流 I 的正方向为从点 a 到点 b (圖1-11)。我們借助下式,用电位 φ_a 来决定电位 φ_b :

$$\begin{aligned} \varphi_b &= \varphi_a - r_1 I + E_1 - r_2 I + E_2 - \\ &\quad - r_3 I - E_3 - r_4 I. \end{aligned}$$

由此等式,我們有:

$$\begin{aligned} I = I_{ab} &= \frac{\varphi_a - \varphi_b + E_1 + E_2 - E_3}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4} = \\ &= \frac{U_{ab} + \sum E}{r_{ab}} = (U_{ab} + \sum E) g_{ab}, \quad (1-12) \end{aligned}$$

其中 $r_{ab} = r_1 + r_2 + r_3 + r_4$ 为电路圖中該部分的总电阻; $\varphi_a - \varphi_b = U_{ab}$ 为所研究部分順着选定的电流方向的端电位差; $\sum E = E_1 + E_2 - E_3$ 为作用于同一部分的电动势的代数和,而且对于其方向和电流正方向相同的电动势取正号,不同的則取負号。

公式(1-12)是用于电路圖有源部分的欧姆定律。

如根据公式(1-12),在計算結果中电流得負值,則表示电流的实际方向与所选定的正方向不一致(与任选的正方向相反)。

对于电路中任何兩点間的电压,也同样可以任意选定其正方向。电压的正方向用字母 U

傍边的下标表示,或在电路图中用箭头表示。

对于电压 $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$ 来说,箭头将从点 a 画向点 b ,假如我们已任取点 a 的电位高于点 b 。

对于电压源的电动势和电流源的电流,如不知其实质的方向,也可以任意选定其正方向,并标以双下标或箭头。

在电路图中具有无源元件的部分,电压的正方向和电流的正方向应选为一致。在这种情形下,电压的箭头就可以不画出来。在计算时,电压和电流均应视为代数量。

1-4. 沿无分支电路 电位的分布情形

借助图解法可以很明显地表示出电位沿无分支电路的分布情形。图 1-12 表示一个具有两个电动势源 E_1 和 E_2 , 两个内阻 r_{e1} 和 r_{e2} 以及两个电阻 r_1 和 r_2 的最简单的无分支电路图。

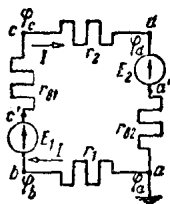


图 1-12.

设电动势 E_1 大于 E_2 。在这种情况下,实际的电流 I 等于:

$$I = \frac{E_1 - E_2}{r_1 + r_{e1} + r_2 + r_{e2}} \quad (1-13)$$

而方向则与电动势 E_1 相一致。为了单值地决定所讨论电路中各点的电位,假定点 a 的电位 φ_a 等于零。在下面我们来求出其余各点的电位。

点 b 的电位低于点 a 的电位

$$\varphi_b = \varphi_a - r_1 I = -r_1 I。$$

当通过第一个电源时,电位升高一个值 E_1 ,而由于内电压降落,电位又降低,这样,点 c 的电位就等于

$$\varphi_c = \varphi_b + E_1 - r_{e1} I = -r_1 I + E_1 - r_{e1} I。$$

为了决定点 d 的电位 φ_d ,必须从电位 φ_c 减去 $r_2 I$,即

$$\varphi_d = \varphi_c - r_2 I = -r_1 I + E_1 - r_{e1} I - r_2 I。$$

最后,当通过第二个电源时,由于电动势 E_2 (根据电动势的定义 $\varphi_d > \varphi_{a'}$),也由于内电压降落,电位的值降低了,而且点 a 的电位应该等于零:

$$\begin{aligned} \varphi_a &= \varphi_d - E_2 - r_{e2} I = -r_1 I + E_1 - \\ &\quad - r_{e1} I - r_2 I - E_2 - r_{e2} I = 0。 \end{aligned}$$

必须指出,从上述表达式不难求出公式(1-13)。

如沿横坐标轴表示各段电阻,沿纵坐标轴表示各点电位(图 1-13),则容易得出沿无分支

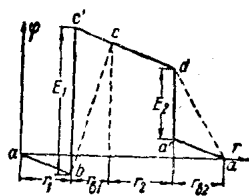


图 1-13.

电路的电位分布图。利用这个图形可以决定电路中任何两点间的电压。特别是,从电位图可以推出,第一个电源的端电压 $U_{cb} = \varphi_c - \varphi_b = E_1 - r_{e1} I$,其值比电动势 E_1 低一个内电压降落,而第二个电源的端电压则相反,其值比电动势 E_2 大一个内电压降落,即

$$U_{da} = \varphi_d - \varphi_a = E_2 + r_{e2} I。$$

电路中任何无源部分的电压与电阻的比值等于该部分的电流,而在电位图中则决定于相应直线对横坐标轴倾斜角的正切。因此,决定沿无分支电路所有无源部分(具有同一个电流)电位变化的各段直线(例如,图 1-13 的 ab 和 cd)的斜度都是一样的。

电源内部的电位分布图,可以有不同的形式。在最简单的情形下,可以假设 r_e 和 E 在电源内部的分布是均匀的,这时电源内部的电位分布图为一一直线的形式,表示电位的连续上升(在具有电动势 E_1 的电源中为虚线 bc)或连续下降(在有电动势 E_2 的电源内为虚线 da)。

1-5. 最简单无分支 电路的功率平衡

我们来研究由一个具有电动势 E_1 和内阻

r_{e1} 的直流电机和一个具有电动势 E_2 及内阻 r_{e2} 的蓄电池所组成的电路的能量关系(圖 1-14)。电机和蓄电池的电动势的方向彼此相反。

設电机的电动势 E_1 大于蓄电池的电动势 E_2 。在这个条件下, 电流 I 的实际方向与电动势 E_1 的方向相同。这

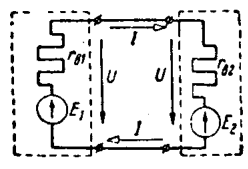


圖 1-14.

两个电源的端电压 U 比电机的电动势 E_1 低了一个电机的内电压降落 $r_{e1} I$, 而比蓄电池的电动势 E_2 则高了一个数值 $r_{e2} I$, 这正与上节所指出的相同:

$$U = E_1 - r_{e1} I \quad (1-14)$$

或
$$U = E_2 + r_{e2} I. \quad (1-15)$$

在方程式 (1-14) 的两边各乘以 I 并进行移项, 得到:

$$E_1 I = r_{e1} I^2 + UI. \quad (1-16)$$

这个方程式的左边是电机所发出的功率; 同一方程式右边的第一项决定在电机绕组中热损失的功率, 而右边第二项则为电机的输出功率, 因而也是蓄电池所消耗的功率。在方程式 (1-15) 的右边和左边各乘以电流 I , 我们有:

$$UI = r_{e2} I^2 + E_2 I. \quad (1-17)$$

从这个方程式可以直接得到結論, 蓄电池所用去的功率 UI 消耗在热损失 $r_{e2} I^2$ 和蓄电池充电 $E_2 I$ 上面。

所得到的功率平衡关系式不仅能用于蓄电池充电的电路, 而且可以用于任何其他电路。所不同者仅为, 对于另一种电路, 能量不消耗在充电上面而消耗在另一种过程上面, 例如消耗在作机械功方面, 像在电动机中所发生的那样。

如将电源表示成另一种等值电路圖(圖 1-15), 則电流源所发出的功率并不等于电动势源所发出的功率。

实际上, 电流源所发出的功率决定于电流

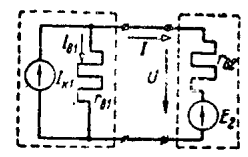


圖 1-15.

I_{k1} 与电流源的端电压 U 的乘积, 即 $I_{k1} U$ 。因为 $I_{k1} = I_{e1} + I$ 和 $I_{e1} = \frac{U}{r_{e1}}$, 所以代换了 I_{k1}

并作簡單变换之后, 我們有:

$$I_{k1} U = (I_{e1} + I) U = \frac{U^2}{r_{e1}} + UI. \quad (1-18)$$

比較表达式 (1-18) 和 (1-16) 就可直接得出, 当两种电源的端电压和电流都相同时, 圖 1-14 电路圖中的热损失 $r_{e1} I^2$ 在一般情形下不等于圖 1-15 电路圖中的热损失 $\frac{U^2}{r_{e1}}$, 因而电动势源所发出的功率 $E_1 I$ 不等于电流源所发出的功率 $I_{k1} U$ 。当采用电动势源或电流源来代替电源时, 应注意到这种情形。

例 1-1. 在两个串联电源 (电动势 $E_1=12$ 伏和 $E_2=48$ 伏, 内阻 $r_{e1}=0.4$ 欧和 $r_{e2}=0.6$ 欧) 的两端接一个具有可变电阻 r 的受电器 (圖 1-16)。試求当电阻

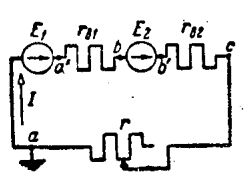


圖 1-16.

r 中的功率具有最大值时, 电阻 r 的数值。在电阻的这个数值下, 求出电源和受电器中的功率的值。

解 我們利用功率的表达式 $P = rI^2$ 来决

定, 当电阻 r 中的功率具有最大值时电阻 r 的数值。

因为电流

$$I = \frac{E_1 + E_2}{r_{e1} + r_{e2} + r},$$

所以

$$P = r \frac{(E_1 + E_2)^2}{(r_{e1} + r_{e2} + r)^2}.$$

对 r 求 P 的导数, 并令其等于零, 結果得到:

$$r = r_{e1} + r_{e2} = 1 \text{ 欧}.$$

根据下述公式求其余的量:

$$\text{电流 } I = \frac{E_1 + E_2}{2r} = \frac{12 + 48}{2} = 30 \text{ 安};$$

第一个和第二个电动势源的功率:

$$P_{u1} = E_1 I = 12 \times 30 = 360 \text{ 瓦};$$

$$P_{u2} = E_2 I = 48 \times 30 = 1440 \text{ 瓦};$$

受电器的功率