



普通高等教育 电气工程 自动化 系列规划教材

Motion Control
System Engineering

运动控制 系统工程

◎ 曾毅 陈阿莲 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育 $\frac{\text{电气工程}}{\text{自动化}}$ 系列规划教材

运动控制系统工程

曾 毅 陈阿莲 田 伟 盖奇庆 编著



机械工业出版社

如果您想设计一个能满足用户要求的自动控制系统或者一套生产流水线的控制装置,如果您想掌握自动控制系统构造、组态设计和仿真、调试、维护的基本方法与技巧,那么就请您阅读此书。

本书是自动化、电气工程及其自动化专业的必修课程教材。本书从实际工程出发,重点讲述了自动控制系统和网络运动控制系统的构造过程、组成方法与应用技术,介绍了自动控制系统的三大件即调速器、触摸屏和 PLC 的连接方法,阐释了系统形成后在实际应用当中所出现的一些常见问题的解决方法。本书针对不同的生产工艺要求对调速器的选择、人机界面的设计、计算机的仿真调试与现场总线组成的网络运动控制系统都作了全面系统的介绍。

本书是作者在十多年教学与科研实践经验的基础上,结合近几年来自动化控制技术的发展编写而成的。书中所提供的应用实例,多数都是来自作者在自动化领域的最新科研成果和经验总结。

本书既可作为高等院校自动化、电气工程及其自动化等专业的教材,又可作为工程技术人员、科研单位的实用参考书,也可供电类维修人员作培训教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

运动控制系统工程/曾毅等编著. —北京:机械工业出版社,2014.2

普通高等教育电气工程自动化系列规划教材

ISBN 978-7-111-45149-5

I. ①运… II. ①曾… III. ①自动控制系统—高等学校—教材
IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 303018 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:于苏华 责任编辑:于苏华

版式设计:常天培 责任校对:张晓蓉

封面设计:张 静 责任印制:李 洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2014 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 25.75 印张 · 720 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-45149-5

定价:49.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前言

本书为普通高等教育电气工程、自动化系列规划教材,自2008年出版以来受到广大读者的普遍欢迎。本书具有较强的实用性和较高的学术价值,是作者十几年来从事运动控制系统工程设计与调试的教学和科研工作的总结,其中也包含了作者最新的工程科研项目 and 成果。

为了适应控制工程的发展需要和读者的最新需求,适应卓越工程师教育培养计划的要求,作者对原书进行了修订。本次修订除了保持理论严谨、注重实践、系统性强的特点之外,对原书中的部分内容进行了更新和改正,同时又增添了许多新的内容。

本书共分7章。第1章介绍了自动控制系统的一般构造理论和方法,重点介绍了步进逻辑公式法和“运动控制系统构造规律”,在本章的最后讲述了“机器人控制基础与运动轨迹规划”;第2章介绍了闭环控制系统的形成过程和 Simulink 建模仿真技术,及单闭环调速控制系统的实例分析;第3章介绍了多闭环控制系统的构造过程、无超调控制系统的实现方法、PROFIBUS-DP 通信网络的组态方法,然后简单介绍了 CAN、PROFINET、MODBUS 等几种常见现场总线的应用;第4章讲述了可逆调速控制系统的构造过程,着重分析了典型配合控制系统的制动过程及仿真,分析了逻辑无环流可逆系统的构造过程,研究了直流脉宽调速控制系统的组成及其仿真电路;第5章重点介绍了通用直流调速器、变频调速器的结构、选择与使用方法及常见故障的处理技巧;第6章介绍了 HMI 的设计基础知识、控制器壳体与内部器件的摆放技术、常见触摸屏画面的组态方法及常见触摸屏故障的处理方法,本章最后介绍了 WinCC flexible 2008 的使用入门;第7章运动控制系统工程实例,该章通过工程实例介绍了自动控制系统的三件——触摸屏、PLC 和调速器是如何通过现场总线“走”到一起组成自动控制系统的,是如何实现生产工艺要求和满足用户各项技术性能指标的。在该章中介绍了目前企业正在推广应用的“实仿程序”,该章是对本书前六章的总结与提高,起到了“画龙点睛”的作用。

为了便于读者自学,本书在书后给出了习题解答;为了便于卓越工程师班学生的学习,本书还在附录中收录了部分控制系统外壳设计的图样以及工程案例实仿程序。本书既可作为自动化、电气工程及其自动化专业学生的专业教材,又可作为工程技术人员、大专院校相关专业师生的实用参考书,也可供自动控制系统设计与维修人员作培训教材使用。

山东大学控制科学与工程学院陈阿莲教授参加了第2章中 Simulink 建模与仿真技术、第3章中 CAN 现场总线和第5章部分内容的编写;济南大学控制科学与工程学院田伟副教授参加了第1章中机器人控制基础与运动轨迹规划简介和第3章中 PROFINET 现场总线内容的编写;山东省人社厅职业鉴定中心培训研究室的盖奇庆高级讲师参加了第5章伺服控制器的选择方法和第6章中 WinCC flexible 2008 使用入门内容的编写;其他各章及全书统稿由山东大学控制科学与工程学院曾毅教授完成。参加整理工作的还有研究生刘鹏、张朋、赵培庆、赵俊达以及肖金廷、姚迪、洪龙华、吕元民等。本书中部分

实例由山东大学控制科学与工程学院的高级实验师高芳红老师、盖奇庆进行了实际验证；部分习题解答是由研究生刘鹏、肖金廷等提供的；对于书中所引用的参考文献及照片的作者，在此一并向他（她）们表示诚挚的感谢。另外，此书在编辑过程中，得到了许多专家和同行的指导和帮助。感谢山东甬泰钢铁科技有限公司玄家国、鞍钢沈阳钢材加工配送有限公司赵志平、浙江兴基源电工设备有限公司王仲钢和青岛宝陆莱针织制衣有限公司孟宪刚等，是他们给予了作者许多研究和实践的机会；感谢通钢集团四平钢铁制品有限公司、济南卷烟厂以及烟台万华聚氨酯股份有限公司等，是他们给作者提供了优良的实验条件和场所。没有他们的大力支持和协助，就不可能有此书中丰富的内容。为此，谨向上述单位、专家表示深切的谢意。

书中如有不当之处，敬请读者批评指正。来信请寄：济南市山东大学（千佛山校区）控制科学与工程学院（邮编：250061，电话：0531-88396176）。

作 者

目 录

前言	
绪论	1
第1章 自动控制系统的构造方法	3
1.1 物体运动控制系统的设计方法	4
1.1.1 功能添加法	4
1.1.2 步进逻辑公式法	7
1.1.3 运动控制系统的基本辅助功能与构造规律	12
1.1.4 步进逻辑公式法应用举例	20
1.1.5 最少程序步判别定理及其应用举例	29
1.2 恒值控制系统的形成方法	33
1.2.1 系统的抑制能力	34
1.2.2 抑制定理与反馈定理	37
1.2.3 恒值控制系统设计方法应用举例	38
1.3 机器人控制基础与运动轨迹规划简介	44
1.3.1 机器人控制系统的结构和工作原理	44
1.3.2 机器人控制系统的特点及其控制方式	47
1.3.3 机器人的轨迹规划	49
1.3.4 插补方式的分类与轨迹控制	52
1.3.5 机器人轨迹插值计算	52
1.3.6 机器人路径的实现方法	59
习题	59
第2章 单闭环调速控制系统的构成及计算机仿真	62
2.1 开环调速控制系统的构造过程及其静特性	62
2.1.1 开环调速控制系统的动、静态结构图	62
2.1.2 晶闸管-电动机系统的特殊问题	66
2.2 单闭环调速控制系统的动、静态分析与设计	68
2.2.1 生产工艺要求与控制系统转速降之间的关系	69
2.2.2 单闭环调速控制系统的抗干扰能力	70
2.2.3 单闭环调速控制系统的限流保护方法	71
2.2.4 控制系统的稳定条件及校正	72
2.2.5 系统的静态参数计算	73
2.3 电压负反馈电流补偿控制的调速系统	74
2.3.1 电压负反馈调速控制系统	74
2.3.2 电流正反馈和补偿控制规律	76
2.3.3 电流补偿控制调速系统的数学模型和稳定条件	77
2.4 Simulink 建模与仿真技术	78
2.4.1 计算机仿真技术的基础知识及 Simulink 使用入门	79
2.4.2 仿真参数设置及仿真速度的控制方法	91
2.4.3 子系统的生成及其封装技术	96
2.4.4 多组参数同时仿真技术	106
2.5 PID 调节器控制规律分析	108
2.5.1 比例调节器的时域表达式和控制规律	109
2.5.2 积分调节器的时域表达式和控制规律	111
2.5.3 比例积分调节器的时域表达式和控制规律	112
2.5.4 微分调节器的时域表达式和控制规律	113
2.5.5 比例微分调节器的时域表达式和控制规律	115
2.5.6 PID 调节器的时域表达式和控制规律	116
2.6 单闭环运动控制系统的应用实例分析	117
2.6.1 单闭环直流调速控制系统应用实例	117

2.6.2 单闭环交流异步电动机调速控制 系统应用实例	119	总线应用简介	166
习题	120	3.7.1 PROFINET 现场总线	166
第3章 多闭环控制系统的构造及现场 总线	123	3.7.2 MODBUS 现场总线	172
3.1 转速电流双闭环调速控制系统及其 静态特性	123	3.7.3 基于 RS-232 协议的 CAN 总线 网络	175
3.1.1 问题的提出及构造过程	123	习题	179
3.1.2 静态结构图及静态特性	127	第4章 可逆调速控制系统及脉宽调制 电路	183
3.2 双闭环调速控制系统的动态性能 及其仿真	129	4.1 晶闸管-电动机系统的可逆电路及其 回馈制动	183
3.2.1 动态数学模型	129	4.1.1 可逆运行理论分析	184
3.2.2 突加给定时的起动过程仿真 分析	130	4.1.2 晶闸管-电动机系统的四象限 运行方法	185
3.2.3 动态性能和两个调节器的作用	132	4.1.3 晶闸管-电动机系统的回馈制动 条件	186
3.2.4 调节器的设计与存在的问题	133	4.2 可逆电路中的环流及其抑制措施	186
3.3 无转速超调的双闭环调速控制系统	135	4.2.1 环流及其种类	186
3.3.1 瞬间降低转速给定电压 U_n^*	135	4.2.2 典型配合控制的定义	188
3.3.2 自动提高转速反馈电压 U_n	135	4.2.3 瞬时脉动环流及其抑制措施	188
3.4 多闭环调速控制系统的构造过程及 性能分析	136	4.3 有环流可逆调速控制系统及控制系统 仿真	190
3.4.1 带电流变化率内环的三环调速 系统	137	4.3.1 典型配合控制系统的组成分析	190
3.4.2 全状态反馈调速控制系统	138	4.3.2 典型配合控制系统的制动过程 分析	192
3.4.3 带能耗制动单元的全状态反馈 调速控制系统	139	4.3.3 典型配合控制系统的仿真波形及 应用场合	194
3.4.4 闭环数目的限制与带预控制调 节器的闭环系统	140	4.3.4 环流自控可逆调速控制系统	197
3.5 弱磁控制的直流调速控制系统	141	4.4 无环流可逆调速控制系统及控制系统 仿真	198
3.5.1 问题的提出及解决原则	141	4.4.1 问题的提出	198
3.5.2 弱磁控制直流调速系统的构造 过程	142	4.4.2 逻辑控制装置的设计过程	199
3.6 PROFIBUS 通信和网络组态	145	4.4.3 逻辑控制无环流可逆调速控制 系统的仿真波形	205
3.6.1 通信基础知识	146	4.5 直流脉宽调速控制系统及控制系统 仿真	208
3.6.2 现场总线概述	147	4.5.1 脉宽调制主电路的形成过程	208
3.6.3 PROFIBUS 网络通信概述	151	4.5.2 脉宽调制变换器的工作原理及 构造过程	210
3.6.4 PROFIBUS-DP 的主要特点	156	4.5.3 脉宽调制变换器的机械特性及 数学模型	218
3.6.5 PROFIBUS-DP 网络组态过程及 数据传输命令	159	4.5.4 脉宽调速系统的控制电路	219
3.6.6 PROFIBUS-DP 网络常见通信故障 的处理	165	4.5.5 脉宽调速系统实例分析	226
3.7 PROFINET、MODBUS 和 CAN 现场			

习题	228	原则	272
第5章 调速器的使用方法及常见故障		6.3.3 控制柜壳体内外设计原则	274
维修	231	6.4 触摸屏工作原理及 MT500 使用	
5.1 直流调速器的结构与控制系统软件		入门	276
组态	231	6.4.1 触摸屏的基本工作原理及分类	276
5.1.1 直流调速器性能概述	231	6.4.2 触摸屏画面总体设计步骤	278
5.1.2 通用直流调速器的外围接线与		6.4.3 EasyView500 的安装及使用	
内部结构	233	入门	279
5.1.3 通用直流调速器控制系统组态		6.4.4 EasyView500 触摸屏画面组态	
方法	237	软件简介	285
5.1.4 通用直流调速器的参数设置		6.4.5 EB500 触摸屏软件组态编辑	
过程及优化方法	239	操作举例	294
5.1.5 直流调速器常见故障的维修		6.5 MT500 与 XP270 触摸屏常见技术	
方法及实例	241	问题的解决方法	312
5.2 通用变频器的工作原理及维修	244	6.5.1 MT500 触摸屏常见技术问题的	
5.2.1 变频器的工作原理简介及分类	244	解决方法	312
5.2.2 变频器的选择方法	246	6.5.2 XP270 触摸屏常见技术问题的	
5.2.3 变频器的故障诊断与维修	248	解决方法	315
5.3 伺服控制器的选择方法	253	6.5.3 触摸屏的常见故障及处理方法	316
5.3.1 伺服电动机的选型	255	6.6 WinCC flexible 2008 使用入门	317
5.3.2 伺服单元的选型	259	6.6.1 WinCC flexible 2008 的特点与	
习题	260	基础知识	317
第6章 系统的人机界面设计及触摸屏		6.6.2 WinCC flexible 2008 的项目组态	
的使用方法	261	方法与技巧	320
6.1 人机界面研究的主要内容及常用		6.6.3 实例组态编辑程序分析	326
认知心理学知识	262	习题	340
6.1.1 人机界面的定义及研究的主要		第7章 运动控制系统工程实例	341
内容	263	7.1 运动控制系统的设计原则与现场调试	
6.1.2 研究人机界面所需要的基础		方法	341
知识	263	7.1.1 运动控制系统设计的一般原则	341
6.1.3 常用认知心理学基础知识	264	7.1.2 运动控制系统设计的基本任务与	
6.2 人机界面与控制系统外壳的色彩		内容	342
搭配	267	7.1.3 运动控制系统设计阶段的划分	343
6.2.1 色彩基础与人机界面设计色彩		7.1.4 设计阶段的电气工程文件的	
搭配	267	组成	344
6.2.2 控制系统中按钮和指示灯的		7.1.5 运动控制系统的现场调试方法	344
颜色	268	7.2 T44—4.0~14.0×1650 钢板横剪线	
6.2.3 控制系统中常用导线的颜色	269	控制系统简介	345
6.2.4 控制系统外壳色彩搭配	269	7.2.1 矫平定尺送料装置的拖动系统	
6.3 显示与控制界面的设计原则	270	要求及设计	345
6.3.1 显示界面的设计	270	7.2.2 系统人机界面设计	348
6.3.2 显示与控制界面的布局设计		7.2.3 横剪线的关键控制技术及主控	
		流程图	350

7.3 HJ300 硅钢片横剪线实仿程序简介 ...	351	7.5.1 螺旋焊管生产线控制系统的技术要求	364
7.3.1 HJ300 线的控制系统 PLC 实仿程序编写	352	7.5.2 螺旋焊管生产线钢板递送自动控制系统的硬件设计	365
7.3.2 HJ300 线的控制系统人机界面实仿程序编写	356	7.5.3 螺旋焊管生产线钢板递送自动控制系统的软件设计	368
7.3.3 HJ300 线的控制系统实仿程序调试	358	7.5.4 螺旋焊管生产线钢板递送自动控制系统的调试与运行	372
7.4 基于现场总线的拉幅定型机控制系统简介	359	习题	372
7.4.1 拉幅定型机的作用和工艺流程	359	附录	373
7.4.2 拉幅定型机控制系统的硬件设计	359	附录 A SPWM 逆变器控制系统工作原理仿真实验	373
7.4.3 拉幅定型机控制系统的软件设计	362	附录 B 转速电流双闭环可逆调速控制系统仿真实验	378
7.4.4 控制系统的现场调试	363	附录 C 典型控制系统外壳设计图实例	381
7.5 螺旋焊管生产线钢板递送自动控制系统简介	364	附录 D 典型控制系统电气原理图	384
		部分习题解答	394
		参考文献	403

绪 论

“运动控制系统工程”是自动化、电气工程及其自动化专业的核心课程之一，是一门应用科学课程。

本课程重点研究运动控制系统和网络运动控制系统的构造过程、组成方法和应用技术，研究解决系统形成后在实际应用中所出现的一些实际问题；熟悉人机界面设计的初步知识、计算机仿真调试与实际调试自动控制系统和网络运动控制系统的一些基本方法和技术。

本课程以“电机学”、“电子学”、“电力电子技术”、“电机拖动”为基础；以“Simulink”为主要研究工具；以“可编程控制器”和“微型计算机或单片机”为主要控制器件；以“传统控制理论和智能控制理论”为指导。

本课程以电动机（交流和直流）作为主要执行元件；以调速器（交流和直流调速器）作为控制信号的主要执行元件；以触摸屏作为主要的人机界面，用现场总线把运动控制系统的三大件，即人机界面、可编程控制器和调速器组成一个运动控制系统的网络。

图 0-1 所示系统是一个典型的网络运动控制系统，要想了解该系统的工作原理应具有以下知识：

要掌握交流电机与直流电机的知识，就应该具有“电机及拖动基础”的知识；要了解转速检测装置和电流检测装置的工作原理就应该具有“检测与转换技术”的知识；要了解可编程控制器和上位机的工作原理就应该具有“可编程控制器”、“微机原理”的知识。

组成系统离不开供电电网，要掌握如何选择变压器、导线，就应该具有“工厂供电”的知识。控制系统原理图组成之后，必须经过计算机仿真，观察所设计的控制系统是否满足生产工艺要求，是否还存在着没有发现的设计缺陷，这就需要具有 Windows 操作系统和 MATLAB 方面的

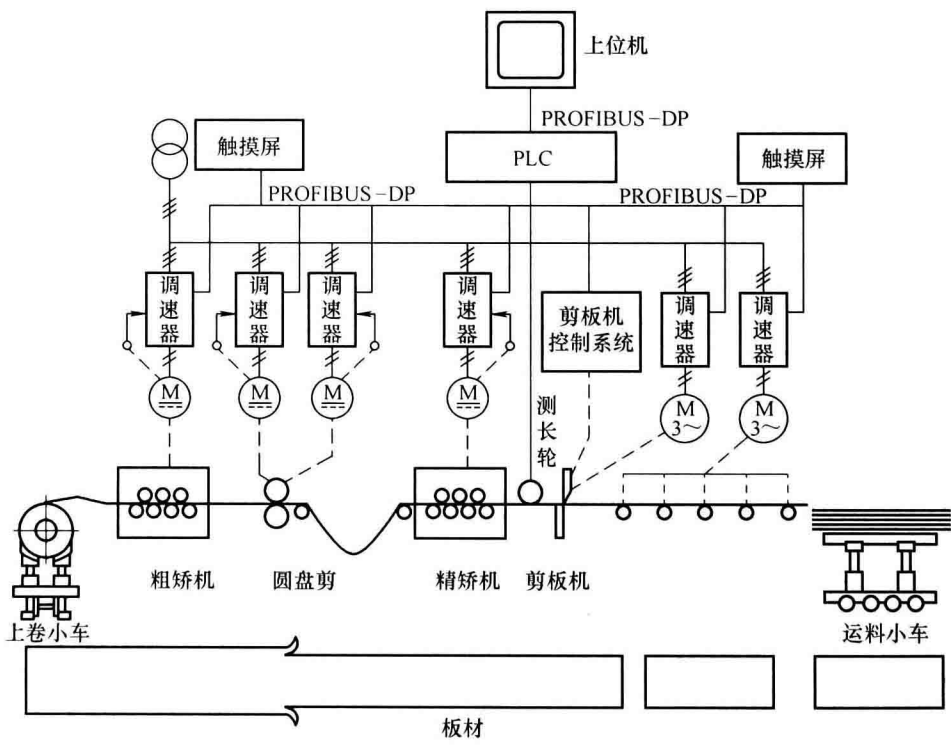


图 0-1 某钢板横剪生产线 PROFIBUS-DP 网络运动控制系统

知识。在计算机仿真过程中，如果系统不能稳定运行怎么办？不能满足系统的动态指标怎么办？这意味还需要掌握“自动控制理论”的知识。有时生产实际要求控制系统的输出具有上升时间短、又无超调的性能，如果采用常规自动控制理论已无法解决时，还需要采用智能控制的策略。

在控制系统组态过程中最关键的两个问题是：其一，硬件结构问题。控制系统为什么这样构造？为什么要引入这种反馈？引入其他的反馈行不行？网络总线种类繁多，选择哪一种总线更合适？其二，软件设计问题。控制系统构造完成后，如何使控制系统满足生产工艺所提出的行为（运动）要求和动、静态技术指标的要求？

要回答上述问题，就必须从“自动控制系统的构造方法”开始探讨。

第 1 章 自动控制系统的构造方法

科学技术发展到今天，人们所能见到的一切机械运动，例如在空中飞行的各种航天航空器、在陆地上运动的各种车辆和在水中航行的各种舰船的运动，一般都可以归结于是由旋转运动产生的。在工厂企业中，除内燃机之外，所有旋转运动都可归结于是由电动机产生的。例如图 1-1 所示的卷烟厂送料机器人自动取料和送料动作和图 1-2 所示的硅钢片生产线上的开卷、送料以及导料等，都是由电动机驱动的。



图 1-1 卷烟厂送料机器人

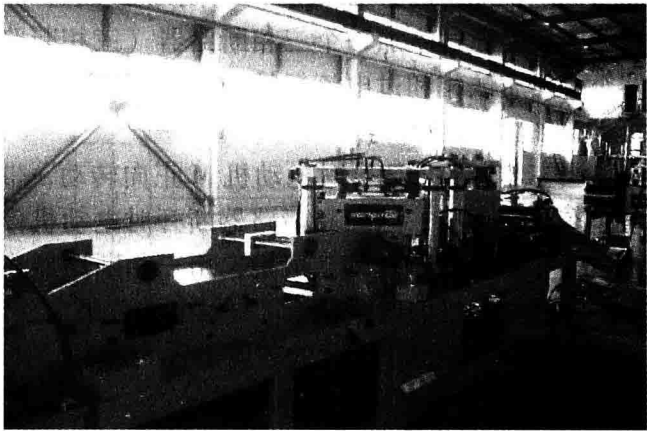


图 1-2 硅钢片横剪线

在各式各样的机械传动中，例如图1-3所示的机械手倒液体的动作过程，电动机在控制系统的控制下，把电能转换成机械能，从而带动生产机械造出满足人们需要的产品的。

然而，电动机不可能自己来完成那些复杂的运动，它们必须在自动控制系统（电气控制电路）的“指挥”之下才能完成。那么电气控制电路如何来设计呢？

按照被控物体的运动形式，自动控制系统的构造方法分为以下两大类：

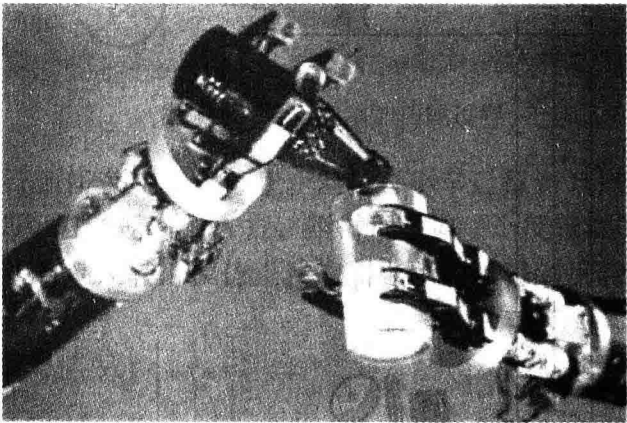
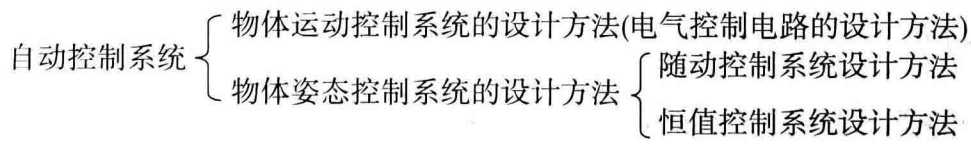


图 1-3 机械手运动控制系统



本章首先讨论物体运动控制系统（电气控制电路）的设计方法，对于物体姿态控制系统，主要研究恒值控制系统。另外，本章还对机器人控制基础与运动轨迹规划作简单介绍。

1.1 物体运动控制系统的设计方法

物体运动控制系统（电气控制电路）的设计方法所遵循的基本定理和基本方法是功能添加法、步进逻辑公式法和最少程序步判定定理。

在物体运动控制系统（电气控制电路）的设计方法当中，最基本的方法是功能添加法。

1.1.1 功能添加法

什么是“功能添加法”呢？下面首先观察用功能添加法设计一辆小车自动往复运动控制电路的过程。

添加功能前的初图如图 1-4 所示，假设有一辆小车由电动机 M 带动。电动机要旋转必须有电源，于是通过添加一个三相断路器（三相断路器至少具有缺相和过电流保护功能）接通了电动机 M，如图 1-5 所示。

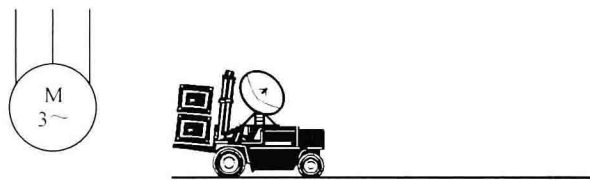


图 1-4 添加功能前的初图

当三相断路器闭合时电动机 M 正向转动，带动小车向右运行；当三相断路器断开时电动机停止转动，小车停止运动。但是，用三相断路器直接去断开电动机的电源，除了有触电的危险之外，还有就是没有一点自动化的“味道”。自动化的标志之一就是按一下按钮（或者用其他方法，如声控方法），电动机就能自动起动。

于是，又添加了控制功能，用常开按钮 S_F 控制接触器 KM_1 线圈的得电状态；用 KM_1 的主触点控制电动机的得电状态，如图 1-6 所示。

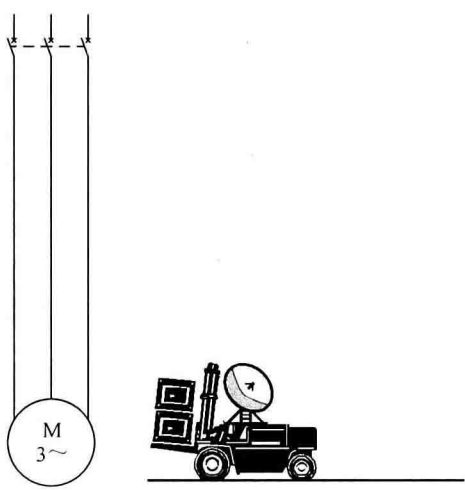


图 1-5 添加三相断路器

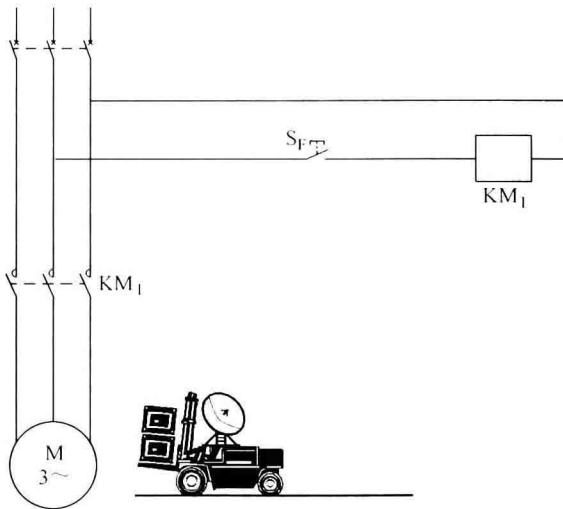


图 1-6 第一次添加功能过程

此时三相断路器变成了总电源开关，总电源开关闭合后，只要按一下起动按钮 S_F ，接触器 KM_1 的线圈得电。之后所有与线圈标号相同的触点均动作，常开触点闭合，常闭触点断开。即主电路当中的常开触点 KM_1 闭合，电源接通，电动机正转，小车开始向右运动。

但在小车向右运动的过程中，操作者必须一直按着按钮，因为一旦松开，按钮 S_F 自动弹回（自动控制系统一般不能使用带自锁的按钮），接触器 KM_1 的线圈失电，其常开触点断开，电动

机 M 脱离电网，小车就会停止运动。

要想把操作者的手“解放”出来，必须在接触器 KM_1 线圈得电后，用一根导线使按钮 S_F 短路，使其在线圈 KM_1 得电后失去控制作用。由于此短路线是在线圈 KM_1 得电后出现的，因此用 KM_1 常开辅助触点与按钮 S_F 并联即可实现这种功能，如图 1-7 所示。

不按动按钮 S_F ，接触器 KM_1 线圈就不会得电；一旦按动 S_F ， KM_1 的线圈得电，根据线圈得电后有“常开触点闭合，常闭触点断开”的特点，与 S_F 并联的常开触点 KM_1 也会闭合，因此当按钮 S_F 自动弹回时， KM_1 的线圈仍然得电。因为此时与 S_F 并联的这个常开触点起到自锁的作用，所以通常称这种触点为“自锁触点”。

由于自锁触点的出现，接触器 KM_1 的线圈得电后，电动机一直处于旋转状态，小车也就一直向右运动。如何让小车停下来呢？通常，在电气控制电路上添加一个常闭按钮 S_T ，问题即可解决，如图 1-8 所示。当小车需要停止时，只需按一下按钮 S_T ，接触器 KM_1 的线圈失电，小车就会停止。

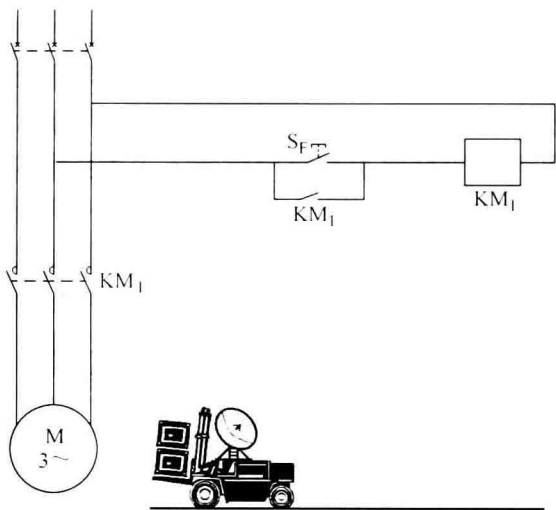


图 1-7 第二次添加功能过程

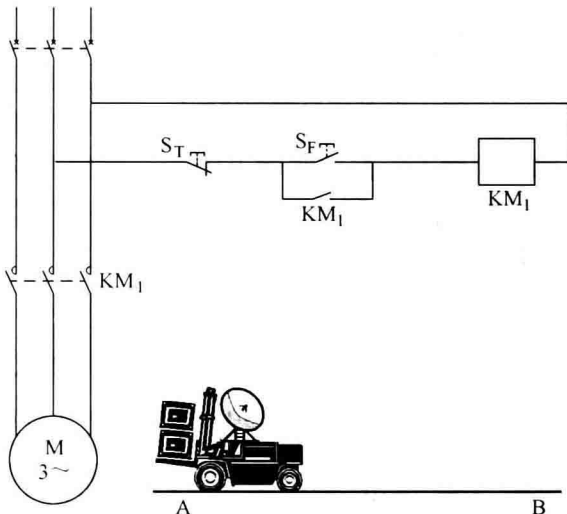


图 1-8 第三次添加功能过程

利用这种电路，可以使小车从 A 点向右运行到任意一点 B 停止。但是，小车运行到 B 点以后，如果希望轻轻地按一下另一个按钮，小车即可自动返回到 A 点，则需再添加一个反转功能。也就是说，轻轻地按一下反转按钮就可让电动机自动反转。模仿正转控制电路即可得到反转的电气控制电路。这里用 S_R 表示反向起动按钮； KM_2 表示控制电动机反转的接触器。根据电机学的知识，电动机的三相电源的相序发生变化，电动机的旋转方向就会发生变化，添加了反转控制的电路如图 1-9 所示。

小车向右运动：按下按钮 S_F ，线圈 KM_1 得电，所有常开触点闭合，电动机 M 正转，小车开始向右运动；按下按钮 S_T ，线圈 KM_1 失电，所有常开触点断开，电动机 M 停止，小车不再向右运动。

小车向左运动：按下按钮 S_R ，线圈

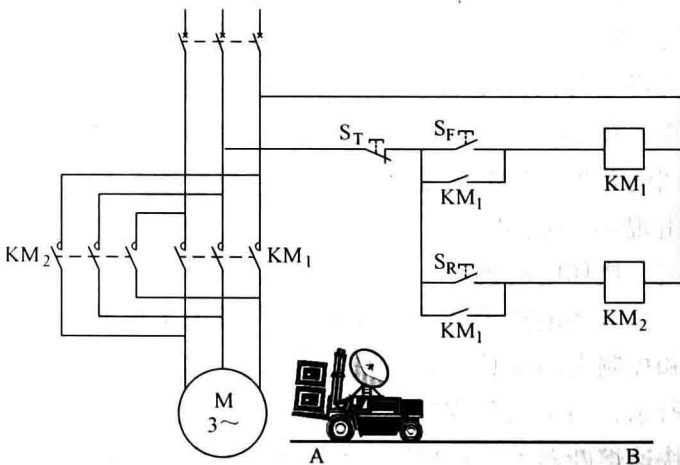


图 1-9 第四次添加功能过程

KM_2 得电，所有常开触点闭合，电动机 M 反转，小车开始向左运动；按下按钮 S_T ，小车停止。

但是这个电路有一个缺点，当小车正在向某一个方向运动时（如向右运动），如果需要停止，按错了按钮，把另一方向的起动按钮（例如 S_R ）当成了停止按钮， KM_1 、 KM_2 两个线圈将会同时得电，造成电源短路事故。为了避免此现象的发生，必须做如下改进：当小车向某一方向运动时，不先按动停止按钮，另一个运动方向的接触器就不能得电，如图 1-10 所示。如果小车正在向右运动，按动反向起动按钮 S_R ， KM_2 不可能得电，电源也就不会短路。这种触点称为互锁触点。

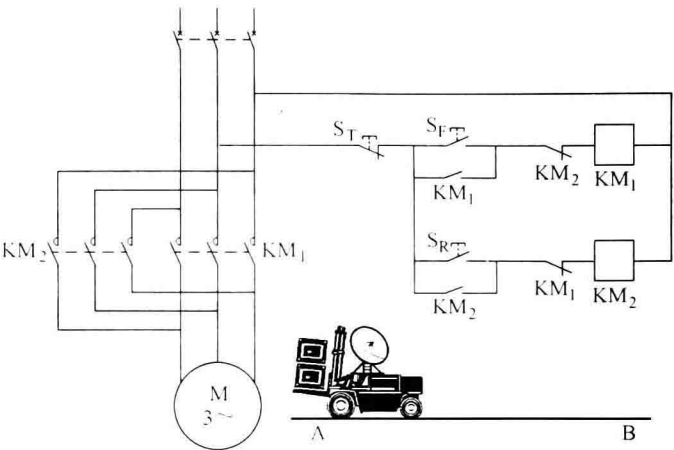


图 1-10 第五次添加功能过程

使用此电路，就可以人工控制着小车作往复运动。如果生产工艺要求小车自动往复运动，如何实现呢？只要在 A、B 两点加两个位置检测装置即可。假设在 A、B 两点分别加装行程开关或接近开关，而每个行程开关至少有一对常开和常闭触点。把这些触点添加到控制电路中即得到了能控制小车自动往复运动的控制电路，如图 1-11 所示。图中， ST_1 和 ST_2 为行程开关。

假设小车原来停在 A、B 之间的某一点上：

S_F 闭合 $\rightarrow$ KM_1 得电 $\left\{ \begin{array}{l} \text{主电路主触点闭合} \rightarrow \text{电动机正转} \rightarrow \text{小车向右运行} \\ \text{控制电路辅助触点闭合和断开} \rightarrow \text{维持电动机正转和避免 } KM_2 \text{ 得电} \end{array} \right.$

当小车压动 B 点的行程开关 ST_2 时（只要不按停止按钮，小车一直作往复运动）：

KM_1 失电， KM_2 得电 $\left\{ \begin{array}{l} \text{主电路触点闭合} \rightarrow \text{电动机反转} \rightarrow \text{小车向左运行} \\ \text{控制电路触点闭合} \rightarrow \text{维持电动机反转和避免 } KM_1 \text{ 得电} \end{array} \right.$

图 1-11 所示电路原理虽然正确，但还不能投入实际运行，因为任何一个物体都有惯性，当小车从 A 点运行到 B 点时小车压动行程开关 ST_2 ， KM_1 立即失电， KM_2 立即得电，由于惯性，小车不可能立即停止，电动机还在惯性作用下正转。但是在 KM_1 失电的同时， KM_2 已经得电，这将造成定、转子间的相对速度过大而烧坏电动机。为此需在控制电路增加延长反向得电时间继电器 KT_2 ，如图 1-12 所示。这样，在小车压动行程开关 ST_2 后，经过一段时间的延时， KM_2 才能得电（延时时间的长短由现场调试决定），避免了立即反向、过电流，烧坏电动机。

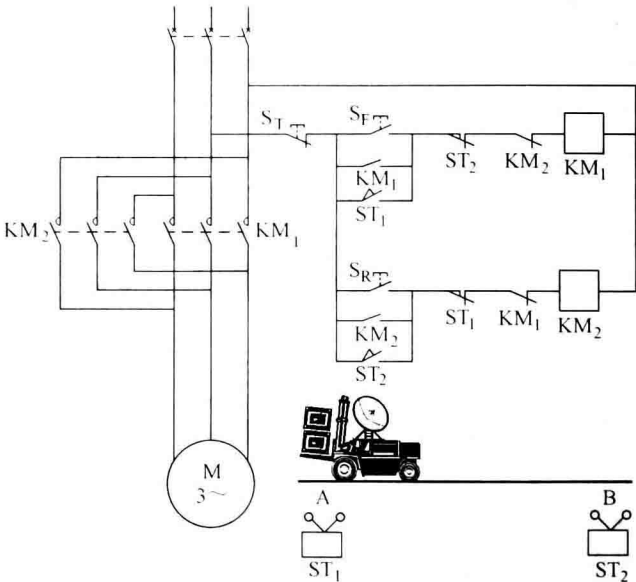


图 1-11 第六次添加功能过程

上述电路投入实际运行还应考虑主电路和控制电路应具有短路保护的功能。如图 1-13 所示，当主电路或控制电路出现短路故障时，快速熔断器 FU_1 或 FU_2 迅速熔断，避免了故障的扩大，从而保护未发生故障的元件。在图

1-13 中还增加了电动机过热检测元件，当电动机由于某种原因引起过热，例如电动机的冷却系统出现故障时，串联在控制电路中的过热检测元件的常闭触点 $A_1 - B_1$ 就会自动断开，实现对电动机过热的保护。过热检测器的动作值的大小由实际情况决定。

随着各种问题的解决，控制电路逐渐地完善起来。每增加一种功能，原控制电路的功能保持不变，这种设计方法称为“功能添加法”。这种方法的优点是灵活方便，但是对于比较复杂的生产工艺，则不适合采用此设计电路。

例如图 1-14 所示生产工艺，小车从 A 点运行到 B 点，然后运行到 C 点，再向右运行到 B 点，再返回向左运行到 A 点，然后重复上述过程。要用“功能添加法”设计，没有丰富的设计经验是相当困难，这是该方法的不足之处。

综上所述，功能添加法的优点是使用灵活方便；缺点是对于复杂的生产工艺，用此方法设计电气控制电路比较困难。

那么对于图 1-14 所示的生产工艺，应如何来设计电路呢？于是就产生了下面的设计方法。

1.1.2 步进逻辑公式法

1. 规定

逻辑代数等式左端是电气控制电路的线圈符号，等式右端是能使该线圈得电的所有的触点符号。例如将图 1-13 电气控制电路图用逻辑代数方程组可表示如下：

$$\begin{cases} KM_1 = (S_F + KM_1 + KT_1) \cdot \overline{ST_2} \cdot \overline{KM_2} \cdot \overline{S_T} \cdot \overline{\theta} \\ KM_2 = (S_R + KM_2 + KT_2) \cdot \overline{ST_1} \cdot \overline{KM_1} \cdot \overline{S_T} \cdot \overline{\theta} \\ KT_1 = ST_1 \cdot \overline{S_T} \cdot \overline{\theta} \\ KT_2 = ST_2 \cdot \overline{S_T} \cdot \overline{\theta} \end{cases}$$

2. 程序步

能使物体产生位移的全部有关输出状态保持不变的一段时间区域称为一个程序步，只要有一个输出状态发生变化就转入下一步。

在图 1-13 所示控制小车自动往复运行的控制电路

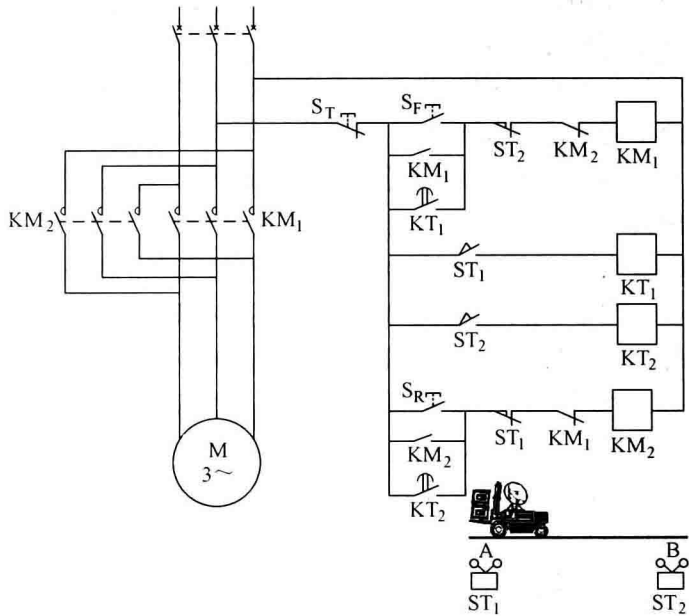


图 1-12 第七次添加功能过程

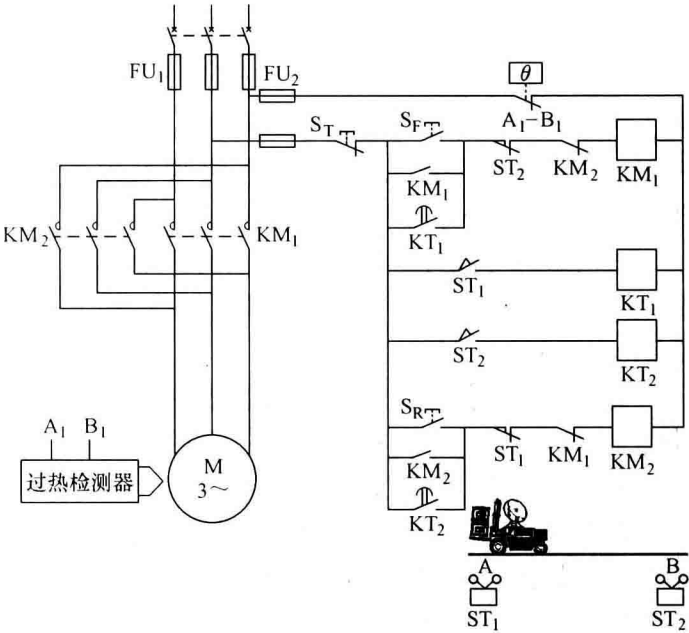


图 1-13 第八次添加功能过程

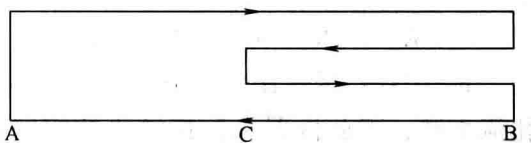


图 1-14 生产工艺要求

中，控制系统的输出信号为 KM_1 和 KM_2 ，输入信号由两个起动按钮和停止按钮发出，反馈信号由行程开关和过热继电器控制发出。如果用程序步来描述，只需两个程序步，如图 1-15 所示。

因为图 1-13 所示控制系统只有 KM_1 和 KM_2 两个输出信号，在小车从 A 点向 B 点运行期间， KM_1 保持得电状态， KM_2 保持失电状态，由定义可得这是一个程序步。在小车从 B 点向 A 点运行期间， KM_2 保持得电状态， KM_1 保持失电状态，所以又形成一个程序步。因此，用两个程序步就可以描述小车自动往复运动的全过程。

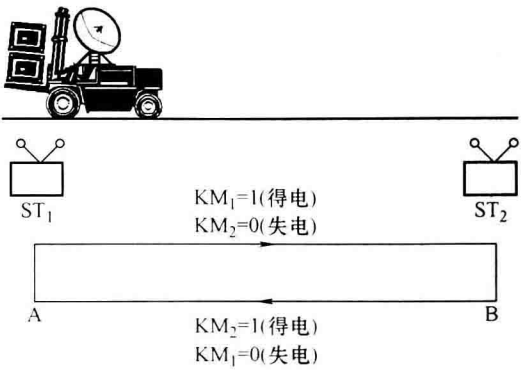


图 1-15 小车自动往复运行轨迹

当用运行轨迹标示程序步时，对运行轨迹作如下规定：有箭头表示的（导数连续的）线段说明小车有位移或有程序步；无箭头表示的线段说明小车无位移或无程序步。

3. 步进逻辑公式

步进逻辑公式如下：

$$K_i = (ST \cdot K_{i-1} + K_i) \cdot \overline{K_{i+1}} \tag{1-1}$$

式中， K_i 表示第 i （程序）步； K_{i+1} 表示第 $i+1$ （程序）步； K_{i-1} 表示第 $i-1$ （程序）步； ST 表示转步信号，通常由位置检测器产生或人为给定产生。

位置检测器分接触式和非接触式两类。其中，非接触式有光、声、波和磁四类。当转步信号由人为给定产生时，又分固定式和随机式两类。固定式一般由定时器和信号发生器产生，随机式一般由人机界面产生。当转步信号 ST 是行程开关时，式（1-1）步进逻辑公式用电气原理图及 PLC 的梯形图表示，如图 1-16 所示。

式（1-1）说明，对于比较复杂的连续化的生产工艺，每个程序步之间一般存在如下关系：

每个程序步都是由前一步接触或感应转步信号 ST 产生的，每一步都因后一步的出现而消失。其推导过程如下：

假设 K 表示中间继电器的线圈或触点，第 i 程序步用逻辑代数书写的过程为：

每一步 K_i 的产生都是由前一步 K_{i-1} 接触或感应 ST 所产生

$$K_i = ST \cdot K_{i-1}$$

产生后应该有一段时间区域保持不变，故应该有自保（自锁）

$$K_i = ST \cdot K_{i-1} + K_i$$

每一步 K_i 的消失都是由后一步 K_{i+1} 的出现而消失

$$K_i = (ST \cdot K_{i-1} + K_i) \cdot \overline{K_{i+1}}$$

式（1-1）尽管比较简单，但是许多自动化流水线、工业机器人和机械手的控制电路的形成过程都由此公式而来。

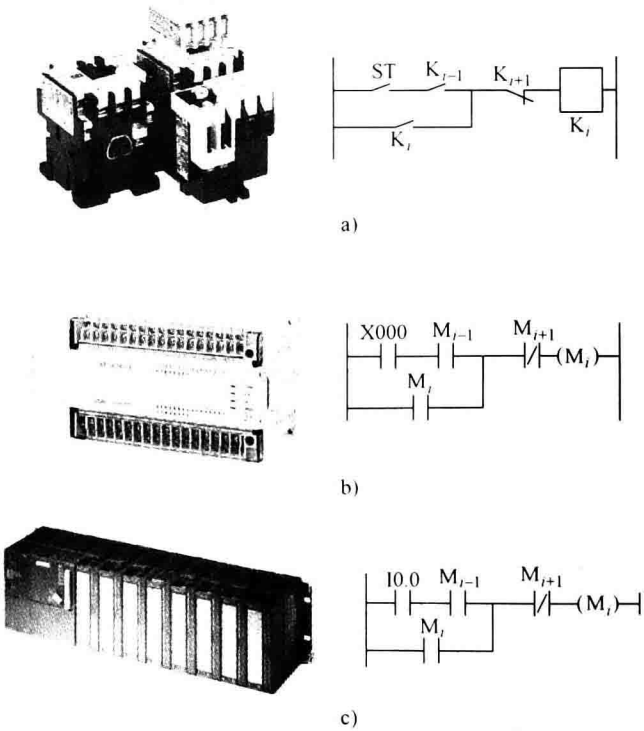


图 1-16 步进逻辑公式用电路原理图
和 PLC 梯形图的表示方法

a) 电路原理图表示法 b) 三菱 PLC 梯形图表示法
c) 西门子 PLC 梯形图表示法