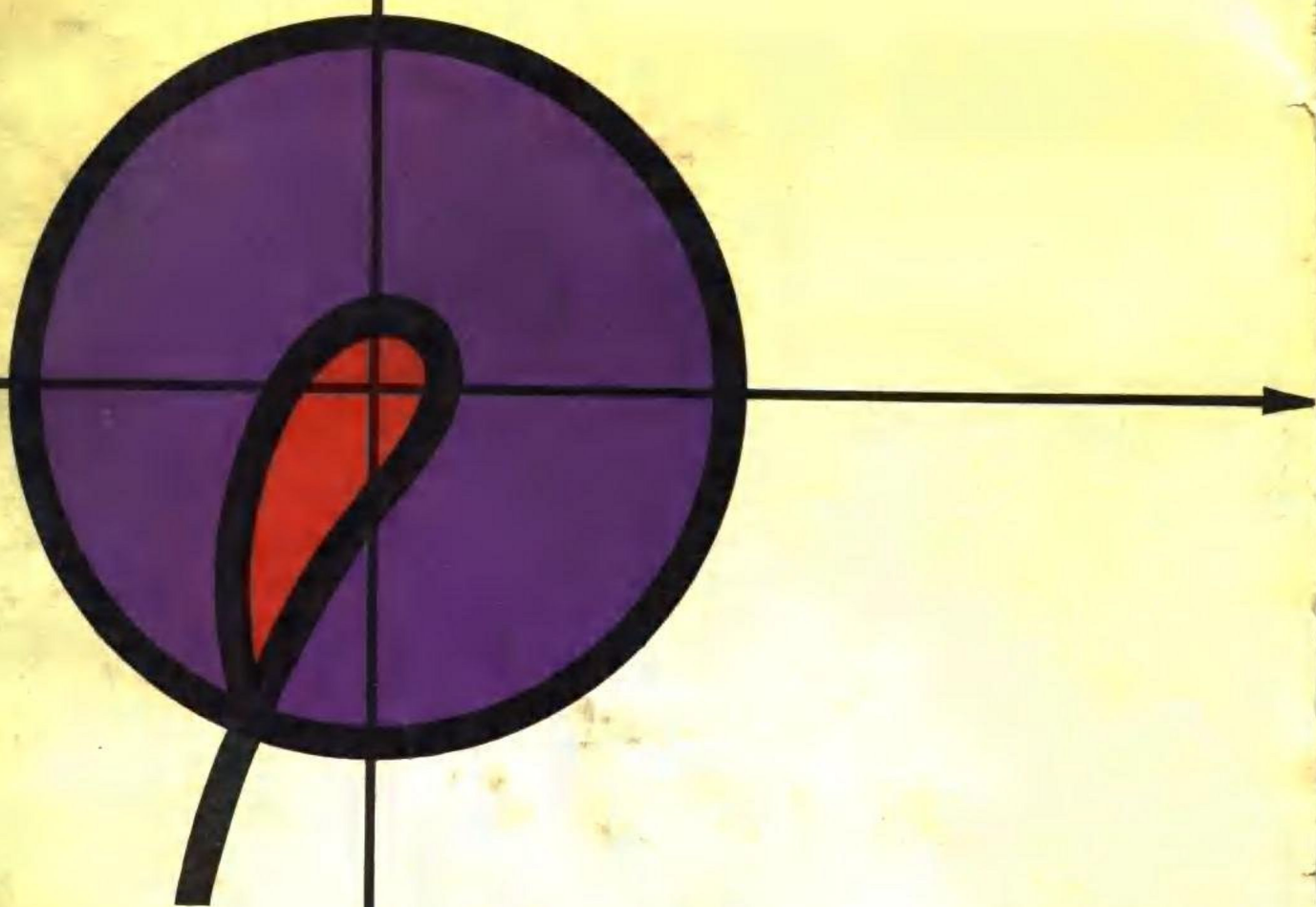




选煤厂自动化 基础知识

煤炭科学研究院唐山煤炭研究所

中国矿业学院 编

煤炭工业出版社

TD94
13
3

选煤厂自动化 基础知识

煤炭科学研究院唐山煤炭研究所

中国矿业学院 编

煤炭工业出版社

A886420

内 容 提 要

这是一本由浅入深的介绍选煤厂自动化基础知识的自学读物。书中首先介绍选煤厂自动化的基本概念以及与选煤厂自动化有关的半导体电路、自动调节原理、计测装置和工业仪表等基础知识。本书结合生产实践还介绍选煤厂原煤按灰分自动分仓装仓、跳汰机程序控制和自动排料、浮选工艺参数的自动调节、悬浮液比重-液位自动控制、装车站自动化以及生产设备集中控制的原理和具体线路。

本书可供选煤技术人员、工人阅读，大专院校选煤专业的师生也可参考。

选煤厂自动化基础知识

煤炭科学研究院唐山煤炭研究所

中国矿业学院 编

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路16号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ 印张 $26^{5/8}$ 插页 2

字数 631 千字 印数 1—2,000

1982年4月第1版 1982年4月第1次印刷

书号15035 2426 定价3 35元

前 言

随着选煤生产和自动化技术的发展,选煤厂自动化水平亦不断得到了提高。当前,现代化的选煤厂均已实现全厂设备的自动或集中控制、自动监视、自动保护或报警。选煤生产过程工艺参数也实现了自动检测和自动调节,并开始应用电子计算机控制和管理生产过程,以获得更高的经济效益。

我国的选煤厂自动化技术,只是在近几年才有所发展。目前,跳汰机自动排料、重介质悬浮液比重自动检测以及全厂设备的集中控制、自动监视、自动保护或报警等项自动化技术已经开始采用,并获得较好效果。为普及推广自动化技术,提高选煤专业人员和工人的自动化技术水平是迫在眉睫的任务。为此,我们编写了《选煤厂自动化基础知识》一书。

为便于自学,在编写中力求由浅入深、通俗易懂、结合生产实践,并用一定的篇幅介绍一些与选煤厂自动化有关的半导体电路、自动调节原理、计测装置和工业仪表等基础知识。

本书由煤炭科学研究院唐山煤炭研究所刘芳圃、张景宽、潘尚达、郁昌林、王振钧、叶桂森、沈勤法、闻治思、朱永淦、盛翰龙和中国矿业学院任守政、郭余庆等编写;由任清晨、刘芳圃、张景宽、潘尚达、郁昌林最后审定。

目 录

第一章 选煤厂自动化的基本概念	1
第一节 选煤厂的基本工艺过程	1
第二节 选煤厂自动化的目的和作用	2
第三节 选煤厂自动化的基本内容	3
第二章 半导体电路基础知识	5
第一节 常用电工知识	5
一、欧姆定律	5
二、电阻的串联与并联	6
三、克希荷夫定律	6
四、叠加原理	7
五、恒压源与恒流源	7
第二节 半导体器件	9
一、晶体二极管	9
二、晶体三极管	12
三、绝缘栅场效应管	18
第三节 交、直流低频电压放大器	21
一、交流低频电压放大器	21
二、直流放大器	40
三、调制式直流放大器	48
四、集成运算放大器	55
第四节 振荡器	66
一、LC振荡器	66
二、RC振荡器	73
第五节 晶体管脉冲电路	76
一、脉冲的概念	76
二、电容充放电规律	76
三、微分电路	81
四、积分电路	82
五、晶体三极管的开关特性	83
六、反相器	84
七、双稳态触发器	89
八、单稳态触发器	96
九、自激多谐振荡器	104
十、射极耦合触发器	106
第六节 数字集成电路	109
一、HTL系列数字集成电路的基本特性	110
二、HTL系列与非门电路元件的测试筛选	112
三、TTL数字集成电路的基本特性	114

四、由与非门组成各种基本逻辑门电路	116
五、数字集成电路触发器	122
六、计数器	136
七、分频器	144
八、分配器及方型矩阵	146
第七节 直流稳压电源	149
一、整流和滤波	149
二、硅晶体管稳压电路	156
三、串联式晶体管稳压电源	159
四、开关型稳压电路	166
五、集成稳压电源	167
六、稳压电源的主要性能指标	173
七、晶体管直流电压变换器	175
第八节 可控硅整流器	178
一、可控硅整流元件的工作原理	178
二、可控硅的伏安特性	179
三、可控硅元件的型号及电性能参数	180
四、可控硅的主回路	181
五、可控硅元件的选择	189
六、可控硅的保护	189
七、可控硅的触发电路	192
第三章 自动调节原理概述	197
第一节 自动调节系统简介	197
一、自动调节系统及其组成	197
二、自动调节系统的分类	199
第二节 自动调节系统的过渡过程	200
一、系统的静态和动态	200
二、过渡过程的基本形式	200
三、品质指标	200
第三节 自动调节系统及对象的传递函数	202
一、数学模型	202
二、方框图变换	205
三、对象特性的实验法测取	206
第四节 自动调节系统的稳定性	208
一、代数判据	208
二、频率判据	209
第五节 调节系统的品质分析	210
一、品质指标的提法	210
二、用拉氏反变换直接法分析二阶系统的品质	211
三、用频率法来分析二阶系统的品质	212
四、积分鉴定法	213
第六节 调节系统的校正和综合	214

一、自动调节系统的校正	214
二、调节器的选型及其参数的整定	217
三、自动调节系统的综合	224
第四章 选煤厂自动化常用测量装置及工业仪表	225
第一节 流量测量	225
第二节 物位测量	230
一、电极式物位测量	230
二、浮标式液位测量	231
三、电容式物位测量	232
四、差压式液位测量	239
五、超声波物位测量	241
第三节 密度测量	243
一、放射性同位素密度计	243
二、水柱平衡密度计	246
三、双管差压比重计	249
第四节 灰分测量	250
一、利用放射性同位素测量灰分的基本原理	251
二、低能 γ -射线测灰仪	252
第五节 计量装置	263
一、电子胶带秤	263
二、电子轨道衡	268
第六节 常用工业仪表	280
一、电动调节器	281
二、显示仪表	287
三、电动执行机构	291
四、运算单元	296
第五章 选煤主要生产过程的自动化	300
第一节 原煤按灰分自动分仓装储	300
一、原煤预先处理的必要性	300
二、原煤按灰分自动分仓控制系统	300
三、逻辑控制电路	302
第二节 跳汰机程序控制及自动排料	304
一、跳汰机的程序控制	305
二、跳汰机自动排料装置	309
第三节 浮选工艺参数自动调节系统	335
一、浮选生产工艺对自动调节系统的要求	336
二、调节系统的干扰因素及浓度、流量调节系统的相互影响	337
三、浮选工艺参数自动调节系统	340
四、浮选生产系统的最佳控制	343
第四节 重介质悬浮液比重-液位自控系统	344
一、重介选煤系统的工艺流程	344
二、悬浮液比重-液位自动调节系统	346

三、悬浮液比重-液位自动调节系统的评价	347
四、悬浮液比重-液位控制系统的测量电路	348
第五节 选煤厂生产设备的集中控制	351
一、选煤生产工艺对集控装置的要求	351
二、由数字集成电路组装的集控装置	353
三、CZM-3型选煤厂集中控制装置	364
四、自动闪光报警装置	397
第六节 装车站自动化	404
一、装车自动计量方式	404
二、装车调车方式	405
三、装车站自动化实例	409
第七节 国外选煤厂自动化简况及其发展趋向	416

选煤厂自动化的基本概念

第一节 选煤厂的基本工艺过程

选煤厂是加工矿井原煤的工厂，它由各种不同的作业环节和工艺设备组成，其全部生产过程基本上实现了机械化生产。选煤加工的目的是清除原煤中的杂质，提高煤炭质量，满足工业部门（钢铁、化工等）的要求，合理利用煤炭资源。

选煤厂必须根据入选原煤可选性的难易程度，合理地设计生产工艺流程和采用相应的设备，以达到预期的生产工艺指标。

目前，我国选煤生产工艺过程，大致包括以下各主要工艺环节：

1) 原煤准备作业。其任务是将入选原煤进行预先处理，选出大块矸石、木块和铁器等杂物，为了达到洗选机械对入料粒度的要求，通常还要将大块原煤破碎到某个粒级。有的选煤厂由于入选原煤质量波动较大，为了给选煤机械创造稳定的入选条件，还设有必要的原煤质量均匀化设施（如混煤、配煤、分装等）。此外，有些大型群矿选煤厂，还需设置原煤受煤设施。

2) 选煤和脱水作业。入选原煤用跳汰选煤或重介选煤工艺分选，其产品经脱水（重介选为脱介）设备脱水后，即为最终产品，如块精煤、末精煤、中煤和洗矸等。

3) 煤泥精选回收和洗水澄清作业。其任务是把水洗（或重介）作业中没有得到有效分选的细粒煤泥集中起来，进行浓缩后再用浮选设备精选。浮选的精煤和尾煤分别脱水，澄清水循环再用。

在北方地区的一些选煤厂，由于气候寒冷，为防止产品在装运过程中冻结，一般还设有浮选精煤火力干燥设备。

4) 生产技术检查。通过对选煤过程的入选原煤、中间产品、最终产品以及辅助过程进行采制样，并进行测量或化验分析，即可获得各种各样的数量、质量数据，以便于及时了解生产现状、调整操作条件，达到指导生产和控制选煤指标的目的。

5) 产品运销作业。将各种选煤产品，分别装运出售，供用户使用。

选煤厂常用的加工程序如图1-1-1所示。

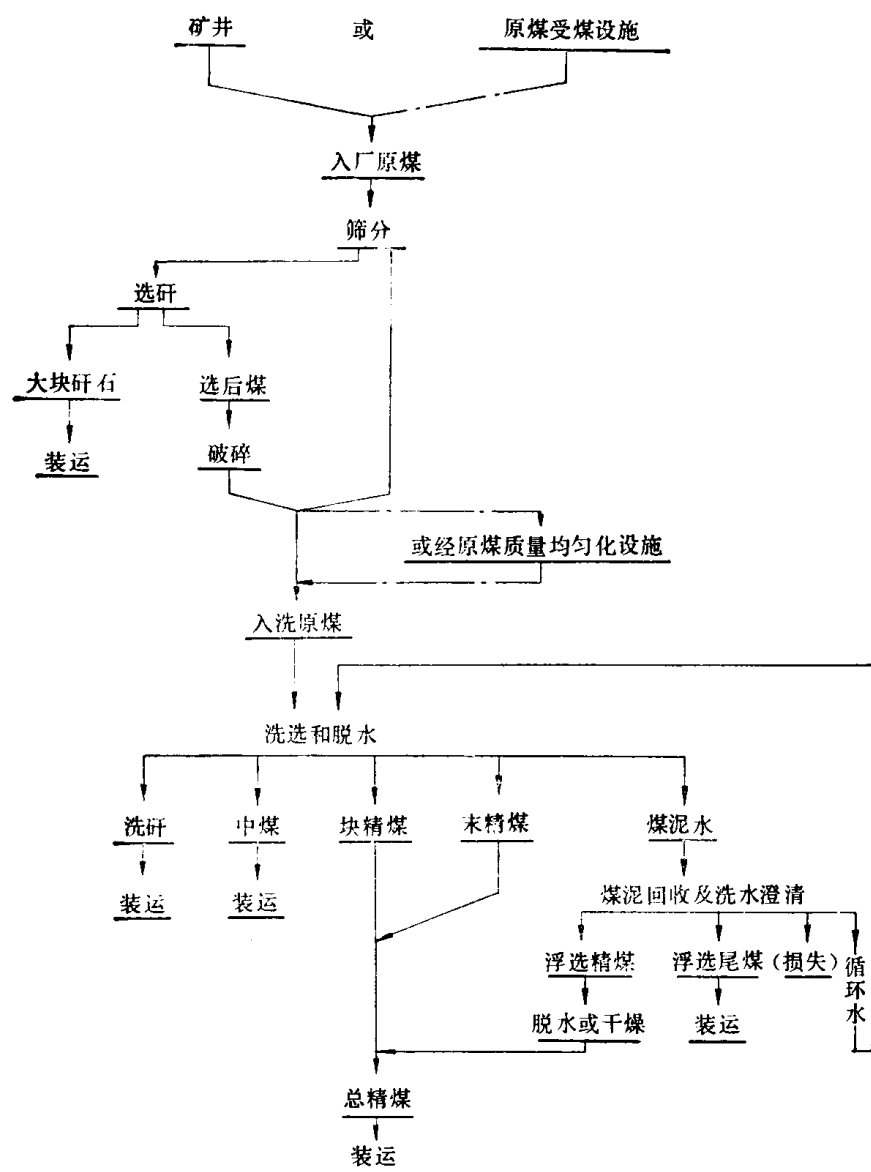


图 1-1-1 选煤厂常用的加工程序

第二节 选煤厂自动化的目的和作用

选煤厂生产工艺环节多、程序复杂、采用了大量的机械设备。在生产过程中，各种设备必须按照一定的工艺程序进行运转，并需要监视其运行状态；各种工艺参数需及时检测，并调整到规定的范围内。因此，这样一个复杂的机械化生产过程，靠人工就地操作和监控，显然是不合理的。

实践证明，采用人工就地操作和监控，不仅岗位人员多、劳动强度大、劳动生产率低，而且设备很难达到安全运转和合理运行，不能充分发挥设备的效能，难以获得预期的生产工艺指标和较高的经济收益。因此，实现选煤厂自动化，不仅是选煤生产的客观需要，还是实现选煤现代化的必要技术手段。

根据国内外的经验，实现选煤厂自动化，可达到以下技术经济效果：

1) 实现选煤设备的自动控制和生产工艺参数的自动调节，可使设备在最佳条件下运

转,充分发挥其效能,确保产品质量、数量及其它工艺指标的稳定,提高精煤回收率,从而达到最佳控制的目的。

2) 由于设有必要的自动保护、监视、报警等装置,能保证设备安全运转,提高设备的利用率。

3) 实现全厂设备的自动或集中控制、自动监视、自动保护或报警以及生产工艺参数的自动检测和调节,可大幅度地减少岗位人员,提高劳动生产率,减轻工人的劳动强度,改善工人的劳动条件。

4) 劳动生产率、设备利用率、精煤回收率的提高,产品数量、质量的稳定,可使选煤生产成本降低,生产利润增加。

第三节 选煤厂自动化的基本内容

随着选煤工艺和设备的不断革新及自动化技术的发展,选煤厂自动化水平亦愈来愈高,由初期只能对生产设备及工艺参数进行监视和事故报警,发展到能对设备和工艺参数进行自动控制和调节,从实现单机自动化、作业线自动化,逐步向全厂综合自动化发展,并开始进行利用电子计算机控制和指挥全厂生产的试验研究。

选煤厂自动化的内容是十分广泛的,它是根据选煤工艺和设备及生产管理的要求而确定的。其主要内容一般包括以下几个方面:

1) 对设备和生产工艺过程的自动监视、自动保护和报警。在生产过程中,对生产设备的运行状态进行自动监视,并设有必要的保护装置,实现事故自动排除或自动报警。必要的地点还可设置工业电视和通讯设备,便于进行远方监视和调度联络,避免发生事故或将事故扩大化,确保安全生产。

2) 生产工艺参数的自动检测和自动调节。在生产过程中,对各工艺过程的生产工艺参数,如入料量、矿浆浓度、流量、悬浮液比重、粘度,药剂添加量,床层厚度,产品数量、灰分、水分、硫分,仓位和液位等进行快速自动检测,并自动指示或记录。对某些操作参数进行自动控制和调节,使生产过程能够在接近最佳的条件下进行,确保产品数量、质量和其它选煤指标的稳定。

3) 对生产设备自动或集中控制。在生产过程中,全厂各作业的设备都要实现自动或集中控制,并根据运转需要及时转换运行流程;故障时可按程序紧急停车;检修或处理故障时可转换为就地操作。全厂设备实现自动或集中控制,可有效地减少岗位人员,减轻工人的劳动强度,提高劳动生产率。

各主要作业环节(或车间)自动化的具体要求概括如下:

1) 原煤准备车间。自动清除原煤中的大块矸石、铁器和木块等杂物;实现原煤质量均匀化设施的自动化(如自动分装、混煤和配煤等)和原煤系统设备的自动或集中控制,自动监视;原煤储量(或仓位)、原煤灰分等自动检测。

大型群矿选煤厂尚须实现原煤受煤系统设备的自动化。

2) 跳汰车间。自动启停跳汰机和跳汰系统的设备;自动检测入选原煤量、灰分、精煤灰分、床层厚度;自动控制和调节跳汰机的给料、排料及跳汰制度等。

3) 重介车间。自动控制重介分选机及其它设备的入料量;悬浮液循环系统和脱介设备的自动控制和调节;悬浮液的自动准备、输送、稀释、浓缩和补充;悬浮液的比重,粘

度和液面的自动检测及自动调节；重介系统设备的自动或集中控制，自动监视等。

4) 浮选车间。浮选入料流量、浓度、药剂添加量的自动检测和调节；药剂的自动准备；真空过滤机液面自动调节；浮选系统设备的自动或集中控制，自动监视等。

5) 火力干燥车间。火力干燥机的给料、排料、温度、压力的自动控制和调节；自动点火及防爆安全自动保护报警；干燥系统设备的自动或集中控制、自动监视等。

6) 辅助设备。各种泵类、风机、脱水设备及阀门等的单机自动化，如循环水泵、水源井泵、介质泵、真空泵、底流泵、浓缩机、鼓风机、压风机、过滤机、压滤机和离心脱水机等。

7) 生产技术检查。对选煤过程的入选原煤、中间产品、最终产品（如精煤、中煤和矸石等）自动采制样及上述产品的灰分、水分、硫分和数量等的快速自动检测，并将其指示或记录。控制和指导生产操作。

8) 运销车间。实现产品储量（或仓位）、灰分、水分和硫分等的自动检测；产品装车、调车、计量的自动或集中控制，自动监视，并自动指示、记录装车的各种数据。

第二章

半导体电路基础知识

第一节 常用电工知识

一、欧姆定律

(一) 一段无源支路的欧姆定律

在一段无源的电路上加上电压 U (见图2-1-1), 当导体的温度不变时, 这段电路中通过的电流 I 与支路两端的电压成正比。其数学表达式为:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (2-1-1)$$

式中 I —— 支路电流, 安培 (A);

U —— 支路两端电压, 伏特 (V);

R —— 电阻, 欧姆 (Ω)。

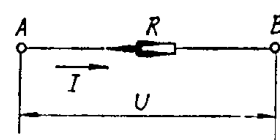


图 2-1-1 一段无源支路
欧姆定律

(二) 一段有源支路的欧姆定律

当导体的温度不变时, 通过一段有电源的支路的电流 I 不仅与支路的端电压 U 有关, 还与支路的电动势 E 有关。其欧姆定律表达式的形式取决于电动势 E 、电压 U 与电流 I 正方向的选择, 见表2-1-1。

表 2-1-1 一段有源支路的欧姆定律

电 路	定律表达形式	说 明
	$I = \frac{U + E}{R}$	U 、 E 的正方向与 I 的正方向一致。
	$I = \frac{U - E}{R}$	U 与 I 的正方向一致, E 与 I 的正方向相反。
	$I = \frac{-U + E}{R}$	U 与 I 的正方向相反, E 与 I 的正方向一致。
	$I = \frac{-U - E}{R}$	U 、 E 的正方向与 I 的正方向相反。

(三) 回路的欧姆定律

通过闭合回路的电流与回路中的电动势成正比，在回路电动势与回路电流有一致正方向时（见图2-1-2），其数学表达式为：

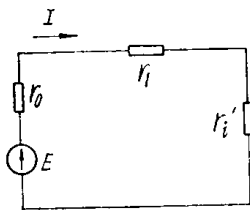


图 2-1-2 回路欧姆定律

$$I = \frac{E}{\Sigma r} \quad (\text{安培}), \quad (2-1-2)$$

式中 E —— 回路的电动势 (V) ;
 Σr —— 回路中的总电阻 (Ω) ;
 $\Sigma r = r_0 + r_1 + r_i$ (Ω) ;
 r_0 —— 电源内阻 (Ω) ;

r_1 —— 负载电阻 (Ω) ;

r_i —— 回路中联线电阻 (Ω) 。

二、电阻的串联与并联

(一) 电阻的串联

当几个电阻串联时（见图2-1-3），其等值电阻等于各个电阻的和。

即

$$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n. \quad (2-1-3)$$

(二) 电阻的并联

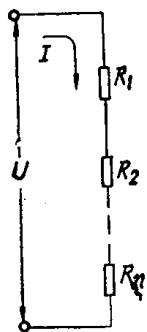


图 2-1-3 电阻的串联

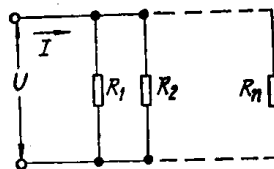


图 2-1-4 电阻的并联

当几个电阻并联时（见图2-1-4），其等值电阻的倒数等于各并联电阻倒数的和。

即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}. \quad (2-1-4)$$

三、克希荷夫定律

(一) 克希荷夫第一定律

对任意结点而言，流入（或流出）该结点的电流的代数和恒等于零。

即

$$\Sigma I = 0. \quad (2-1-5)$$

如图2-1-5所示，在结点A上，当假定流入结点的电流为正时，则有：

$$\Sigma I = I_1 - I_2 + I_3 - I_4 + I_5 = 0.$$

(二) 克希荷夫第二定律

循任一固定方向，沿任一回路，其各段电压的代数和恒等于零。

即

$$\Sigma U = 0. \quad (2-1-6)$$

在图2-1-6所示的电路中，回路A-B-C-D有如下关系：

$$\sum U = U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} + U_{DA} = 0.$$

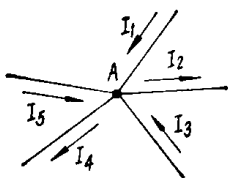


图 2-1-5 克希荷夫第一定律示例

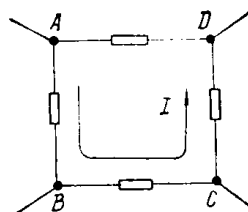


图 2-1-6 克希荷夫第二定律

四、叠加原理

在线性电路中，当有两个或两个以上电源（如电动势或电压、电流）同时作用时，在任一部分的作用效果，等于每个电源单独作用而其它电压电源短路、其它电流电源开路时，在该部分所产生的同类（如电压、电流）作用效果的代数和。

在图2-1-7,a所示的电路中，欲求电流 I_3 ，则可利用叠加法。首先，由 E_1 单独作用于电路， E_2 视为短路，电路各参数不变（如图2-1-7,b），求得 I_3' ；而后令 E_2 单独作用于电路， E_1 视为短路，电路各参数不变（如图2-1-7,c），求得 I_3'' 。则按叠加原理：

$$I_3 = I_3' + I_3''$$

必须指出，这一原理仅适用于线性电路中电动势、电压和电流之间的关系，而不适用于功率和能量。因为它们和电动势、电压以及电流之间的关系是二次方程的、非线性的。

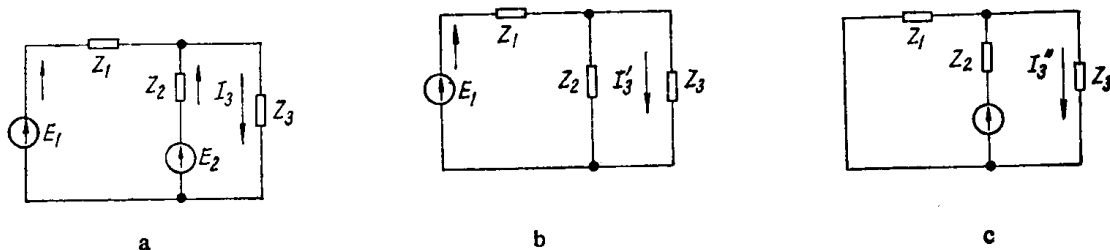


图 2-1-7 叠加原理

五、恒压源与恒流源

理想的恒压源是指具有一定的电源电压 E ，而其内阻等于零的电源。我们在实际工作中所遇到的内阻很小的电源，可以近似地作为理想恒压源，在电路中用 E 表示。

理想的恒流源是指内阻为无穷大，并能输出恒定电流 I 的电源。实际上，一般工程中所用的电流源均可近似地作为理想恒流源。在电路中用 I 表示。

通常，我们所使用的电源都存在一定的内阻，因而其输出电压将随所供电流而有所变化。如图2-1-8所示，这样的电源我们可以看成是由一个恒压源和一个内阻串联组成。如图2-1-8, b所示，这个电源同样也可以看成是由一个恒流源和一个内阻并联组成。

在对负载等效的前提下，图2-1-8,a和图2-1-8,b所示的电路可以互相转换。

图2-1-8,a有：

$$E = I_{sc}R_i + U_{sc}.$$

(2-1-7)

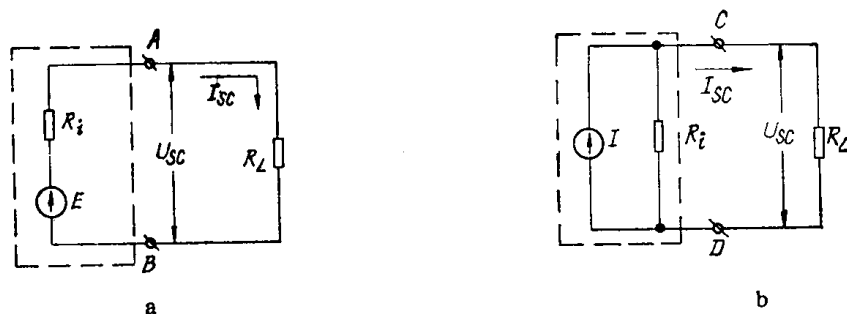


图 2-1-8 串联内阻的恒压源和并联内阻的恒流源的转换

图2-1-8,b有:

$$I = I_{sc} + \frac{U_{sc}}{R_i};$$

或

$$IR_i = I_{sc} R_i + U_{sc}. \quad (2-1-8)$$

在要求图2-1-8, a、b两电路对负载 R_L 等效的条件下, R_i 上的电压和电流相同, 则公式2-1-7、2-1-8应完全相同。则有:

$$E = IR_i \quad \text{或} \quad I = \frac{E}{R_i}. \quad (2-1-9)$$

用公式2-1-9可以把串联内阻 R_i 的恒压源 E 等效地变换为并联内阻 R_i 的恒流源 I , 这时 $I = \frac{E}{R_i}$, 即实际电源的输出端A、B短路时所产生的短路电流就是恒流源的电流 I 。用公式2-1-9同样可将并联电阻 R_i 的恒流源 I 等效地变换成为串联内阻 R_i 的恒压源 E , 这时 $E = IR_i$, 即相当于实际电源输出端C-D的开路(不接负载)电压。

在变换中还应注意电源的极性, 即恒压源的正极应和恒流源流出的一端相对应。

任何具有两个出线头的部分电路均称为二端网络, 根据其内部是否含有电源, 再分成有源二端网络与无源二端网络。

任一复杂的有源二端网络(见图2-1-9,a)总可以用一个恒压源 E 和内阻抗 Z_i 相串联的有源支路(见图2-1-9,b)来代替。 E 是有源二端网络的开路电压 U_0 ; Z_i 是有源二端网络的输入阻抗。这就是有源二端网络定理, 又称等效发电机原理或戴维南定理。

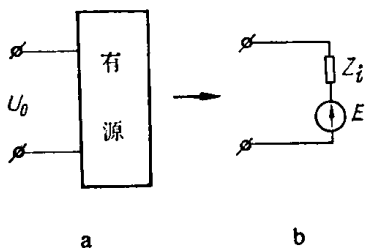


图 2-1-9 有源二端网络

在上述定理中, E 可以通过实验法或采用电路计算法求得。计算时必须将有源二端网络与外部电路断开。输入阻抗 Z_i 的计算方法则有两种, 其一是用阻抗的串、并联式星形-三角形互换来化简求出。但是计算时, 必须将网络与外部电路断开, 将其内部所有的电动势都等于零, 并保持其内部参数不变。输入阻抗的另一个计算方法是开路短路法。根据等效一致的原理, 图2-1-9,a所示的有源二端网络和图2-1-9,b所示的等效有源支路, 应有相同的开路电压 U_0 和短路电流 I_s 。因此, 只要将有源二端网络的两个出端短路, 算出短路电流 I_s 。(它同样是等效有源支路的 I_s), 再按公式2-1-10计算出 Z_i 。

$$Z_i = \frac{E}{I_s} = \frac{U_0}{I_s}. \quad (2-1-10)$$

第二节 半导体器件

一、晶体二极管

(一) 半导体的导电性能

自然界的物质按其导电能力的不同，一般可以相对地分为导体、绝缘体和半导体三类。金、银、铜、铝及某些合金等都是很好的导电材料，通常称它们为导体；陶瓷、橡胶、石英玻璃、云母、塑料、变压器油以及环氧树脂等材料，导电性能很差，我们称之为绝缘体；还有一类物质如锗和硅等，其导电性能介于导体和绝缘体之间，这就是人们常说的半导体。

半导体的导电能力除介于导体和绝缘体之间以外，还易于受温度、光照、电场和杂质等外界因素的影响，这是半导体特有的性质。

不含杂质的半导体称为本征半导体。在本征半导体中，其原子的外层电子-价电子，既不象导体那样易于挣脱原子核的束缚，又不象绝缘体那样被束缚的很紧。半导体原子外层的每一个价电子都和邻近原子成对地联结在一起，组成共价键。在温度升高的影响下，受共价键束缚的电子受热激发获得足够的能量。这样，少量的价电子就会摆脱束缚而成为自由电子，同时在原来共价键的位置上留下了一个空位，这个空位叫做空穴（见图2-2-1）。这就是说在本征半导体中有一个自由电子就有一个空穴。自由电子和空穴总是成对出现的。

在室温下，当我们在一块本征半导体两端加上电压时（见图2-2-1），自由电子将跑向正极，空穴将移向负极。于是，电路中就形成了电流。显然，在本征半导体中同时存在着两种导电现象-电子型导电和空穴型导电，但流过外电路的电流是电子电流和空穴电流的代数和。由于自由电子和空穴的移动起了运载电流的作用，故我们把自由电子和空穴又叫做载流子。在本征半导体中，受热激发而形成的电子-空穴对是非常少的。因此，在图2-2-2的电路中流过的电流甚微（常用 μA 即 10^{-6}A 或 $\text{m}\mu\text{A}$ ，即 10^{-9}A 来计量）。由于它对温度的敏感性，使其在温度升高时电流增加。

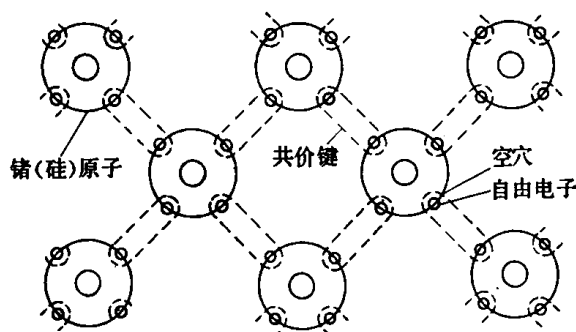


图 2-2-1 本征半导体晶体粒中原子的排列

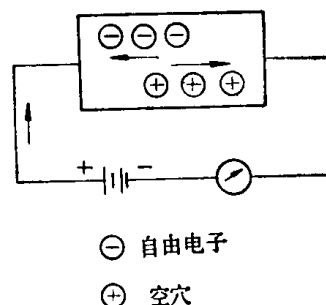


图 2-2-2 本征半导体中电荷的移动

(二) 晶体管的基本结构——PN结

由于本征半导体的导电能力很差，一般实用价值不大。但如在本征半导体中掺入适量的其它元素——杂质，就可以使其获得重要的用途。例如，硅晶体中掺入少量的三价元素硼，则在硅晶体中将产生大量的空穴。这种半导体主要靠空穴导电，所以叫做空穴型半导体，简称P型半导体。必须指出，在P型半导体中除掺入杂质产生的空穴以外，也还存在着热