

● 徐少强 胡国新 主编

输配电线路 施工技术手册



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

输配电线路 施工技术手册

◎ 徐少强 胡国新 主编

附录 (97) 目錄表并图

主编 徐少强 胡国新 中国水利水电出版社
北京 中国水利水电出版社 2002

工 - 强电线路

10-03

号 018572 第

(440.01) 号 6 强电

(中心) 25/1233

点 强电



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

《输配电线路施工技术手册》是一本集送电、配电线路施工于一体的实用电工手册。它集中介绍了电力线路方面的基础知识、专业知识,是集应用技术和实用数据于一体的工具书。本书系统地阐明了电力系统 500kV~10kV 架空电力线路与电缆线路施工,尤其在当代施工领域,引进了国外的监理机制,施工过程的质量控制注入了 ISO9002/ISO9002 国际质量管理标准,施工质量的验评和创优活动,使线路的施工管理更为完善,施工质量有了进一步的提高。本书针对以上新情况、新问题,进行了较为详细的叙述。本书还汇集了施工中可供参照的大量标准数据,无疑是一部技术指南手册。

本书可供从事输配电施工的工程技术人员以及从事电气工作的技术人员、设计人员、监理人员和管理人员等阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

输配电线路施工技术手册 / 徐少强, 胡国新主编.

北京: 中国水利水电出版社, 2005

ISBN 7-5084-2739-4

I. 输... II. ①徐... ②胡... III. 输配电线路—工程施工—施工技术—技术手册 IV. TM726-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 018275 号

书 名	输配电线路施工技术手册
作 者	徐少强 胡国新 主编
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	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	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 34.25 印张 1184 千字
版 次	2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	69.00 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

前 言

电力是社会主义现代化建设事业中不可缺少的二次能源,而且随着社会主义现代化事业的不断向前发展,其替代一次能源的应用和作用将越来越大。电气化程度的不断提高也日益证明社会的发展越来越先进和文明。本手册从电力线路的施工技术入手来满足电气工作者的需求,为从事这方面工作的广大电气工程技术人员、干部(包括监理人员)、管理人员和广大电工提供了一本工具书。其内容兼容知识性、技术性和实用性;其特征兼容系统性、系列性和专业性。

当今,在现代化的中国特色的社会主义大踏步跨进了21世纪的时代,中国的电力事业经过了改革开放的洗礼,已经摆脱了过去“严重缺电”的被动局面,而目前又花大力气建设城乡电网,实行全国联网,西电东送的伟大战略部署。因此出版这样一本《输配电线路施工技术手册》是十分适合的,也是十分必要的。本手册共分两篇22章,是一部输配电电工的实用大全。它可供各行各业从事内外线电工及其电气技术人员使用。

本书由徐少强、胡国新主编,参加编写工作的还有高向前、齐道恩、毕学昱、王保权、李得武、周焱、杜斌、胡其秀、罗翔、腾国清、姚莉、申德江、刘杰、王玲、万载扬、张展、孔庆云、王晓明、金福林、陆耀平、张晋斌、王正才、刘辉煌、尹力、张家斌、谈笑君、吴跃华、崔景云、张建国、盖庆福、孙宪平、陶复华、赵友权、张绍文、张青、徐义斌、刘力男、谈文华、胡胜利、许幸乐、朱良生、赵文荣、孙国宝、刘清汉、周权、孙景纬、郑晓广、王进弘、肖文凤、杜风宽、赵宏、李英明等。

在本手册编写与审定的过程中,多承中国电机工程学会、中国电工技术学会和北京首钢设计院等各位专家、工程技术人员的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

由于本手册专业性强,加之作者编写时间仓促,水平有限,施工安装经验不足,内容中难免有不妥之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2005年6月

目 录

前 言

第一篇 基础知识

第一章 电工基础知识	1
1-1 直流电路	1
1-2 电磁和电磁感应	8
1-3 交流电路基本概念	13
1-4 三相交流电路	23
1-5 电工名词解释	27
1-6 电工基本定律	33
1-7 电工计算公式	33
1-8 常用单位换算	36
第二章 起重基础知识	42
2-1 力的基本知识	42
2-2 起重的基本方法	48
2-3 起重用机具	51
2-4 抱杆	58
2-5 绳索与索卡	60
2-6 吊环、吊钩和御夹	67
2-7 起重作业安全要点	69
第三章 安全基础知识	70
3-1 电气安全技术	70
3-2 安全用具和绝缘工具	75
3-3 接地接零	79
3-4 电气安全装置	85
3-5 触电急救	86
3-6 防火与消防用具	89
第四章 施工测量	98
4-1 线路工程的术语和平断面图	98
4-2 经纬仪在测量上的应用	100
4-3 定位测量	106
4-4 施工测量中值得注意的几个问题	112
第五章 基础工程	114
5-1 概述	114

5-2	基础荷载及土壤性质	115
5-3	电杆基础	117
5-4	铁塔基础	120
5-5	特殊型基础	122
5-6	跨河铁塔灌注高桩基础	129
5-7	混凝土及其施工	130
第六章	焊接工艺	139
6-1	概述	139
6-2	焊接工艺	139
6-3	焊接的质量及安全	140
6-4	乙炔和乙炔发生器	142

第二篇 输配电线路施工

第七章	电力系统的基本知识	143
7-1	概述	143
7-2	电力系统的接线	144
7-3	电力系统的负荷	146
第八章	架空线路的电气计算概论	148
8-1	电力线路的结构	148
8-2	防雷保护	166
8-3	接地装置	168
8-4	导线换位	174
8-5	绝缘避雷线	175
第九章	电力线路的机械计算概论	177
9-1	概述	177
9-2	导地线的机械荷载	177
9-3	导地线的弧垂和应力	178
9-4	导地线的震动及防震措施	181
9-5	线间距离及杆高的确定	183
第十章	杆塔的类型和运输	186
10-1	杆塔分类和型式	186
10-2	杆塔构件的质量检查	187
10-3	杆塔构件的运输	194
第十一章	杆塔构件的组装	196
11-1	概述	196
11-2	组装图纸的符号规定	197
11-3	组装前的准备工作	199
11-4	混凝土杆的排杆和连接	199
11-5	杆塔的组装	201
11-6	铁塔的地面组装	206

第十二章 杆塔起立方法	208
12-1 概述	208
12-2 工器具的选择	209
12-3 混凝土杆的起立	219
12-4 铁塔的组立	224
12-5 杆塔组立的安全注意要点	229
第十三章 导地线架设	231
13-1 放线	231
13-2 导地线的连接	239
13-3 紧线	244
13-4 附件安装	250
第十四章 光缆 OPGW 架设	253
14-1 概述	253
14-2 光缆 OPGW 的结构简介	253
14-3 光缆的主要技术参数	253
14-4 放线准备	254
14-5 张力放线	254
14-6 紧线	255
14-7 金具及附件安装	256
14-8 注意事项	257
第十五章 杆塔的施工设计	258
15-1 概述	258
15-2 杆塔的荷重及重心位置	259
15-3 人字抱杆的参数选择	262
15-4 固定吊点的选择	265
15-5 各设备受力与杆塔起立角 γ 的关系	268
15-6 现场布置对杆塔整立的影响	269
15-7 施工技术措施	271
第十六章 接地装置的施工	274
16-1 概述	274
16-2 接地装置的施工	274
16-3 接地电阻和土壤电阻率的测量	275
第十七章 高压配电架空线路施工	277
17-1 10(6)kV 针式瓷瓶架空线路	277
17-2 10(6)kV 瓷横担架空线路	280
17-3 高压配电架空线路的架设	283
17-4 变压器台架	293
17-5 高压配电架空线路常用电气设备	294
第十八章 低压架空线路施工	299
18-1 概述	299
18-2 低压架空线路杆顶组装	299
18-3 接户线	301

第十九章 电力电缆线路的施工	303
19-1 电缆种类	303
19-2 各种型号电力电缆的应用范围	308
19-3 电缆运行的最高允许温度	310
19-4 电缆的长期允许载流量	311
19-5 电缆的选择	314
19-6 电缆的施工安装方式	316
19-7 电缆敷设	367
19-8 电缆终端头和中间头的制作	408
19-9 高压单芯电缆的施工	468
19-10 电缆的试验	468
19-11 电缆安装验收	472
第二十章 监理工作概述	474
20-1 监理机制	474
20-2 监理机构设置	474
20-3 监理人员的职责及设施	474
20-4 监理规划及监理实施细则的编制	475
20-5 施工准备阶段的监理	476
20-6 工地施工协调会简介	476
20-7 工程质量控制	477
20-8 工程安全控制	478
20-9 主要原材料的质量控制	479
20-10 超高压输电线路的通道控制	482
20-11 工程投资控制	483
20-12 竣工验收中的监理工作	483
20-13 施工阶段监理资料的管理	484
20-14 设备监造概述	485
第二十一章 送电线路建设工程质量验收概述	487
21-1 概述	487
21-2 工程质量的标准和检查验收	487
21-3 工程质量的监督检查	488
21-4 正式竣工验收	489
21-5 工程质量验评	490
21-6 送电线路工程的达标投产考核	491
第二十二章 线路竣工试验	492
22-1 概述	492
22-2 线路绝缘测定和相位鉴别	492
22-3 线路常数试验	493
22-4 线路递增加压和冲击投切试验	500
附录 1 名词解释	502
附录 2 架空电力线路施工检查评级表	504
附表 2-1 架空电力线路施工工程类别划分表	504

一、土石方工程	505
线表 3.1.2 线路路径复测质量要求及检查方法表	505
线表 3.1.3 普通基础分坑和开挖质量要求及检查方法表	505
线表 3.1.4 拉线基础分坑和开挖质量要求及检查方法表	505
线表 3.1.5 岩石掏挖基础分坑和开挖质量等级评定标准及检查方法表	505
线表 3.1.6 施工基面及开挖质量等级评定标准及检查方法表	505
二、基础工程	506
线表 3.2.1 现浇混凝土铁塔基础质量检验等级评定标准及检查方法表	506
线表 3.2.2 现浇拉线(含锚杆拉线)基础质量检验等级评定标准及检查方法表	506
线表 3.2.3 预制装配式铁塔基础质量检验等级评定标准及检查方法表	507
线表 3.2.4 混凝土杆预制基础质量检验等级评定标准及检查方法表	508
线表 3.2.5 岩石、掏挖基础质量检验等级评定标准及检查方法表	509
线表 3.2.6 灌注桩基础质量等级评定标准及检查方法表	509
线表 3.2.7 贯注桩基础质量等级评定标准及检查方法表	510
线基 2 普通基础和拉线基础分坑及开挖检查记录表	511
线基 1 现浇铁塔基础检查及评级记录表	512
线基 2 现浇铁塔拉线基础检查及评级记录表	513
线基 3 装配式基础检查及评级记录表	514
线基 4 混凝土杆基础检查及评级记录表	515
线基 5 岩石、掏挖铁塔基础检查及评级记录表	516
线基 6 灌注桩基础检查及评级记录表	517
线基 7 贯入桩基础检查及评级记录表	518
三、杆塔工程	519
线表 3.3.1 自立塔组立质量等级评定标准和检查方法表	519
线表 3.3.2 拉线铁塔组立质量等级评定标准和检查方法表	519
线表 3.3.3 混凝土杆组立质量等级评定标准和检查方法表	520
线塔 1 自立式铁塔组立检查及评级记录表	522
线塔 2 拉线铁塔组立检查及评级记录表	522
线塔 3 混凝土杆组立检查及评级记录表	523
四、架线工程	524
线表 3.4.1 导地线展放质量等级评定标准和检查方法表	524
线表 3.4.2 导地线连接质量等级评定标准和检查方法表	524
线表 3.4.3 紧线质量等级标准和检查方法表	524
线表 3.4.4 附件安装质量等级评定标准及检查方法表	525
线线 1 导、地线展放施工检查及评级记录表	526
线线 6 紧线施工检查及评级记录表(耐张段)	527
线线 7 附件安装施工检查及评级记录表	528
五、接地工程	529
线表 3.5.1 表面式接地装置质量等级评定标准和检查方法表	529
线表 3.5.2 深埋式接地装置质量等级评定标准和检查方法表	529
六、线路防护设施	529
线表 3.6.1 线路防护设施质量等级评定标准和检查方法表	529
线表 3.6.2 线路交叉跨越距离测定及检查方法表	530
附录 3 原材料及器材检验	531

材表 4.0.1	钢材检验标准及检查方法表	531
材表 4.0.2	水泥检验标准及检查方法表	531
材表 4.0.3	砂、石、水检验标准及检查方法表	531
材表 4.0.4	混凝土预制件检验标准及检查方法表	531
材表 4.0.5	塔材及混凝土杆横担铁件检验标准及检查方法表	532
材表 4.0.6	电杆各部尺寸检验标准（允许偏差）表	533
材表 4.0.7	钢芯铝绞线、钢绞线检查标准及检查方法表	533
材表 4.0.8	金具检验标准及检查方法表	534
材表 4.0.9	绝缘子检验标准及检查方法表	535

第一篇 基础知识

第一章 电工基础知识

1-1 直流电路

电路就是电流通过的闭合回路。它由电源和负载组成，电源和负载用导线连接起来，最常用的导线是铜线和铝线。电源能把其他形式的能量转换成电能，如发电机能把机械能转换成电能，蓄电池能把化学能转换成电能。负载能把电能转换成其他形式的能，如电动机能把电能转换成机械能，电炉丝能把电能转换成热能等。在电源内能产生电势，在电势的作用下，形成了电荷向一定方向的运动，这叫做电流。不改变方向的电流的电路叫做直流电路。

电荷，即带电的质点（在电解液中的离子，在金属中的自由电子）在导体中运动时，便与导体中的离子和分子相碰撞，带电质点的动能便以热能的形式散发出来。对于这种现象，我们通常称做电阻。

在实际电路中，除了电源、负载和连接导线外，为了控制和监视电路，还装有开关、熔丝、测量仪表等设备，如图 1-1 所示。

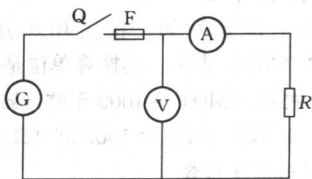


图 1-1 电路图

G—电源；Q—开关；F—熔断器；A—电流表；

V—电压表；R—负载

1-1.1 电位差、电压和电势

要使电荷流动，就必须要有电位差存在，电位差的大小决定于物体所带电荷的正负和多少，物体带

正电荷越多，电位就越高，物体带负电荷越多，电位就越低。两个带电物体之间的电位叫电位差，习惯称为电压。

电路中，由电源产生的电位差，叫做电动势，简称电势。它能把电子从一个极转移到另一个极，积累正电荷的那个极叫正极，积累负电荷的那个极叫负极。

在电路中，电压和电势的区别在于：

在闭合电路中（见图 1-2），电势由电源产生，经过内阻产生压降，在电源出口端的电位差，就是电压。在开路电源两端的电压就等于它的电势，即

$$E = U + Ir = IR + Ir = I(R + r)$$

电压和电势的单位都是“伏特”，用字母“V”表示，在实用中以千伏（kV）、伏（V）、毫伏（mV）、微伏（ μ V）表示，其单位换算如下

$$1 \text{ 千伏 (kV)} = 1000 \text{ 伏 (V)}$$

$$1 \text{ 伏 (V)} = 1000 \text{ 毫伏 (mV)}$$

$$1 \text{ 毫伏 (mV)} = 1000 \text{ 微伏 } (\mu\text{V})$$

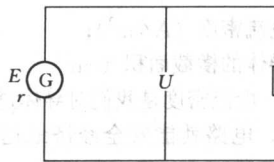


图 1-2 电路

1-1.2 电流、电流密度

电流强度简称电流，是衡量电流大小的物理量，在一秒钟内通过导体截面的电荷量就是对电流大小的度量。假使电流的方向和大小均不随时间而变化，就称做直流电流；反之电流的方向和大小均随时间而变化就称做交流电流，简称交流。在直流电路中（见图 1-3，有

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

式中 I ——电流强度 (A);

Q ——电荷量 (C);

t ——时间 (s)。

从式 (1-1) 可以看出, 假如在 1 秒钟内通过导体截面的电荷等于 1 库仑, 则导体内的电流就等于 1 安培, 即

$$1[\text{安培}] = \frac{1[\text{库仑}]}{1[\text{秒}]}$$

即

$$1[\text{A}] = \frac{1[\text{C}]}{1[\text{s}]}$$

电流的流动方向是取带正电子移动的方向, 也就是与电子的流动方向相反。

在电源内电流的流动方向是从负极到正极; 在电源外部, 电流的流动方向是正极流向负极。

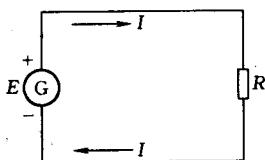


图 1-3 电路

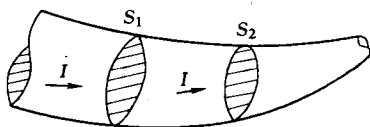


图 1-4 不同截面的导体

电流与导体的横截面积之比值, 叫做电流密度

$$\delta = \frac{I}{s} \quad (1-2)$$

式中 δ ——电流密度 (A/cm²);

s ——导体的横截面积 (cm²)。

在实用中, 电流密度是我们对导体进行选型的依据。选得恰当, 电路就能安全经济地运行, 选得过大, 虽然年运行费用小, 但一次投资太大, 不合算; 选得过小, 虽然投资小, 但运行不安全、不经济, 所以在这两者之间、有一个经济的数据, 称它为经济电流密度, 用 I_f 表示。图 1-4 为不同截面的导体。

1-1.3 电阻、电阻率、电阻的温度系数和电导

1. 电阻

导体中的自由电子在移动过程中, 电子之间、电子和带不同电荷的质点之间不断地发生碰撞, 同时还要

克服原子核对它的吸收力, 因而就受到一定的阻力, 导体对电流的阻力, 称做电阻, 用字母 R 表示。电阻大的物体导电性能差, 电阻小的物体导电性能好。

这种导电性能差的物体, 叫做电的不良导体。在通常条件下, 由于其内部不存在自由电子, 因而它不易于传导电流, 这类物体又称做绝缘体, 如橡胶、塑料、玻璃、云母、陶瓷、胶木、油类、干燥的木材、纸张、空气等。

导电性能好的物体, 叫做电的良好导体, 由于其内部存在自由电子、离子等带电微粒, 易于传导电流, 所以称做导体, 如金属、酸、碱、盐的水溶液、大地、人体等。

介于导体和绝缘体之间的物体, 称做半导体, 它具有单向导电的性能, 如锗、硅、硒等。现代广泛用的晶体管和集成电路, 都是用这些材料制成的。

2. 电阻率

金属导体的电阻和其长度成正比, 和其横截面积成反比, 并且与其材料、温度等因素有关。由公式

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

推得

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

式中 R ——导体的电阻 (Ω);

L ——导体的长度 (m);

S ——导体的截面积 (mm²);

ρ ——导体的电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)。

导体的电阻率 ρ 决定导体的材料的特性, 电阻率高的材料, 导电性能差, 电阻率低的材料, 导电性能好。电阻率 ρ 是指长度为 1m, 截面积为 1 mm² 的均匀导体, 在温度 20℃ 时所具有的电阻值。常用材料的电阻率见表 1-1。

电阻的单位是欧姆, 在实用中还常以千欧 (k Ω)、兆欧 (M Ω) 表示, 其换算单位是:

$$1 \text{ 兆欧 (M}\Omega) = 1000 \text{ 千欧 (k}\Omega)$$

$$1 \text{ 千欧 (k}\Omega) = 1000 \text{ 欧 (}\Omega)$$

3. 电阻的温度系数

随着导体温度的升高, 有的导体电阻也随着增加, 如金属类物体; 而有的导体电阻却随着温度增加而减小, 如电解液、石墨和碳之类物体。但是, 温度的变化却对某些合金几乎没有影响, 故可以看作某些合金的电阻系数实际上不随温度而变化。

$$\frac{r_2 - r_1}{r_1} = \alpha(t_2 - t_1)$$

$$r_2 = r_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)] \quad (1-4)$$

式中 r_2 ——与温度 t_2 相对应的电阻；

r_1 ——与温度 t_1 相对应的电阻；

α ——电阻的温度系数，它等于当温度升高

1℃时，导体电阻的相对增量。

化学纯金属的电阻温度系数近于 0.0041/℃，如

铜、铝的电阻；康铜、锰铜的电阻温度系数非常小；

碳、电解液有着负电阻温度系数。

表 1-1

常用导体材料的电阻率和平均温度系数表

材 料	电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	平均温度系数 (0~100℃)	材 料	电阻率 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	平均温度系数 (0~100℃)
银	0.016	0.004	黄铜	0.07~0.08	0.002
铜	0.0175	0.004	青铜	0.021~0.4	0.004
铝	0.029	0.004	锰铜	0.42	0.000006
钨	0.056	0.0046	康铜	0.4~0.51	0.000005
钢	0.13~0.25	0.006	镍铬	1.1	0.00015
铁	0.13~0.30	0.006	铁铬铝	1.4	0.00005

注 表中是指 20℃ 时的数值

【例 1-1】 截面 $S = 120 \text{mm}^2$ ，长 $l = 50 \text{km}$ 的铝质输电线，试求在温度 0~20℃ 时的电阻？

$$\text{解：} r_{20} = \rho \frac{l}{S} = 0.029 \times \frac{50000}{120} = 12.1 (\Omega)$$

$$\begin{aligned} r_0 &= r_{20} + r_{20} \cdot \alpha (t_0 - t_{20}) \\ &= 12.1 + 12.1 \times 0.004 \times (-20) \\ &= 11.1 (\Omega) \end{aligned}$$

4. 电导

在工程技术中，常用电阻的倒数，称电导来表示，即公式：

$$G = \frac{1}{R}$$

电导的单位名称为 [西门子]，单位符号为 “S”，它的含意与电阻相反，电导大，表示导体的导电性能好，反之电导小，表示导体的导电性能差。

1-1.4 欧姆定律

欧姆定律是电路的基本定律，在工程技术中应用极为广泛。它是反映电路中电压、电流和电阻之间关系的定律。

在实际电路中，有直流发电机或蓄电池等作电源供给负载的电路，它由内电路（即电源内部的电路）和外电路（包括导线和负载）所组成的电路，称为全电路。但是在闭合电路中，往往有某一段电路中含有电势，而仅有电阻，这种电路，称为一段电路。

1. 一段电路的欧姆定律

定义：当导体温度不变时，通过导体的电流与其两端的电压成正比，而与其电阻成反比，这就叫做一段电路（见图 1-5）的欧姆定律，即

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

式中 I ——流过导体的电流 (A)；

U ——加在导体两端的电压 (V)；

R ——导体的电阻 (Ω)。

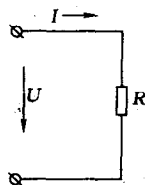


图 1-5 一段电路

由公式可知：电压等于电流与电阻的乘积，即：

$$U = IR$$

2. 全电路的欧姆定律

在只有一个电源的无分支电路中（见图 1-6），电流的大小与电源的电动势成正比，而与内外电路电阻之和成反比，这就叫做全电路的欧姆定律。

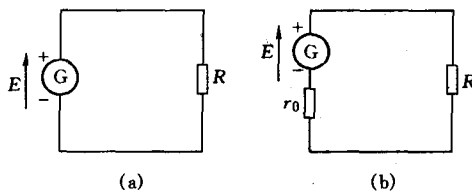


图 1-6 简单全电路

(a) 实际电路；(b) 等效电路

$$I = \frac{E}{R + r_0} \quad (1-6)$$

则 $E = I(R + r_0) = IR + Ir_0 = U + U_0$

$$U = E - U_0$$

式中 E ——电源电动势 (V);

I ——电路中的电流 (A);

r_0 ——电源的内电阻 (Ω);

R ——外电路的电阻 (Ω);

U_0 ——电源内电阻上的电压降 (V);

U ——电源两端的电压 (V)。

由式 (1-6) 可知:

(1) 当电源两端开路 (即 $R = \infty$) 时, 电路中电流为零 (即 $I = 0$), 则电源端电压等于电源电动势 (即 $U = E$)。

(2) 当 R 逐渐减小时, 电路中的电流随之增加, 则电源内阻上的压降 (即 $U_0 = Ir_0$) 也逐渐增加, 而其端电压 (即 $U = IR$) 却逐渐下降。

(3) 当 $R = 0$ 时, 电路称为短路, 电源端电压 $U = 0$, 而电流达到最大值 (即 $I = \frac{E}{r_0}$) 称为短路电流。短路电流要比正常电流大好多倍, 而这是不容许存在的电路。

【例 1-2】 已知电源 $E = 220\text{V}$, 其内阻 $r_0 = 0.90\Omega$, 线路输送距离为 625m , 用铜塑线 25mm^2 , 负载电阻为 82Ω , 求: (1) 电路中电流; (2) 负载两端的端电压; (3) 线路上的压降; (4) 电源出口短路时的短路电流。

解: (1) 线路电阻为

$$R_{\text{线}} = \rho \frac{L}{S} = 0.0175 \times \frac{625 \times 2}{25} = 0.875(\Omega)$$

总电阻为

$$R_{\text{总}} = r_0 + R_{\text{线}} + R_{\text{负}} = 0.90 + 0.875 + 82 = 83.78(\Omega)$$

则电流为

$$I = \frac{E}{R_{\text{总}}} = \frac{220}{83.78} = 2.63(\text{A})$$

(2) 负载两端电压为

$$U = IR_{\text{负}} = 2.63 \times 82 = 215.9(\text{V})$$

(3) 线路上的压降为:

$$U_{\text{线}} = IR_{\text{线}} = 2.63 \times 0.875 = 2.3(\text{V})$$

(4) 电源短路时的短路电流为

$$I_{\text{短}} = \frac{E}{r_0} = \frac{220}{0.90} = 241.8(\text{A})$$

1-1.5 基尔霍夫定律

前面已经论述了用欧姆定律求解简单电路的公式和方法, 但在实际工程中, 往往比简单电路要复杂得多, 对这些电路就需要用基尔霍夫第一定律和第二定律来求解。

1. 基尔霍夫第一定律

定义: 流入分支点的电流之和等于流出分支点的电流之和, 即在分支点电流的代数和等于零。在图 1-7 里, 假定流入分支点的电流方向作为 “+”, 而流出分支点的电流方向作为 “-”。则对于分支点 A 处

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

即

$$I_1 + I_3 + I_5 - I_2 - I_4 = 0$$

或写成一般式

$$\sum I = 0 \quad (1-7)$$

基尔霍夫第一定律用处十分广泛, 例如在变电所的汇流母线上, 往往就需要根据基尔霍夫第一定律来搞电量平衡, 以校正计量表的正确性。

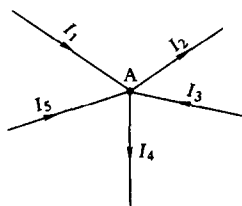


图 1-7 节点电路

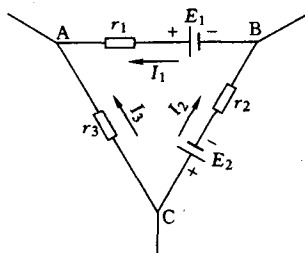


图 1-8 分支电路

2. 基尔霍夫第二定律

定义: 在闭合电路中, 电势的代数和等于在各段电阻内电压降的代数和。

在图 1-8 中有

$$-E_1 + E_2 = -I_1(r_1 + r_{01}) - I_2(r_2 + r_{02}) + I_3 r_3$$

即

$$\sum E = \sum IR \quad (1-8)$$

在这里, 当各电势的方向和任意选取的绕行方向相一致的时候, 这电势就定为正的; 当电流的方向和绕行的方向一致时, 在电阻上的电压降就定为正的, 反之, 就是负的。

在特殊情况下, 当回路内不包含有电源时, 则:

$$\sum (IR) = 0$$

【例 1-3】 如图 1-9 所示, 已知 $E_1 = 24\text{V}$, $E_2 = 12\text{V}$, $R_1 = 200\Omega$, $R_2 = 400\Omega$, 若忽略电池内阻, 求这回路中的电流, 电阻 R_1 、 R_2 上的电压降各是多少?

解：选定绕行方向为顺时针，则

$$E_1 - E_2 = IR_1 + IR_2$$

$$i = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2} = \frac{24 - 12}{200 + 400} = 20(\text{mA})$$

$$U_1 = IR_1 = 20 \times 10^{-3} \times 200 = 4\text{V}$$

$$U_2 = IR_2 = 20 \times 10^{-3} \times 400 = 8\text{V}$$

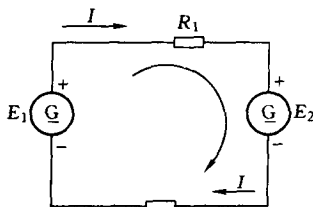


图 1-9

1-1.6 电路的串联、并联和混联

1. 串联电路

定义：若干个电阻的头尾依次连接，这样的连接叫串联，如图 1-10 所示。

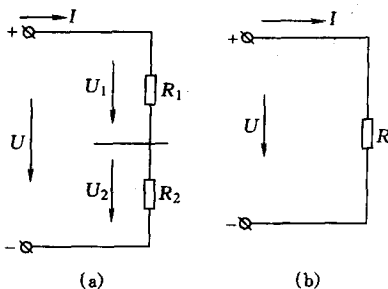


图 1-10 串联电路

(a) 实际电路；(b) 等效电路

在串联电路中，有如下三个特点：

- (1) 流过各电阻的电流均相同。
- (2) 总电压等于各电阻上的分电压之和，即

$$U = U_1 + U_2 = IR_1 + IR_2$$

从上式中可推导出，各电阻上的电压降和它的电阻值成正比。

- (3) 总电阻等于各分电阻之和，即 $R = R_1 + R_2$ 。

串联电路的这三个特点非常重要，工程中常用它来达到限流，分压和降压的目的。

2. 并联电路

定义：若干个电阻并排地接至同一电压的两个节点之间，这样的连接叫并联，如图 1-11 所示。在并联电路中，有如下三个特点：

- (1) 各电阻两端上的电压均相等。

(2) 总电流等于各并联支路电流之和，即

$$I = I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = U g_1; \quad I_2 = \frac{U}{R_2} = U g_2;$$

$$I_1 : I_2 = g_1 : g_2 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2}$$

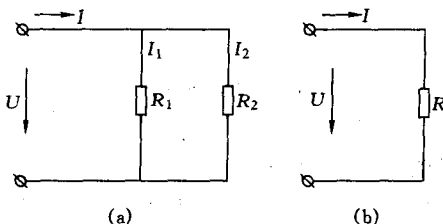


图 1-11 并联电路

(a) 实际电路；(b) 等效电路

由上式可看出，支路电阻越小，则分流电流就越大，并且各支路间的电流分配和各支路的电导成正比或者和各支路的电阻成反比。由此可知，并联电阻具有分流原理。

(3) 总电阻的倒数等于各分电阻的倒数之和，即

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

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

由公式可见，总电阻之值必定小于其最小的电阻值。

在实际工程中，负载多数是并联接在电源上的。例如：电灯和电动机通常都是互相并联的。这样，各负载都是独立的，不会因其中任何一个负载工作状态而影响其他负载的工作状况。

3. 混联电路

在实际工程中，电路往往是由串联和并联混合接在一起的，这种电路，称为混联电路。从图 1-12 (a) 所表示的电路，来求混联电路的总电阻，它的计算步骤应该是 R_2 和 R_3 并联，然后再与 R_1 串联，即

$$R_{\text{总}} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

其总电流为

$$I = \frac{U_{\text{AD}}}{R_{\text{总}}}$$

串联、并联以及由串并联组成的混合电路，统称为直流的简单电路。

在复杂的分支电路中，电阻和电源是任意安放着的。计算这样复杂的电路，单靠欧姆定律是不够的，

这就要运用基尔霍夫第一定律和第二定律去求解。

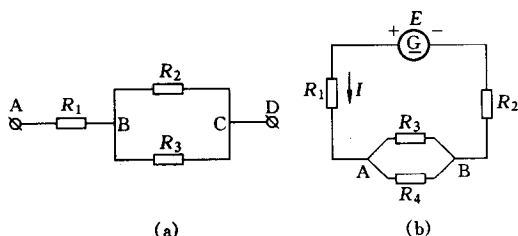


图 1-12 混合电路及其计算图

(a) 混合电路; (b) 混合电路计算图

【例 1-4】如图 1-12 (b) 所示的电路内的电流和电压为: $E = 24\text{V}$, $r_0 = 0.5\Omega$, $R_1 = 3\Omega$, $R_2 = 5\Omega$, $R_3 = 20\Omega$, $R_4 = 30\Omega$ 试求总电阻和总电流?

解: (1) 总电阻为

$$R_{AB} = \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \\ = \frac{20 \times 30}{20 + 30} = \frac{600}{50} = 12(\Omega)$$

$$R_{\text{总}} = R_1 + R_2 + R_{AB} + r_0 \\ = 3 + 5 + 12 + 0.5 = 20.5(\Omega)$$

(2) 总电流为

$$I = \frac{E}{R_{\text{总}}} = \frac{24}{20.5} = 1.17(\text{A})$$

4. 具有可变电阻的无分支电路

在具有两个电阻串联, 其中一个电阻是可变电阻的无分支电路中 (见图 1-13), 当电路两端的电压不变时, 而可变电阻从无限大变到零时, 其发生的现象可由以下公式表示。

在这电路内的电流为

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2}$$

$$\text{当 } R_2 = \infty \text{ 时具有电流最小值 } I_0 = \frac{U}{\infty} = 0$$

$$\text{当 } R_2 = 0 \text{ 时具有电流最大值 } I_K = \frac{U}{R_1}$$

从以上公式可知, 当 $R_2 = \infty$ 时的电路, 称做无载状态; 而当 $R_2 = 0$ 时的电路, 称做短路状态。

5. 电流、电压和电阻的测定

(1) 安培计。用来测量电流的仪器, 叫安培计或叫电流表。

根据被测量大小, 还有毫安计、微安计。它们的换算关系为

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

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

安培计和负载串联接入电路内。为了减少安培计

内的电压降和功率损失, 安培计的电阻应做得很小 (几分之一欧姆), 因此当测量大电流时 ($I > 0.5\text{A}$), 仪器就需要分路, 在刻度上同样反映出被分流的数值就可以。

(2) 伏特计。用来测量电压的仪器叫做伏特计, 或叫电压表。

根据被测量大小, 还有用千伏、毫伏等单位, 它们的换算关系为

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

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

测量电路两点间的电压时, 伏特计的两端直接和这两点并联接入。由于伏特计内不允许流过大量的电流 ($I < 0.1\text{A}$), 所以必须与仪器串联一附加电阻, 在刻度上同样能反映出被测量的实际数值。

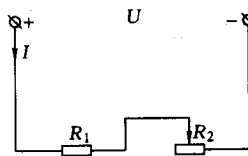


图 1-13 具有可变电阻的无分支电路

(3) 电阻的测定。电阻的测定有好几种方法, 最常用的是电流电压法, 它是利用欧姆定律经过换算, 求得电阻值的, 这就是在电路中同时接入安培计和伏特计, 读得读数以后, 再进行换算的。

另外, 电阻的测量常常用电桥来进行, 例如变压器绕组的电阻就是用电桥测定的。

6. 电功率与电能

在电力系统中, 发电厂和供电企业的基本任务就是发出和输送电功率, 向用户销售电能, 这就牵涉到电功率和随着时间而积累的电能的计量和计算问题。

(1) 电功率。发电机是发出电能的, 负载是消耗电能的。如图 1-14 所示, 设负载两端的电压为 U , 电路中输送的电流为 I , 则负载 R 所消耗的功率 P 为

$$P = UI(\text{W}) \quad (1-9)$$

式中 P ——电功率 (W);

U ——端电压 (V);

I ——电流 (A)。

电功率的单位为伏安 (瓦特), 用字母 “W” 表示。在实际工程中, 还常用千瓦 (kW), 兆瓦 (MW) 作单位。它们之间的换算关系为

$$1\text{兆瓦 (MW)} = 1000\text{千瓦 (kW)}$$

$$1\text{千瓦 (kW)} = 1000\text{瓦 (W)}$$

根据欧姆定律, 电功率的公式还可改写为

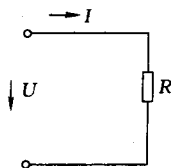


图 1-14 负载电路

$$P = UI = IRI = I^2 R$$

$$P = U \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R}$$

【例 1-5】有一只 220V 的灯泡，当并接到 220V 电源时，其灯泡通过的电流是 0.455A，灯泡的电阻为 484Ω，问灯泡的电功率为多少？

解：\$P = I^2 R = 0.455^2 \times 484 = 100\$ (W)

(2) 电能量。负载的电功率只能表示它们的工作能力的大小，而不能表示它们随时间而消耗的功率，所以电能量就是电功率在某段时间内所作的功，即

$$W = Pt = UIt = I^2 Rt = \frac{U^2}{R} t \quad (1-10)$$

式中 \$W\$——电能 (J)；

\$t\$——时间 (s)。

如果负载的功率为 1W，时间为 1s，则负载上所消耗的电能量为 1J，即

$$1J = 1W \times 1s$$

在实际工程中，电能的法定单位用千瓦小时来表示，单位符号为 kW·h，即

$$1kW \cdot h = 1kW \times 1h$$

【例 1-6】一台直流电动机，其运行时消耗的功率为 5.6kW，问一年(按 8000h 计算)要用多少电能？

解：\$W = Pt = 5.6 \times 8000 = 44800\$ (kW·h)

(3) 电的热效应(焦耳-楞次定律)。电流通过导体时，导体就会发热，这就是电能转变成热能的现象，这种现象就叫做电流的热效应。

功率表示电能转变成热能的速率，即

$$P = UI$$

根据欧姆定律，即

$$U = IR$$

将 \$U\$ 代入上式中，得到热功率，即

$$P = I^2 R$$

在时间 \$t\$ 内的电能转变为热能的电量为

$$W = Pt = I^2 Rt$$

因为，1J = 0.24 卡，就可求出导体内电流放出的热量，即

$$Q = 0.24 I^2 Rt \quad (1-11a)$$

式中 \$Q\$——热量 (卡)。

由于“卡”已成为被废除的单位，故直接以“焦耳”表示的公式为

$$Q = 3.6 I^2 Rt \times 10^3 \quad (1-11b)$$

式中的单位：\$I\$ 为 A，电阻为 Ω，时间为 h，则 \$Q\$ 为 J。

这个关系就是导体内电流所放出的热量与电流的平方、导体电阻以及流过的时间成正比。这就叫焦耳-楞次定律。

电能转变为热能，对白炽灯，电热器及电炉的装置有着巨大的而实际的效用。例如在电机和变压器的线圈中，热量的产生可能引起不能容许的温度升高，以致烧坏线圈。

升高导体温度所需的热量，与导体的质量及温度的增量成正比，而热量向周围空间散发的速率和导体与周围媒介的温度差成正比。随着导体温度的升高，导体与周围媒介的温度差也增加起来，因而导体散热也就增加，这样，导体的温度增加便减慢，最后在某一温度时，建立起热平衡，即导体内由于电流和电阻的作用而放出的热量便与散发到外界媒介的热量相等。这时的温度叫稳定温度。

达到这种稳定温度所需要的加热时间，对于各种导体是不同的，例如白炽灯的灯丝只需要几分之一秒钟，而电机、变压器却需要几个小时。任何种类的导体都有一定的极限容许电流，因为导体过热会引起机械性质的变化(如导线的张力)，再则绝缘导线的过热会烧焦绝缘物甚至引起着火。

要使导线或绝缘导线正常地工作，它们受热就有一定的极限温度，一般按规范规定为 60~100℃，随绝缘物的性质和安装情况而定。

各种截面的导线的额定电流值见表 1-2 及表 1-3。

表 1-2

绝缘铜线容许极限电流

截面积 (mm ²)	容许极限 电流 (A)	截面积 (mm ²)	容许极限 电流 (A)	截面积 (mm ²)	容许极限 电流 (A)	截面积 (mm ²)	容许极限 电流 (A)
0.5	10	4.0	36	35	150	150	390
0.75	13	6.0	46	50	190	185	450
1.0	15	10	68	70	240	240	535
1.5	20	16	90	95	290	300	615
2.5	27	25	125	120	340	400	735