

中等专业学校交流讲义

电工学与电力拖动

成都水力发电学校编

中国工业出版社

前 言

是按本校水利施工机械专业电工学与电力拖动课程的教学大纲编写的，该课程数约为 180 学时。

编写过程中，对于电工基础部分，曾力求做到简单明确，避免与物理学课程重复，叙述复杂电路的几种计算方法的目的之一，是想借以阐明电路的某些性质，分析以后遇到的电路中的各种现象和过程。

为了给电力拖动部分作准备，在电机学中编入了涉及某些特殊电机的内容。

工业电子学部分中，一方面竭力避免与物理学课程重复；另一方面也想照顾其完并作为“离子拖动”部分提供基础。

电力拖动部分的取材偏广，内容并非完全必要，在教学过程中可以适当取舍。

本书第一章至第五章是杜光齐编写的，第六章是刘祖学编写的，第七章是陈德强编，第八章中的异步电机部分是朱昌孝编写的，第八章中的同步电机部分、第十七章至十八章是钱鼎荣编写的，第九章至第十一章和第二十一章是邓泽远编写的，第十二章至十六章和第十九章是张杏林编写的，第二十章是栗玉若编写的，全书由张杏林校

由于编写时间短促，及受理论水平和业务能力的限制，加上本校的大纲未经多方面意见，故在编排体系及具体内容上难免有不恰当和错误之处。希望读者提出意见，指正。对本书的意见及建议请寄至成都水力发电学校电工教研组。

成都水力发电学校

1961年12月

目 录

前言

緒論	1
----	---

第一篇 电工基础与电气测量

第一章 直流电路

1-1 电路的概念	3
1-2 电路的形式	4
1-3 基尔霍夫定律、支路电流法	5
1-4 回路电流法	8
1-5 节点电压法	9
1-6 重迭原理	10
1-7 电容器和电容	11
1-8 电容器的充电和放电, 电场 能量	12
习题	14

第二章 电磁

2-1 电流的磁场	16
2-2 磁感应和磁通	16
2-3 线圈的磁场	18
2-4 铁磁体的磁化和反复磁化	19
2-5 磁路的欧姆定律和全电流定律	21
2-6 磁路计算	22
2-7 电磁铁	23
2-8 电磁感应, 楞次定律	23
2-9 涡流	25
2-10 自感应	26
2-11 线圈的接通与短接	28
2-12 磁场能量	29
习题	30

第三章 单相交流电路

(一)交流的基本概念

3-1 概述	31
3-2 正弦波形电动势的产生	32
3-3 相位与相位差	35
3-4 正弦量的图示法	36
3-5 同频率正弦量的加法和减法	37
3-6 交流电的有效值	38

(二)交流电路

3-7 纯电阻电路	40
3-8 纯电感电路	41
3-9 具有电阻与电感的交流电路	43
3-10 纯电容电路	45
3-11 电阻、电感与电容的串联电 路, 电压谐振	47
3-12 电阻、电感与电容的并联电 路, 电流谐振	49
3-13 提高功率因数的意义和方法	51
3-14 集肤效应	52
习题	53

第四章 三相交流电路

4-1 概述	54
4-2 三相交流发电机	55
4-3 发电机绕组的星形(Y)接法	56
4-4 发电机绕组的三角形(Δ)接 法	57
4-5 负载的连接方法	58
4-6 负载的星形连接和中线的作 用	59
4-7 负载的三角形连接	61
4-8 三相电功率	63
习题	64

第五章 电气测量

5-1 概述	65
5-2 电工仪表的分类	65
5-3 磁电式仪表	67
5-4 电磁式仪表	68
5-5 电动式仪表	63
5-6 感应式仪表	69
5-7 电流和电压的测量	70
5-8 功率的测量	72
5-9 电能的测量	74
5-10 电阻的测量	75
5-11 绝缘电阻的测量	76
5-12 非电量电测法的概念	77
习题	78

第二篇 电机学

第六章 直流电机79

- 6-1 直流电机的用途和构造79
- 6-2 电枢绕组80
- 6-3 直流电机电枢的电动势82
- 6-4 直流电机的电磁转矩82
- 6-5 电枢反应84
- 6-6 直流电机的换向及改善换向的方法85
- 6-7 直流电机按励磁方法的分类88
- 6-8 他励发电机89
- 6-9 并励发电机92
- 6-10 串励发电机93
- 6-11 复励发电机94
- 6-12 直流电动机概述95
- 6-13 并励电动机97
- 6-14 串励电动机98
- 6-15 复励电动机99
- 6-16 直流电动机的起动100
- 6-17 直流电动机的反转102
- 6-18 直流电动机的调速102
- 6-19 直流电机的损耗、效率和额定值104
- 6-20 电机放大机105
- 6-21 我国直流电机制造情况106
- 习题108

第七章 变压器108

- 7-1 概述108
- 7-2 单相变压器的构造108
- 7-3 空载时的变压器110
- 7-4 有负载时的变压器111
- 7-5 三相电压的变换112
- 7-6 变压器的外特性和电压调节113
- 7-7 变压器的损耗和效率113
- 7-8 变压器的并联运行114
- 7-9 自耦变压器115
- 7-10 仪用变压器116
- 7-11 多绕组变压器118
- 习题118

第八章 交流电机119

(一) 异步电动机

- 8-1 概述119

8-2 异步电动机的构造119

8-3 旋转磁场的产生121

8-4 异步电动机的旋转原理124

8-5 转子的转差率124

8-6 异步电动机在转子不动时的物理量125

8-7 异步电动机转动时的各物理量125

8-8 异步电动机的工作过程126

8-9 异步电动机的转矩127

8-10 异步电动机的起动129

8-11 双鼠笼式和深槽式电动机132

8-12 异步电动机的转速调节与反转133

8-13 单相异步电动机134

8-14 异步电动机的损失和效率136

8-15 三相异步电动机始端和终端的判断137

(二) 同步电机

8-16 概述139

8-17 同步发电机的构造139

8-18 同步发电机的作用原理140

8-19 同步电动机的旋转原理和恒速特性141

8-20 同步电动机的功率因数143

8-21 同步电动机的起动144

8-22 电机的故障与维护146

习题147

第三篇 工业电子学

第九章 整流设备148

9-1 电子发射148

9-2 二极管的整流电路和滤波电路149

9-3 充气二极管150

9-4 闸流管及可控整流电路151

9-5 汞弧整流器153

9-6 引燃管155

9-7 半导体整流器156

9-8 稳压管157

第十章 放大器158

10-1 三极管158

10-2 电子管放大器160

10-3	直接耦合放大器	161
10-4	阻容耦合放大器	161
10-5	变压器耦合放大器	162
10-6	推挽放大器	162
10-7	放大器的反馈	163
第十一章	电子与离子设备	164
11-1	电子管稳压器	164
11-2	电子延时继电器	164
11-3	光电管及光电继电器	165

第四篇 电力拖动

第十二章	电动机的机械特性	168
12-1	生产机械和电动机的机械特性	168
12-2	并激直流电动机的机械特性	170
12-3	并激直流电动机在制动状态下的机械特性曲线	172
12-4	串激直流电动机的机械特性	176
12-5	串激直流电动机在制动状态下的机械特性曲线	177
12-6	复激直流电动机的机械特性	177
12-7	异步电动机的机械特性	178
12-8	异步电动机在制动状态下的机械特性曲线	180
12-9	同步电动机的机械特性曲线及角特性曲线	182
第十三章	电力拖动的转速调节	184
13-1	电力拖动转速调节的基本指标	184
13-2	并激直流电动机的转速调节	187
13-3	在发电机-电动机系统中, 直流电动机的转速调节	189
13-4	顺接-逆接系统	191
13-5	分流电枢时并激直流电动机的转速调节	192
13-6	串激直流电动机的转速调节	192
13-7	用分流电枢或分流激磁绕组来调节串激直流电动机的转速	193
13-8	由串激发电机供电的串激电动机的转速调节	194
13-9	具有离子变流器的直流拖动	195
13-10	交流电动机的转速调节	196

13-11	在转子电路中加入电阻来调节异步电动机的转速	197
13-12	用改变磁极对数来调节异步电动机的转速	197
13-13	用改变频率来调节异步电动机的转速	199
13-14	电力拖动转速调节的脉冲法	200

第十四章 特殊电力拖动的机械

特性和调节性能

14-1	概述	202
14-2	两个在电动状态下工作的电动机作硬轴联系的电力拖动	202
14-3	一个在电动状态下工作的电动机和另一个在制动状态下工作的电动机作硬轴联接	203
14-4	在具有回转变子的线路中异步电动机的转速调节	203
14-5	用异步滑动联接机调节转速	204
14-6	在串级线路中异步电动机的转速调节	205
14-7	电力拖动的同步转动	205

第十五章 电力拖动中的过渡状态

15-1	概述	206
15-2	电力拖动中转矩的性质和符号	207
15-3	转矩和飞轮惯量的换算	209
15-4	拖动的加速时间及减速时间的决定	211
15-5	并激电动机的起动	212
15-6	并激电动机的能耗制动	214
15-7	并激电动机的反接制动和反转	215
15-8	具有串激电动机的拖动装置中的过渡状态	216
15-9	在发电机-电动机系统中电力拖动的过渡状态	217
15-10	具有三相异步电动机的电力拖动的过渡状态	217
15-11	减少电力拖动在过渡状态	

下能量损失的方法.....	218	組控制.....	258
第十六章 电动机的选择	219	18-7 磁放大器及其在电动机控制 中的应用.....	260
16-1 按电流种类选择电动机.....	219	18-8 电子——閘流管在电动机控 制中的应用.....	262
16-2 按电源电压选择电动机.....	219	18-9 同步傳遞与随从拖动的概念.....	264
16-3 按构造特点选择电动机.....	219	第十九章 施工机械的电力装备	266
16-4 选择电动机容量的一般原則.....	221	19-1 概述.....	266
16-5 在持續不变負荷下电动机容 量的选择.....	221	19-2 起重机械的电力装备.....	267
16-6 在可变負荷下电动机容量的 选择.....	222	19-3 运输机械的电力装备.....	278
16-7 在短时工作方式下电动机容 量的选择.....	224	19-4 电鋸.....	280
16-8 在断續工作方式下电动机容 量的选择.....	225	19-5 水力机械化的电气設备.....	286
16-9 繪制負荷图的一些問題.....	227	19-6 电动工具.....	288
习题.....	228	第五篇 工地的电力供应	
第十七章 电力拖动的控制設備	231	第二十章 工地的电力供应	289
17-1 概述.....	231	20-1 有关供电的常識.....	289
17-2 非自动电器.....	232	20-2 工地自用发电厂和变电所的 典型接綫.....	292
17-3 接触器和磁力起动器.....	237	20-3 变电所的结构.....	300
17-4 继电器.....	240	20-4 供电綫路导綫截面积及熔断 器的选择.....	305
17-5 制动电磁鉄.....	245	习题.....	320
17-6 高压控制用电器.....	245	第二十一章 电气安全	321
第十八章 电力拖动控制	247	21-1 电流对人体的作用.....	321
18-1 概述.....	247	21-2 触电方式.....	321
18-2 自动控制綫路的图示.....	248	21-3 保护接地与保护接中綫.....	322
18-3 鼠籠电动机控制.....	251	21-4 触电急救常識.....	323
18-4 綫繞式电动机控制.....	253	21-5 防止触电的安全常識.....	323
18-5 直流电动机控制.....	255	21-6 电动机的主要安全操作規程.....	324
18-6 发电机(或放大机)-电动机			

緒 論

在現代，電能已經廣泛地应用到一切技術部門中及日常生活的各方面了。

在工業、農業及交通運輸業中所使用的各種機械很多都是用電動機來拖動的。另一方面，金屬的冶煉、焊接、熱處理以及各種材料的加熱等，也普遍地使用着電能。大家熟悉的電燈、電話、收音機及電視機等更無一不使用着電能。就是在醫療方面，也廣泛地应用着電器診斷和電治療方法。而在尖端科學技術方面，則是必須使用電能的。

在施工工地上，起重機、運輸機、挖土機及混凝土攪拌機各種施工機械都廣泛地采用電力拖動，在其他工作中也常用到各種電動工具。對於夜間施工，電氣照明是必不可少的。另外，電熱在施工中的应用也愈來愈廣泛了。

* * *

遠在公元前 300 年左右(戰國末年)，我國就發現了磁的現象，並做成了指示南北方向的“司南”。呂氏春秋中有“慈石召鐵”，王充論衡中有“頓牟掇芥”的記載。這都說明在我國很早就發現了磁和電的現象。不僅如此，在我國有的古代建築上早已實際应用了避雷裝置。

在十八世紀中葉，俄國科學家 M.O. 羅蒙諾索夫研究了大氣中的雷電現象。1819 年，奧斯特發現了電流對磁針的作用力。1831 年，法拉第發現了電磁感應現象，接着，俄國科學院院士楞次更進一步得出了確定感應電動勢方向的定律，並且闡明了電機可逆性原理。1834 年，俄國科學家 B.C. 亞可比發明了直流電動機。1889 年，卓越的俄國科學家和工程師 M.O. 多里沃-多布羅沃利斯基發明了三相制，他還發明了三相變壓器和三相異步電動機等。1895 年，俄國科學家 A.C. 波波夫發明了無線電。

在 M.O. 多里沃-多布羅沃利斯基發明三相制，解決了遠距離輸電的問題以後，電力拖動有了顯著的發展。二十世紀初，出現了軋鋼機、起重機及造紙機等的電力拖動。以後，電力拖動不斷地發展，到現在它已經發展成為自動化的電力拖動了。

* * *

解放前，我國在電力工業和電工技術方面是十分落後的。

解放後，在黨的英明領導下，我國的電氣事業有了飛躍的發展。年發電量從 1949 年的 43 億度增加到 1959 年的 415 億度。現在我國已能製造大型的汽輪發電機組、水輪發電機組、各種電機、電力變壓器及其它電氣設備，同時也建立了新型的儀表廠、電子管廠和無線電器材廠。隨着科學技術的日益發展，我國已能製造多種自動化機床，並且建立了許多用自動化程度較高的設備裝備起來的工廠和企業。另外，技術力量也有了很大發展。

* * *

學習本課程的目的，是使學生具有電工學的基本知識，掌握一定的實際操作技能，並具有電力拖動的基本知識，以改善生產工作的條件，提高勞動生產率和改善產品質量。

電工學是把電磁現象和理論应用到工程技術的科學，而在電力拖動中則要研究利用

电动机来带动生产机械时的各种問題。

本书中，电工基础部分和物理課程有紧密的联系，其中介紹了直流电路、交流电路和磁路的基本原理和計算方法，它是学习其余部分的基础。

在电气测量部分中，介紹了各种常用电工仪表的构造、原理和使用方法，并簡要的介紹了非电量的电测法。

电机学部分中，介紹了各种电机的构造、原理及一些計算方法，它是学习电力拖动的基礎。

工业电子学部分中，叙述了电子管、离子管、半导体及电子离子仪器的基本原理及其在工业上的应用，同时也給以后叙述“离子拖动”准备了条件。

电力拖动部分由电力拖动基础、电力拖动控制和施工机械的电力装备三部分組成。其中分析了各种电动机和电力拖动系統的机械性能及其中发生的各种物理过程；叙述了如何根据生产的要求，合理而經濟地选择电动机；以及如何控制和运用电动机。

在工地电力供应部分中，介紹了有关电力网和变电站的基本知識及导綫和熔断器的选择方法。

在本书最后，还简单地介紹了安全用电常識和安全操作注意事項。

学习本課程时，应当把理論与实际紧密結合起来，要深入地理解各种現象和过程的物理概念和本質，牢固地掌握基本运算方法并应重視基本的实际操作。另外，在学习过程中應該注意到本課程中各部分間的相互联系。

第一篇 电工基础与电气测量

第一章 直流电路

1-1 电路的概念

一般的电路是由电源、联接导线及负载三部分所组成的。

电源能把非电形态的能量(如机械能、化学能或热能等)转换成电能。例如发电机能把机械能转换成电能;而干电池能把化学能转换成电能。

联接导线的作用是把电能从电源输送到负载去。为了减小导线上的电压降落和能量损失,联接导线一般是用电阻很小的金属(铜、铝等)制成。

从电源输送来的电能在负载中将转换成其它形态的能量(机械能、化学能、热能等),以供生产和日常生活的需要。因此,负载又称为用电器。电动机、电灯及电热器等都是常见的负载。

用导线把负载与电源的两端连接起来,便构成一个简单电路(图 1-1)。电源构成内电路;负载和联接导线构成外电路。

电路内的自由电子在电源电动势的作用下将沿闭合电路不断地运动,而形成电流。一般规定,在外电路中电流流动的方向是从电源的正端(+)经过负载流向电源的负端(-),与电子移动的方向相反;与此相应,在内电路中电流是从电源的负端流向正端,与电源电动势的方向相同。

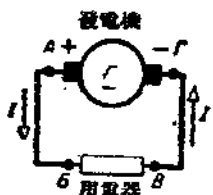


图 1-1 简单电路

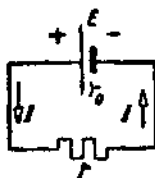


图 1-2 电路

电路中电流的大小一般可用欧姆定律来计算。例如在图 1-2 所示的电路中,电源的电动势为 E ,内电阻为 r_0 ,负载电阻为 r ,联接导线的电阻小到可以忽略不计,设电流为 I ,则:

$$I = \frac{E}{r + r_0} \quad (1-1)$$

上式表明了整个电路中电动势、电阻及电流间的相互关系,它是全电路的欧姆定律的表达式。它又可改写为:

$$\begin{aligned} E &= Ir + Ir_0 \\ &= U + Ir_0 \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中 Ir_0 称为电源内部的电压降落;

$U = I\tau$ 称为负载电压降(通电时的电源端电压)。

由此得:

$$I = \frac{U}{\tau}.$$

这一关系式表明了一段电路上电流、电压及电阻间的关系,它是一段电路的欧姆定律的表达式。

(1-2)式称为电路的电压平衡方程式。当 $I=0$ 时, $E=U+I\tau_0=U$, 即断路时电源的电动势等于它的端电压。从式中还可以看出, 电路中电流愈大时, 则端电压愈低。

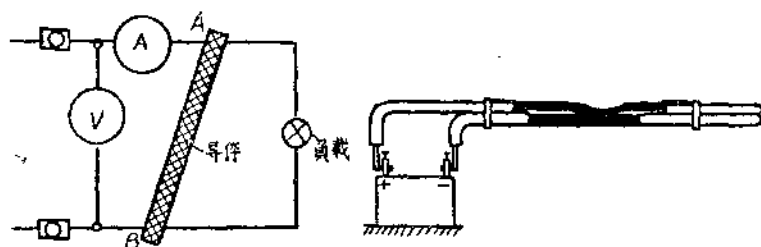


图 1-3 线路的短路

如果用一根电阻很小的导线接在电源的两端, 那末电流将很大, 这种情况称为短路。

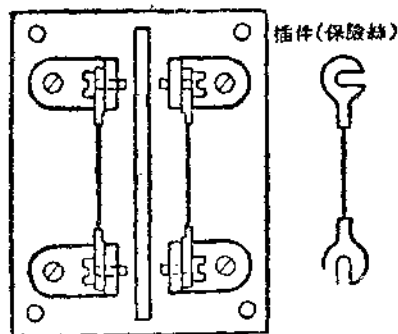


图 1-4 双路保护器

由于电流很大, 从楞次-焦耳定律的公式

$$Q = 0.24 I^2 \tau t$$

可以看出将可能产生大量热量, 使电源、导线和电气设备烧毁。为了防止这种危害, 在电路上必须装置一定容量的熔断保护器(保险丝)或其他保护装置, 使当电流过大能及时地切断电路。

图 1-5 保护器的符号

1-2 电路的形式

电路一般可分为简单电路和复杂电路两种。物理学中学过的负载串联及并联电路都是简单电路。简单电路都可以利用负载串并联算法及欧姆定律解出其电流和功率。

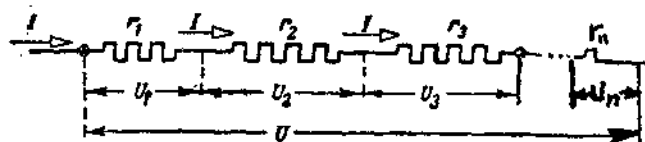


图 1-6 串联负载电路

图 1-6 为串联负载电路, 其特点是各负载通过同一电流。串联电路的总电阻等于各分电阻的和:

$$R = r_1 + r_2 + \dots + r_n, \quad (1-3)$$

式中 R 表示总电阻; $r_1, r_2, \dots, r_n$ 分别表示第一、第二、……第 n 个电阻。

图 1-7 为并联负载电路, 其特点是并联着的各负载上具有同一电压。并联电路的总电阻的倒数等于各分电阻的倒数之和:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n} \quad (1-4)$$

在电路中三根或三根以上的导线的连接点称为节点。如图 1-7 中的 A 及 B 二点就是节点。两个相邻节点间的电路称为支路(或分路)。电路中任何一个闭合路径称为回路。

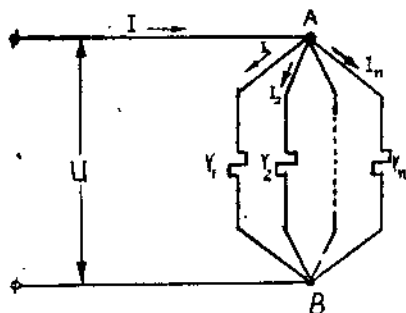


图 1-7 并联负载电路

若电路内的电源不止一个时, 一般只利用串并联法则及欧姆定律就不能求解, 这种电路称为复杂电路, 其计算方法将在下几节中叙述。

1-3 基尔霍夫定律、支路电流法

运用基尔霍夫定律的计算方法是计算电路的基本方法。任何复杂电路, 不论电源和支路数目的多少, 当知道了所有电源的电动势和各部分的电阻时, 都可利用它来计算出各支路中的电流。

(1) 基尔霍夫第一定律。它是表示与同一节点相连的各支路的电流之间的关系定律, 所以又称为电流定律。

在电路内任一节点上, 单位时间内流入该节点的电量必等于流出此节点的电量。这是由于我们认为在节点处不可能堆积电荷, 也不可能凭空产生电荷。也就是说, 流入某节点的电流之和等于流出该节点的电流之和, 这一关系称为基尔霍夫第一定律。

图 1-8 中流入节点的电流是 I_1, I_2 及 I_3 , 流出节点的电流是 I_4 及 I_5 。按基尔霍夫第一定律有:

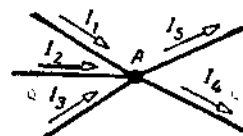


图 1-8 节点上的电流

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5,$$

$$\text{或} \quad I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0,$$

$$\text{即} \quad \sum I = 0.$$

(1-5)

上式为基尔霍夫第一定律的普遍表达式, 可用文字叙述如下:

在任何节点上电流的代数和为零。

在应用第一定律写方程式时, 一般将流入节点的电流规定为正(+), 则流出节点的电流必须规定为负(-)。反之, 将流入节点的电流规定为负, 流出节点的电流规定为正也是可以的。

例 1-1. 在电压是 110 伏的线路上, 接入功率为 1.1 瓦的一台电动机和一组电灯 (共计 3 盏, 每灯 40 瓦)。如图 1-9 所示, 求线路上的电流。

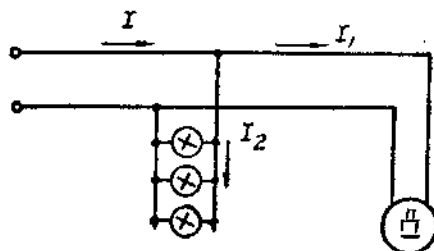


图 1-9 有支路的电路

解: 电动机取用的电流

$$I_1 = \frac{P_1}{U} = \frac{1100 \text{ 瓦}}{110 \text{ 伏}} = 10 \text{ 安};$$

电灯取用的电流

$$I_2 = \frac{P_2}{U} = \frac{40 \text{ 瓦} \times 3}{110 \text{ 伏}} = 1.1 \text{ 安};$$

故线路上的电流

$$I = I_1 + I_2 = 10 + 1.1 = 11.1 \text{ 安}。$$

(2) 基尔霍夫第二定律。它是表示一个闭合回路中电动势和各部分电阻上电压降之关系的定律，所以又称为电压定律。

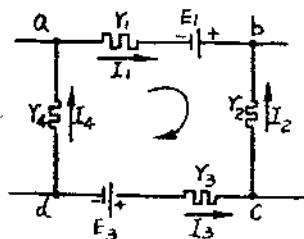


图 1-10 复杂电路中的一个回路

从电路中的任一点出发，按任意方向沿电路环行一周再回到原来这一点，所走过的闭合电路称为回路，环行的方向称为回路的方向。

图 1-10 所示是复杂电路中的一个闭合回路。环行方向如箭头所示，对闭合回路 $abcda$ 来说，其中的电位差具有下列关系：

$$\text{由 } a \text{ 到 } b: \quad \varphi_a - \varphi_b = -E_1 + I_1 r_1,$$

$$\text{由 } b \text{ 到 } c: \quad \varphi_b - \varphi_c = -I_2 r_2,$$

$$\text{由 } c \text{ 到 } d: \quad \varphi_c - \varphi_d = E_3 - I_3 r_3,$$

$$\text{由 } d \text{ 到 } a: \quad \varphi_d - \varphi_a = I_4 r_4.$$

对于整个回路，我们把上列各等式的左端和右端分别相加得：

$$0 = -E_1 + E_3 + I_1 r_1 - I_2 r_2 - I_3 r_3 + I_4 r_4,$$

则

$$E_1 - E_3 = I_1 r_1 - I_2 r_2 - I_3 r_3 + I_4 r_4,$$

即

$$\sum E = \sum (Ir). \quad (1-6)$$

上式为基尔霍夫第二定律的普遍表达式，可用文字叙述如下：

在任一闭合回路内，各电动势的代数和等于各部分电阻上电压降的代数和。

在应用第二定律写方程式时，首先为选定的回路任意规定一个方向，再任意选定各支路中电流的正方向，凡是电流的正方向与回路方向一致，则电流在电阻上的电压降为正；如果电流的正方向与回路方向相反，则电流在电阻上的电压降为负。凡是电动势的正方向与回路的方向一致时，则此电动势为正；如果电动势的正方向与回路的方向相反，则此电动势为负。研究(1-6)式的推导过程即可了解为什么作上述之规定。

在特殊情况下，如果回路内不包含电源，则仍可按上述定律写出方程式：

$$\sum (Ir) = 0. \quad (1-7)$$

利用基尔霍夫定律计算电路时，需要注意下列事项：

1) 画出完整的电路图，并任意假设出各支路中电流的正方向。

2) 电路中有几个未知量便需列出几个各自独立的方程式。

3) 充分利用第一定律写方程式，因为按第一定律写出的方程式简单。如电路中有 n 个节点，则按第一定律只能写出 $(n-1)$ 个独立的方程式，第 n 个方程式不要再写，因为它不是独立的并可从已写出的 $(n-1)$ 个方程式求得。

4) 不足的方程式可应用第二定律来写出，写时最好选择最简单的回路，写前须先任

意假設出回路的方向。所选用的每一个回路內都必須至少包含一个未被所选用的其他回路所利用过的支路；否則所写的方程式就不是各自独立的。

5) 解联立方程式，求出各未知量以后，再用一个未曾用过的回路写出方程式，将答案代入此方程式进行驗算。

上面所叙述的，对每一支路假定一电流，再用基尔霍夫第一、二定律列出方程式进行計算的方法称为支路电流法。

例1-2. 在图1-11所示的电路中，已知： $E_1 = 130$ 伏， $E_2 = 117$ 伏， $r_1 = 1$ 欧， $r_2 = 0.6$ 欧， $r_3 = 24$ 欧。

求电流 I_1 、 I_2 和 I_3 。

解：为了求出三个电流必須列出三个方程式。綫路中只有两个节点，所以用第一定律只能列出一个独立的方程式，其余的两个方程式要用第二定律列出，各支路中假定的电流的正方向如图所示。

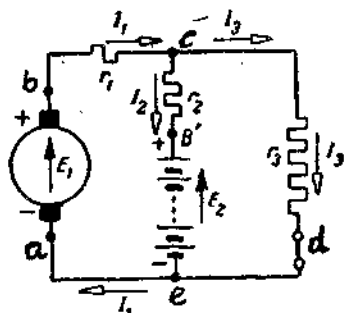


图1-11 含有两个电源的电路

$$\text{节点 } c: \quad I_1 - I_2 - I_3 = 0; \quad (1)$$

$$\text{回路 } abcea: \quad E_1 - E_2 = I_1 r_1 + I_2 r_2; \quad (2)$$

$$\text{回路 } abcdea: \quad E_1 = I_1 r_1 + I_3 r_3. \quad (3)$$

把已知值代入再經過整理得：

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0; \quad (4)$$

$$I_1 + 0.6 I_2 = 13; \quad (5)$$

$$I_1 + 24 I_3 = 130. \quad (6)$$

$$(5) - (4): \quad 1.6 I_2 + I_3 = 13; \quad (7)$$

$$(5) - (6): \quad 0.6 I_2 - 24 I_3 = -117. \quad (8)$$

$$24(7) + (8): \quad 39 I_2 = 195,$$

$$\therefore I_2 = \frac{195}{39} = 5 \text{ 安.}$$

$$\text{将 } I_2 \text{ 之值代入 (5):} \quad I_1 = 13 - 0.6 I_2$$

$$= 13 - 3$$

$$= 10 \text{ 安.}$$

将 I_1 及 I_2 之值代入 (1):

$$I_3 = I_1 - I_2$$

$$= 10 - 5$$

$$= 5 \text{ 安.}$$

所得电流之值为正，表示电流的方向与所假設的电流正方向相同。

驗算：利用回路 $cdec$ 列出方程式

$$E_2 = -I_2 r_2 + I_3 r_3,$$

$$117 = -5 \times 0.6 + 5 \times 24$$

$$= -3 + 120$$

$$= 117.$$

沒檢驗出答案有什么錯誤。

1-4 回路电流法

在计算电路时,有时并不设出支路电流,而是假定在每个各自独立的回路内都有一个环流沿着该回路流动着,称之为回路电流。并认为各支路中的电流是回路电流合成的;在电阻上,每个流过它的回路电流都产生一个相应的电压降。回路电流流过某一节点时其电流之值并不改变,显然可知,流入某节点各回路电流之和必等于流出该节点电流之和,即各回路电流自然地符合了基尔霍夫第一定律,从而由它们所合成的各支路中的电流也自然地符合第一定律。回路电流是待求的未知数,显然,它的数目恰好等于电压方程式的数目,这就省去了电流方程式,从而使计算过程可能简化。这种方法称为回路电流法,其解题步骤如下:

(1)画出电路图,并假设出回路电流的方向。为了方便起见,一般回路电流都假设为同一方向(都是顺时针或都是反时针方向)。

(2)利用基尔霍夫第二定律列出各回路的电压方程式。在电阻上,凡是回路电流的正方向与回路方向一致时它产生的电压降为正,否则为负;电动势的正方与回路方向一致时,电动势为正,否则为负。

(3)解方程式,求出各回路电流。

(4)根据各回路电流求出各支路中的电流。

(5)验算。

例1-3. 用回路电流法解例1-2中的电路(图1-12)。

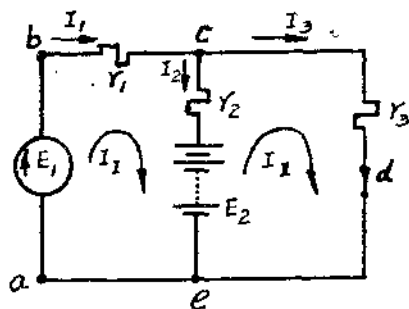


图1-12 回路电流法

解: 回路 $abcea$:

$$(r_1 + r_2)I_1 - r_2 I_2 = E_1 - E_2. \quad (1)$$

回路 $cdec$:

$$(r_2 + r_3)I_2 - r_2 I_1 = E_2. \quad (2)$$

代入已知值,并整理之:

$$1.6I_1 - 0.6I_2 = 13, \quad (3)$$

$$-0.6I_1 + 24.6I_2 = 117. \quad (4)$$

$$0.6 \times (3) + 1.6 \times (4):$$

$$39I_2 = 195,$$

$$\therefore I_2 = 5 \text{ 安.}$$

将 I_2 之值代入(3)得:

$$I_1 = \frac{13 + 0.6I_2}{1.6} = \frac{16}{1.6} = 10 \text{ 安.}$$

故各支路中的电流为:

$$I_1 = I_1 = 10 \text{ 安;}$$

$$I_2 = I_1 - I_2 = 10 - 5 = 5 \text{ 安;}$$

$$I_3 = I_2 = 5 \text{ 安.}$$

验算: 列出回路 $abcdea$ 的方程式

$$\begin{aligned}
 E_1 &= r_1 I_1 + r_3 I_1 \\
 &= 1 \times 10 + 24 \times 5 \\
 &= 130.
 \end{aligned}$$

沒檢驗出答案有什么錯誤。

1-5 节点电压法

对于并联支路較多而节点只有两个的复杂电路，若利用回路电流法来计算仍然很麻煩。但如果我們能求出这两个节点間的电压，那么各支路中的电流便容易求出，这种方法称为节点电压法。

由图1-13据一段电路的欧姆定律知：

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{r_1} = (E_1 - U_{ab})g_1,$$

$$I_2 = \frac{-E_2 - U_{ab}}{r_2} = (-E_2 - U_{ab})g_2,$$

$$I_3 = \frac{E_3 - U_{ab}}{r_3} = (E_3 - U_{ab})g_3,$$

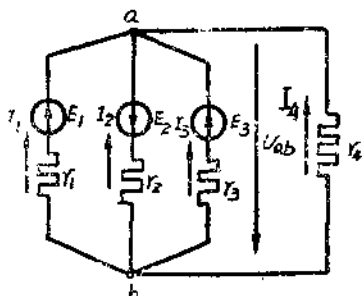


图 1-13 只有两个节点的复杂电路

$$I_4 = \frac{-U_{ab}}{r_4} = -U_{ab}g_4.$$

根据基尔霍夫第一定律，节点 a 处各支路电流間关系为：

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0,$$

$$\begin{aligned}
 \text{則} \quad (E_1 - U_{ab})g_1 + (-E_2 - U_{ab})g_2 + (E_3 - U_{ab})g_3 \\
 - U_{ab}g_4 = 0,
 \end{aligned}$$

$$U_{ab}(g_1 + g_2 + g_3 + g_4) = E_1g_1 - E_2g_2 + E_3g_3,$$

所以

$$U_{ab} = \frac{E_1g_1 - E_2g_2 + E_3g_3}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4}.$$

一般形式为：

$$U_{ab} = \frac{\sum(Eg)}{\sum g}.$$

应用此节点电压的公式时，必須注意 Eg 的符号，由上面的推导过程可知：若 E 与 U 的方向相反則取正号，如 E_1g_1 及 E_3g_3 ；若 E 与 U 的方向相同則取負号，如 E_2g_2 。

例1-4. 图1-13中已知 $E_1=10$ 伏， $E_2=12$ 伏， $E_3=20$ 伏， $r_1=0.5$ 欧， $r_2=1$ 欧， $r_3=2$ 欧， $r_4=10$ 欧，求各支路中的电流。

$$\text{解：各支路电导为：} g_1 = \frac{1}{r_1} = \frac{1}{0.5} = 2 \frac{1}{\text{欧}}, \quad g_2 = \frac{1}{r_2} = \frac{1}{1} = 1 \frac{1}{\text{欧}},$$

$$g_3 = \frac{1}{r_3} = \frac{1}{2} = 0.5 \frac{1}{\text{欧}}, \quad g_4 = \frac{1}{r_4} = \frac{1}{10} = 0.1 \frac{1}{\text{欧}}.$$

所以

$$\begin{aligned}
 U_{ab} &= \frac{\sum(Eg)}{\sum g} = \frac{E_1g_1 - E_2g_2 + E_3g_3}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4} \\
 &= \frac{20 - 12 + 10}{2 + 1 + 0.5 + 0.1} = 5 \text{ 伏}.
 \end{aligned}$$

各支路电流为：

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{r_1} = \frac{10 - 5}{0.5} = 10 \text{ 安},$$

$$I_2 = \frac{-E_2 - U_{ab}}{r_2} = \frac{-12 - 5}{1} = -17 \text{ 安},$$

$$I_3 = \frac{E_3 - U_{ab}}{r_3} = \frac{20 - 5}{2} = 7.5 \text{ 安},$$

$$I_4 = \frac{-U_{ab}}{r_4} = \frac{-5}{10} = -0.5 \text{ 安}.$$

其中 I_2 及 I_4 均为负数，表示所设的方向与实际方向相反。

必须注意，应用此法时，所有电流都必须假设成流向同一个节点。

1-6 重迭原理

在多电源电路中，许多电动势同时作用在这个电路中所产生的电流，等于各个电动势单独存在时，在这个电路中所产生电流的代数和。这个原理称为重迭原理。此原理是以线性电路本身的性质为依据的：因为在线性电路中，电流是和电动势成正比的（即电流和电动势间具有线性关系），所以把各个电动势单独作用时所产生的各电流加以重迭才能等于实际的电流。如果电路中有随电流大小而变化的非线性电阻，就不能应用重迭原理；不过，一般的电阻都可认为是线性的。

利用重迭原理来解复杂电路，可以不用一系列的方程式，这就可能使运算过程简化。其计算方法是：我们先假设电路中只有第一个电动势作用，其它电动势都不存在，各支路中的电阻（包括所有电源的内阻）保持原来的数值，求出各支路中的电流；然后再假设只有第二个电动势作用再求出各该支路中的电流，依次类推。最后求这些电流的代数和，就得到所有电动势同时存在时在各支路中所应产生的电流。

例1-7. 利用重迭原理计算图1-14中各支路中的电流。已知： $E_1 = 126$ 伏， $E_2 = 124$ 伏， $r_1 = r_2 = 1$ 欧， $r_3 = 12$ 欧。

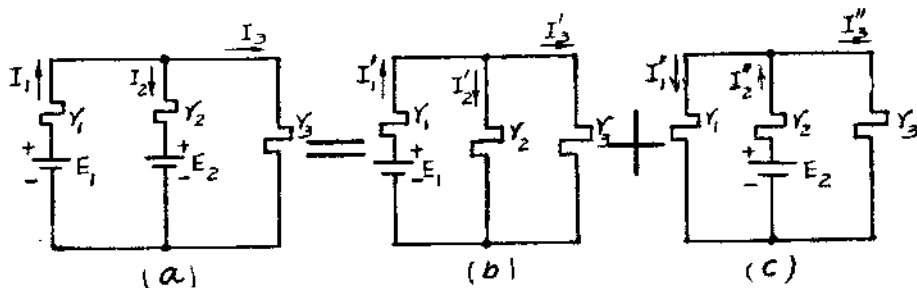


图 1-14 重迭原理

解：先假设只有电动势 E_1 作用(如图1-14, b)，求出：

$$I'_1 = \frac{E_1}{r_1 + \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3}} = \frac{126}{1 + \frac{1 \times 12}{1 + 12}} = 65.5 \text{ 安};$$

$$I'_2 = I'_1 \cdot \frac{r_3}{r_2 + r_3} = 65.5 \times \frac{12}{1 + 12} = 60.5 \text{ 安};$$

$$I'_3 = I'_1 \frac{r_2}{r_2 + r_3} = 65.5 \times \frac{1}{1+12} = 5.04 \text{ 安.}$$

再假设只有电动势 E_2 作用(如图1-14,c), 求出:

$$I''_2 = \frac{E_2}{r_2 + \frac{r_1 r_3}{r_1 + r_3}} = \frac{124}{1 + \frac{1 \times 12}{1+12}} = 64.5 \text{ 安;}$$

$$I''_1 = I''_2 \frac{r_3}{r_1 + r_3} = 64.5 \times \frac{12}{1+12} = 59.5 \text{ 安;}$$

$$I''_3 = I''_2 \frac{r_1}{r_1 + r_3} = 64.5 \times \frac{1}{1+12} = 4.96 \text{ 安.}$$

故各支路中的电流为:

$$I_1 = I'_1 - I''_1 = 65.5 - 59.5 = 6 \text{ 安;}$$

$$I_2 = -I''_2 + I'_2 = -64.5 + 60.5 = -4 \text{ 安;}$$

$$I_3 = I'_3 + I''_3 = 5.04 + 4.96 = 10 \text{ 安.}$$

从基尔霍夫定律出发, 可以证明重迭原理是正确的。

1-7 电容器和电容

隔着电介质的两个导体的总体称为电容器, 组成电容器的导体称为电极。当把电容器的两极接在电源上时, 电容器就被充电, 而两极上就带有异性电荷。电量(Q)与极间电压(U)之比值标志着电容器容纳电荷的本领, 称为该电容器的电容(C)。

$$C = \frac{Q}{U},$$

式中电量的单位为库; 电压的单位为伏; 电容的单位为法。在实际应用中法的单位太大, 一般用微法或微微法作单位。

$$1 \text{ 微法} = 10^{-6} \text{ 法,}$$

$$1 \text{ 微微法} = 10^{-6} \text{ 微法} \\ = 10^{-12} \text{ 法.}$$

电容器可以串联或并联使用, 以满足不同的需要。

并联电容器(图1-15)的总电量等于各电容器电量之和。

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n. \quad (1-8)$$

由于是并联, 所以各电容器上的电压相同。将(1-8)式各项都以电压除之, 得:

$$\frac{Q}{U} = \frac{Q_1}{U} + \frac{Q_2}{U} + \dots + \frac{Q_n}{U},$$

从而总电容

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (1-9)$$

上式表示, 当电容器并联时, 总电容等于各电容器电容之和。

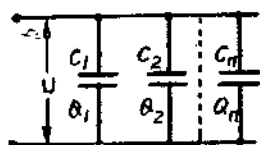


图 1-15 电容器的并联

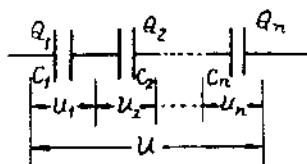


图 1-16 电容器的串联