

最新统一编写电力行业岗位及职业技能鉴定培训教材

SONGDIAN XIANLU

送电线路

(初、中、高级工及
技师、高级技师适用)

《送电线路》编委会 编



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

最新统一编写电力行业岗位及职业技能鉴定培训教材

送电线路

(初、中、高级工及
技师、高级技师适用)

《送电线路》编委会 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书根据《中华人民共和国职业技能鉴定规范·送电线路》、职业技能鉴定指导书及送电线路工岗位规范编写。主要是为提高送电线路专业人员的业务素质,配合职业技能鉴定和专业培训的开展,落实学习型企业的创建,依据架空送电线路相关的规程规范,参考相关的设计、施工、运行与检修书籍,并结合实际工作需要和设计、施工、运行经验而编写的。

全书共分九章,主要包括基础知识与相关知识,工具、金具和绝缘子,路径与测量,基础,杆塔,导线,防雷和接地,送电线路知识及相关知识练习题及答案,送电线路操作实践。其中杆塔和导线是本书学习的重点。

本书可供送电线路的设计、施工、运行与检修人员以及送电线路初级、中级、高级工和技师、高级技师培训和学习,也可供其他相关技术人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

送电线路:初、中、高级工及技师、高级技师适用 /
《送电线路》编委会编. —北京:中国水利水电出版社,
2007
最新统一编写电力行业岗位及职业技能鉴定培训教材
ISBN 978-7-5084-4872-5
I. 送… II. 送… III. 输电线路—职业技能鉴定—教材
IV. TM726
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 112212 号

书 名	最新统一编写电力行业岗位及职业技能鉴定培训教材 送电线路 (初、中、高级工及技师、高级技师适用)
作 者	《送电线路》编委会 编
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	787mm×1092mm 16 开本 29.75 印张 705 千字
版 次	2007 年 10 月第 1 版 2007 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	49.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

本书编委会名单

主 任	马保恒						
副 主 任	王向东	王英杰					
编 委	靳新建	王玉贵	尹怀更	程国华	刘丙勋	张 云	
	赵玉汉	李秀贤	赵中秋	刘东风	谭俊岭	王文彬	
	周延根	张灵军	张朝锋	孙胜博	宋彦泽	梁俊红	
	于俊现	李尚荣	周辛国				
主 编	王玉贵						
副 主 编	尹怀更	郑 威	魏 杰				
编写人员	王忠民	赵军宪	李勇军	陈笑宇	张继涛	赵建周	
	高庆东	刁法良	史长行	谢 锋	田 杰	秦喜辰	
	吉金东	王兆军	王子顺	丁毓山	谈文华	叶常容	

前言



为提高送电线路专业人员的业务素质，配合职业技能鉴定和岗位培训的开展，落实学习型企业的创建，特编写本书。

本书依据 SDJ 3—79《架空送电线路设计技术规程》、DL/T 5092—1999《110~500kV 架空送电线路设计技术规程》、GBJ 233—90《110~500kV 架空电力线路施工及验收规范》、《电业安全工作规程（线路部分）》等有关规程规范；以电力工程高压送电线路设计手册、送电工人施工手册、10~110kV 线路施工、送电线路运行和检修、高压送电线路基础施工、输配电线路运行和检修等方面的书籍为主要参考资料，并结合实际工作的需要和设计、施工、运行经验而进行编写。

本书共分九章，考虑实际工作和职业技能鉴定的需要，重点是第五章和第六章，其中第五章第三节“杆塔事故内力及变形计算举例”、第六章第三节“应力及弧垂计算举例和自练”是供技师或高级技师参考应用的，其他章节基本涵盖了送电线路初级、中级、高级工和技师、高级技师的知识和技能要求。

本书在编写过程中，得到河北省电力公司、邢台供电公司有关领导和同行们的大力帮助和热情指导，在此向他们表示衷心感谢。

由于编写时间仓促，编者水平有限以及实践经验的不足、收集资料的不全，书中的疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正并提出宝贵意见。

作者

2007年9月

目 录

前言

第一章 基础知识与相关知识	1
第一节 直流电路与磁路	1
第二节 交流电路	17
第三节 识绘图知识	27
第四节 工程力学基础	40
第五节 线路与气象	65
复习思考题与习题	70
第二章 工具、金具和绝缘子	75
第一节 起重工具	75
第二节 金具	90
第三节 绝缘子	108
复习思考题与习题	122
第三章 路径与测量	125
第一节 路径选择	125
第二节 线路测量	128
第三节 定位复测	133
复习思考题与习题	138
第四章 基础	141
第一节 基础类型及构造	141
第二节 基础所用主要材料	148
第三节 基础受力	159
第四节 基础施工	168
复习思考题与习题	180
第五章 杆塔	184
第一节 杆塔类型及选用	184
第二节 杆塔结构与荷载	193
第三节 杆塔事故情况内力及变形计算举例	202
第四节 杆塔施工	212
第五节 杆塔的故障及巡视	225

复习思考题与习题	227
第六章 导线	230
第一节 导线的种类和截面计算	230
第二节 导线悬挂点等高时的机械计算	235
第三节 应力及弧垂计算举例和自练	243
第四节 架线施工	263
第五节 导线运行	280
复习思考题与习题	288
第七章 防雷和接地	291
第一节 雷电	291
第二节 接地装置	298
第三节 中性点与接地方式	315
复习思考题与习题	318
第八章 送电线路知识及相关知识练习题及答案	321
第九章 送电线路操作实践	353
第一节 单项操作	353
第二节 多项操作	373
第三节 综合操作	389
附录一 电业安全工作规程(电力线路部分)(DL 409—1991)	400
附录二 架空送电线路运行规程(DL/T 741—2001)	434
附录三 电力线路防护规程(水利电力部[79]水电规字第6号)	452
附录四 职业技能鉴定培训大纲	455
附录五 职业技能鉴定《送电线路》初级工理论知识试题	463
附录六 职业技能鉴定《送电线路》高级工理论知识试题	465

第一章 基础知识与相关知识

第一节 直流电路与磁路

一、直流电路的基本概念和简单直流电路

(一) 电流

导体中的自由电子在电场力的作用下，作有规则的定向运动，称为电流。工程上规定正电荷移动的方向为电流的方向。因此，在金属导体中，电流的方向是与自由电子的实际移动方向相反的。

电流的大小用电流强度来表示，其数值等于单位时间内通过导体截面的电量，通常用符号 I 表示，即

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-1)$$

式中 I ——电流强度，A；

Q ——通过导体截面的电荷量，C；

t ——通过电荷量 Q 所用的时间，s。

电流强度的单位可用千安 (kA)、安 (A)、毫安 (mA)、微安 (μA) 表示，且

$$1\text{kA} = 1000\text{A}$$

$$1\text{A} = 1000\text{mA}$$

$$1\text{mA} = 1000\mu\text{A}$$

(二) 电位和电压

1. 电位

所谓电场中某点的电位，在数值上等于单位正电荷沿任意路径从该点移至无限远处电场力所做的功。其单位为伏特，简称伏 (V)。

在电场中电位等于零的点叫做参考点，凡电位高于零电位的点，电位为正，凡电位低于零电位的点，其电位为负。通常以大地作为参考点。

2. 电压

电场中任意两点间的电压，等于这两点电位差，因此，电压也称电位差。

电压的单位可用千伏 (kV)、伏 (V)、毫伏 (mV)、微伏 (μV) 表示，即

$$1\text{kV} = 1000\text{V}$$

$$1\text{V} = 1000\text{mV}$$

$$1\text{mV} = 1000\mu\text{V}$$

电场中各点的电位随着参考点的改变而不同，但是无论参考点如何改变，任意两点间的电位差是不变的。电压的正方向是从高电位点指向低电位点。

(三) 电势

电势是电源内部的电源力，常称局外力，它等于将单位正电荷从电源负极移到正极时所做的功。因此电源电势是衡量电源力做功能力的物理量，可用下式表示

$$E = \frac{A}{Q} \quad (1-2)$$

式中 E ——电势，V；

A ——电源力所做的功，J；

Q ——正电荷的电荷量，C。

电势的方向规定为电源力推动正电荷运动的方向，即从负极指向正极的方向，也就是电位升高的方向。

(四) 电阻和电阻率

在电场力的作用下，电流在导体中流动时，所受到的阻力，称为电阻，用“ R ”或“ r ”表示。电阻常用的单位为：兆欧（ $M\Omega$ ）、千欧（ $k\Omega$ ）、欧（ Ω ），即

$$1M\Omega = 1000000\Omega$$

$$1k\Omega = 1000\Omega$$

$$1\Omega = 1000m\Omega = 1000000\mu\Omega$$

当导体两端的电压是 1V，导体中的电流是 1A 时，这段导体的电阻为 1 Ω 。即

$$1\Omega = \frac{1V}{1A}$$

同一种材料对电流的阻力，主要决定于导体的长度和横截面积。如截面积相同时，则导体越长，电阻越大；如长度相同时，则截面积越大，电阻越小。所以电阻与导线长度 L 成正比，而与导线截面积 S 成反比。即

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-3)$$

式中 ρ ——电阻率。

ρ 的物理意义是：在 20 $^{\circ}\text{C}$ 时，长度为 1m，横截面积为 1 mm^2 的导线的电阻值，它与材料性质有关。 ρ 值越小，导电性能越好。 ρ 的单位是 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。

(五) 导体的电阻与温度

电流通过导体时，其温度增高；导体的环境温度增高时，其温度也增高。温度升高，导体中分子运动加快，电子与分子碰撞机会增多，致使导体的电阻增大。表 1-1 中所列的 R 值为 20 $^{\circ}\text{C}$ 时的数值，温度增高， R 值增大。

表 1-1 温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 时的 ρ 和 α 值

材料	$\rho\left(\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}\right)$	$\alpha\left(\frac{1}{^{\circ}\text{C}}\right)$	材料	$\rho\left(\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}\right)$	$\alpha\left(\frac{1}{^{\circ}\text{C}}\right)$
铜	0.0175	0.004	锡	0.114	0.00438
铝	0.0283	0.004	铅	0.222	0.00387
铁	0.1	0.0057	康铜	0.44	0.00004

为了考虑温度对导体电阻的影响,引入了温度系数 α ,其物理意义是:温度每升高 1°C 时, 1Ω 电阻的变化量。

设温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 时电阻的数值为 R_t ,若温度由 $t^{\circ}\text{C}$ 增加到 $T^{\circ}\text{C}$,则电阻的变化量为

$$\Delta R = R_t \alpha (T - t)$$

由此,在 $T^{\circ}\text{C}$ 时电阻的总值应为电阻的原值 R_t 加上变化值 ΔR ,即

$$R_T = R_t + \Delta R = R_t + R_t \alpha (T - t) = R_t [1 + \alpha (T - t)] \quad (1-4)$$

式中 R_T ——温度为 $T^{\circ}\text{C}$ 时的电阻, Ω ;

R_t ——温度为 20°C 时的电阻, Ω 。

(六) 欧姆定律

1. 简单直流电路的意义

所谓简单直流电路是指能用欧姆定律做电阻串、并、混联求解的电路。

2. 电路欧姆定律

外电路欧姆定律指出:在一段电路中,流过电阻 R 的电流 I 与电阻两端的电压 U 成正比,而与这段电路的电阻成反比。用公式表示是

$$I = \frac{U}{R}$$

或写成

$$U = IR, \quad R = \frac{U}{I} \quad (1-5)$$

式中 U ——电压, V;

I ——电流, A;

R ——电阻, Ω 。

(七) 全电路欧姆定律

全电路欧姆定律是用来说明在一个闭合电路中,电势、电压、电流、电阻之间基本关系的定律。即在一个闭合电路中,电流与电源的电势 E 成正比,与电路中电源的内阻 r 和外电阻 R 之和成反比。用公式表示为

$$I = \frac{E}{R + r} \quad (1-6)$$

式中 E ——电路中电源电势, V;

I ——电流, A;

R ——外电阻,即负载电阻, Ω ;

r ——电源内阻, Ω 。

(八) 电功和电功率

在一段时间内,电源力(电场力)做的功称为电功或电能,电能用符号 A 表示。其总值是焦耳(J)。通常电能也以电量的形式表现,以千瓦小时($\text{kW} \cdot \text{h}$)为单位,称为度。两者之间的换算关系为

$$1 \text{ 度} (\text{kW} \cdot \text{h}) = 3.6 \times 10^6 \text{ 焦} (\text{J})$$

单位时间内电源力所做的功称为电功率。电功率用符号 P 表示,常用的单位为千瓦(kW)、瓦(W)等,即

$$1(\text{kW}) = 1000\text{W}$$

$$1(\text{W}) = 1000\text{mW}$$

电功率的计算公式为

$$P = \frac{A}{t} = \frac{UI t \times 10^{-3}}{t} = UI \times 10^{-3} = I^2 R \times 10^{-3} = \frac{U^2}{R} \times 10^{-3} \quad (1-7)$$

式中 P ——电功率, kW;

t ——时间, h;

A ——电能, kW·h, 1kW=1.36 马力。

(九) 电流的热效应

当电流流过导体时, 由于导体具有一定的电阻, 因此, 就要消耗一定的电能。这些电能不断地转变为热能, 使导体温度升高, 这种现象就叫做电流的热效应。根据能量守恒原理, 电路中消耗的电功率将全部转换为热功率, 由式 (1-7) 知

$$Q = 0.24 I^2 R \quad (1-8)$$

式中, 0.24 称为热功当量。

(十) 短路和断路

如果电源通向负载的两根导线不经过负载而相互直接接通, 就发生了电源被短路的情况。这时电路中的电流可能增大到远远超过导线所允许的电流限度。

断路, 一般是指电路中某一部分断开, 例如导线、电气设备的线圈等断线, 使电流不能导通的现象。

短路会造成电气设备的过热, 甚至烧毁电气设备、引起火灾。同时, 短路电流还会产生很大的电动力, 造成电气设备损坏, 严重的短路事故甚至还会破坏系统稳定, 所以对运行中的电气设备应采取一定的保护措施, 例如安装自动开关、熔断器等, 当发生短路故障时, 这些装置可将短路点及时切除, 以防止短路造成电气设备的破坏。

(十一) 电阻的串并联电路

1. 串联电路

图 1-1 所示的为两个电阻 R_1 、 R_2 的串联电路, 其特点如下:

- (1) 两个电阻 R_1 、 R_2 首尾相接, 没有分支。
- (2) 电路总电压等于 R_1 、 R_2 上的分电压 U_1 、 U_2 之和。
- (3) 所有电阻流过相同的电流。

串联电路的总电阻等于参与串联的所有电阻之和, 即

$$R = R_1 + R_2$$

对于 n 个电阻的串联电路的总电阻等于

$$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n \quad (1-9)$$

2. 电阻的并联

并联电路的特点是:

(1) 所有参加并联电阻的首端并接在一起, 末端并接在一起, 所有电阻受相同电压的作用, 如图 1-2 所示。

(2) 并联电路总电流 I 等于各个并联电阻的电流 I_1 、 I_2 、 $\cdots$ 、 I_n 之和。如果用图 1-2 (b) 来等效图 1-2 (a), 就是用 R 来代替 R_1 、 R_2 的作用。对图 1-2 (a) 的总电流,

应等于所有电阻的各个分电流之和，即

$$I = \frac{U}{R} = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

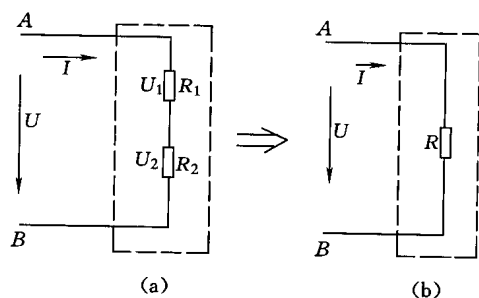


图 1-1 串联电路

(a) 实际电路；(b) 等效电路

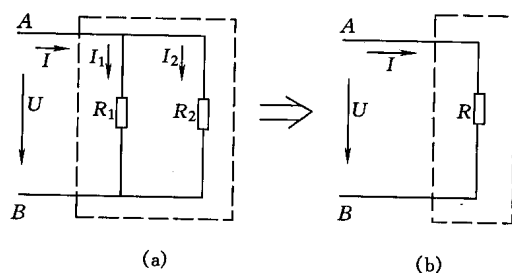


图 1-2 并联电路

(a) 实际电路；(b) 等效电路

3. 算例

(1) 已知：在图 1-3 中， $U=220V$ ，各电阻的阻值标注在图中，求电路的总电流。
计算 A、B 两点间的电阻

$$R_{AB} = \frac{100 \times 100}{100 + 100} = 50(\Omega)$$

计算 C、B 两点间的电阻

$$R_{CB} = \frac{100 \times 100}{100 + 100} = 50(\Omega)$$

电路的总电流

$$I = \frac{U}{50 + 50} = \frac{220}{100} = 2.2(A)$$

(2) 在图 1-4 中， $R_1 = 900$ ， $R_2 = 300$ ， $R_3 = 300$ ， $R_4 = 150$ ， $R_5 = 600$ ，求开关 S 打开和闭合时的等效电阻 R_{ab} 。

当开关 S 打开时

$$R_{ab} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2 + R_4} + \frac{1}{R_3 + R_5}}$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{900} + \frac{1}{300 + 150} + \frac{1}{300 + 600}} = 225(\Omega)$$

当开关 S 闭合时

$$R_{23} = \frac{300 \times 300}{300 + 300} = 150(\Omega)$$

$$R_{45} = \frac{150 \times 600}{150 + 600} = 120(\Omega)$$

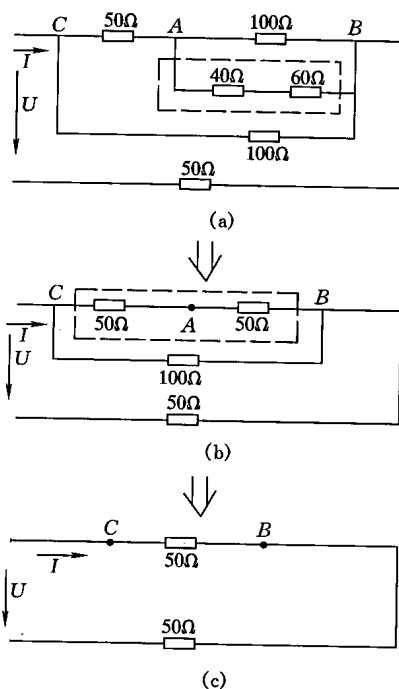


图 1-3

$$R_{ab} = \frac{270 \times 900}{270 + 900} \approx 207.69(\Omega)$$

(3) 一个电路如图 1-5 所示, 求它的等效电阻 R_{ab} 。

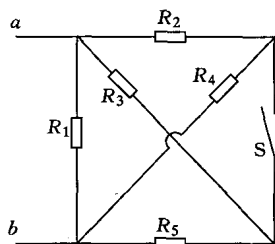


图 1-4

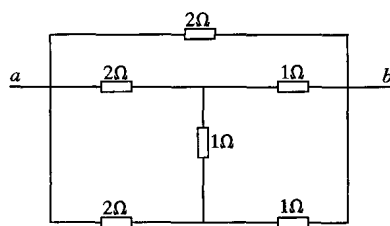


图 1-5

从图中可以看到其中一个电桥存在, 由于电桥的对角电阻乘积相等, 所以这个电桥是平衡的, R_{ab} 等效电阻为

$$R_{ab} = \frac{\frac{2+1}{2} \times 2}{\frac{2+1}{2} + 2} = \frac{6}{7} \approx 0.857(\Omega)$$

(十二) 电容

1. 电容电路中的物理现象

能够贮存电荷的容器称为电容器, 例如, 两块金属板便可构成一个电容器, 如图 1-6 所示。在极板面积一定的条件下, 电容器的正、负极板上积累的电荷 Q 越多, 其极板间的电位差越高。

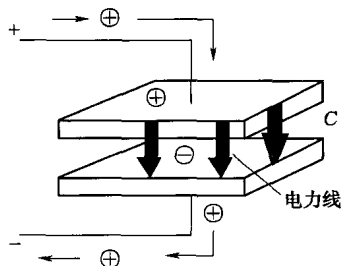


图 1-6 电容器

电容器电容的大小是按着下述方法定义的: 两极板间的电压升高 1V 所需要的电荷量, 称为电容器的电容, 单位法拉, 简称法, 用符号 F 表示。若将两极板间电压提高 100V, 所需的电荷量为 50C, 则该电容器的电容 C 为

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{50C}{100V} = 0.5(F) \quad (1-10)$$

$$1F = 10^6 \mu F = 10^{12} (pF)$$

在这里有一个很重要的概念是: 电容器两端电压与电荷量成正比例, 即 $Q=CU$ 。由于极板上电荷量 Q 必须逐步积累, 不能突变, 所以电容器两端电压不能突变。

此外, 若电容器两端电压上升得快, 表明极板上电荷积累得快, 通过电容器的电流就大; 若两端电压下降得快, 表明电荷泄放得快, 其放电电流就大。可见, 电容器中的电流由端电压随时间的变化率确定。因此, 通过电容器的电流只能是暂态电流和交流。

2. 电容的串并联计算公式

(1) 电容的并联计算公式。电容的并联公式如同电阻的串联计算公式一样, 如若有 n 个电容并联, 则总电容为

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (1-11)$$

因为电容并联相当于电容器的极板扩大一样。

(2) 电容的串联计算公式。电容的串联公式如同电阻的并联计算公式一样，如若有 n 个电容并联，则总电容得倒数为

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n} \quad (1-12)$$

对于两个电容则有

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (1-13)$$

因为电容串联是把电荷量按电容器的容量分布在各个极板上，相当电容器的极板缩小一样。

3. 算例

(1) 图 1-7 中，电容器 $C_1 = 1\mu\text{F}$ ， $C_2 = 3\mu\text{F}$ ， $C_3 = 6\mu\text{F}$ ， $C_4 = 2\mu\text{F}$ ， $U = 100\text{V}$ ，求各电容器电压。

解：

$$C_5 = \frac{C_3 \times C_4}{C_3 + C_4} + C_2 = \frac{6 \times 2}{6 + 2} + 3 = \frac{9}{2} (\mu\text{F})$$

因为

$$\frac{C_1}{C_5} = \frac{U_5}{U_1}$$

$$U_1 + U_5 = 100(\text{V})$$

则

$$U_1 = 81.8(\text{V})$$

$$U_5 = U_2 = 18.2(\text{V})$$

$$\frac{C_3}{C_4} = \frac{U_4}{U_3}$$

$$U_3 + U_4 = 18.2(\text{V})$$

$$U_3 = 4.55(\text{V})$$

$$U_4 = 13.6(\text{V})$$

(2) 在图 1-8 中， $C_1 = 0.2\mu\text{F}$ ， $C_2 = 0.3\mu\text{F}$ ， $C_3 = 0.8\mu\text{F}$ ， $C_4 = 0.2\mu\text{F}$ ，求开关 S 断开与闭合时，A、B 两点的等效电容 C_{AB} 。

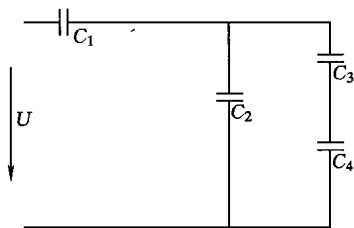


图 1-7

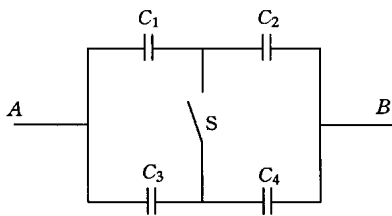


图 1-8

解：开关断开时

$$C_{AB} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + \frac{C_3 C_4}{C_3 + C_4} = \frac{0.2 \times 0.3}{0.2 + 0.3} + \frac{0.8 \times 0.2}{0.8 + 0.2} = 0.28(\mu\text{F})$$

开关闭合时

$$C_{AB} = \frac{(C_1 + C_3)(C_2 + C_4)}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4} = \frac{(0.2 + 0.8)(0.3 + 0.2)}{1.5} = 0.33(\mu F)$$

(十三) 基尔霍夫定律

1. 电路的节点

复杂电路是不能用串、并、混联简化的电路。在电路中 3 条及以上电路汇聚的一点，叫做节点。

2. 支路

在电路中两个节点之间的电路元件叫做支路。即支路可以有源元件，也可以是无源元件。

3. 回路

由数条支路所构成的闭合电路，叫做回路。

4. 基尔霍夫第一定律

基尔霍夫第一定律的内容是：在网络中，汇聚于电路节点所有电流的代数和等于零。例如，对于图 1-9 的节点 A 有

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (1-14)$$

或者写成

$$\sum_A I = 0$$

式中 $\sum_A$ 号下的字母 A 表示节点 A。

基尔霍夫第一定律又称为节点电流定律。节点电流的方向如果假定流入为正，则流出为负，或者相反。第一定律说明流入节点的电流等于流出节点的电流，它实质上是电荷不灭定律，即在节点处电荷既不能消失，也不能再生，更不能贮存，流出的电荷等于流入的电荷。

5. 基尔霍夫第二定律

基尔霍夫第二定律的内容是：在闭合回路中，所有电势的代数和等于回路中所有电阻压降的代数和。现利用图 1-10 来证明这个结论。

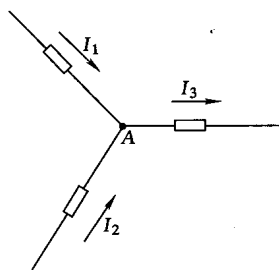


图 1-9 基尔霍夫
第一定律图形

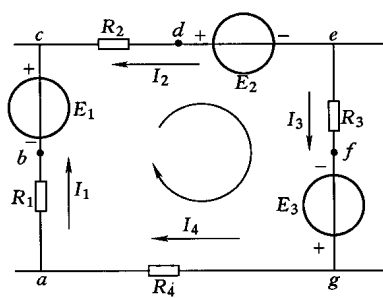


图 1-10 基尔霍夫
第二定律图形

今假定点 a (见图 1-10) 为参考点，即 $\varphi_a = 0$ ，则

$$b \text{ 点的电位} \quad \varphi_b = \varphi_a - I_1 R_1$$

$$c \text{ 点的电位} \quad \varphi_c = \varphi_b + E_1$$

$$d \text{ 点的电位} \quad \varphi_d = \varphi_c + I_2 R_2$$

$$e \text{ 点的电位} \quad \varphi_e = \varphi_d - E_2$$

$$f \text{ 点的电位} \quad \varphi_f = \varphi_e - I_3 R_3$$

将上述所有方程式左边的相加，右边的也相加，将所有电位都消去，再将剩余部分经过移项后，得

$$E_1 + E_3 - E_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_4 I_4$$

$$\sum E = \sum IR \quad (1-15)$$

公式 (1-15) 就是第二定律的内容，式中符号的选取应遵循下述原则：凡与循行方向一致的电势、电流取正号，相反的取负号。所谓循行方向就是沿回路求出各点电位时的绕行方向，这个绕行方向也是任意选取的。

(十四) 支路电流法

(1) 已知图 1-11 所示的电路中，电势、电阻已标在图中，求电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 中的电流。

第一步，先假定三个支路中电流的方向，如 I_1 、 I_2 、 I_3 所示。

第二步，列节点方程式。

$$\text{对节点 } a \text{ 有} \quad I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (1-16)$$

$$\text{对节点 } b \text{ 有} \quad -I - I_2 + I_3 = 0 \quad (1-17)$$

式 (1-16)、式 (1-17) 只是符号相反，因此，两个方程只有一个是独立的，即可用式 (1-16) 改变符号的办法推导出式 (1-17) 来。图 1-11 中有两个节点，可列一个独立方程式。一般说来，如果有 n 个节点，则可列 $n-1$ 个独立方程式。

第三步，列回路电压方程式。

在电路中要求出的有三个电流： I_1 、 I_2 、 I_3 ，因此需要三个独立方程式联立求解。而由基尔霍夫第一定律已列一个独立方程式 (1-16)，其余两个独立方程可由基尔霍夫第二定律来补写。一般来讲，如果要求电流数为 m 个，节点为 n 个，则由基尔霍夫第二定律，所补写的回路方程数为 $P=m-n+1$ 个。

在列回路方程时，应选定循行回路的方向，在图 1-11 中，循行方向用罗马数字 I 和 II 标出，按此循行方向列方程如下：

$$\text{回路 I} \quad E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3 \quad (1-18)$$

$$\text{回路 II} \quad E_2 = I_2 R_2 + I_3 R_3 \quad (1-19)$$

第四步，联立求解。将式 (1-16) 代入式 (1-18) 和式 (1-19)，得

$$30 = 7I_1 + 4I_2$$

$$50 = 4I_1 + 8I_2$$

解得 $I_1 = 1\text{A}$, $I_2 = 5.75\text{A}$, $I_3 = I_1 + I_2 = 1 + 5.75 = 6.75\text{A}$

(2) 算例。利用支路电流法求解图 1-12 个支路的电流， $E_1 = 10\text{V}$ ， $E_2 = 6\text{V}$ ， $E_3 = 20\text{V}$ 。

列回路方程式：

$$\text{节电方程} \quad I_2 - I_3 - I_1 = 0$$

$$\text{回路方程} \quad E_2 - E_1 = R_1 I_1 - R_3 I_3$$

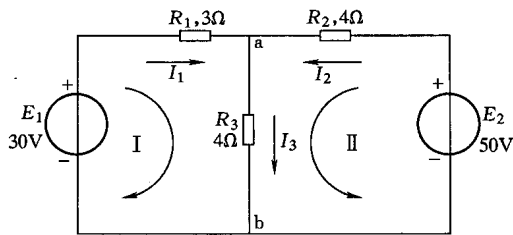


图 1-11 支路电流法电路图

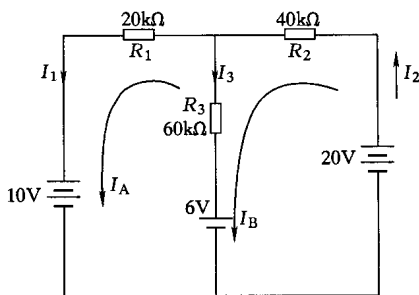


图 1-12 支路电流法电路图

$$E_3 - E_2 = R_2 I_2 + R_3 I_3$$

代入具体数值后，联立求得：

$$I_1 = 0.1(\text{mA})$$

$$I_2 = 0.2(\text{mA})$$

$$I_3 = 0.1(\text{mA})$$

(十五) 等效发电机原理

(1) 等效发电机原理是复杂电路的重要解法之一。这种方法原理简单，但用起来比较灵活，特别是在众多支路中，只要求解出一条支电流，用这种方法来解决问题。

图 1-13 是一个含有 3 个支路的电路， $R_1=4\Omega$ ， $R_2=4\Omega$ ， $R_3=3\Omega$ ， $E_1=6\text{V}$ ， $E_2=14\text{V}$ ，今只要求求出 R_3 中的电流，采用等效发电机原理来求解这个电流的作法是：要求电流的支路 R_3 从网络中开断，如图 1-13 (b) 所示。将网络的其余部分看作一个实际发电机，如虚框所示。这个实际发电机当 R_3 开断时，它处在空载状态，产生的空载电压为 U_0 。

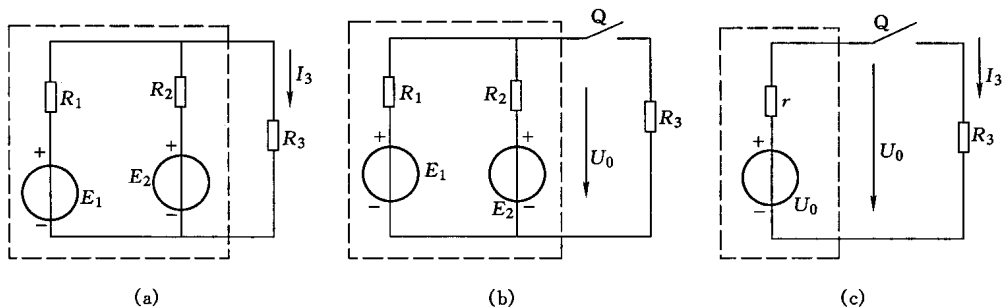


图 1-13 等效发电机电路图

实际发电机应具有内阻，这个内阻 r 应该是虚框中电势 E_1 、 E_2 不存在时 [见图 1-13 (c)]，虚框的等效电阻

$$r = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{4 \times 4}{4 + 4} = 2(\Omega)$$

这样，便把图 1-13 (a) 的复杂电路化成图 1-13 (c) 的简单电路。利用全电路欧姆定律可得 R_3 中的电流