

# 电气自动控制

姚樵耕 俞文根 编著

机械工业出版社

本书将电气控制的理论与实践相结合，是一本综合性很强的专业教材。本书分为上、下篇。上篇“控制原理及应用”的主要内容包括自动控制的基本概念、自控系统动态分析基础、自控系统动态分析方法、直流调速系统技术基础、晶闸管调速系统的分析以及电机扩大机调速系统的分析等六部分共六章。

下篇“控制技术及应用”的主要内容包括转速、电流双闭环直流调速系统（不可逆）分析、可逆直流调速系统分析、交流变频调速系统分析、继电器控制电路分析以及位置随动系统等。此外，还有514C直流调速系统和MMV交流调速系统的设定调试、故障处理等实际操作指导，共七章。

为便于读者复习思考，加深理解，在每一章后有小结、练习思考题及答案。在书后还附有模拟试题、模拟试卷及答案，以供参考。

本书主要是为高级维修电工远程多媒体教学而编写的，亦可用作传统教学面授的教材。可以用作维修电工技师及高级技师的培训教材，还可供大专、高职师生、工程技术人员参考。

## 图书在版编目（CIP）数据

电气自动控制 / 姚樵耕，俞文根编著. —北京：机械工业出版社，2004.9

ISBN 7-111-15242-5

I. 电... II. ①姚...②俞... III. 电气控制：自动控制 IV. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2004）第 092572 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：李振标 徐明煜 版式设计：霍永明 责任校对：张晓蓉

封面设计：王伟光 责任印制：

印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

850mm×1168mm  $\frac{1}{32}$ ·12.875 印张·2 插页·341 千字

0 001— 册

定价： 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话（010）68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

## 前 言

本书是受上海市职业技能培训中心的委托，由上海广电网络公司组织编写的，是高级维修电工职业技能培训远程多媒体教学的教材之一。

本书分为上下两篇。上篇“控制原理及应用”的主要内容有：自动控制基本概念、自控系统动态分析基础、自控系统动态分析方法、直流调速系统技术基础、晶闸管调速系统分析和电机扩大机调速系统分析等六部分。

下篇“控制技术及应用”的主要内容有：转速、电流双闭环直流调速系统（不可逆）分析、可逆直流调速系统分析、交流变频调速系统分析、继电控制电路以及位置随动系统等现代电气控制技术。

本教材是严格按照上海市职业技能 1 + x 培训大纲和鉴定细目而编写的。为确保教材质量，有关单位组织了张毓麟、柴敬镛、王照清等专家，进行了严肃认真的评审与验收。

众所周知，要编好一本教材，绝非旦夕之功。本教材是《高级维修电工职业技能培训教材》（中国劳动出版社，1993 年）和《自控系统动态分析讲义》（中国纺织大学，1994 年），经过 10 年边教边改，不断补充新的技术成果，并不断精炼的产物。

本教材与原教材相比较，最显著的特点一是少而精，二是先进性。总学时从 160 学时不断减为现在 64 学时，新技术日新月异、不断扩大，老基础只能日益压缩。例如，动态分析从 40 学时减为 10 学时。所以，必须走精简之路。拉氏变换简化为两张很小的表，只讲用法。

特别要指出的是，有人担心，没有微积分基础，动态分析难教难学。于是干脆就不教不学。这不符合实际需要，也不符合教

## IV

学大纲的要求。众所周知，自控系统乃动态系统，不会动态分析，怎么调整与维修？有人建议留给技师、高级技师去学。他们也不懂微积分呀，怎么办？其实，拉氏变换就是用来取代微积分运算的，只要代数知识就行。东华大学十多年来职业技能培训的实践证明：担心是多余的。

本教材采用多媒体教学讲授 64 学时，传统教学约需 100 学时。本教材同时考虑到高级维修电工、技师及高级技师的培训需要，内容适当扩展，而且由于技术先进，紧贴生产实际，所以也可供大专、高职师生及工程技术人员参考，特别适合当代快节奏时间紧的人们参考。

本教材共十三章，第一章至第六章由姚樵耕编写，第七章至第十三章由俞文根编写。每章末均有小结、练习思考题及答案，书尾附有模拟试题、模拟试卷及答案，供参考。这对复习思考、加深理解是十分有益的。

由于编者水平有限，缺点错误在所难免，殷切期望读者批评指正。

编 者

2004 年 8 月于上海

# 目 录

前言	
常用符号表	
上篇 控制原理及应用	1
第一章 自动控制基本概念	1
第一节 自动控制基本组成	1
一、自动控制基本任务	1
二、人工控制系统基本职能	1
三、自控系统基本组成	2
第二节 自动控制基本方式	3
一、开环控制之一	3
二、开环控制之二	3
三、闭环(反馈)控制	4
四、复合控制	5
第三节 自控系统的基本要求和基本问题	6
一、稳	6
二、准	7
三、快	8
四、省	8
第四节 自控系统分类举例	8
一、转速控制系统	8
二、位置随动系统	10
三、程序控制系统	12
小结	12
练习思考题	13
第一章练习思考题答案	13
第二章 自控系统动态分析基础	16

# VI

第一节 引言 .....	16
一、动态分析的重要性 .....	16
二、动态分析的方法 .....	16
三、拉氏变换的用途 .....	16
四、拉氏变换表简介 .....	17
五、学好动态分析的关键 .....	17
第二节 拉氏变换 .....	17
一、常用函数的拉氏变换表 .....	17
二、关于拉氏变换表的几点说明 .....	17
三、典型函数及其拉氏变换 .....	19
第三节 拉氏变换基本法则 .....	21
一、基本法则表 .....	21
二、应用举例 .....	22
第四节 传递函数 .....	24
一、传递函数的概念 .....	24
二、RLC 电路的传递函数 .....	25
三、典型环节及其传递函数 .....	27
四、基本控制器的传递函数 .....	31
五、系统框图及传递函数 .....	35
小结 .....	38
练习思考题 .....	39
第二章练习思考题答案 .....	39
第三章 自控系统动态分析方法 .....	43
第一节 自控系统的稳定性 .....	43
一、稳定性的概念 .....	43
二、自控系统稳定判据 .....	44
三、稳定性分析举例 .....	45
第二节 系统的静差分析法 .....	47
一、静差分析法 .....	47
二、跟踪静差分析 .....	47
三、抗扰静差分析 .....	49
四、有差系统与无差系统 .....	50
第三节 暂态响应分析法 .....	51

一、一阶系统的阶跃响应 .....	51
二、二阶系统的阶跃响应 .....	52
三、二阶系统动态性能指标 .....	54
四、二阶系统动态性能分析举例 .....	55
第四节 改善系统性能的方法 .....	56
一、结构不稳定系统及改进方法 .....	56
二、改善稳态精度的方法 .....	58
三、改善动态性能的方法 .....	59
四、过程控制系统 PID 参数整定方法 .....	61
小结 .....	62
练习思考题 .....	63
第三章练习思考题答案 .....	64
<b>第四章 直流调速系统技术基础</b> .....	67
第一节 直流调速系统的调速方案 .....	67
一、直流电动机调速方法 .....	67
二、直流电动机供电方法 .....	68
第二节 直流调速系统的主要技术指标 .....	69
一、稳态性能指标 .....	70
二、动态性能指标 .....	71
第三节 晶闸管直流调速系统的组成 .....	72
一、晶闸管变流器 (V) .....	72
二、V-M 调速系统的特点 .....	72
第四节 调节器及传感器 .....	75
一、调节器 .....	75
二、电压、电流传感器 .....	75
三、转速检测单元 .....	76
小结 .....	77
练习思考题 .....	78
第四章练习思考题答案 .....	79
<b>第五章 晶闸管调速系统的分析</b> .....	81
第一节 转速负反馈系统的分析 .....	81
一、系统组成 .....	81
二、静态分析 .....	81

三、静态分析举例 .....	85
四、动态分析 .....	86
五、稳定性分析 .....	89
第二节 无静差调速系统的分析 .....	90
一、有静差的原因 .....	90
二、无静差系统的结构原理 .....	90
三、无静差系统调节过程分析 .....	91
四、无静差调节系统的特点 .....	92
第三节 带电流截止负前(反)馈的 V-M 调速系统 .....	93
一、系统结构工作原理 .....	93
二、问题的提出 .....	93
三、电流截止负前(反)馈物理实现方法 .....	94
四、带截流环节的 V-M 系统的动态特性 .....	95
第四节 电压负反馈与电流正前(反)馈调速系统 .....	96
一、电压负反馈 V-M 调速系统 .....	96
二、电流正前(反)馈扰动补偿控制 .....	97
小结 .....	99
练习思考题 .....	102
第五章练习思考题答案 .....	103
第六章 电机扩大机调速系统 .....	107
第一节 电机扩大机调速系统组成原理 .....	107
一、结构组成(以龙门刨床主拖动系统为例) .....	107
二、系统结构框图 .....	108
三、工作原理 .....	108
第二节 电机扩大机调速系统电路分析 .....	108
一、给定环节 .....	109
二、电压负反馈环节 .....	109
三、电流正前(反)馈扰动补偿环节 .....	110
四、电流截止负前(反)馈保护环节 .....	110
五、电压微分负反馈稳定环节 .....	111
六、加(减)速换向环节 .....	111
七、停车自动消磁环节 .....	112
第三节 电机扩大机调速系统中各环节的调试方法 .....	112

一、电压负反馈环节的调试 .....	112
二、桥形稳定环节的调试 .....	114
三、电流正前(反)馈环节的调试 .....	115
四、电流截止负前(反)馈环节的调试 .....	116
五、调试小结 .....	116
第四节 系统故障的分析与维修 .....	117
一、飞车 .....	117
二、振荡 .....	118
第五节 电机扩大机的结构及工作原理 .....	119
一、电机扩大机基本结构 .....	119
二、电机扩大机工作原理 .....	119
三、电机扩大机的主要特性 .....	120
四、传递函数 .....	122
小结 .....	122
练习思考题 .....	124
第六章练习思考题答案 .....	125
参考文献 .....	127
<b>下篇 控制技术及应用</b> .....	129
<b>第七章 转速、电流双闭环直流调速系统(不可逆)</b> .....	129
第一节 问题的提出 .....	129
第二节 系统的组成 .....	130
第三节 工作原理 .....	132
一、电流调节器 ACR 的调节作用 .....	132
二、速度调节器 ASR 的调节作用 .....	132
第四节 双闭环直流调速系统的静特性 .....	133
一、速度调节器 ASR 不饱和时的特性 .....	133
二、速度调节器 ASR 饱和时的特性 .....	134
第五节 双闭环直流调速系统的动态特性 .....	135
一、起动特性 .....	135
二、动态抗扰性能 .....	136
三、动态指标 .....	138

## X

四、两个调节器的作用小结 .....	140
小结 .....	140
练习思考题 .....	141
第七章练习思考题答案 .....	141
<b>第八章 晶闸管可逆直流调速系统</b> .....	<b>143</b>
第一节 V-M 可逆直流调速系统原理 .....	143
一、电枢反接可逆线路 .....	143
二、励磁反接可逆线路 .....	145
第二节 V-M 可逆调速系统的回馈制动 .....	146
一、电动机的两种工作状态 .....	146
二、晶闸管装置的两种工作状态 .....	146
第三节 电动机的回馈制动及其实现 .....	147
一、电动机运行过程中的回馈制动 .....	147
二、如何在 V-M 系统中实现发电回馈制动 .....	148
三、V-M 可逆系统回馈制动的实现方法 .....	149
第四节 可逆系统运行中的环流分析 .....	151
一、环流及其分类 .....	151
二、直流环流与配合控制 .....	152
三、脉动环流及其抑制 .....	153
第五节 逻辑无环流可逆直流调速系统 .....	155
一、系统的组成和工作原理 .....	155
二、可逆系统对无环流逻辑控制器的要求 .....	156
三、逻辑装置的基本组成 .....	158
四、逻辑无环流系统的优缺点及改进措施 .....	159
第六节 514C 直流调速系统的原理、安装、调试 .....	159
一、514C 直流调速系统的原理 .....	159
二、514C 直流调速系统的安装接线 .....	160
三、514C 直流调速系统的调试 .....	161
小结 .....	162
练习思考题 .....	163
第八章练习思考题答案 .....	163
<b>第九章 V-M 调速系统实例分析</b> .....	<b>165</b>
第一节 KZD—II 型晶闸管小功率有静差直流调速系统实例分析 .....	165

一、结构特点和技术指标 .....	165
二、定性分析 .....	166
三、系统的调试与整定 .....	167
第二节 KGSA/Y 型无静差双闭环直流调速系统实例分析 .....	169
一、结构特点 .....	169
二、电路组成及工作原理 .....	169
三、晶闸管直流调速系统调试 .....	173
练习思考题 .....	179
第九章练习思考题答案 .....	179
*第十章 全数字直流调速系统及其应用 (选学内容) .....	181
第一节 问题的提出 .....	181
第二节 直流脉宽调速系统 .....	181
一、脉宽调制 (PWM) 的基本原理 .....	182
二、无制动作用的不可逆 PWM 变换器 .....	183
三、有制动作用的不可逆 PWM 变换器 .....	183
四、可逆 PWM 变换器 .....	185
第三节 脉宽调速系统的开环机械特性及特殊问题 .....	188
一、开环机械特性 .....	188
二、PWM 的特殊问题 .....	189
第四节 脉宽调速系统的组成结构 .....	190
一、脉宽调制器 (UPW) .....	190
二、逻辑延时环节 (DLD) .....	193
三、基极驱动器 (GD) .....	194
第五节 PWM 直流调速系统实例 .....	195
第六节 微机控制全数字化 PWM 直流调速系统 .....	195
一、系统结构和工作原理 .....	195
二、用 8031 单片机实现全数字化直流调速系统 .....	197
第七节 6RA24 全数字化直流调速系统实例分析调试 .....	198
一、6RA24 系列直流调速装置的原理接线 .....	198
二、试验线路组成及连接 .....	201
三、参数设定 .....	202
四、速度控制试验 .....	204
五、信号监视试验 .....	205

六、动态参数调整 .....	205
小结 .....	205
练习思考题 .....	206
第十章练习思考题答案 .....	206
<b>第十一章 交流变频调速系统 .....</b>	<b>208</b>
第一节 概述 .....	208
第二节 变频调速基本原理 .....	209
一、基本公式 .....	209
二、基频以下调速控制方式 .....	210
三、基频以上调速控制方式 .....	211
第三节 变频调速时的机械特性 .....	211
一、异步电动机的固有机械特性 .....	211
二、变频调速的三种机械特性 .....	212
第四节 变频器 .....	214
一、变频器的分类 .....	214
二、交-直-交变频器的结构组成 .....	214
三、电压型变频器 .....	216
四、电流型变频器 .....	217
五、电压型变频器主电路 .....	218
第五节 正弦波脉宽调制 (SPWM) 逆变器及其控制模式 .....	220
一、SPWM 逆变器工作原理 .....	220
二、SPWM 的控制模式 .....	221
三、SPWM 的模拟控制方法 .....	221
四、SPWM 的软件控制法 .....	224
五、SPWM 专用集成芯片 .....	227
第六节 变压、变频调速系统 .....	228
一、电压型变压变频调速系统组成 .....	228
二、电流型变压变频调速系统组成 .....	228
三、用 HEF4752 全数字化变频调速系统 .....	229
四、单片机数字控制的变频调速系统 .....	231
五、以 DSP 为控制核心的数字变频调速系统 .....	232
第七节 MMV 交流变频调速装置参数设定与运行 .....	233
一、交流变频调速装置主要特点 .....	233

二、接线图、接线及参数设定 .....	233
三、试验操作方法 .....	235
四、MMV 系统应用实例 .....	238
* 第八节 其他类型的变频调速系统简介 (选学内容) .....	243
一、转速闭环转差频率控制 (SF 控制) 的变频调速系统 .....	243
二、矢量控制 (VC 控制) 的变频调速系统 .....	247
三、直接转矩控制 (DSC) 的变频调速系统 .....	250
小结 .....	255
练习思考题 .....	257
第十一章 练习思考题答案 .....	257
第十二章 继电控制电路的分析及设计 .....	259
第一节 电路图 .....	259
一、电气原理图 .....	259
二、电气元件布置图 .....	262
三、电气安装接线图 .....	263
四、功能表图 .....	263
第二节 继电控制电路的读图分析 .....	264
一、一般方法和步骤 .....	264
二、查线读图分析法 .....	265
三、图示读图分析法 .....	265
四、逻辑代数读图法 .....	266
第三节 继电控制设计 .....	269
一、继电控制设计的基本原则 .....	269
二、继电控制设计的基本内容 .....	269
三、继电控制设计的一般程序 .....	270
第四节 电力拖动方案和电动机选择 .....	270
一、电力拖动方案选择原则 .....	270
二、电动机的选择 .....	271
第五节 继电控制电路的设计 .....	273
一、电气原理图设计的基本方法 .....	273
二、电气原理图设计的注意点 .....	273
第六节 常用电器的选择 .....	276
一、熔断器的选择 .....	276

二、接触器的选择 .....	277
三、断路器的选择 .....	278
四、热继电器的选择 .....	278
五、时间继电器的选择 .....	279
六、过电流继电器的选择 .....	279
七、欠电流继电器的选择 .....	280
八、欠电压继电器的选择 .....	280
小结 .....	280
练习思考题 .....	281
第十二章练习思考题答案 .....	281
*第十三章 位置随动系统(选学内容) .....	282
第一节 概述 .....	282
一、位置随动系统的组成原理 .....	282
二、位置随动系统的应用 .....	284
三、位置随动系统与调速系统的比较 .....	284
四、位置随动系统的分类 .....	285
第二节 位置信号检测 .....	288
一、自整角机(BS) .....	288
二、旋转变压器(BR) .....	290
三、感应同步器(BIS) .....	292
四、光电编码盘 .....	294
五、其他位置信号检测器件 .....	294
第三节 驱动执行机构 .....	299
一、交流伺服电动机 .....	299
二、直流伺服电动机 .....	300
三、步进电动机 .....	301
第四节 位置随动系统实例分析 .....	302
一、KSD-I型小功率位置随动系统 .....	302
二、三芯片直流伺服电动机位置随动控制系统简述 .....	308
三、DSP全数字直流位置随动系统简述 .....	313
小结 .....	317
练习思考题 .....	318
第十三章练习思考题答案 .....	319

参考文献 .....	320
附录 .....	321
附录 A 电气自动控制模拟试题及答案 .....	321
一、电气控制应知模拟试题 .....	321
二、电气控制应知模拟试题答案 .....	335
三、电气控制应会模拟试题 .....	343
四、电气控制应会模拟试题答案 .....	346
附录 B 高级维修电工模拟试卷及答案 .....	349
一、高级维修电工应知模拟试卷 (A 卷) .....	349
二、高级维修电工应知模拟试卷 (A 卷) 答案 .....	356
三、高级维修电工应知模拟试卷 (B 卷) .....	358
四、高级维修电工应知模拟试卷 (B 卷) 答案 .....	366
五、高级维修电工应会模拟试卷 (A 卷) .....	367
六、高级维修电工应会模拟试卷 (A 卷) 答案 .....	375
七、高级维修电工应会模拟试卷 (B 卷) .....	379
八、高级维修电工应会模拟试卷 (B 卷) 答案 .....	388

## 常用符号表

A	放大器、调节器放大器	$f(t)$	原函数
A	面积	$F(s)$	象函数
AG	电机扩大机	G	发电机、给定器
ACR	电流调节器	GAB	绝对值变换器
ASR	速度调节器	GD	驱动器
AVR	电压调节器	$GD^2$	电机飞轮力矩
APR	位置调节器	GE	励磁发电机
AR	反向器	G—M	发电机—电动机调速系统
AP	脉冲放大器	$G(s)$	传递函数
B	变换器	GT	触发器
B	磁通密度	GTO <sup>①</sup>	门极关断晶闸管
C	电容、控制输出量	GTR	电力晶体管
$C_e$	电动势转速比	GVF	压频变换器
$C_m$	转矩电流比	H	换向器
CPU	中央微处理器	$I$	电流
D	微分器、数字电路和器件	$I_m$	电流最大值
$D$	调速范围	$I_N$	电流额定值
DLC	逻辑控制器	$I_d$	整流电流
DRC	环形分配器	$i$	瞬时电流
E	电动势	$J$	转动惯量
$e$	误差	K	继电器、接触器
$e_s$	稳态误差	K	放大倍数
F	反馈、反馈环节	L	电感、电抗器
$F$	磁动势	LT	拉氏变换
FA	限流保护	$L^{-1}T$	拉氏反变换
$f$	频率、反馈系数、摩擦系数	M	电动机

(续)

$m$	质量	SPWM	正弦波脉宽调制
max	极大	$Q$	无功功率
min	极小	$T$	时间常数、周期
MC	微型计算机	$T_d$	微分时间函数
MD	直流电动机	TF	传递函数
MA	交流电动机	$T_L$	负载转矩
N	运算放大器	$T_e$	电磁转矩
$N$	匝数、抗动量	TA	电流互感器
$N_z$	振荡次数	W	绕组
$n$	转速	$W_G$	发电机励磁绕组
$n_0$	空载转速	$W_B$	补偿励磁绕组
$n_N$	额定转速	IGBT	绝缘栅双极型晶体管
$n_m$	最高转速	$t$	时间
P	比例控制器	$t_r$	上升时间
$P$	功率、脉冲	$t_p$	峰值时间
PWM	脉宽调制	$t_s$	调节时间、过渡时间
PD	比例微分控制器(调节器)	$t_v$	恢复时间
PI	比例积分控制器(调节器)	$U$	电压
PID	比例积分微分控制器(调节器)	$U_0$	空载电压
		$U_N$	额定电压
R	电阻、输入量、给定值	$U_s$	电源电压、同步电压
RP	电位器	UR	整流器
S	视频功率	UI	逆变器
s	秒	$U_d$	整流电压
$s$	转差率、复变量	$U_c$	控制电压
SA	控制开关	$U_g^{\wedge} U_r$	给定电压
SB	按钮	$U_f$	反馈电压
SM	伺服电动机	$U_{gn}$	转速给定电压