

电气控制柜设计·制作·维修技能丛书

# 电气控制柜设计制作

## —— 电路篇

任清晨◎主 编



★内容专业      ★讲解翔实  
★源于实践      ★提升技能



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

电气控制柜设计·制作·维修技能丛书

# 电气控制柜设计制作 ——电路篇

任清晨 主 编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

“电气控制柜设计·制作·维修技能丛书”一共3册，全面介绍了电气控制柜电路设计、制作工艺及维护维修的全过程。

本书是丛书的第一分册，重点针对电气控制柜的电路设计，讲解了电气控制技术的发展，电气控制柜使用条件及主要性能指标，影响电气控制柜制作的因素，电气控制柜设计制作的原则、电路设计规范、电路图的设计方法及注意事项，元器件的选择原则和使用方法等。

本书内容丰富，注重实践，并将电气控制柜设计制作的相关国家标准、工艺规范融入各章节中，适合电气控制设备生产企业的设计人员（主要负责电路设计），以及各行业中电气设备的使用和维护技术人员参考阅读，也可作为相关职业技术培训机构的培训教材。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目（CIP）数据

电气控制柜设计制作. 电路篇 / 任清晨主编. —北京：电子工业出版社，2014.10  
（电气控制柜设计·制作·维修技能丛书）  
ISBN 978-7-121-24340-0

I. ①电… II. ①任… III. ①电气控制装置—控制电路 IV. ①TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字（2014）第213901号

策划编辑：陈韦凯

责任编辑：张京

印刷：北京季蜂印刷有限公司

装订：北京季蜂印刷有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开本：787×1092 1/16 印张：22.75 字数：612千字

版次：2014年10月第1版

印次：2014年10月第1次印刷

印数：3500册 定价：49.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn)，盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线：（010）88258888。

# 前 言

电是一种绿色环保型二次能源，电的使用使科学技术得到了飞速的发展，同时使人类的生产、生活水平得到了极大的提高。当今世界上如果没有电，人类的生产、生活将会一团糟，情况将难以想象。为了更好地使用电这种能源，人类一天也没有停止过对其特性及其应用技术的研究。为了更好地利用电能，全世界的所有全科大学、工科院校和职业技能培训机构几乎毫无例外地都开设了电气专业的课程。虽然电可以造福人类，但是在使用电能的同时，电能对使用者也具有极大的危害和潜在的风险。利用机柜作为电气控制装置的外壳进行安全防护，就构成了电气控制柜。

电气控制设备是人类使用电能为自身服务的工具和桥梁。人类从利用电能的第一天起从未停止过对电气控制设备的研究，使电气控制设备及其性能日臻完善。电气控制设备的使用遍及人们生产、生活的各个角落和各行各业。电气控制柜的设计和制作工艺技术水平，直接影响着人类使用电能为自身服务的水平和质量。因此，提高电气控制柜的设计和制作的从业人员及欲加入电气控制设备制造行业的人员的技术工艺水平，具有十分重要的意义。

“电气控制柜设计·制作·维修技能丛书”以很自然的方式，将电气控制柜制作的前人经验及相关国家标准和工艺规范的具体内容融入各章节中，拥有本丛书可以省去查阅相关国家标准和各种手册的大量时间，基本可以做到一书在手即可解决电气控制柜制作中的几乎全部问题。本丛书的特点是以国家标准为主线，避开行业问题及与生产无关的纯理论问题，重点介绍各行各业均适用的电气控制柜设计制作的实用生产技术和职业能力。对于电气控制设备生产企业的从业人员和电气控制设备使用企业的维护修理人员来讲，本丛书是一套工具书；对于大专院校和职业技术学院电气专业在校学生来讲，本丛书是一套教辅参考书，可以有效地提高毕业生的工作能力和就业竞争力；对于职业技术培训机构和自学成才者来讲，本丛书是不可多得的教材。

“电气控制柜设计·制作·维修技能丛书”由3个分册组成：第一分册《电气控制柜设计制作——电路篇》，第二分册《电气控制柜设计制作——结构与工艺篇》，第三分册《电气控制柜设计制作——调试与维修篇》，三个分册构成一个比较完整的体系。本书是丛书的第一分册，主要讲解电气控制技术的发展、电气控制柜使用条件及主要性能指标、影响电气控制柜制作的因素、电气控制柜设计制作的原则、电路设计规范、电路图的设计方法及注意事项、元器件的选择原则和使用方法。学习本丛书前，最好先学习一些机械基础知识、电工电子技术基础知识和液压基础知识，这样会收到事半功倍的学习效果。

本书由任清晨主编，魏俊萍、王维征、刘胜军、任江鹏、李宏宇、曹广平、赵丽也参与了部分书稿的编写工作。在编写过程中，查阅了大量的相关国家标准和出版物，并且阅读了互联网上的相关文章，这些出版物和文章为本书的编写提供了大量的素材，在此向这些文章的作者表示衷心的感谢。本书内容经过中国科学院电工所科诺伟业公司武鑫博士、天威保变风电公司鲁志平总工程师审阅，在此向二位专家表示衷心的感谢。

编 者

# 目 录

第 1 章 电气控制	(1)	1.2.3.5 绝缘电阻与介电性能	(25)
1.1 概述	(1)	1.2.3.6 温升	(26)
1.1.1 电气控制技术发展简史	(1)	1.2.3.7 EMC 环境	(26)
1.1.1.1 人类历史的科学技术发展简史	(1)	1.2.3.8 噪声	(26)
1.1.1.2 近代工业革命的三大阶段	(1)	1.2.4 智能型控制设备要求	(26)
1.1.1.3 电气控制无处不在	(6)	1.2.4.1 一般要求	(26)
1.1.2 电气控制	(7)	1.2.4.2 功能要求	(26)
1.1.2.1 什么是电气控制技术	(7)	1.3 影响电气控制柜制作的因素	(27)
1.1.2.2 电气控制设备	(7)	1.3.1 电气控制柜的制作方式	(27)
1.1.2.3 电气控制设备的智能化	(10)	1.3.1.1 生产类型	(27)
1.1.3 电气控制技术发展的几个阶段	(10)	1.3.1.2 不同生产类型的工艺特点	(28)
1.1.3.1 开关控制电器阶段	(10)	1.3.2 客户的要求	(29)
1.1.3.2 继电控制电器阶段	(11)	1.3.2.1 执行标准	(29)
1.1.3.3 数字逻辑控制阶段	(13)	1.3.2.2 控制要求	(30)
1.1.3.4 电子计算机控制阶段	(13)	1.3.2.3 可靠性要求	(32)
1.1.4 控制设备的分类	(14)	1.3.2.4 寿命要求	(32)
1.1.4.1 电气控制设备的分类	(15)	1.3.2.5 安全性要求	(32)
1.1.4.2 电气控制设备的特性	(15)	1.3.3 使用条件	(33)
1.2 电气控制柜使用条件及主要性能		1.3.3.1 环境对电气控制设备的影响	(33)
指标	(16)	1.3.3.2 机械因素对电气控制设备的	
1.2.1 正常使用条件	(16)	影响	(33)
1.2.1.1 周围空气温度	(17)	1.3.4 设备条件和技术水平	(34)
1.2.1.2 海拔	(17)	1.3.5 技术文件与标志	(34)
1.2.1.3 湿度	(17)	1.3.5.1 技术文件	(35)
1.2.1.4 污染等级	(17)	1.3.5.2 标志	(37)
1.2.1.5 振动、冲击和碰撞	(18)	1.4 电气控制柜设计制作的原则	(38)
1.2.1.6 供电电源	(18)	1.4.1 技术设计的一般原则	(38)
1.2.1.7 电磁兼容性 (EMC)	(18)	1.4.2 安全设计原则	(39)
1.2.1.8 运输、储存和安置条件	(19)	1.4.2.1 人员和财产的安全性	(39)
1.2.1.9 安装条件	(19)	1.4.2.2 电气产品安全设计基本要求	(40)
1.2.2 特殊使用条件	(19)	1.4.2.3 电气产品有哪些安全风险	(41)
1.2.3 工作性能指标	(19)	1.4.2.4 应首先采用改变产品的危险性	
1.2.3.1 额定工作制	(19)	特征的方法消除安全隐患	(42)
1.2.3.2 主电路的额定值和极限值	(20)	1.4.2.5 安全技术措施选择顺序	(42)
1.2.3.3 正常负载和过载特性	(24)	1.4.2.6 进行电路设计和结构设计时安	
1.2.3.4 短路特性	(24)	全性设计的优选顺序	(42)



1.4.2.7	安全设计必须考虑环境条件和应 用条件, 特别应考虑特殊条件··	(42)	2.2.2.2	逻辑设计法·····	(80)
1.4.2.8	安全设计必须考虑设备在制造 过程中的安全·····	(43)	2.3	电路设计的注意事项·····	(84)
1.4.2.9	电气控制设备安全设计方法··	(43)	2.3.1	电气控制电路设计中应注意的 问题·····	(84)
1.4.3	可靠性设计原则·····	(48)	2.3.2	PLC 控制系统设计的注意事项···	(94)
1.4.3.1	系统的整体可靠性原则·····	(48)	2.3.2.1	PLC 控制系统设计的基本 原则·····	(94)
1.4.3.2	高可靠性组成单元要素原则··	(48)	2.3.2.2	PLC 控制系统设计的基本 内容·····	(94)
1.4.3.3	具有安全系数的设计原则····	(48)	2.3.2.3	PLC 控制系统设计的一般 步骤·····	(95)
1.4.3.4	高可靠性方式原则·····	(48)	2.3.2.4	PLC 机型的选择·····	(96)
1.4.3.5	元器件的选择对机电产品可靠 性的影响·····	(49)	2.3.3	单片机控制电路设计的注意事项··	(98)
1.4.4	节能环保绿色设计原则·····	(49)	2.3.3.1	单片机控制电路设计的基本 要求·····	(98)
1.4.4.1	环保型材料的利用·····	(49)	2.3.3.2	单片机 (MCU) 选择设计 要求·····	(99)
1.4.4.2	节约能源设计·····	(50)	2.3.3.3	电源部分的设计要求·····	(99)
1.4.5	控制功能设计原则·····	(51)	2.3.3.4	时钟设计要求·····	(100)
1.4.6	可加工性、可装配性和可维修性 设计原则·····	(52)	2.3.3.5	I/O 口设计要求·····	(100)
<b>第 2 章</b>	<b>电气原理图设计·····</b>	<b>(54)</b>	2.3.3.6	上/下拉电阻要求·····	(100)
2.1	电气控制系统设计概述·····	(54)	2.3.3.7	通信接口·····	(100)
2.1.1	控制系统概述·····	(54)	2.4	元器件的选择原则·····	(101)
2.1.2	自动控制系统·····	(56)	2.4.1	控制电器·····	(101)
2.1.2.1	自动控制系统的组成·····	(56)	2.4.1.1	控制电器的作用·····	(101)
2.1.2.2	自动控制系统的分类·····	(56)	2.4.1.2	常用低压电器的主要种类和 用途·····	(102)
2.1.2.3	自动控制系统的性能要求····	(57)	2.4.2	开关器件和元件的选择·····	(102)
2.1.2.4	自动控制线路的基本组成····	(58)	2.4.2.1	开关器件和元件的选用原则··	(103)
2.1.2.5	常用控制方法·····	(59)	2.4.2.2	器件封装结构和质量等级的 选择·····	(103)
2.1.3	电气控制设备设计的原则与内容··	(60)	2.4.2.3	降额设计·····	(103)
2.1.3.1	电气控制设备设计的一般 原则·····	(60)	2.4.3	开关器件和元件参数的选择····	(104)
2.1.3.2	电气控制设备设计的任务及 内容·····	(60)	2.4.3.1	在空载、正常负载和过载条 件下接通、承载和分断电流 的能力·····	(104)
2.1.4	电气控制设备设计的一般步骤···	(61)	2.4.3.2	接通、承载和分断短路电流 的能力·····	(105)
2.1.5	电动机拖动方案的确定方法····	(68)	2.4.3.3	通断操作过电压·····	(105)
2.2	电路图的设计方法·····	(71)	2.4.3.4	开关器件及元件动作条件···	(106)
2.2.1	电气控制电路设计概述·····	(71)			
2.2.1.1	电气原理图设计的内容·····	(71)			
2.2.1.2	电气原理图设计的基本步骤··	(73)			
2.2.2	电气原理图的设计方法·····	(73)			
2.2.2.1	经验设计法·····	(73)			

2.4.3.5	操动器	(107)	3.3	电路原理图的绘制	(147)
2.4.3.6	触点位置指示	(107)	3.3.1	电气制图规则	(147)
2.4.3.7	适用于隔离的电器的附加 要求	(108)	3.3.1.1	电路图的组成	(147)
2.4.3.8	具有中性极电器及控制设备 的附加要求	(109)	3.3.1.2	电气原理图符号位置的索引	(148)
2.4.4	控制电器接线端子的选择	(109)	3.3.1.3	元器件的标注方法	(149)
2.4.4.1	接线端子的结构要求	(109)	3.3.1.4	电气原理图的绘制原则	(149)
2.4.4.2	接线端子连接导线的能力	(109)	3.3.2	电气原理图绘制工具	(151)
2.4.4.3	接线端子的连接	(110)	3.3.2.1	CAD 绘图软件	(151)
2.4.4.4	接线端子的识别和标志	(110)	3.3.2.2	CAD 绘图技巧	(151)
2.4.4.5	外接导线端子	(110)	3.3.2.3	CAD 电路原理图的输入方法	(154)
<b>第 3 章</b>	<b>电路设计规范</b>	(112)	3.3.2.4	电气原理图绘制步骤	(155)
3.1	功能电路设计规范	(112)	3.3.2.5	电气原理图绘制注意事项	(156)
3.1.1	电源及引入电源线端接法和切断 开关	(112)	3.3.2.6	对电气原理图的审核	(156)
3.1.1.1	电源	(112)	3.3.3	电气原理图的画法	(157)
3.1.1.2	对电子设备供电电路的要求	(113)	3.3.3.1	概略图的画法	(157)
3.1.1.3	引入电源线端接法和切断 开关	(115)	3.3.3.2	功能图的画法	(157)
3.1.2	控制电路和控制功能	(118)	3.3.3.3	电路图的画法	(158)
3.1.2.1	控制电路	(118)	<b>第 4 章</b>	<b>低压电器的选与用</b>	(159)
3.1.2.2	控制功能	(120)	4.1	断路器的选与用	(160)
3.1.2.3	联锁保护	(124)	4.1.1	断路器的选型	(160)
3.1.2.4	故障情况的控制功能	(125)	4.1.1.1	断路器类型的选择	(160)
3.2	防护电路设计规范	(128)	4.1.1.2	低压断路器技术参数选择 方法	(161)
3.2.1	电击防护的设计	(128)	4.1.1.3	断路器电流参数的标定	(166)
3.2.1.1	概述	(128)	4.1.1.4	断路器选型应注意的其他 问题	(167)
3.2.1.2	直接接触的防护	(129)	4.1.1.5	低压断路器辅助功能的选择 方法	(168)
3.2.1.3	间接接触的防护	(129)	4.1.1.6	低压断路器的附件选择	(169)
3.2.1.4	采用安全超低压 (PELV) 作防护	(132)	4.1.1.7	漏电断路器 (RCD) 的选择	(169)
3.2.2	电气设备的保护与等电位联结	(133)	4.1.1.8	四极塑料外壳式断路器的 选型	(170)
3.2.2.1	电气设备的保护	(133)	4.1.2	断路器的使用注意事项	(171)
3.2.2.2	短路保护与短路耐受强度	(139)	4.1.2.1	容易混淆的概念	(171)
3.2.2.3	等电位联结	(142)	4.1.2.2	影响断路器使用的因素	(171)
3.2.3	电磁兼容性 (EMC) 设计	(144)	4.1.2.3	断路器上下级间配合应注意 的问题	(173)
3.2.3.1	电磁兼容性设计要求	(144)	4.1.2.4	剩余电流动作保护器的正确 应用	(175)
3.2.3.2	提高电磁兼容性 (EMC) 的 措施	(146)	4.1.2.5	四极断路器使用注意事项	(176)

4.2 熔断器的选与用	(176)	4.5.1.1 根据电力电容器用途选择电 容器的类型	(220)
4.2.1 熔断器的选择	(176)	4.5.1.2 根据电力电容器的用途选择 电容器的型号	(221)
4.2.1.1 熔断器的选择原则	(176)	4.5.1.3 电力电容器额定电压的正确 选择	(221)
4.2.1.2 熔断器熔体电流的计算方法	(178)	4.5.1.4 移相电容器容量的选定	(222)
4.2.1.3 查表法定选熔体额定电流	(181)	4.5.1.5 根据工作电压选择使用油浸 电容器还是自愈式电容器	(223)
4.2.2 熔断器的使用注意事项	(183)	4.5.2 电力电容器的使用注意事项	(223)
4.2.2.1 熔断器和断路器的比较	(183)	4.5.2.1 环境影响电力电容器的使用 寿命	(223)
4.2.2.2 电气控制设备保护方案的 选择	(184)	4.5.2.2 电力电容器的电气保护	(224)
4.2.2.3 熔断器使用注意事项	(184)	4.5.2.3 电力电容器的接通和断开	(225)
4.3 接触器的选与用	(185)	4.5.2.4 电力电容器的放电	(226)
4.3.1 接触器的选型	(185)	4.5.2.5 电力电容器的补偿方式	(226)
4.3.1.1 按负载种类选择接触器的 类型	(185)	4.6 热电阻及热电偶的选与用	(226)
4.3.1.2 根据被控制设备的运行状况 来选定额定电流	(191)	4.6.1 热电阻与热电偶的选型	(226)
4.3.1.3 接触器结构形式的选择	(192)	4.6.1.1 热电阻与热电偶的选择	(226)
4.3.1.4 接触器的额定电压的选定	(192)	4.6.1.2 热电阻与热电偶选型流程	(226)
4.3.1.5 选定后的校验	(193)	4.6.1.3 热电阻与热电偶选型技巧	(227)
4.3.1.6 短路保护元件	(193)	4.6.1.4 其他主要参数选择	(230)
4.3.2 接触器的使用注意事项	(194)	4.6.1.5 配套温度检测仪的选用	(231)
4.3.2.1 接触器和继电器的用法和 区别	(194)	4.6.2 热电阻与热电偶的使用注意 事项	(231)
4.3.2.2 交流接触器、固态继电器及 无触点接触器的区别	(195)	4.6.2.1 热电阻与热电偶的比较	(231)
4.3.2.3 影响接触器使用的因素	(196)	4.6.2.2 热电阻与热电偶使用注意 事项	(232)
4.4 继电器的选与用	(197)	4.6.2.3 热电偶补偿导线使用注意 事项	(233)
4.4.1 继电器的选型	(197)	4.7 可编程序控制器 (PLC) 的选与用	(235)
4.4.1.1 电磁继电器选型	(198)	4.7.1 PLC 的选型方法	(235)
4.4.1.2 固态继电器 (SSR) 的选用	(201)	4.7.1.1 输入/输出 (I/O) 的选择	(235)
4.4.1.3 热继电器的选型及整定原则	(203)	4.7.1.2 PLC 程序存储器类型及容量 选择	(238)
4.4.1.4 时间继电器的选用	(206)	4.7.1.3 控制功能的选择	(239)
4.4.2 继电器的使用注意事项	(206)	4.7.1.4 机型的选择	(242)
4.4.2.1 继电器在使用中的整体要求	(206)	4.7.1.5 软件选择及支撑技术条件的 考虑	(244)
4.4.2.2 触点使用中的注意事项	(207)	4.7.1.6 PLC 的环境适应性	(245)
4.4.2.3 线圈使用中的注意事项	(211)		
4.4.2.4 固态继电器使用注意事项	(216)		
4.4.2.5 热继电器使用注意事项	(218)		
4.5 电力电容器的选与用	(220)		
4.5.1 电力电容器的选型	(220)		



4.7.1.7	PLC 输出类型的选择及使用	(245)		选用	(278)
4.7.1.8	选型需要考虑的其他问题	(246)	5.3.1.2	二极管管型的选择原则	(279)
4.7.2	PLC 使用中应注意的事项	(247)	5.3.1.3	选好二极管的各项主要技术 参数	(280)
4.7.2.1	PLC 配线要求	(247)	5.3.1.4	选好二极管的外形、尺寸大 小和封装形式	(281)
4.7.2.2	I/O 端的接线要求	(248)	5.3.1.5	确定二极管型号	(281)
4.7.2.3	24V 直流接线端	(249)	5.3.2	二极管的使用注意事项	(281)
4.7.2.4	电源接线	(249)	5.3.2.1	二极管普遍适用的注意事项	(281)
4.7.2.5	PLC 输出负载的影响	(249)	5.3.2.2	使用稳压二极管时的注意 事项	(282)
第 5 章	电子元器件的选与用	(251)	5.3.2.3	LED 发光二极管使用注意 事项	(283)
5.1	电阻器的选与用	(251)	5.3.2.4	开关二极管的使用注意事项	(285)
5.1.1	电阻的选型	(251)	5.3.2.5	瞬态抑制二极管 (TVS) 在 使用中应注意的事项	(286)
5.1.1.1	固定电阻的选型	(252)	5.4	三极管的选与用	(287)
5.1.1.2	电位器的选型	(256)	5.4.1	晶体三极管的选用原则	(287)
5.1.1.3	压敏电阻的选型	(257)	5.4.1.1	双极型晶体管和场效应管的 比较和选择	(287)
5.1.1.4	热敏电阻的选型	(258)	5.4.1.2	根据三极管在电路中的作 用进行选用	(288)
5.1.1.5	光敏电阻器的选用	(259)	5.4.1.3	三极管特性参数的选用	(290)
5.1.1.6	湿敏电阻器的选用	(260)	5.4.2	三极管的使用注意事项	(291)
5.1.1.7	熔断电阻器的选用	(260)	5.4.2.1	晶体管参数在实际使用中的 意义	(291)
5.1.2	电阻的使用注意事项	(260)	5.4.2.2	晶体三极管使用注意事项	(292)
5.1.2.1	压敏电阻、热敏电阻及熔断 器的比较	(260)	5.4.2.3	场效应管使用注意事项	(295)
5.1.2.2	压敏电阻的使用注意事项	(261)	5.5	集成电路的选与用	(296)
5.1.2.3	热敏电阻的使用注意事项	(265)	5.5.1	集成电路的选型	(296)
5.2	电容器的选与用	(266)	5.5.1.1	集成稳压器的选择	(296)
5.2.1	电容器的选型	(266)	5.5.1.2	运算放大器的选择	(296)
5.2.1.1	电容器类型的选择	(266)	5.5.1.3	DC-DC 变换器芯片选择	(299)
5.2.1.2	电容器参数选择	(267)	5.5.1.4	数字逻辑集成电路的选择	(301)
5.2.1.3	根据使用环境选择合适型 号的电容器	(271)	5.5.2	集成电路的使用注意事项	(302)
5.2.1.4	电容选择中的一些误区	(271)	5.5.2.1	集成电路通用的注意事项	(302)
5.2.2	电容器的使用注意事项	(272)	5.5.2.2	TTL 集成电路使用应注意的 问题	(304)
5.2.2.1	影响电容器使用的主要因素	(272)	5.5.2.3	CMOS 集成电路使用应注意 的问题	(305)
5.2.2.2	使用电容器应避免的场合	(273)			
5.2.2.3	多片陶瓷电容器 (MLCC) 使用注意事项	(274)			
5.2.2.4	电解电容器使用注意事项	(275)			
5.2.2.5	电容器的串联和并联	(277)			
5.3	二极管的选与用	(278)			
5.3.1	二极管的选用	(278)			
5.3.1.1	根据具体电路的功能要求				

5.5.2.4 集成电路的接口电路·····	(308)	5.7.1.1 选择晶闸管的类型·····	(322)
5.5.3 不同用途集成电路的使用注意 事项·····	(310)	5.7.1.2 晶闸管主要参数的选择·····	(322)
5.5.3.1 集成稳压器的使用注意事项··	(310)	5.7.1.3 不同用途晶闸管的选用·····	(324)
5.5.3.2 集成运算放大器的使用注意 事项·····	(311)	5.7.2 晶闸管的使用注意事项·····	(327)
5.5.3.3 数字逻辑集成电路使用注意 事项·····	(312)	5.7.2.1 晶闸管的保护·····	(327)
5.6 光电耦合器的选与用·····	(313)	5.7.2.2 在高海拔、低温条件下的使 用注意事项·····	(332)
5.6.1 光电耦合器的选型·····	(313)	5.7.2.3 晶闸管串、并联使用要求·····	(332)
5.6.1.1 光电耦合器的选用原则·····	(314)	5.7.2.4 晶闸管检测注意事项·····	(334)
5.6.1.2 光电耦合器类型的选择·····	(314)	5.7.2.5 晶闸管模块使用注意事项·····	(334)
5.6.1.3 光电耦合器参数的选择·····	(315)	5.8 IGBT 的选与用·····	(335)
5.6.2 光电耦合器的使用注意事项·····	(317)	5.8.1 IGBT 的选型·····	(335)
5.6.2.1 光电耦合器使用时必须考虑 的问题·····	(317)	5.8.1.1 IGBT 选型程序·····	(335)
5.6.2.2 影响电流传输比(CTR)的 因素·····	(320)	5.8.1.2 IGBT 参数的选择·····	(335)
5.6.2.3 光电耦合器延时·····	(321)	5.8.1.3 IGBT 模块的选择·····	(336)
5.6.2.4 光电耦合器使用时的其他注 意事项·····	(321)	5.8.1.4 IGBT 驱动器的选型·····	(339)
5.7 晶闸管的选与用·····	(322)	5.8.2 IGBT 模块使用时的注意事项·····	(340)
5.7.1 晶闸管的选用·····	(322)	5.8.2.1 IGBT 的栅极保护·····	(340)
		5.8.2.2 IGBT 的过压保护设计·····	(344)
		5.8.2.3 IGBT 的过流保护电路设计··	(346)
		5.8.2.4 过热保护·····	(349)
		5.8.2.5 串、并联问题·····	(349)
		参考文献·····	(352)

# 第1章 电气控制

## 1.1 概述

### 1.1.1 电气控制技术发展简史

任何技术和技能的发展都源于人类生产和生活的需要及人类在生产活动和生活中创造发明的长期积淀。因此，了解人类历史的科学技术发展史、近代工业革命的历史和电气控制技术发展的几个阶段，有助于对电气控制技术的学习。

#### 1.1.1.1 人类历史的科学技术发展简史

科学技术在人类历史的长河中出现了5次大的飞跃，变革了历史的发展进程。

第一次是取火技术的发明和应用，结束了人类的野蛮时代，进入了文明时代。

第二次是农业技术体系的形成，使人类的生产生活进入稳定的农业文明时代，形成自给自足的农业经济。

第三次是蒸汽机的发明和应用，机械技术的应用使人类进入工业社会时代。

第四次是电的发明和应用，电气技术的应用使人类进入电气文明时代。

第五次是核能和电子技术的发明和应用，促进了高科技产品的诞生，使人类的生活发生了亘古未有的巨大变化。

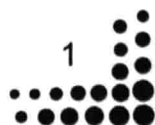
#### 1.1.1.2 近代工业革命的三大阶段

##### 1. 第一次工业革命

早期的工业生产，除人力之外只有以畜力、风力或水力作为动力。人类为了生存及生活得更美好，在同自然界的斗争中深感自己的渺小和无力，总是梦想自己能够具有大象般的力量和骆驼一样的耐力。

在18世纪60年代前后开始于英国的工业革命称为第一次工业革命，又称为产业革命或第一次科技革命。1788年瓦特发明了蒸汽机，蒸汽机的发明实现了人类多年的愿望，解决了动力来源问题，最终导致了产业革命，使生产力得到了巨大发展。这是近代以来的第一次世界性技术革命。

机械动力的使用，第一次有可能把人类从繁重的劳动中解放出来，使生产效率得到了极大的提高。以蒸汽机的发明和应用为主要标志，从此人类进入“机械时代”。具有良好的自动控制



系统是蒸汽机得以成功应用的必要条件之一，它标志着机械自动化领域技术化和理论化阶段的开始。蒸汽机上的离心式自动调速装置是机械式自动控制系统的代表（见图 1.1.1）。但由于每个需要动力的工厂必须安装锅炉、蒸汽机、笨重的皮带轮轴传动装置，还需要自己解决燃料来源及运输等问题，仍然很不方便。

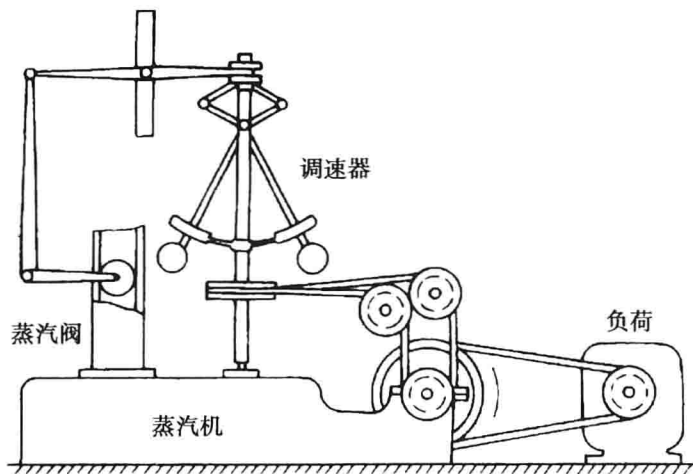


图 1.1.1 瓦特蒸汽机上的离心调速机构

机械装置是由轴、齿轮、凸轮、皮带、杠杆等机械零件组成的，机械钟表是人们日常生活中最常见的机械装置，利用机械装置可以实现生产机械的自动化。但是机械自动化具有其天然的缺陷：一是机械动力无法远距离传输；二是机械装置无法进行远距离控制；三是机械装置全部是刚性结构，一经制成便无法改变，只能完成特定的功能，也就是说没有柔性。这些原因阻碍了机械自动化的进一步发展。直到电气自动化技术与其相结合，机械自动化才进入了第二个春天。

## 2. 第二次工业革命

“电”是一个与人们生活息息相关、密不可分的事物，人们从一开始对它恐惧到逐渐认识，再到加以利用，经历了一个漫长的过程，“电”也因此改变了人类的命运。电的发明和利用，促进了人类制造技术的发展，而以制造业为基础的工业文明，使得人类社会进入了一个崭新的时代。

19 世纪的第二次世界性技术革命是以电的发明和电力的广泛运用而开始的，大致发生在我国清朝光绪到“中华民国”这段时间。电的发明和应用是大批科学工作者在一段时期内通过不解的努力取得的成果，从此使人类进入“电气时代”。

所谓“电气时代”，是指以电能作为一种主要的能量形式支配着社会经济生活。电能的突出优点在于：第一，它是一种易于传输的工业动力；第二，它还是极为有效、可靠的信息载体。因此，电力时代主要体现在动力传输与信息传输两个方面。与动力传输相关联，出现了大型发电机、高压输电网、各种各样的电动机和照明电灯；与信息传输相关联，出现了电报、电话和无线电通信。这些伟大的发明使人类的生活进入了一个更光明、更美好的新时期。

早在我国东汉时期，王充在《论衡》一书中提到“顿牟掇芥”等问题。在公元前 585 年，古希腊哲学家塞利斯已经发现了摩擦过的琥珀能吸引碎草等轻小物体。到 1660 年，马德堡的盖利克发明了第一台摩擦起电机；1745 年，荷兰人发明蓄电池；1819 年，丹麦科学家奥斯特就发现了电流的磁效应现象。1820 年，法国科学家安培根据奥斯特的报告，对磁场与电流之间的关



系作了进一步的整理与研究。他认为，两条电线平行放置的时候，电流流动的方向相同时，会相互排斥；相反，则会相互吸引。如果将电线绕成线圈，通电后，线圈就会像自然界的磁石一样。现在，安培的名字已经家喻户晓，成为电流强度单位的名称。大约在同一时期，德国人欧姆发现了电阻定律：导体上存在着一种阻力，随着长度的增加而增加，但随着截面面积的增加而减小。电阻的存在使电流随着电线长度的增加而逐渐减弱。1831年，英国科学家法拉第发现了电磁感应现象，提出了发电机的理论基础。1837年英国发明电报，第二年美国就推广使用了。

1866年，德国工程师西门子制成了发电机；1870年，比利时人格拉姆发明了电动机，电力开始被用来带动机器，成为补充和取代蒸汽动力的新能源。在电力的使用中，发电机和电动机是相互关联的两个重要组成部分。发电机将机械能转化为电能；电动机则将电能转化成机械能。1876年贝尔发明了电话；1879年爱迪生发明了世界上第一只实用的白炽灯，从此将光明带进人们的生活。随后，电灯、电话、电焊、电钻、电车、电报等如雨后春笋般涌现出来。各种电动生产工具和生活用具的出现，导致了对电的大量需求。

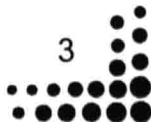
把电力应用于生产，必须解决远距离输送问题。1876年，俄国出现了街道及家庭的电力照明。1882年，法国学者德普勒发现了远距离送电的方法。同年，美国著名发明家爱迪生在纽约创建了美国第一个火力发电站，把输电线连接成网络。随着对电能需求的显著增加和用电区域的扩大，直流电动机显示出成本高、易出事故等缺点。从19世纪80年代起，人们又投入了对交流电的研究。交流电具有通过变压器任意变化电压的长处，使输电效率达到80%以上，最早较大规模使用交流电是在电力照明中的应用。1885年，意大利科学家法拉第提出的旋转磁场原理，对交流电机的发展起到了重要作用。19世纪80年代末90年代初，人们研制出三相异步发电机，这种比较经济、可靠的三相交流电机迅速得到推广。

电、电流、电磁感应和电磁波的发明和应用，以及电力传输的成功，是使电力取代蒸汽动力的重大突破，它使电力很快成为广泛应用的能源和动力。电力工业的发展进入新的阶段。电力照亮了城市和农村，为工厂和矿山提供了方便、灵活的强大动力，成为生产、交通运输、通信等全面转向工业化的决定因素。

随着发电厂的建立，需要有通、断大电流且耐受高压的断路器设备。20世纪20年代最简单的断路器是金属棒与盛有水银的容器。接通时就将金属棒插入水银中，断开时将棒提起。这种开关比较笨重，价钱也很贵，使用时要操动几次才能保证接触良好。这迫使人们寻求更好的办法。除了在接通后开关触点要接触良好之外，随着功率和电流的增大，断路器断开时会产生火花（称为电弧）。电弧的高温可以使触点烧环，甚至熔化，造成伤人或火灾。因此必须设法使电弧及早熄灭，使电路得以分断成功。1893年，M.O.多里沃-多布罗夫斯基发明了电磁断路器，1895年，英国费朗梯取得油断路器专利。

通常采用多台机组、多个发电站（包括水力及火力电厂），用输电线连接成网，形成了由众多发电站、输电线、变电所、配电网及广大用户组成的电力系统。电力系统在负荷上能互相支援，故障中有多路供电，使电能的供应更为安全可靠、经济高效。

电力系统中为了减小事故造成的损失，保护人身及设备的安全，必须有保护设施。最早的保护设备只是简单的熔断器、避雷器、断路器等。随着机组的加大和电压等级的提高，陆续研制出各种继电器及量测设备，组成保护电路，“继电保护”已经发展成为电厂中的一种专门技术。直到现在人们的技术水平还不能完全适应需要，包括欧美工业发达的国家，也一再出现电力系统失控，造成大面积停电。每次故障的损失常以数亿元计算。对电力系统稳定性的研究正在进一步发展中，“继电保护”的市场需求是电气控制技术发展的基础条件。





19 世纪末 20 世纪初，在世界上掀起了电气化的高潮，美国、德国由于最早实现了电气化而迅速进入世界工业强国行列。电力技术的广泛应用，首先促进了电力工业、电气设备工业的迅速发展。以发电、输电、配电这三个环节为主要内容的电力工业产生并发展起来了。发电机、电动机、变压器、断路器及电线、电缆等电气设备制造工业也迅速兴起，同时还促进了材料、工艺和控制等工程技术的发展。电力技术的发展使许多传统产业得到改造，使得一系列新技术应运而生。

### 3. 第三次工业革命

伴随着人类文明的不断前行，人们始终没有停止对电力这种能源的开发与利用，应运而生的电子技术也为人们更好地利用这种能源提供了巨大的帮助，而同样不断发展的客观要求，使得电气产品由传统型向组合化、智能化、高灵敏度和高可靠性方向发展。

第三次工业革命从 20 世纪 40 年代开始，以电子技术的发明和应用为主要标志。

#### 1) 电子管与晶体管

人类在与自然界斗争的过程中，不断总结和丰富着自己的知识。电子科学技术就是在生产斗争和科学实验中发展起来的。1883 年美国发明家爱迪生发现了热电子效应，随后在 1904 年弗莱明利用这个效应制成了电子二极管，并证实了电子管具有“阀门”作用，它首先被用于无线电检波。1906 年美国的德弗雷斯在弗莱明的二极管中放进了第三个电极——栅极而发明了电子三极管，从而建立了早期电子技术史上最重要的里程碑。半个多世纪以来，电子管在电子技术中立下了很大功劳。但是电子管毕竟成本高、制造繁、体积大、耗电多，自 1948 年美国贝尔实验室的几位研究人员发明晶体管以来，在大多数领域中已逐渐用晶体管来取代电子管。但是，不能否定电子管独特的优点，在有些装置中，无论从稳定性，经济性或功率上考虑，还需要采用电子管。

1957 年，美国通用电气公司研制出世界上第一个晶闸管，使半导体技术进入了强电领域。其结构的改进和工艺的改革为新器件的开发和研制奠定了基础。经过近二十年的工艺完善和应用开发，到 20 世纪 70 年代，晶闸管已趋于成熟，形成了从低压小电流到高压大电流的系列产品。同时还派生了不对称晶闸管（ASCR）、逆导晶闸管（RCT）、双向晶闸管（TRIAC）等器件。20 世纪 80 年代末期和 90 年代初期发展起来的，以功率 MOSFET 和 IGBT 为代表的，集高频、高压和大电流于一身的功率半导体复合器件，表明传统电力电子技术已经进入现代电力电子时代。

#### 2) 集成电路

第一个集成电路是在 1958 年见诸于世的。集成电路的出现和应用，标志着电子技术发展到了一个新的阶段。它实现了材料、元件、电路三者之间的统一；同传统的电子元件的设计与生产方式、电路的结构形式有着本质的不同。随着集成电路制造工艺的进步，集成度越来越高，出现了大规模和超大规模集成电路（如可在一块  $6\text{mm}^2$  的硅片上制成一个完整的计算机），进一步显示出集成电路的优越性。集成电路的微型化和高可靠性使分立器件电路相形见绌、望尘莫及。

#### 3) 数字计算机控制技术

##### (1) 数字逻辑控制技术

数字控制是按数字化的代码组成的程序对控制对象实现自动控制的一种方法。



数字控制和数字测量也在不断发展,并得到日益广泛的应用。数字控制机床和“自适应”数字控制机床相继出现。目前利用电子计算机对几十台乃至上百台数字控制机床进行集中控制(所谓“群控”)也已经实现。

#### (2) 计算机控制技术

随着半导体技术的发展和科学研究、生产与管理等的需要,电子计算机应时而兴起,并且日臻完善。从1946年诞生第一台电子计算机以来,已经经历了电子管、晶体管、集成电路及超大规模集成电路四代,运算速度已达每秒千亿次。自从1971年美国Intel公司生产出世界上第一台微处理器Intel 4004以来,微处理器的性能和集成度几乎每两年就提高一倍,价格却大幅度下降。在随后30多年的时间里,微型计算机经历了4位机、8位机、16位机、32位机几个大的发展阶段,目前64位机也已经普遍使用。随着半导体集成电路技术的发展,微型计算机的运行速度越来越快,可靠性大大提高,体积越来越小,功能越来越齐全,成本却越来越低,使微型计算机的应用越来越广泛。微型计算机的出现,在科学技术上引起了一场深刻的变革。现在正在研究和开发第五代计算机(人工智能计算机)和第六代计算机(生物计算机),它们不依靠程序工作,而依靠人工智能工作。

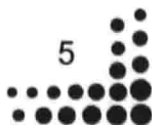
计算机控制是自动控制理论与计算机技术相结合而产生的一门新兴学科,计算机控制技术是随着计算机技术的发展而发展起来的。自动控制技术在许多工业领域获得了广泛的应用,但是由于生产工艺日益复杂,控制品质的要求越来越高,简单的控制理论有时无法解决复杂的控制问题。计算机的应用促进了控制理论的发展,先进的控制理论和计算机技术相结合,推动计算机控制技术不断发展。微型计算机不仅可应用于科学计算、信息处理、办公娱乐、民用产品、家用电器等领域,而且在仪器、仪表及过程控制领域也得到了广泛的应用。仪器、仪表在测量过程自动化、测量结果的数据处理及系统控制等方面有着重要的应用,在许多高精度、高性能、多功能的测量仪器中都采用了微处理器技术。过程控制也是微型计算机应用最多的一个方面,控制对象已从单一的工艺流程扩展到整个企业的生产、管理及现场各种设备的控制中,采用分布式计算机控制,实现了企业的控制和管理一体化,大大提高了企业的自动化程度。

近年来,随着计算机技术、自动控制技术、检测与传感器技术、网络与通信技术、微电子技术、显示技术、现场总线智能仪表、软件技术及自控理论的高速发展,计算机控制的技术水平大大提高,计算机控制系统的应用水平突飞猛进。利用计算机控制技术,人们对现场的各种设备进行远程监控,完成常规控制技术无法完成的任务,微型计算机控制已经被广泛地应用于军事、农业、工业、航空航天及日常生活的各个领域。大到载人航天飞船的研制,小到日用的家用电器,甚至计算机控制的家庭机器人,到处可见计算机控制系统的应用。

#### 4) 计算机网络通信技术

从人类发明电报电话之日起,通信技术就已经产生。现代通信技术主要研究信号的产生、信息的传输、交换和处理,以及在计算机通信、数字通信、卫星通信、光纤通信、计算机网络、个人通信、平流层通信、多媒体技术、互联网技术、数字程控交换等方面的理论和工程应用问题。通信技术是以现代的声、光、电技术为硬件基础,辅以相应软件来达到信息交流目的。通信技术随着现代科学技术水平的不断提高而得到迅速发展。

通信技术是一种以数据通信形式出现,在计算机与计算机之间或计算机与终端设备之间进行信息传递的方式。计算机网络就是将分散的计算机通过通信线路有机地结合在一起,达到相互通信,实现软/硬件资源共享的综合系统。网络是计算机的一个群体,是由多台计算机组成的,



这些计算机是通过一定的通信介质互连在一起的，使得彼此间能够交换信息。

计算机网络控制的功能主要体现在三个方面：信息交换、资源共享、分布式处理。

#### (1) 信息交换

信息交换是计算机网络最基本的功能，主要完成计算机网络中各个节点之间的系统通信。用户可以通过网络传送电子邮件、发布指令、进行监测、电子贸易、远程控制、聊天等。

#### (2) 资源共享

所谓的资源是指构成系统的所有要素，包括软/硬件资源，如计算处理能力、大容量磁盘、高速打印机、绘图仪、通信线路、数据库、文件和其他计算机上的有关信息。由于受经济和其他因素的制约，这些资源并非（也不可能）所有用户都能独立拥有，所以网络上的计算机不仅可以使自身的资源，也可以共享网络上的资源。因而增强了网络上计算机的处理能力，提高了计算机软/硬件的利用率。

#### (3) 分布式处理

一项复杂的任务可以划分成许多部分，由网络内各计算机分别协作并行完成有关部分，使整个系统的性能大为增强。

通信与计算机控制技术的融合，将电气控制技术发展到一个新的阶段。20世纪90年代走向实用化的现场总线控制系统正以迅猛的势头快速发展，是目前世界上最新型的控制系统。现场总线控制系统的出现，正受到国内外自动化设备制造商与用户越来越强烈的关注。多协议、多层次、专业网络、行业总线将是未来十年现场总线发展的方向，应根据应用的场合不同来进行选择，同时支持多种协议的网关芯片也将随着装备技术和芯片技术的发展而日益成熟。

一般过程控制中可能选 PROFIBUS 等，PROFIBUS 可以说是一个很好的块通信协议，相当严谨；具有诊断、参数化、配置、数据交换能力，且在可靠性方面相当完备。PROFIBUS 的最大优点是状态机与通用处理器之间的多缓存结构，使通信的实时性、一致性和可靠性得到了充分的保证。

就目前来说，控制功能的应用仍然是通过有线电缆来完成的。现今的无线技术是对有线技术强有力的补充。在工业过程控制领域，安全、有效的工厂操作总是放在第一位的。无线技术更为可靠、连续、兼容的操作方式将给整个工业界以信心，越来越多的无线控制设备将应用于工厂中。

### 1.1.1.3 电气控制无处不在

早上起来，被用电池驱动的闹钟吵醒，打开电灯，卷起暖和的电热毯，穿好衣服，使用电磁炉加热早餐。走出家门，坐上电车去公司上班，电车司机按照十字路口的红绿灯指示，安全地把您送到目的地。在工作岗位，首先要打开电子计算机查看往来的电子邮件，然后使用打印机或复印机准备会议时需要分发的文件。接着来到会议室打开照明灯光，开始调整投影仪及音响设备。会议结束后，需要到市场车间查看各种数控设备、起重运输设备、检测设备等设备是否运转正常。下班后，立刻打开手机与朋友联络聚餐。

今天的世界已是电的世界，人们几乎没有一天可以离开电。没有电，洗衣机不能用，衣服不能洗净烘干；电视不能看；游戏机不能玩；十字路口的红绿灯不能亮；工厂无法开工；人们吃饭都会遇到困难。如果一天没有电，就会觉得忽然变得无所事事、寸步难行，因为大部分的工作与生活都会受到影响。

没有先进的电气控制技术，就不可能有许许多多的人造卫星在太空翱翔，工厂也不会有完



全自动的无人值守生产线，通信技术只能停留在人工接线阶段，地面上也不可能有高速列车在飞驰。电气控制早已渗透进人们生活及工作的方方面面，电气控制无处不在。

## 1.1.2 电气控制

### 1.1.2.1 什么是电气控制技术

电气控制技术是以各类电力拖动装置与系统为对象，以实现控制过程自动化为目标的控制技术。电气控制系统是自动化系统的主干部分，在国民经济各行业中的许多部门得到了广泛应用，是实现工业生产自动化的重要技术手段。现代化生产的水平、产品的质量和经济效益等各项指标，在很大程度上取决于生产设备的先进性和电气自动化程度。

自动化是人类自古以来永无止境的梦想和追求目标。电气自动化，是指在人类的生产、生活和管理过程中，通过采用一定的电气技术装置和策略，使得仅用较少的人工干预甚至没有人工干预，就能使系统达到预期目的的过程，从而减少和减轻了人的体力和脑力劳动，提高了工作效率、效益和效果。由此可见，电气自动化涉及人类活动的几乎所有领域。

随着科学技术的不断发展、生产工艺的不断改进，特别是计算机技术的应用、新型控制策略的出现，不断改变着电气控制技术的面貌。在控制方法上，从手动控制发展到自动控制；在控制功能上，从简单控制发展到智能化控制；在操作上，从笨重发展到信息化处理；在控制原理上，从单一的有触点硬接线继电器逻辑控制系统发展到以微处理器或微计算机为中心的网络化自动控制系统。现代电气控制技术综合应用了计算机技术、微电子技术、检测技术、自动控制技术、智能技术、通信技术、网络技术等先进的科学技术成果。新的控制理论和新型电器及电子器件的出现，成为电气控制技术发展的新的推动力。

### 1.1.2.2 电气控制设备

电气控制设备又称为电气控制装置，电气控制设备在自动化系统中起着电能控制、保护、测量、转换和分配的作用。随着控制技术、高低压电气元器件技术、电气自动化技术及计算机软硬件技术的不断发展，电气控制设备也在向数字化方向发展。

#### 1. 电气控制设备的功能

为了保证被控设备运行的可靠与安全，需要有许多辅助电气设备为之服务。能够实现某项控制功能的若干个电气元件及组件的组合称为控制回路。电气控制设备一般分为一次控制回路和二次控制回路，不同的被控制设备有不同的控制回路，而且高压电气设备与低压电气设备的控制方式也不同。这些设备要有以下功能。

##### 1) 自动控制功能

自动控制指的是在没人参与的情况下，利用电气控制装置使被控对象或过程自动地按预定规律运行。例如，高压和大电流开关设备的体积是很大的，一般都采用操作系统来控制分、合闸，特别是当设备出了故障时，需要开关自动切断电路，因此要有一套自动控制的电气操作设备，对供电设备进行自动控制。