



中国科学院机械工程系列规划教材

机械装备电气控制技术

郝丽娜 巩亚东 李 虎 编著
王仁德 主审



科学出版社
www.sciencep.com

中国科学院机械工程系列规划教材

机械装备电气控制技术

郝丽娜 巩亚东 李 虎 编著
王仁德 主审

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍机械装备电气控制技术,全书共分8章,内容包括电气控制线路的基本环节、典型电气控制线路的分析、继电器-接触器控制电路的设计、可编程控制器(PLC)及其应用、直流调速系统、交流调速系统、现代电气控制技术简介和综合练习。

本书适用于机械工程及自动化和相关专业的本、专科教学,也可供有关工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械装备电气控制技术/郝丽娜,巩亚东,李虎编著. —北京:科学出版社, 2006

(中国科学院机械工程系列规划教材)

ISBN 7-03-017486-0

I. 机… II. ①郝…②巩…③李… III. 机械设备-电气控制-高等学校-教材
IV. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 069096 号

责任编辑:段博原 贾瑞娜 / 责任校对:刘亚琦
责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年8月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2006年8月第一次印刷 印张:21 1/4

印数:1—3 000 字数:414 000

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

中国科学院机械工程系列规划教材

编写委员会

顾 问：闻邦椿

主 编：谢里阳

执行主编：陈良玉

委 员：(以姓氏笔画为序)

马星国 王玉良 王世杰 王淑仁 巩云鹏

巩亚东 刘 杰 孙志礼 李为民 李树军

李景春 宋锦春 柳洪义 黄秋波

序

装备制造业是我国国民经济中的重要基础工业。机械装备为各类产品的物化提供平台和载体,机械装备的技术水平是衡量社会生产力水平的重要标志,机械科学、机械工程技术和机械工业的发展水平对经济建设和社会发展的作用都至关重要。

目前,世界机械工业产值达到了总工业产值的 $1/3$ 以上。我国制造业增加值在国内生产总值所占的比重高达 40% ,我国的财政收入一半也来自制造业。随着我国加入 WTO,经济越来越融入到全球经济体系中,我国的制造业在世界制造业中的地位越来越重要,并正从制造大国迈向制造强国。至少在 21 世纪的前 20 年,制造业将仍然是我国国民经济增长的主要来源,因此需要大批综合素质高、能力强的机械类专业人才。

另外,我国高等教育从精英型教育阶段进入了大众型教育阶段,实现了高等教育的历史性的跨越式发展,技术的进步和社会的发展也对高等院校机械教育的人才培养提出了新的要求。

为此,中国科学院教材建设专家委员会和科学出版社组织我国机械工程领域的中国科学院院士、教育部教学指导委员会成员、教学名师以及经验丰富的专家教授组成编委会,共同组织编写了这套《中国科学院机械工程类系列规划教材》,以适应我国高等机械工程教育事业的发展,更好地实现机械工程类专业人才的培养目标,在规模上、素质上更好地满足我国机械科学技术和机械工业发展的需要,为建设创新型国家做出贡献。

本套教材主要有以下几方面的特点:

1. 适应多层次的需要。本套教材依据教育部相关教学指导委员会制定的最新专业规范和机械基础课程最新的教学基本要求,同时吸取不同层次学校教师的意见,进行了教材内容的编排与优化,能够满足各类型高校学生的培养目标。
2. 结构体系完备。各门课程的知识点之间相互衔接,以便学生完整掌握学科基本概念、基本理论,了解学科整体发展趋势。本套教材除主教材外,还配套有辅导书、多媒体课件、习题集及网络课程等。
3. 作者经验丰富。参加本套教材编写的人员不少来自相关国家重点学科、国家机械教学基地的院校,有些还是国家级、省部级教学成果奖参加人,国家级、省级精品课程建设负责人以及相关院校的骨干教师代表。
4. 理论与实际相结合,加强实践教学。在达到掌握基本理论、基本知识、

基本技能的教学要求前提下,注重例题、设计实践和实验教学,着力于学生分析问题能力、创新能力和实际动手能力的培养。

另外,为了保证本套教材的质量,编委会聘请国内知名的同行专家对教材进行了审定。

我们还将根据机械科学与工程学科发展的战略要求,对本套教材不断补充、更新,以保持本套教材的系统性、先进性和适用性。

我们热忱欢迎全国同行以及关注机械科学与工程教育、教学及教材建设的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议,一道为我国机械工程教育的发展而努力。

中国科学院院士

周邦椿

2006年5月

前 言

本书是针对高等学校机械工程及自动化和相关专业的本、专科教学需要而编写的,共分8章,内容包括电气控制线路的基本环节、典型电气控制线路的分析、继电器—接触器控制电路的设计、可编程序控制器(PLC)及其应用、直流调速系统、交流调速系统、现代电气控制技术简介和综合练习。

本书是在东北大学出版的机械工程专业课程《设备电气控制技术》内部教材的基础上,经多次试用修正完成的。编者总结了多年的教学和科研经验,紧密结合了教学实践中的具体情况,对机械设备电气控制技术的主要内容及发展趋势进行了讲解,力求注意内容的系统性,论述的简明性,突出实用性和先进性,便于自学。本书适用于机械制造及自动化专业、机电一体化及相关专业的本、专科教学,也可供有关工程技术人员学习参考。

本书的第1~3章由东北大学巩亚东和傅艳华编写,第4~6章由东北大学郝丽娜和陈文林编写,李虎和刘兴刚参加了第7、8章的编写。全书的组织和统稿工作由巩亚东和郝丽娜完成,由东北大学王仁德教授担任主审。由于编者水平有限,书中不乏欠妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2006年5月

目 录

序

前言

第 1 章 电气控制线路的基本环节	1
1.1 电气控制电路图的绘制和分析方法	1
1.1.1 电气控制电路图的绘制方法	1
1.1.2 电气控制电路图的分析方法	2
1.2 鼠笼式电动机的启动控制电路	10
1.2.1 鼠笼式异步电动机全压启动控制线路	10
1.2.2 三相鼠笼式异步电动机降压启动线路	12
1.3 电动机正反转控制电路	18
1.3.1 电动机正反转线路	19
1.3.2 正反转自动循环线路	20
1.4 电动机制动控制电路	21
1.4.1 能耗制动控制电路	21
1.4.2 反接制动控制电路	23
1.5 双速电动机高低速控制电路	25
1.6 液压系统的电气控制	26
1.6.1 液压动力头控制电路	26
1.6.2 半自动车床刀架纵进、横进、快退控制电路	28
1.7 控制电路的其他基本环节	30
1.7.1 点动控制	30
1.7.2 联锁与互锁	30
1.7.3 多点控制	32
1.7.4 工作循环自动控制	33
1.8 电动机的保护	34
1.8.1 短路保护	34

1.8.2 过载保护	35
1.8.3 过电流保护	35
1.8.4 零电压与欠电压保护	35
1.8.5 弱磁保护	36
习题	37
第2章 典型电气控制线路的分析	39
2.1 车床的电气控制线路	39
2.1.1 CW6163B型万能卧式车床的控制线路	40
2.1.2 C616卧式车床的电气控制线路	41
2.1.3 C650卧式车床的电气控制线路	43
2.2 钻床的电气控制线路	46
2.2.1 主电路	46
2.2.2 控制电路、信号及照明电路	48
2.3 铣床电气控制线路	50
2.3.1 电气线路概述	52
2.3.2 控制线路	53
2.3.3 圆形工作台的控制	55
2.4 镗床电气控制线路	55
2.4.1 电气控制线路的特点	57
2.4.2 控制线路的工作原理	57
习题	59
第3章 继电器-接触器控制电路的设计	60
3.1 电气控制系统设计的一般内容	60
3.2 电气控制电路的设计步骤	62
3.2.1 电力拖动电动机的选择	62
3.2.2 电气控制电路的设计	64
3.3 常用低压电器元件的选用	70
3.3.1 概述	70
3.3.2 接触器	72
3.3.3 继电器	73
3.3.4 熔断器	78

3.3.5 速度继电器	79
3.3.6 断路器	80
3.3.7 主令电器	81
3.3.8 控制变压器	82
3.4 CW6163 型卧式车床的电气控制电路设计	83
3.4.1 机床电气传动的特点及控制要求	83
3.4.2 电气控制电路的设计	83
3.4.3 选择电气元件	84
3.4.4 制定电气元件明细表	86
3.4.5 绘制电气线路接线图	86
习题	88
第 4 章 可编程序控制器及其应用	90
4.1 概述	90
4.1.1 可编程序控制器应用及特点	91
4.1.2 可编程序控制器的发展	93
4.1.3 可编程序控制器的编程语言	94
4.2 OMRON 可编程序控制器及其指令系统	95
4.2.1 PLC 中的编程元件、功能及区域分配	95
4.2.2 编程指令	98
4.3 5-Step 语句编程	120
4.3.1 概述	120
4.3.2 5-Step 编程语言结构	121
4.3.3 程序构成和工作循环	122
4.3.4 5-Step 编程指令简介	122
4.4 可编程序控制器系统设计	125
4.4.1 可编程序控制器系统设计的内容和步骤	125
4.4.2 可编程序控制器系统的硬件电路设计	128
4.4.3 可编程序控制器用户程序设计	132
4.4.4 可编程序控制器系统设计举例	135
4.5 可编程序控制器应用实例	142
4.5.1 工件取放机械的步进控制	142

4.5.2 液体混合装置的可编程控制器控制	150
习题	152
第5章 直流调速系统	155
5.1 直流电动机调速的基础知识	155
5.1.1 直流电动机的调速性能和方法	156
5.1.2 直流调速系统用的可控直流电源	157
5.2 开环调速系统	161
5.2.1 开环 V-M 调速系统的机械特性	161
5.2.2 转速控制的要求和调速指标	164
5.2.3 开环调速系统的性能和存在的问题	168
5.3 转速负反馈单闭环直流调速系统	169
5.3.1 单闭环调速系统的组成及静特性	169
5.3.2 单闭环调速系统的动态分析	176
5.4 无静差调速系统和积分控制规律	186
5.4.1 积分调节器和积分控制规律	186
5.4.2 比例积分调节器和比例积分控制规律	188
5.4.3 采用 PI 调节器的单闭环无静差调速系统	189
5.5 单闭环调速系统的限流保护——电流截止负反馈的应用	194
5.5.1 问题的提出	194
5.5.2 电流负反馈截止环节	194
5.5.3 带电流截止负反馈的单闭环转速负反馈调速系统	195
5.6 其他反馈环节在自动调速系统中的应用	197
5.6.1 电枢电压负反馈调速系统	197
5.6.2 电动势负反馈调速系统	199
5.6.3 电流正反馈和补偿控制作用	200
5.7 有从属电流环的调速系统——转速、电流双闭环调速系统	203
5.7.1 双闭环调速系统的组成及静特性	203
5.7.2 限幅输出的 PI 调节器的动态响应	207
5.7.3 双闭环调速系统的启动过程	208
5.7.4 双闭环调速系统的动态抗扰性能	212
5.8 自动调速系统中的检测装置	213

5.8.1 转速检测装置	213
5.8.2 电流检测装置	215
5.8.3 电压检测装置	220
习题	222
第6章 交流调速系统	224
6.1 概述	224
6.1.1 交流调速系统与直流调速系统的比较	225
6.1.2 交流调速系统的难点和复杂性	226
6.1.3 交流调速系统的技术突破	227
6.1.4 交流调速系统的主要应用领域	230
6.1.5 交流电动机的机械特性	231
6.1.6 交流调速的基本方法	233
6.2 变频器	240
6.2.1 变频器的基本构成	241
6.2.2 变频器的分类	244
6.3 富士变频器简介	249
6.3.1 富士变频器的特点及使用注意事项	249
6.3.2 基本功能及使用操作	249
6.3.3 常用功能的软件设计及举例	253
6.4 变频器典型电路设计及应用举例	257
6.4.1 变频器的基本接线及电路设计	257
6.4.2 采用变频器的开环控制系统举例	260
6.4.3 采用变频器的闭环系统举例	260
6.5 变频器的使用与维护	262
6.5.1 使用变频器的注意事项	262
6.5.2 变频器本身的故障自诊断及预防功能	266
6.5.3 变频器对周边设备的影响及故障防范	267
习题	268
第7章 现代电气控制技术简介	269
7.1 应用 Protel 绘制接触器继电器控制电路	269
7.1.1 电器元件库的建立	269

7.1.2 电气控制原理图的绘制	271
7.2 MATLAB 在控制系统计算机辅助设计的应用	271
7.2.1 控制系统计算机辅助设计的基本原理	271
7.2.2 MATLAB 及其应用	273
7.3 控制系统的网络控制结构及现场总线技术	282
7.3.1 工业控制系统的网络结构	283
7.3.2 工业控制中的现场总线技术	285
7.4 现场总线低压电器产品及其控制系统	291
7.4.1 现场总线低压电器产品	292
7.4.2 基于现场总线的电气控制系统结构	292
7.4.3 现场总线式电气控制系统的优点	296
7.4.4 基于现场总线的自动化系统结构的变化趋势	297
第 8 章 综合练习	299
8.1 自动取料机的运行控制	299
8.2 机器人工作站的电气控制	305
8.2.1 信号分析	306
8.2.2 电气控制原理	308
8.2.3 PLC 控制程序	313
习题	316
参考文献	318
附录	319

第 1 章 电气控制线路的基本环节

1.1 电气控制电路图的绘制和分析方法

1.1.1 电气控制电路图的绘制方法

电气控制电路图是把某些电气元件（如接触器、继电器、按钮、行程开关等）和电动机等用电设备按某种要求用导线连接起来的电气线路。为了设计、分析研究、安装维修时阅读方便，在绘制电气控制电路图时，必须使用国家统一规定的电气图形符号和文字符号。国家标准 GB/T6988.1 到 GB6988.7—1997《电气制图》规定了电气技术领域各种图的绘制方法；国家标准 GB/T4728.1 到 GB4728.13—(1985~1996)《电气图用图形符号》规定了绘制各种电气图用的图形符号总则；国家标准 GB/T7159—1987《电气技术中的文字符号制订通则》中规定了文字符号的组成规则。电器图常用图形符号及文字符号见附录。

电气图的种类很多，下面介绍在电气控制中最常用的三种图：电路图、电气设备位置图和电气设备接线图。

(1) 电路图

电路图用于详细表示电路、设备或成套装置的全部基本组成和连接关系，而不考虑各电器元件的实际安装位置 and 实际接线情况，其用途是：

- 1) 详细理解电路、设备或成套设备及其组成部分的作用原理。
- 2) 为测试和寻找故障提供信息。
- 3) 作为编制接线图的依据。

绘制电气电路图时，一般要遵循以下规则：

1) 为便于分析看图，电路或元件应按功能布置，并尽可能按其工作顺序排列。对因果次序清楚的，其布局顺序应该是从左到右和从上到下。

2) 电气控制电路分为主电路和控制电路，要分开来画。

3) 电气控制电路中，同一电器元件的不同部分（如线圈和触头）常不画在一起，但要用同一文字符号标注。

4) 电气控制电路的全部触头都按“非激励”状态绘出。“非激励”状态对电操作元件（如接触器、继电器等）是指线圈未通电时的触头状态；对机械操作元件（如按钮、行程开关等）是指没有受到外力时的触头状态；对主令控制器是指手柄置于“零位”时各触头状态；断路器和隔离开关的触头处于断开状态。

(2) 电气设备位置图

表示各项目(如元件、器件、部件、组件、成套设备等)在机械设备和电气控制中的实际安装位置,图中各项目的文字符号应与有关电路图中的符号相同。各项目的安装位置是要取得信号的地方,操作元件放在便于操作的地方,一般电气元件应放在控制柜内。

(3) 电气设备接线图

表示各项目之间实际接线情况,图中一般标示出:项目的相对位置、项目代号、端子号、导线号、导线类型、导线截面积、屏蔽和导线绞合等内容。绘制接线图时应把各电气元件的各个部分(如触头与线圈)画在一起;文字符号、元件连接顺序、线路号码编制都必须与电路图一致。电气设备位置图和接线图用于安装接线、检查维修和施工。

1.1.2 电气控制电路图的分析方法

任何生产设备或系统,不管它要做多少复杂的工作,都是在其电气控制系统的支配下按照一定规律完成的,是在组成电气控制系统的各个元器件间的相互协调、配合下实现的。而电路图以全景图的形式表现出它们之间的这种协作关系。各种元器件的图形符号就好比“单词”,它们之间的连线就好比“语法规则”和“修辞方法”,将“单词”组成了一条条语句用以描述系统的工作过程。因此,分析电路图的过程就是掌握系统工作情况的过程,这是日后维护工作的基础;反过来,若先对系统的工作过程有了详细的了解,对分析电路图会起到引导作用,这也是设计电路图的前提。

要读懂电路图,首先要弄清电路图各个元件起什么样的作用。电路图中(除了配电部分)的电器元件,基本可以分成三类:执行元件、检测元件和运算元件。执行元件是用来操纵被控制对象的执行机构,这类元件包括电动机、接触器、电磁阀、电磁离合器等。检测元件可以把系统工作过程中的一些参量(如机械位移、压力、流量)的变化转换成电信号,这类元件有按钮开关、行程开关、压力继电器等。运算元件用来对检测元件的信号进行逻辑运算,判断系统工作过程的各个阶段,使每一阶段都有其所要求的执行元件工作,这类元件包括中间继电器、时间继电器等。在某些情况下,可以用检测元件直接控制执行元件,这时,检测元件兼有运算元件的功能。

一套设备或系统的工作过程,可以分解成若干个时间上依次衔接的阶段,称为“工步”。在每一工步内,由执行元件确定正在进行的工作,如“前进”、“后退”等。这些工步在检测元件的控制下产生转换。弄清了系统工作过程中究竟有哪些工步及各元件所呈现的状态和配合关系,就可以说读懂(或分析)了电路图的工作原理或系统的工作过程。怎样来阐述这些工作过程呢?方法很多,主要

有：文字叙述法、图形分析法和逻辑函数法。

1. 文字叙述法

用自然语言平铺直叙地依次说明各元器件的行为和状态，是普遍采用的方法。叙述法可以非常全面、细腻地阐述电路的工作过程，可以使人了解每一个细节。但这种分析方法的缺点是不能直观、简明、形象地展开各元件在不同阶段所处的状态和系统工作的全过程。

2. 图形分析法

人们在调试、检修电子设备时常要用示波器观察电路中一些点的电压和电流波形及它们之间的时序关系，从而了解和判断电路的工作状态，这就是图形分析法。图形，既简明直观又蕴涵大量信息。电气控制电路中的元器件，绝大部分只存在于两种状态，如线圈或得电或失电，触头或闭合或断开，这样就可简单的线条来标明它们的状态了。图形分析法也有多种形式，常用的有：工作流程图、工作状态图和功能表图。

(1) 工作流程图

工作流程图又称工作循环图或工艺流程图。我们以图 1-1 为例说明工作流程

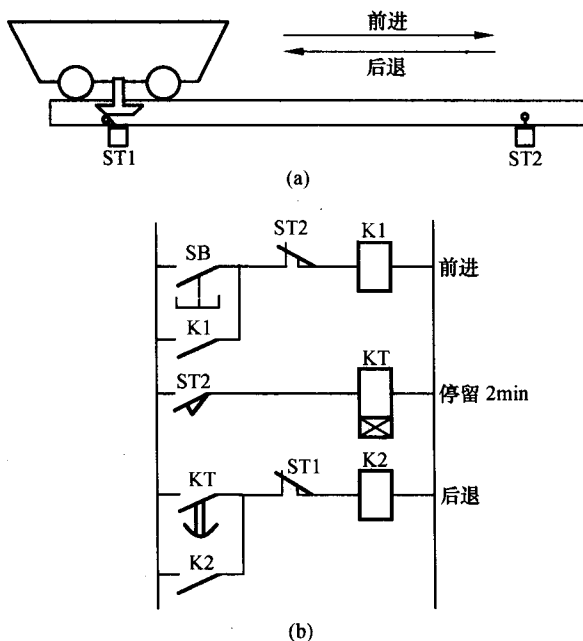


图 1-1 小车进退示意图及其控制电路

图的画法。图 1-1 (a) 为被控对象示意图。其工作要求是：当小车停在原位 ST1 处时，若按下启动按钮 SB，小车前进。到达 ST2 处时停止，停留 2min 后小车退回到 ST1 处停止。图 1-1 (b) 是实现这种要求的控制电路，继电器 K1 得电使小车前进，K2 得电使小车后退（暂不考虑实际怎样使小车运动）。

控制电路的工作过程是（文字叙述法）：按下启动按钮 SB 使 K1 线圈得电，小车前进；为防止松开 SB 会使 K1 线圈失电，用 K1 的动合触头与 SB 并联来维持 K1 线圈自身继续得电。当小车运动到 ST2 处时，ST2 的动断触头断开使 K1 线圈失电，小车停止，同时 ST2 的动合触头闭合使时间继电器 KT 线圈得电开始计时。2min 后，时间继电器 KT 的延时动合触头闭合使 K2 线圈得电，小车后退。当小车离开 ST2 时其动合触头断开，时间继电器 KT 将失电，其延时动合触头的立即断开会使得 K2 线圈失电，使用 K2 动合触头与 ST2 并联后就可避免这种情况发生。小车退回到原位 ST1 处时 ST1 的动断触头断开，切断 K2 线圈的供电电路，小车停止。

该工作过程可以用工作流程图的阶梯状图形加以描述，如图 1-2 所示。

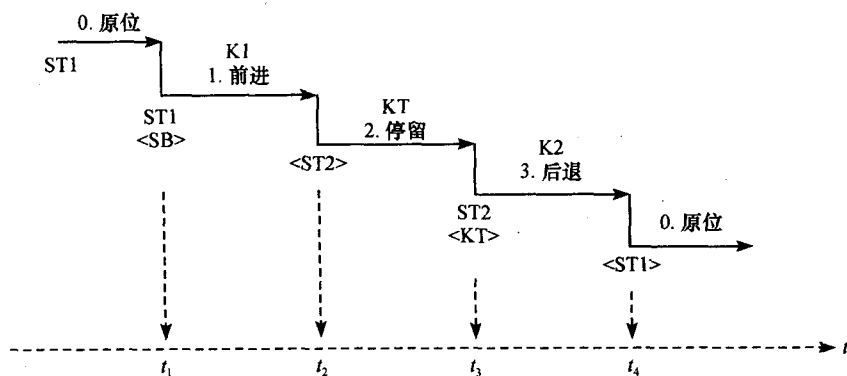


图 1-2 小车运行的工作流程图

如将图 1-2 中的阶梯图向时间轴（图中虚线轴）投影，阶梯转折处对应于时间轴上的某一时刻，相邻时刻之间的一段时间内系统处于一种特定的工作状态（这种特定的状态即为一个工步）。因此，这种图实际上是电路中各个元件的状态在时间轴上的标示，反映了它们的状态之间的时序关系，能简明直观地反映电路工作的全过程。

工作流程图的含义和画法如图 1-3 所示。说明如下：

- 1) 工作流程图由各工步依次衔接而成（有时会出现分支）。
- 2) 突出表达系统的相对稳态过程（除非专门讨论暂态过程）。在各工步内执行元件的状态保持不变，即各工步是由执行元件的状态确定的。