

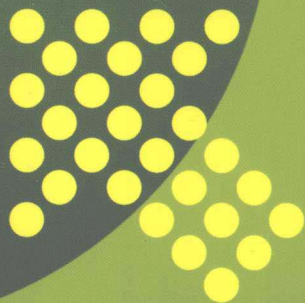
21世纪高等学校规划教材



DIANQI KONGZHI YU PLC YINGYONG

电气控制与PLC应用

王晓敏 陶恒林 主 编
袁 勇 李斌贵 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

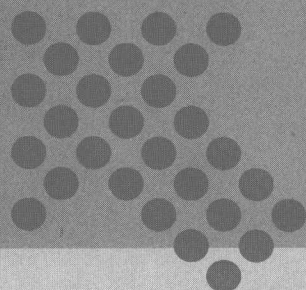
21世纪高等学校规划教材



DIANQI KONGZHI YU PLC YINGYONG

电气控制与PLC应用

主 编	王晓敏	陶恒林
副主编	袁 勇	李斌贵
编 写	王 桥	兰 蓉
	何朝阳	陈经文
主 审	弭洪涛	



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

全书共分 12 章, 主要介绍三相交流异步电动机的运行特性、常用低压电器、继电—接触器控制系统、常见机电设备线路分析、PLC 基本知识、三菱 FX 系列 PLC 和西门子 S7-200 系列 PLC 的结构组成、指令系统和编程、编程软件的使用方法, PLC 的通信系统、应用程序设计和应用举例。每章都有重点难点提示、小结及复习与思考。全书内容选择恰当, 理论联系实际, 突出实用和针对性。

本书可作为高职高专院校机电技术应用、数控技术、机械制造、电气自动化及相关专业的教材, 也可作为各类短期培训班的培训教材, 还可作为机电一体化技术开发人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气控制与 PLC 应用/王晓敏, 陶恒林主编. —北京: 中国电力出版社, 2010. 2

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 0034 - 7

I. ①电… II. ①王… ②陶… III. ①电气控制—高等学校—教材
②可编程序控制器—高等学校—教材 IV. ①TM571. 2 ②TM571. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 009041 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 2 月第一版 2010 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.5 印张 497 千字

定价 32.80 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前 言

随着社会的进步和科技的发展,各类机电设备大量采用可编程控制器(PLC)取代传统的继电—接触器,使电气控制技术向自动化、智能化、集成化、网络化方向发展,这已经成为企业技术进步和技术改造的一个重要趋势。可编程控制器(PLC)是以微处理器为基础,综合计算机技术、电子应用技术、自动控制技术以及通信技术发展起来的新型工业自动化控制装置。可编程控制器(PLC)作为机电自动化的主导产品,其可靠性极高、使用极方便巨大优越性,已广为工程技术人员所熟知。因此,对可编程控制器(PLC)进行普及、应用和推广是十分必要的。

编写本书的目的是要为读者提供一本内容完整、文字精练、通俗易懂的电气控制技术应用教材。机电设备的继电—接触器控制和可编程序控制两部分内容有内在关联,属同一体系,但是两者的发展阶段不同。本书首先介绍三相交流异步电动机的运行特性、常用低压电器的结构、继电—接触器控制系统、常见机电设备电路的分析,然后引入 PLC 的基本原理、重点介绍三菱 FX 系列 PLC 和西门子 S7 系列 PLC 的结构组成、指令系统和编程、编程软件的使用方法,PLC 的通信系统、PLC 的总体设计和典型应用等。

本书在内容选取上,力求反映当前机电设备控制新技术发展的方向,以提高实际动手能力为目的,选择了一些能提高学生的学习兴趣、拓宽其知识面的典型实际应用控制内容,重点强调 PLC 的总体设计和控制应用能力的培养。本书将继电器控制部分和 PLC 控制部分有机结合在一起,由机电设备的基本电气控制环节过渡到机电设备的 PLC 自动化、网络化电气控制线路,在注重基础理论教育的同时,突出实践性教学环节,力图做到深入浅出、层次分明、详略得当,尽可能体现高职教育的特点。在文字叙述上,力求通俗易懂,便于理解。每章都有重点难点提示、小结及复习与思考,以方便读者学习使用,使读者对所学知识能得到进一步的理解和掌握。

本书第 1、2、3 章由三峡电力职业学院王晓敏编写,第 4 章由葛洲坝集团公司三峡机电安装工程施工项目部王桥编写,第 5 章由三峡电力职业学院兰蓉编写,第 6、7 章由三峡电力职业学院袁勇编写,第 8 章由三峡电力职业学院李斌贵编写,第 9、10 章由葛洲坝集团公司机械船舶有限公司陶恒林编写,第 11 章由三峡电力职业学院何朝阳编写,第 12 章由三峡电力职业学院陈经文编写,三峡电力职业学院机电系孙晋桃、王尧、蔡波、姚小丽、严敏、张继参与了本书的部分习题编写和校对工作,全书由王晓敏负责统稿。

本书由北华大学弭洪涛教授主审。在本书编写过程中,得到许多同志的支持和帮助;编写中还参考引用了部分文献材料,在此一并向有关文献的作者表示诚挚的谢意。

如果您对这个系列的教材有什么意见和建议,可以发邮件至 wxm-0717@163.com 与我们联系。

由于作者的水平所限,时间仓促,书中难免存在不妥及疏漏之处,恳切希望专家学者和读者不吝指教。

编 者

2009 年 11 月

目 录

前言	
绪论	1
第1章 三相交流异步电动机的运行特性	4
1.1 三相交流异步电动机的基本特性	4
1.2 三相交流异步电动机的运行原理	7
1.3 三相交流异步电动机的起动	13
1.4 三相交流异步电动机的调速	17
1.5 三相交流异步电动机的反转与制动	22
小结	26
思考与练习	27
第2章 常用低压电器	29
2.1 低压电器的分类和基本结构	29
2.2 低压开关电器	33
2.3 低压保护电器	41
2.4 接触器	44
2.5 继电器	47
小结	54
思考与练习	54
第3章 继电—接触器控制系统	56
3.1 电气控制线路的绘制	56
3.2 交流电动机的起动控制	59
3.3 交流电动机的电气制动和调速控制	73
3.4 直流电动机控制线路	79
3.5 电气控制线路的保护	82
小结	84
思考与练习	85
第4章 常见机电设备线路分析	87
4.1 电气控制线路分析基础	87
4.2 常用机床的电气控制线路	89
4.3 小型冷库的电气控制线路	107
4.4 桥式起重机的电气控制线路	109
4.5 电液控制系统分析	115
小结	118

思考与练习	118
第 5 章 PLC 基本知识	120
5.1 PLC 的基本结构及特点	120
5.2 PLC 的分类及应用	125
5.3 PLC 的工作原理	128
5.4 PLC 的编程语言	132
5.5 PLC 的性能指标	134
小结	137
思考与练习	138
第 6 章 三菱 FX2N 系列 PLC	139
6.1 FX2N 系列 PLC 的硬件结构	139
6.2 FX2N 系列 PLC 的编程元件	142
6.3 FX2N 系列 PLC 的技术指标	156
小结	159
思考与练习	159
第 7 章 FX2N 系列 PLC 的指令和编程	161
7.1 FX2N 系列 PLC 的基本逻辑指令	161
7.2 FX2N 系列 PLC 的编程原则	169
7.3 FX2N 系列步进梯形指令及状态编程法	172
7.4 FX2N 系列 PLC 的功能指令及编程	179
小结	188
思考与练习	188
第 8 章 西门子 S7-200 系列 PLC	191
8.1 S7-200 系列 PLC 的硬件结构	191
8.2 S7-200 系列 PLC 的数据与存储	196
8.3 S7-200 系列 PLC 的内部资源	199
8.4 S7-200 系列 PLC 的性能指标	207
小结	209
思考与练习	209
第 9 章 S7-200 系列 PLC 的指令和编程	210
9.1 S7-200 系列 PLC 的基本逻辑指令	210
9.2 S7-200 系列 PLC 的数据处理指令	220
9.3 S7-200 系列 PLC 的程序控制指令	222
9.4 S7-200 简单编程实例	226
小结	230
思考与练习	231
第 10 章 PLC 编程软件的使用	233
10.1 FX 系列 PLC 编程器及其应用	233
10.2 FXGP/WIN-C 编程软件	239

10.3	STEP 7-MicroWIN 编程软件	248
10.4	编程调试及运行监控	256
10.5	PLC 仿真软件的使用	259
	小结	261
	思考与练习	262
第 11 章	PLC 程序设计和应用	263
11.1	PLC 控制系统的总体设计	263
11.2	PLC 程序的设计方法	265
11.3	PLC 程序设计的编程技巧	273
11.4	PLC 的应用设计	275
	小结	281
	思考与练习	282
第 12 章	PLC 的通信系统	283
12.1	PLC 通信的基础知识	283
12.2	FX2N 系列 PLC 的通信	291
12.3	FX2N 系列 PLC 通信功能的应用	297
12.4	S7-200 系列 PLC 的通信	302
12.5	S7-200 系列 PLC 通信功能的应用	312
	小结	316
	思考与练习	316
	参考文献	318

绪 论

0.1.1 电气控制技术的发展

电气控制技术是以各类电动机为动力的传动装置与系统为对象,以实现生产过程自动化的控制技术。电气控制系统是其中的主干部分,在国民经济各行业中的许多部门得到广泛应用,是实现工业生产自动化的重要技术手段。

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,从笨重麻烦发展到信息化处理;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。

继电—接触器控制系统至今仍是许多生产机械设备广泛采用的基本电气控制形式,也是学习更先进电气控制系统的基础。它主要由继电器、接触器、按钮、行程开关等组成,由于其控制方式是断续的,故称为断续控制系统。继电—接触器控制系统具有控制简单、方便实用、价格低廉、易于维护、抗干扰能力强等优点。但由于其接线方式固定,灵活性差,难以适应复杂和程序可变的控制对象的需要。

在实际生产中,由于大量存在用开关量控制的简单的程序控制过程,而实际生产工艺和流程又是经常变化的,因而传统的继电—接触器控制系统经常不能满足这种要求,从 20 世纪 30 年代开始,机械加工企业为了提高生产效率,采用机械化流水作业的生产方式,对不同类型的零件分别组成自动生产线。随着产品机型的更新换代,生产线承担的加工对象也随之改变,这就需要改变控制程序,使生产线的机械设备按新的工艺过程运行。而继电—接触器控制系统是采用固定接线的,很难适应这个要求。另外,大型自动生产线的控制系统使用的继电器数量很多,这种有触点的电器工作频率较低,在频繁动作情况下寿命较短,从而造成系统故障,使生产线的运行可靠性降低。为了解决这些问题,20 世纪 60 年代初期,技术人员利用电子技术研制出矩阵式顺序控制器和晶体管逻辑控制系统来代替继电—接触器控制系统,它们通过组合逻辑元件插接或编程来实现继电器接触控制,能够根据生产的需要改变控制程序,而又远比电子计算机结构简单、工作可靠、价格低廉。但矩阵式顺序控制器和晶体管逻辑控制系统的装置体积大,功能受到一定限制。由于这些控制装置本身性能存在不足,因此未能获得广泛应用。

随着大规模集成电路和微处理机技术的发展及应用,上述电气控制技术也发生了根本性的变化,在 20 世纪 70 年代出现了将计算机的存储技术引入顺序控制器,产生了新型工业控制器——可编程控制器(PLC)。它用软件手段实现各种控制功能,是一种自诞生起就得到迅速发展的新型工业控制装置。

可编程控制器(PLC)兼备了计算机控制和继电器控制系统两方面的优点,故目前在世界各国已作为一种标准化通用装置普遍应用于工业控制。可编程控制器具有通用性强、可靠

性高、能适应恶劣的工业环境，指令系统简单、编程简便易学、易于掌握，体积小、维修工作少、现场连接安装方便等一系列优点，正逐步取代传统的继电—接触器控制系统，广泛应用于冶金、采矿、建材、机械制造、石油、化工、汽车、电力、造纸、纺织、装卸、环保等各个行业的控制中。

在自动化领域，可编程控制器与 CAD/CAM、工业机器人并称为加工业自动化的三大支柱，其应用日益广泛。可编程控制器技术是以硬接线的继电—接触器控制为基础，以微处理器为核心，逐步发展为既有逻辑控制、计时、计数，又有运算、数据处理、模拟量调节、联网通信等功能控制装置。它可通过数字量或者模拟量的输入、输出满足各种类型机械控制的需要。可编程控制器及有关外部设备，均按既易于与工业控制系统连接成一个整体，又易于扩充其功能的原则设计，已成为生产机械设备中开关量控制的主要电气控制装置。

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。电气控制技术是随着科学技术的不断进步、生产工艺不断提出新的要求而迅速发展的，随着新的控制理论和新型电器及电子器件的出现，又为电气控制技术的发展开拓了新的途径。

0.1.2 本课程的性质与任务

“电气控制与 PLC 应用”课程是一门实用性很强的专业课，主要内容是以电动机或其他执行电器为控制对象，介绍继电—接触器控制系统和 PLC 控制系统的工作原理、典型机械的电气控制线路以及电气控制系统的设计方法。当前 PLC 控制系统应用十分普遍，已经成为实现工业自动化的主要手段，是教学的重点所在。

但是，虽然 PLC 的功能极为强大，它既可实现开关量（数字量）的控制，也能实现连续量（模拟量）的控制，但它最初是为了在数字量控制中取代继电—接触器控制系统而产生的，设计思想源自继电—接触器，而且 PLC 的输入、输出仍然与继电—接触器密切相关，两者有许多相同和相似之处。因此熟悉继电—接触器控制技术后，就很容易接受 PLC 的编程语言，为进一步学习可编程控制器奠定基础。

另一方面，根据我国当前情况，继电—接触器控制系统仍然是机械设备最常用的电气控制方式，许多控制要求不太复杂的场合仍在使用继电—接触器。如电力拖动中，电动机主电路的通断仍由接触器来完成。而且低压电器正在向小型化、长寿命发展，出现了功能多样的电子式电器，使继电—接触器控制系统性能不断提高，因此它在今后的电气控制技术中仍然占有相当重要的地位。

继电—接触器控制与 PLC 控制各有特点，并不会因为 PLC 的高性能而完全取代继电—接触器等传统器件。可以预见，在今后相当长的时间内，PLC 与继电—接触器等传统器件仍将会是电气自动控制装置的主要元器件，因此掌握继电—接触器控制技术也是学习和掌握 PLC 应用技术所必需的基础。

本课程的目标是培养学生对电气控制技术的实际应用能力。其具体要求是：

- (1) 熟悉电气控制技术中常用低压电器的结构原理、用途和型号，具有合理选择、使用常用低压电器的能力。
- (2) 熟练掌握继电—接触器控制线路的基本环节，具有阅读和初步分析电气控制线路工作原理的能力。
- (3) 了解电气控制电路分析的方法和步骤，熟悉典型生产设备的电气控制线路。

-
- (4) 熟悉 PLC 的基本工作原理及应用发展概况。
 - (5) 熟练掌握 PLC 的基本指令系统和典型电路的编程，掌握 PLC 的程序设计方法。能够根据一般工艺过程和控制要求进行系统设计和编写 PLC 应用程序。
 - (6) 了解 PLC 的网络和通信原理。
 - (7) 具有设计和改进一般机械设备电气控制线路的基本能力。

第1章 三相交流异步电动机的运行特性

【本章重点难点提示】 本章要求掌握异步电动机的工作原理；熟悉三相交流异步电动机运行时的机械特性；了解三相交流异步电动机的起动电流和起动转矩的计算；掌握三相交流异步电动机的起动、调速方法和特点；熟悉三相交流异步电动机的电磁制动及机械特性。

难点在于三相交流异步电动机运行时的电磁关系、起动电流和起动转矩的计算、三相交流异步电动机调速及电磁制动时的电磁关系、三相交流异步电动机各种运行状态时转差率 s 的变化。

三相交流异步电动机是目前生产、生活中应用最广泛的一种电机。据统计，在供电系统的动力负载中，约有 85% 的负载由异步电动机驱动。与其他电动机相比较，三相交流异步电动机具有结构简单、制造方便、坚固耐用、运行可靠、价格低廉、检修维护方便等一系列优点；还具有较高的运行效率和令人满意的工作特性，能满足各行各业大多数生产机械的传动要求。

以交流电动机为原动机的电力拖动系统为交流电力拖动系统。三相交流异步电动机由于结构简单、价格便宜，且性能良好、运行可靠，故广泛应用在各种拖动系统中。

1.1 三相交流异步电动机的基本特性

1.1.1 三相交流异步电动机的运行原理

如同所有的旋转电机，三相交流异步电动机在结构上分成固定不动的定子和旋转的转子两大部件，两者之间还存在气隙。三相交流异步电动机的定子上嵌有三相对称绕组，而转子绕组则是一个自成回路的三相或多相绕组。

当绕组与三相对称电源接通后，三相对称电流所形成的合成磁场将是一个单方向的旋转

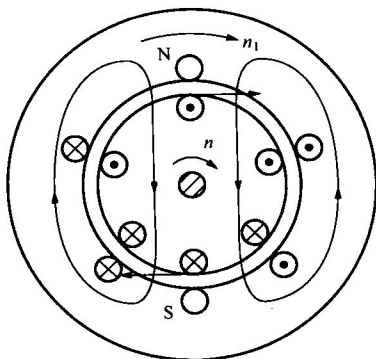


图 1-1 三相交流异步电动机
的基本工作原理

磁场。现假设该磁场以同步转速 $n_1 = \frac{60f_1}{p}$ 沿顺时针方向旋转，由于转子导条与定子旋转磁场之间存在相对切割速度时，转子导体就会切割磁力线而感应电动势 e_2 ，其方向可由右手定则判定。因为转子绕组自成封闭回路，所以转子导条中会有电流 i_2 出现，该载流导体在定子磁场中将受到电磁力的作用，其方向可由左手定则判定。该电磁力会形成与定子磁场旋转方向相同的电磁转矩，电磁转矩推动转子旋转，从而将输入的电功率转变为机械能输出，这就是三相交流异步电动机的基本工作原理，如图 1-1 所示。

在三相交流异步电动机中，转子转动的方向与磁场的旋转方向始终是一致的，要改变异步电动机的转向，只需要改变旋转磁场的方向。若设转子转速为 n ，如果 $n=n_1$ ，则定子磁场与转子之间就没有相对运动，即不存在电磁感应关系，不能在转子导体中感应电动势并形成电流，也就无法在转子上产生电磁转矩，从而难以维持原转子转速继续旋转，所以，正常运行的异步电动机转子速度不可能等于磁场旋转的速度，而是略小于同步转速，异步电动机异步的名称由此而来。

为了表征转子转速与定子旋转磁场同步转速之间的差异，转子转速 n 与同步转速 n_1 之差称为转差 Δn ，转差 Δn 与同步转速 n_1 之比称为转差率 s 。则

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \times 100\% \quad (1-1)$$

转差率 s 是决定异步电动机运行情况的一个基本数据，也是异步电动机一个很重要的参数，对分析和计算异步电动机的运行状态及其机械特性有着重要的意义。当异步电动机额定运行时，其转差率很小，一般在 0.01~0.06 之间。

1.1.2 三相交流异步电动机的铭牌数据

在三相交流异步电动机外壳显眼的位置上有一块牌子，这块牌子叫铭牌。铭牌上注明这台电动机的型号及主要技术数据（额定值），这些数据是正确选择、安装、使用和维修三相交流异步电动机的重要依据。

1. 三相交流异步电动机的额定值

(1) 额定功率 P_N 。额定功率是指在满载运行时三相交流异步电动机轴上所输出的机械功率，同时也是电动机长期运行所不允许超过的最大值，以 kW 或 W 为单位。

(2) 额定电压 U_N 。额定电压是指电动机额定运行时定子绕组上所加的线电压。三相交流异步电动机要求所接的电源电压值的变动一般不应超过额定电压的 $\pm 5\%$ 。电压过高，电动机容易烧毁；电压过低，电动机难以起动，即使起动后电动机也可能带不动负载，同样容易烧坏电机。额定电压的单位为 V 或 kV。

(3) 额定电流 I_N 。额定电流是指三相交流异步电动机在额定电源电压下，输出额定功率时，流入定子绕组的线电流，同时也是电动机长期运行所不允许超过的最大值，以 A 为单位。若超过额定电流长期过载运行，三相交流异步电动机就会过热乃至烧毁。

(4) 额定转速 n_N 。额定转速是指三相交流异步电动机额定运行状态时电动机每分钟的转速，单位为 r/min。电动机运行状态时，转子转速略小于同步转速，如 $n_N = 1440\text{r/min}$ ，则 $n_1 = 1500\text{r/min}$ 。

(5) 额定功率因数 $\cos\varphi_N$ 。额定功率因数是指电动机在额定状态运行时，定子侧的功率因数。

(6) 额定频率 f_N 。额定频率是指三相交流异步电动机额定运行时所接的交流电源每秒钟内周期变化的次数。我国规定标准电源频率为 50Hz。所以除出口产品外，国内使用的交流异步电动机的额定频率均为 50Hz。

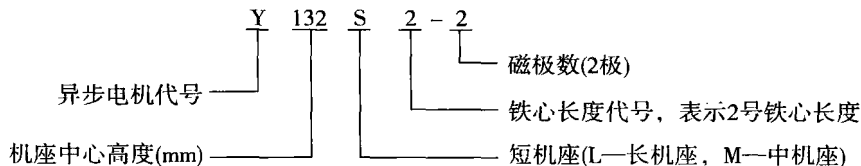
在三相交流异步电动机内存在如下关系

$$P_N = \sqrt{3}U_N I_N \cos\varphi_N \eta_N \quad (1-2)$$

式中 η_N ——额定效率。

2. 三相交流异步电动机的型号

异步电动机的型号是由汉语拼音的大写字母与阿拉伯数字组成，其中汉语拼音字母是根据电机全名称选择有代表意义的汉字，用该汉字的第一字母组成。下面以一具体型号说明其意义：



3. 三相交流异步电动机的绝缘等级

三相交流异步电动机的绝缘等级是指三相交流异步电动机所采用的绝缘材料的耐热能力，它表明三相交流异步电动机允许的最高工作温度。三相交流异步电动机的绝缘等级和最高允许温度见表 1-1。

表 1-1 三相交流异步电动机的绝缘等级和最高允许温度

等级	绝缘材料	最高允许温度(℃)
A	用普通绝缘漆浸渍处理的棉纱、丝、纸及普通漆包线的绝缘漆	105
E	环氧树脂、聚酯薄膜、青壳纸、三醋酸纤维薄膜、高强度漆包线的绝缘漆	120
B	云母、玻璃纤维、石板(用有机胶黏合或浸渍)	130
F	云母、玻璃纤维、石板(用合成胶黏合或浸渍)	155
H	云母、玻璃纤维、石板(用硅有机树脂黏合或浸渍)	180

4. 三相交流异步电动机的工作方式

三相交流异步电动机的工作方式也叫定额，是指三相交流异步电动机承受负载情况的说明，即允许连续使用的时间，分为连续、短时、周期断续工作方式三种。

(1) 连续工作方式。连续工作方式是指电动机带额定负载运行时，运行时间很长，电动机的温升可以达到的稳态温升的工作方式。[电动机本身的温度与标准环境温度(40℃)的差值称为温升。]

(2) 短时工作方式。短时工作方式是指电动机带额定负载运行时，运行时间很短，使电动机的温升达不到稳态温升；停机时间很长，使电动机的温升可以降到零的工作方式。

(3) 周期断续工作方式。周期断续工作方式是指电动机带额定负载运行时，运行时间很短，使电动机的温升达不到稳态温升；停止时间也很短，使电动机的温升降不到零，工作周期小于 10min 的工作方式。

5. 三相交流异步电动机的接法

三相交流异步电动机定子绕组的连接方法有星形(Y)和三角形(Δ)两种。定子绕组的连接只能按规定方法连接，不能任意改变接法，否则会损坏三相电动机。

6. 三相交流异步电动机的防护等级

三相交流异步电动机的防护等级表示三相交流异步电动机外壳防止异物和水进入电机内部的等级。其中 IP 是防护等级标志符号，其后面的两位数字分别表示电机防固体和防水能力。数字越大，防护能力越强，如 IP44 中第一位数字“4”表示电动机能防止直径或厚度大

于1mm的固体进入电机内壳。第二位数字“4”表示能承受任何方向的溅水。

1.1.3 三相交流异步电动机的主要系列简介

1. Y系列

Y系列是一般用途的小型笼型电动机系列，Y系列取代了原先的JO2系列，原来的老系列JO系列和JO2系列已被淘汰。Y系列的额定电压为380V，额定频率为50Hz，功率范围为0.55~90kW，同步转速为750~3000r/min，外壳防护型式为IP44和IP23两种，B级绝缘。Y系列的技术条件已符合国际电工委员会（IEC）的有关标准。

2. JDO2系列

该系列是小型三相多速异步电动机系列。它主要用于各式机床以及起重传动设备等需要多种速度的传动装置。

3. JR系列

该系列是中型防护式三相绕线式转子异步电动机系列，容量为45~410kW。

4. YR系列

YR系列是一种大型三相绕线转子异步电动机系列，容量为250~2500kW，主要用于冶金工业和矿山中。

1.2 三相交流异步电动机的运行原理

1.2.1 三相交流异步电动机的空载运行

三相交流异步电动机的三相定子绕组与三相对称电源接通，轴上不带任何机械负载，转子空转时的运行状态，称为空载运行。

三相交流异步电动机空载运行时，轴上没有任何机械负载，电动机所受阻转矩很小，其转子转速 n 接近同步转速 n_1 ，即 $n \approx n_1$ ，转子与气隙磁场的相对运动转速 Δn 就接近零，即 $\Delta n = n_1 - n \approx 0$ 。这时三相交流异步电动机内只有定子绕组上的电流形成气隙磁场，该电流称为空载励磁电流。

显然，对于结构固定的三相交流异步电动机，当电源频率 f_1 一定时，主磁通 $\Phi_m \propto U_1$ 。若外加电压 U_1 一定，主磁通 Φ_m 大体上也为一定值。由于三相交流异步电动机有气隙，空载电流则较大，一般为额定电流的30%~50%，在小型三相交流异步电动机中，甚至可以达到额定电流的60%。

1.2.2 三相交流异步电动机的负载运行

负载运行时，由于转子转速 $n < n_1$ ，则转子三相对称绕组将切割气隙旋转磁场而感应三相对称电动势，在转子上产生三相对称电流，进而在转子上产生单方向的旋转磁动势。

若定子磁场为顺时针方向，由于 $n < n_1$ ，转子三相电动势的相序则取决于气隙旋转磁场依次切割转子绕组的顺序，即取决于转子与气隙磁场的相对运动转速 $\Delta n = n_1 - n$ 的方向。而 Δn 的方向与 n_1 的方向一致，因此感应而形成的转子电动势或电流的相序也必然为顺时针方向。由于合成磁动势的转向决定于转子绕组中电流的相序，所以转子合成磁动势 F_2 的转向与定子磁动势 F_1 的转向相同，也为顺时针方向，即在异步电动机中转子磁动势的旋转方向与定子磁动势的旋转方向始终相同。

若转子绕组感应电动势及电流的频率为 f_2 ，则

$$f_2 = \frac{p\Delta n}{60} = \frac{spn_1}{60} = sf_1 \quad (1-3)$$

式中 p ——电动机定子磁极对数；

f_1 ——电源频率。

设转子磁动势相对转子的旋转速度为 n_2 ， p_2 为电动机转子感应磁极对数，则

$$n_2 = \frac{60f_2}{p_2} = \frac{s60f_1}{p} = sn_1 \quad (1-4)$$

于是转子磁动势 F_2 在空间（相对于定子）的旋转速度 n_2 为

$$n_2 + n = sn_1 + n = n_1 \quad (1-5)$$

即等于定子磁动势 F_1 在空间的旋转速度，也就是说，无论三相交流异步电动机的转速如何变化，定、转子磁动势总是相对静止的。

下面分析三相交流异步电动机运行的两种特殊情况：

(1) 三相交流异步电动机空载运行时，转子等效电阻为 r_2 ，此时转子转速 $n \rightarrow n_1$ ， $s \rightarrow 0$ ， $\frac{1-s}{s}r_2 \rightarrow \infty$ ，转子相当于开路状态。

(2) 三相交流异步电动机转子堵转时（接上电源，转子被堵住不动时），此时转子转速 $n=0$ ， $s=1$ ， $\frac{1-s}{s}r_2=0$ ，此时转子电流大约为额定电流的 5~8 倍，同时定子电流会随之增大，大约为额定电流的 4~7 倍，若不及时切断电源，电动机很快会因为过热而烧毁，所以在三相交流异步电动机时应多注意电动机转子的堵转情况。三相交流异步电动机在起动瞬间也属于这种情况。

1.2.3 三相交流异步电动机的工作特性

1. 三相交流异步电动机的电磁转矩表达式

电磁转矩对三相交流异步电动机的拖动性能起着极其重要的作用，直接影响着电动机的起动、调速、制动等性能。其常用表达式有以下三种形式。

(1) 电磁转矩 T 的物理表达式

$$T = C_T \Phi_m I_2 \cos\varphi_2 \quad (1-6)$$

式中 Φ_m ——每极磁通，Wb；

C_T ——转矩常数，与电机结构有关；

I_2 ——转子电流；

$\cos\varphi_2$ ——转子功率因数。

可见，三相交流异步电动机的电磁转矩是由转子电流的有功分量与主磁通相互作用产生的。它的大小和电磁场传递的电磁功率成正比，即与主磁通及转子电流的有功分量的乘积成正比。

上述电磁转矩表达式很简洁，物理概念清晰，常用于三相交流异步电动机的定性分析。

(2) 电磁转矩 T 的参数表达式。电磁转矩 T 的物理表达式 (1-6) 在具体应用时，由于 I_2 和 $\cos\varphi_2$ 都随转差率 s 而变化，因而不便于分析异步电动机的各种运行状态，很难进行定量计算。为此要用到电磁转矩的参数表达式。

电磁转矩 T 的参数表达式为

$$T = \frac{3pU_1^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]} \quad (1-7)$$

式中 U_1 ——加在定子绕组上的相电压, V;

r_1 、 r_2' ——定子、转子绕组电阻, Ω ;

x_1 、 x_2' ——定子、转子绕组漏抗, Ω 。

由电磁转矩 T 的参数表达式 (1-7) 可见, 当外施电压 U_1 不变, 电源频率 f_1 不变, 电机参数 r_1 、 r_2' 、 x_1 、 x_2' 为常值时, 电磁转矩 T 是转差率 s 的函数。

因式 (1-7) 为一个二次方程, 当 s 为某一个值时, 电磁转矩有一最大值 T_{\max} 。令 $dT/ds=0$, 即可求得产生最大电磁转矩 T_{\max} 时的临界转差率 s_m , 即

$$s_m = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (1-8)$$

将式 (1-8) 代入式 (1-7), 求得对应 s_m 的最大电磁转矩 T_{\max} , 即

$$T_{\max} = \frac{3pU_1^2}{4\pi f_1 [r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]^2} \quad (1-9)$$

由式 (1-8) 和式 (1-9) 可见:

- 1) 电源的频率及参数不变时, 最大转矩与电压的平方成正比。
- 2) 最大转矩和临界转差率都与定子电阻 r_1 及定、转子漏抗 x_1 、 x_2' 有关。
- 3) 最大转矩与转子回路中的电阻 r_2' 无关; 而临界转差率则与 r_2' 成正比, 调节转子回路的电阻, 可使最大转矩在任意 s 时出现。

转矩的参数表达式便于分析参数变化对电机运行性能的影响, 可用于定量计算。

(3) 电磁转矩的实用表达式。在工程计算上, 利用转矩的参数表达式比较繁琐, 为了使用方便, 希望通过电动机产品目录或手册中所给的一些技术数据来求得机械特性, 需使用电磁转矩的实用表达式。

电磁转矩的实用表达式为

$$\frac{T}{T_{\max}} = \frac{2}{\frac{s_m}{s} + \frac{s}{s_m}} \quad (1-10)$$

在三相交流异步电动机运行时, 如果已知 T_{\max} 和 s_m , 应用式 (1-10) 可方便地作出异步电动机的转矩—转差率曲线。

2. 三相交流异步电动机的机械特性

机械特性是指在一定条件下, 电动机的转速与转矩之间的关系, 即 $n=f(T)$ 。因为异步电动机的转速 n 与转差率 s 之间存在一定的关系, 故异步电动机的机械特性往往多用 $T=f(s)$ 的形式表示, 称 $T-s$ 曲线。机械特性分为固有机机械特性和人为机械特性两种。

(1) 固有机机械特性。异步电动机的固有机机械特性是指在额定电压和额定频率下, 按规定方式接线, 定、转子外接电阻为零时, T 与 s 的关系, 即 $T=f(s)$ 曲线。

当 $U=U_N$ 、 $f=f_N$ 时, 异步电动机的固有机机械特性曲线如图 1-2 所示。曲线形状分析如下:

- 1) AB 段。因 s 较大, 且异步电动机中 $r_1 + r_2' \ll x_1 + x_2'$, $T = \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1 (x_1 + x_2')^2} \frac{r_2'}{s}$ 近似为双

曲线，随着 s 的减小， T 反而增大。

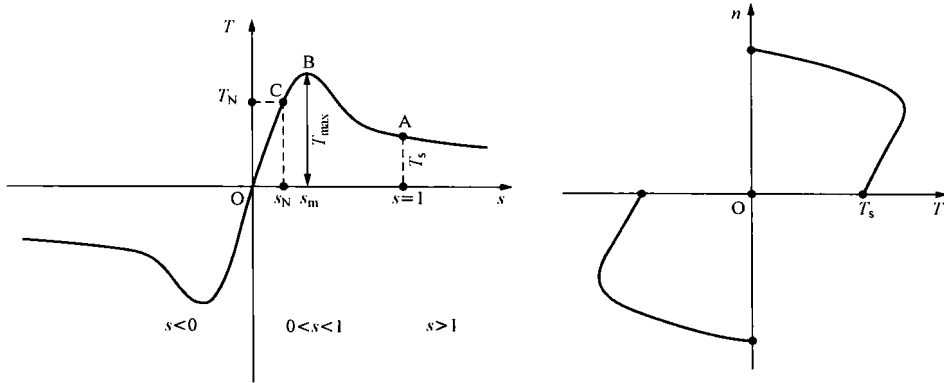


图 1-2 异步电动机的固有机械特性曲线

2) BO 段。因 s 很小， $T = \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1 r_2' / s} = \frac{3pU_1^2 s}{2\pi f_1 r_2'}$ 近似为直线，随 s 的减小， T 亦减小。

曲线几个特殊点分析如下：

- 同步点 O。在理想电动机中， $n = n_1$ ， $s = 0$ ， $T = 0$ ，又称理想空载运行点。
- 额定点 C。异步电动机额定电磁转矩等于空载转矩加上额定负载转矩，因空载转矩比较小，有时认为额定电磁转矩等于额定负载转矩。额定负载转矩可从铭牌数据中求得，即

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} \quad (1-11)$$

式中 T_N ——额定负载转矩， $N \cdot m$ ；

P_N ——额定功率， kW ；

n_N ——额定转速， r/min 。

- 临界点 B。一般电动机的临界转差率 s_m 约为 $0.1 \sim 0.2$ ，在 s_m 时，电动机产生最大电磁转矩 T_m 。

根据电力拖动稳定运行的条件， $T-s$ 曲线中的 AB 段为不稳定区，BO 段是稳定运行区，即异步电动机稳定运行区域为 $0 < s < s_m$ 。为了使电动机能够适应在短时间过载而不停转，电动机必须留有一定的过载能力。

所谓过载能力，是指最大转矩 T_{max} 与额定转矩 T_N 之比，即

$$\lambda_k = \frac{T_{max}}{T_N} \quad (1-12)$$

过载能力 λ_k 的大小反映了三相交流异步电动机短时过负荷的能力和运行的稳定性，是三相交流异步电动机运行性能的一个重要指标，普通三相交流异步电动机 λ_k 为 $1.6 \sim 2.2$ ，起重、冶金用三相交流异步电动机 $\lambda_k = 2.2 \sim 2.8$ ，冲击性负载要求 $\lambda_k = 2.7 \sim 3.7$ 。

- 起动点 A。电动机刚接入电网，但尚未开始转动的瞬间，电动机轴上产生的转矩叫电动机起动转矩 T_{st} （又称堵转转矩）。此时 $n = 0$ ， $s = 1$ ，于是

$$T = T_{st} = \frac{3pU_1^2 r_2'}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]} \quad (1-13)$$

由式 (1-13) 可以看出：