

高等职业教育机电类专业规划教材

电气控制与PLC (三菱)

**DIANQI KONGZHI YU PLC
(SANLING)**

杨林建 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



配 电 子 课 件

高等职业教育机电类专业规划教材

电气控制与 PLC (三菱)

主 编 杨林建

参 编 方 婷 刘淑香

王代清 王俊英

主 审 罗光伟

常州大学图书馆
藏书章

机械工业出版社

本书是基于机床电气控制技术的实践需要而编写的,主要内容有交直流电动机及调速、机床常用电器元件、机床电气控制基本环节、设备电气控制电路、可编程序控制器,介绍了机床继电器-接触器控制系统中电器元件的结构、原理、图形符号、文字符号及电器元件的基本性能参数和选用、机床电气控制的基本环节、典型设备电气控制电路分析、电气控制电路设计、电气故障诊断的基本方法以及可编程序控制器等内容,本书关于可编程序控制器的内容以三菱FX_{2N}系列为主,简要介绍了西门子S7-200系列。

本书可作为高职高专院校机电类、电子信息类专业学生的教材,也可供相关专业的工程技术人员参考。

本书配有电子课件,凡使用本书作为教材的教师可登录机械工业出版社教育服务网 www.cmpedu.com 注册后下载。咨询邮箱: cmpgaozhi@sina.com。咨询电话:010-88379375。

图书在版编目(CIP)数据

电气控制与PLC:三菱/杨林建主编. —北京:机械工业出版社,2015.8
高等职业教育机电类专业规划教材
ISBN 978-7-111-50680-5

I. ①电… II. ①杨… III. ①电气控制—高等职业教育—教材②plc技术—
高等职业教育—教材 IV. ①TM571.2②TM571.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第142864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:刘良超 责任编辑:刘良超

版式设计:霍永明 责任校对:肖琳

封面设计:鞠杨 责任印制:李洋

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2015年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·13.25印张·328千字

0001-3000册

标准书号:ISBN978-7-111-50680-5

定价:29.00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

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

前 言

本书基于机床电气控制技术的实践需要,按照“必需、够用”的原则进行编写,本书在编写过程中注重培养学生解决实际问题的能力及自学能力、训练学生的职业实践技能,并针对高职类教材在实用性、通用性和新颖性方面的特殊要求,即教材的内容要满足学生毕业后的工作需要,在内容选取上注重与工作过程相结合,突出实用和易学的特点。

本书内容共5章,包括交直流电动机及调速、机床常用电器元件、机床电气控制基本环节、设备电气控制电路、可编程序控制器。

本书特点:

- 1) 内容选取由简单到复杂,全书配有工业应用图例和在企业中大量使用的机床控制电路,深入浅出,通俗易懂。
- 2) 注重理论知识培养的同时,增加了实践技能训练的内容。为建立学生学习的长效机制,在每章最后增加了拓展资源的内容。
- 3) 考虑工业应用实际,在PLC部分主要以日本三菱公司的FX_{2N}系列为主,同时简要介绍了西门子公司S7-200系列,以便于工程技术人员和学生触类旁通。
- 4) 综合性强,为适应企业对机电一体化技术人才的需要,根据自动化技术的发展现状,本书以继电器、接触器和可编程序控制器为主,同时介绍了液压系统电气控制的设计和电液控制技术。在机床电气控制设计部分介绍了逻辑设计方法和经验设计方法。增加了机床电气故障诊断的基本知识,考虑到部分企业的生产实际,增加了桥式起重机电气控制电路分析的部分内容。

本书由四川工程职业技术学院杨林建担任主编,由罗光伟担任主审。第1章由王代清编写,第2章由王俊英编写,第3章由刘淑香编写,绪论、第4章由方婷编写,第5章由杨林建编写。

由于编者水平有限,加之编写时间仓促,书中不足和错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。如有意见和建议请发到邮箱810372283@qq.com,以便再版时改进。

编 者

目 录

前言		
绪论	1	
第1章 交直流电动机及调速	5	
1.1 交流电动机及调速	5	
1.2 直流电动机及调速	15	
【实践技能训练】 运用变频器改造桥式起重机控制电路	19	
【拓展资源】 变频调速的基本知识	21	
本章小结	26	
思考题与习题	26	
第2章 机床常用电器元件	27	
2.1 常用的开关电器	27	
2.2 常用的主令电器	32	
2.3 熔断器	35	
2.4 热继电器	38	
2.5 交流接触器	41	
2.6 电气控制中常用的继电器	44	
【实践技能训练】 低压电器的认识与拆装	49	
【拓展资源】 低压电器的基本知识	49	
本章小结	50	
思考题与习题	51	
第3章 机床电气控制基本环节	52	
3.1 机床电气原理图及绘制规则	52	
3.2 三相异步电动机的起动控制电路	56	
3.3 三相异步电动机的正、反转控制电路	60	
3.4 三相异步电动机的制动控制电路	64	
【实践技能训练】 三相电动机正、反转控制接线与调试	68	
【拓展资源】 半自动车床刀架的电液控制	69	
本章小结	70	
思考题与习题	70	
第4章 设备电气控制电路	72	
4.1 C650 型车床电气控制电路	72	
4.2 X6132 型铣床电气控制电路	76	
4.3 Z3040 型摇臂钻床电气控制电路	84	
4.4 T619 型镗床电气控制电路	89	
4.5 起重机的电气控制	93	
【实践技能训练】 X6132 型铣床电气控制电路的安装与调试	105	
【拓展资源】 CW6163 型卧式车床电气原理图的设计	106	
本章小结	112	
思考题与习题	112	
第5章 可程序控制器	114	
5.1 PLC 概述	114	
5.2 FX _{2N} 系列 PLC 的基本指令系统	125	
5.3 FX _{2N} 系列 PLC 的步进指令及功能指令	150	
【实践技能训练1】 PLC 基本操作：编程软件的使用	183	
【实践技能训练2】 PLC 的编程与调试	187	
【拓展资源】 S7-200 PLC 的基本知识	188	
本章小结	200	
思考题与习题	200	
附录	203	
附录 A 电气图常用图形及文字符号一览表	203	
附录 B 常见 Y 系列电动机技术数据	206	
参考文献	208	

绪 论

各工业生产部门的生产机械设备，基本上都是通过金属切削机床加工生产出来的，因此机床是机械制造业中的主要加工设备，机床的质量、数量及自动化水平，都直接影响到整个机械工业的发展。机床工业发展的水平是一个国家工业水平的重要标志。

0.1 电气自动控制在现代机床设备中的地位

过去，生产机械由工作机构、传动机构、原动机三部分组成。自从电器元件与计算机应用在机械上后，现代化生产机械已包含第四个组成部分——以电气为主的自动控制系统，它使机器的性能不断提高，使工作机构、传动机构的结构大大简化。

所谓“自动控制”是指在没有人直接参与（或仅有少数人参与）的情况下，利用自动控制系统，使被控制对象自动地按预定规律工作。导弹能准确地命中目标，人造卫星能按预定轨道运行并返回地面指定的地点，宇宙飞船能准确地月球上着陆并安全返回，都离不开自动控制技术。在工业上，机器按照规定的程序自动地实现起动与停止；在微型计算机控制的数控机床上，按照计算机发出的程序指令，自动按预定的轨迹进行加工，自动退刀、自动换工件，再自动加工下一个工件；在轧钢机设备上，用电子计算机计算出轧制速度与轧辊压下量，并通过晶闸管可控整流电路控制电动机来实现这些指令；在自动化仓库中，由可编程序控制器（PLC）自动控制货物的存放与取出；利用可编程序控制器，按照预先编制的程序，使机床实现各种自动加工循环，所有这些都是电气自动控制的应用。

实现自动控制的手段是多种多样的，可以用电气的方法来实现，也可以用机械的、液压的、气动的等来实现自动控制。由于现代化的金属切削机床均用交、直流电动机作为动力源，因而电气自动控制是现代机床的主要控制手段。即使采用其他控制方法，也离不开电气控制的配合。本书就是以机床作为典型对象来研究电气自动控制技术的基本原理、方法和应用，这些基本控制方法自然也适用于其他机器设备及生产过程。

机床设备经过一百多年的发展，结构不断改进，性能不断提高，在很大程度上取决于电气拖动与电气控制技术的更新。电气拖动在速度调节方面具有无可比拟的优越性和发展前途。采用直流或交流无级调速电动机驱动机床，使结构复杂的变速箱变得十分简单，简化了机床结构，提高了效率和刚度，也提高了精度。近年研制成功用于数控车床、铣床、加工中心的电动机—主轴部件（电主轴单元技术），是将交流电动机转子直接安装在主轴上，使其具有宽广的无级调速范围，且振动和噪声均较小，它完全代替了主轴变速齿轮箱，对机床传动与结构将产生变革性影响。

现代化机床设备在电气自动控制方面综合应用了许多先进的科学技术成果，如计算机技术、电子技术、自动控制理论、精密测量技术及传感技术等，特别是在当今的信息时代，微型计算机已广泛用于各行各业，机床是最早应用电子计算机的设备之一。早在 20 世纪 40 年

代末期,电子计算机就与机床有机结合产生了新型机床——数控机床。现在价廉可靠的微型计算机在机床行业中的应用日益广泛,由微型计算机控制的数控机床与数显装置越来越多地在我国各类工厂中获得使用和推广。这些新科学技术的应用,使机床电气设备不断实现现代化,从而提高了机床自动化程度和机床加工效率,扩大了工艺范围,缩短了新产品试制周期,加速了产品更新换代。现代化机床还可以提高产品加工质量,减少工人劳动强度,降低产品成本等。近 20 年来出现的各种机电一体化产品、数控机床、机器人、柔性制造单元及系统等均是机床电气设备实现现代化的硕果。总之,电气自动控制在机床中占有极其重要的地位。

0.2 机床电气自动控制技术发展简介

0.2.1 电气拖动的发展与分类

电气控制与电气拖动有着密切的关系。20 世纪初,由于电动机的出现,使机床的拖动技术发生了变革,人们用电动机代替蒸汽机,使机床的电气拖动技术随着电动机的发展而发展。

1. 成组拖动技术

成组拖动是指一台电动机经天轴(或地轴)通过传送带传动驱动若干台机床工作。由于这种方式存在传动路线长、效率低、结构复杂等缺点,因此早已被淘汰。

2. 单电动机拖动技术

单电动机拖动是指一台电动机拖动一台机床。与成组拖动相比,单电动机拖动简化了传动机构,缩短了传动路线,提高了传动效率,至今有些中小型通用机床仍然采用单电动机拖动技术。

3. 多电动机拖动技术

随着机床自动化程度的提高和重型机床的发展,机床的运动增多,受到的要求也随之提高,从而出现了采用多台电动机驱动一台机床(如铣床)乃至十余台电动机拖动一台重型机床(如龙门刨床)的拖动方式,这样可以缩短机床传动链,易于实现各工作部件运动的自动化。当前重型机床、组合机床、数控机床、自动线等均采用多电动机拖动的方式。

4. 交、直流无级调速技术

由于电气无级调速具有可灵活选择最佳切削用量和简化机械传动结构等优点,20 世纪 30 年代出现的交流电动机-直流发电机-直流电动机无级调速系统,至今还在重型机床上有所应用。20 世纪 60 年代以后,随着大功率晶闸管的问世和变流技术的发展,又出现了晶闸管直流电动机无级调速系统,它较之前者,具有效率高、动态响应快、占地面积小等优点,当前在数控机床、磨床及仿形等机床中已得到广泛应用。由于逆变技术的出现和高压大功率管的问世,20 世纪 80 年代以来交流电动机无级调速系统有了迅速发展,它利用改变交流电的频率等措施来实现电动机转速的无级调速。交流电动机无电刷与换向器,较之直流电动机易于维护且寿命长,很有发展前途。

0.2.2 电气控制系统的发展与分类

1. 逻辑控制系统

逻辑控制系统又称开关量或断续控制系统,逻辑代数是它的理论基础,采用具有两个稳定工作状态的各种电器和电子器件可构成各种逻辑控制系统。逻辑控制系统按自动化程度的不同可分为以下几种:

(1) 手动控制系统 在电气控制的初期,大都采用电气开关对机床电动机的起动、停止、反向等动作进行手动控制,这在现在的砂轮机、台钻等动作简单的小型机床上仍有应用。

(2) 自动控制系统 按其控制原理与采用电器元件的不同又可分为:

1) 继电器。接触器自动控制系统。多数通用机床至今仍采用继电器、接触器、按钮等电器元件组成的自动控制系统,它具有直观、易掌握、易维护等优点,但功耗大、体积大,并且改变控制工作循环较为困难(如果要改变,需重新设计电路)。

2) 顺序控制器。由集成电路组成的顺序控制器具有程序变更容易、程序存储量大、通用性强等优点,广泛用于组合机床、自动线等。20世纪60年代末,又出现了具有运算功能和较大功率输出能力的可编程序控制器(Programmable Controller, PC),又称PLC(Programmable Logic Controller),它是由大规模集成电路、电子开关、晶闸管等组成的专用微型电子计算机,可代替大量的继电器,且功耗小、质量小,在机床上具有广阔的应用前景。

3) 数字控制系统。20世纪40年代末,为了适应中小批量机械加工生产自动化的需要,工程师们应用电子技术、计算机技术、现代控制理论、精密测量等近代科学成就,研制成了数控机床。它是由电子计算机按照预先编好的程序,对机床实行自动化的数字控制。数控机床既有专用机床生产效率高的优点,又兼有通用机床工艺范围广、使用灵活的特点,并且还具有能自动加工复杂的成形表面、精度高等优点,因而具有强大的生命力,发展前景广阔。

数控机床的控制系统最初是由硬件逻辑电路构成的专用数控装置(Numerical Control, NC),但其成本昂贵,工作可靠性差,逻辑功能固定。随着电子计算机的发展,又出现了DNC(Direct Numerical Control)、CNC(Computer Numerical Control)、AC(Adaptive Control)等数控系统。

为了充分发挥电子计算机运算速度快的潜力,曾出现过由一台电子计算机控制数台、数十台、甚至上百台数控机床的“计算机群控系统”,又称计算机直接控制系统,这就是DNC。

随着小型电子计算机的问世,又产生了用小型电子计算机控制的数控系统(CNC),不仅降低了制造成本,还扩大了控制功能和使用范围。

近十年来,随着价格低廉、工作可靠的微型电子计算机的出现,更加促进了数控机床的发展,出现了大量的微型计算机数控系统(Micro-Computer Numerical Control, MNC),当今世界各国生产的全功能和经济型数控机床均系MNC系统。

AC称为自适应控制系统,它能在毛坯余量变化、硬度不均、刀具磨损等随机因素出现时,使机床具有最佳切削用量,从而始终保证具有较高的加工质量和生产效率。

由数控机床、工业机器人、自动搬运车、自动化检测、自动化仓库等组成的统一由中心计算机控制的机械加工自动线称为柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS),它

是自动化车间和自动化工厂的重要组成部分与基础。较之专用机床自动线,它具有能同时加工多种工件、能适应产品变化、使用灵活等优点,当前世界各国均在大力发展数控机床和柔性制造系统。

随着生产的发展,由单个机床的自动化逐渐发展为生产过程的综合自动化。柔性制造系统 FMS,再加上计算机辅助设计 CAD、计算机辅助制造 CAM、计算机辅助质量检测 CAQ 及计算机信息管理系统就可以构成计算机集成制造系统 (Computer Integrated Manufacturing System, CIMS),它是当前机械加工自动化发展的高级形式。机床电气自动化的水平在电气控制技术迅速发展的进程中将被不断推向新的高峰。

2. 连续控制系统

对物理量(如电压、转速等)进行连续自动控制的系统称为连续控制系统,又称模拟控制系统。这类系统一般是具有负反馈的闭环控制系统,常伴有功率放大的特点,且有精度高、功率大、抗干扰能力强等优点。例如,直流电动机驱动机床主轴实现无级调速的系统,交、直流伺服电动机拖动数控机床进给机构和工业机器人的系统均属连续控制系统。

3. 混合控制系统

同时采用数字控制和模拟控制的系统称为混合控制系统,数控机床、机器人的控制驱动系统多属于这类控制系统。数控机床由数字电子计算机进行控制,通过数-模转换器和功率放大等装置驱动伺服电动机和主轴电动机带动机床执行机构产生所需的运动。

0.2.3 课程的内容及要求

机床电气控制技术就是采用各种控制元件、自动装置,对机床进行自动操纵、自动调节转速、按给定程序和自动适应多种条件的随机变化而选择最优的加工方案,以及工作循环自动化等。

机床电气控制技术课程,就是研究解决机床电气控制的有关问题,阐述机床电气控制原理,机床电气控制电路的设计方法及常用电器元件的选择、可编程控制器等内容,本书只涉及最基本、最典型的控制电路及控制实例。

在学完本课程以后,学生应掌握电气控制技术的基本原理;学会分析一般机床的电气控制电路并具有一定的设计能力;对可编程序控制器应具有基本的运用能力。

综上所述,通过对本门课程的学习,学生应具有机电一体化产品的综合分析和设计能力。

本节主要知识点

1. 机床电气控制是采用电器元件构成的电气线路对生产设备、生产过程所进行的控制;继电器-接触器控制系统主要是根据控制要求,用导线将一定数量的继电器、接触器连接而成的电路。

2. 电气拖动的发展:成组拖动—单电动机拖动—多电动机拖动—交、直流无级调速。

第1章 交直流电动机及调速

1.1 交流电动机及调速

交流电动机主要分为同步电动机和感应电动机两大类，它们的工作原理和运行性能都有很大差别。同步电动机的转速与电源频率之间有着严格的关系，感应电动机的转速虽然也与电源频率有关，但不像同步电动机那样严格。同步电动机主要用作发电机，目前交流发电机几乎都是采用同步电动机。感应电动机则主要用作电动机，大部分生产机械用感应电动机作为原动机。

本章主要分析讨论三相感应电动机并结合讨论交流电动机中的一般问题。

1.1.1 三相感应电动机的工作原理

在图 1-1 中，N—S 是一对磁极，在两个磁极相对的空间里装有一个能够转动的圆柱形铁心，在铁心外圆槽内嵌放有导体，导体两端各用一圆环将它们接成一个整体。

如图 1-1 所示，如在某种因素的作用下，使磁极以 n_1 的速度逆时针方向旋转，形成一个旋转磁场，转子导体就会切割磁力线而产生感应电动势 e 。用右手定则可以判定，在转子上半部分的导体中，感应电动势的方向为 $\oplus$ ，下半部分导体的感应电动势方向为 $\ominus$ 。在感应电动势的作用下，导体中就有电流 i ，若不计电动势与电流的相位差，则电流 i 与电动势 e 同方向。载流导体在磁场中将受到一电磁力的作用，由左手定则可以判定电磁力 F 的方向。由于电磁力 F 所形成的电磁转矩 T 使转子以 n 的速度旋转，旋转方向与磁场的旋转方向相同，这就是感应电动机的基本工作原理。

旋转磁场的旋转速度 n_1 称为同步转速。由于转子转动的方向与磁场的旋转方向是一致的，所以如果 $n = n_1$ ，则磁场与转子之间就没有相对运动，它们之间就不存在电磁感应关系，也就不能在转子导体中形成感应电动势、产生电流，从而不能产生电磁转矩。所以感应电动机的转子速度不可能等于磁场旋转的速度，因此这种电动机一般也称为异步电动机。

转子转速 n 与旋转磁场转速 n_1 之差称为转差 Δn ，转差与磁场转速 n_1 之比称为转差率 s 。

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

转差率 s 是决定感应电动机运行情况的一个基本数据，也是感应电动机一个很重要的参数。

实际上感应电动机的旋转磁场是由装在定子铁心上的三相绕组，通入对称的三相电流而

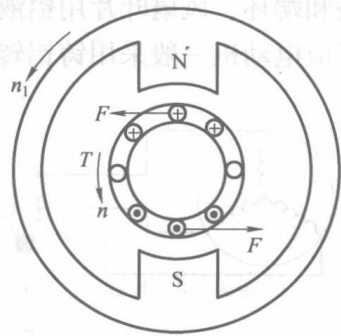


图 1-1 三相感应电动机工作原理

产生的。

1.1.1.1 三相感应电动机的结构

和其他旋转电动机一样,感应电动机也是由定子和转子两大部分组成。定子、转子之间为气隙,感应电动机的气隙比其他类型的电动机要小得多,一般为 $0.25 \sim 2.0\text{mm}$,气隙的大小对感应电动机的性能影响很大。下面简要介绍感应电动机主要零部件的构造、作用和材料。

1. 定子部分

(1) 机座 感应电动机的机座仅起固定和支撑定子铁心的作用,一般用铸铁铸造而成。根据电动机防护方式、冷却方式和安装方式的不同,机座的形式也不同。

(2) 定子铁心 定子铁心由厚 0.5mm 的硅钢片叠压而成,铁心内圆有均匀分布的槽,用以嵌放定子绕组,冲片上涂有绝缘漆(小型电动机也有不涂漆的)作为片间绝缘以减少涡流损耗,感应电动机的定子铁心是电动机磁路的一部分。

(3) 定子绕组 三相感应电动机的定子绕组是一个三相对称绕组,它由三个完全相同的绕组组成,每个绕组即为一相,三个绕组在空间相差 120° 电角度,每相绕组的两端分别用 $U1-U2$ 、 $V1-V2$ 、 $W1-W2$ 表示,可以根据需要接成星形或三角形。

2. 转子部分

(1) 转子铁心 转子铁心的作用和定子铁心相同,一方面作为电动机磁路的一部分,一方面用来安放转子绕组。转子铁心也是用厚 0.5mm 的硅钢片叠压而成,套在转轴上。

(2) 转子绕组 感应电动机的转子绕组分为绕线转子与笼型两种,根据转子绕组的不同,分为绕线转子感应电动机与笼型感应电动机。

绕线转子绕组也是一个三相绕组,一般接成星形,三根引出线分别接到转轴上的三个与转轴绝缘的集电环上,通过电刷装置与外电路相连。这就有可能在转子电路中串接电阻以改善电动机的运行性能,如图 1-2 所示。

笼型绕组在转子铁心的每一个槽中插入一根铜条(导条),在铜条两端各用一个铜环(称为端环)将导条连接起来,称为铜排转子,如图 1-3a 所示。也可用铸铝的方法,将转子导条和端环、风扇叶片用铝液一次浇铸而成,称为铸铝转子,如图 1-3b 所示。 100kW 以下的感应电动机一般采用铸铝转子。

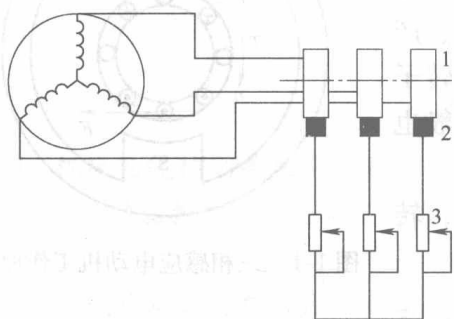
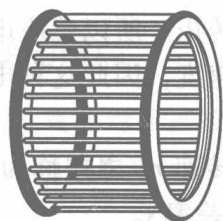
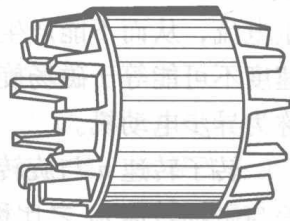


图 1-2 绕线转子绕组与外加变阻器的连接



a) 铜排转子



b) 铸铝转子

图 1-3 笼型转子绕组

笼型绕组因结构简单、制造方便、运行可靠,所以得到了广泛的应用。

图 1-4、图 1-5 分别表示笼型感应电动机和绕线转子感应电动机的结构图。

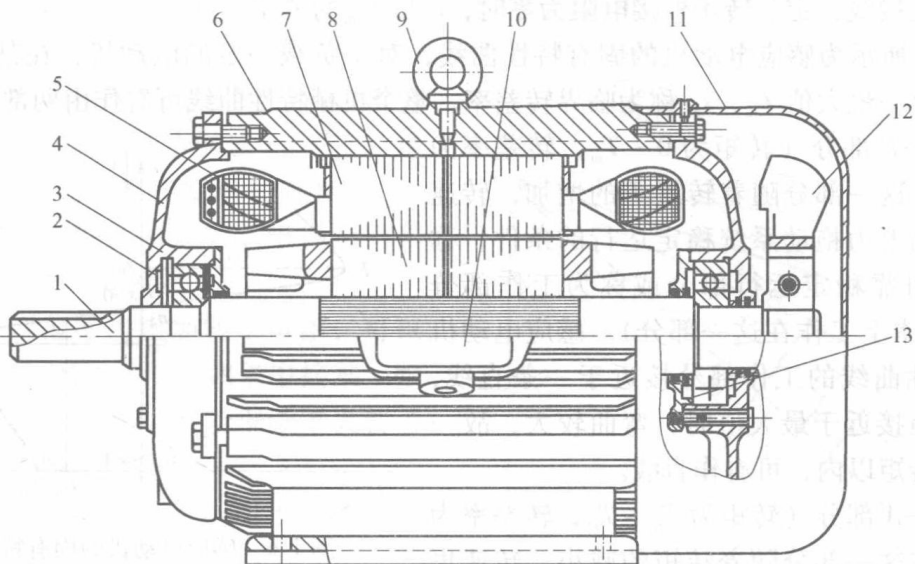


图 1-4 笼型感应电动机的结构图

1—轴 2—弹簧片 3—轴承 4—端盖 5—定子绕组 6—机座 7—定子铁心
8—转子铁心 9—吊环 10—出线盒 11—风罩 12—风扇 13—轴承内盖

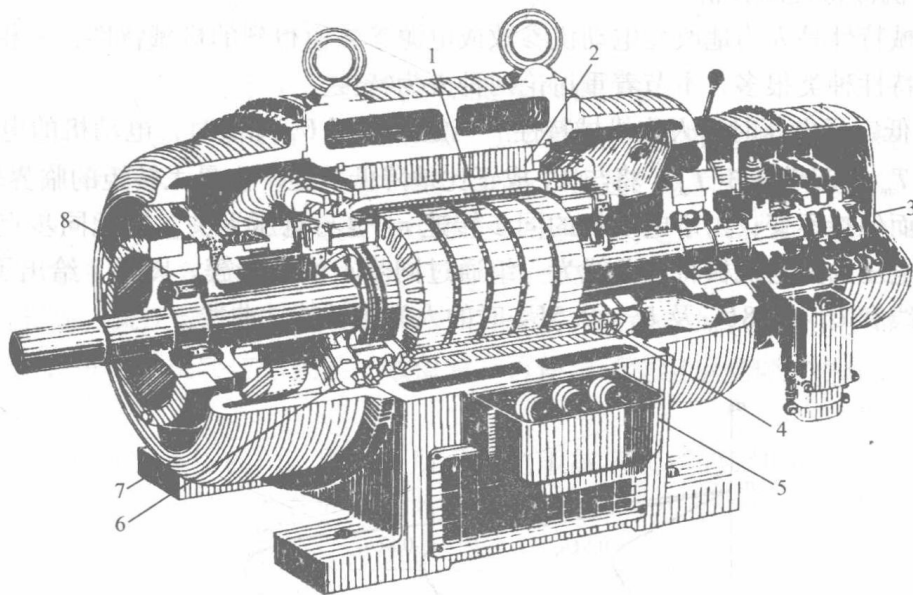


图 1-5 绕线转子感应电动机的结构图

1—转子 2—定子 3—集电环 4—定子绕组 5—出线盒 6—转子绕组 7—端盖 8—轴承

1.1.1.2 三相感应电动机的机械特性

三相感应电动机的机械特性是指在一定条件下, 电动机的转速 n 与转矩 T_{em} 之间的关系: $n = f(T_{em})$ 。因为感应电动机的转速与转差率存在一定的关系, 所以感应电动机的机械特性也往往用 $T_{em} = f(s)$ 的形式表示, 通常称为 $T-s$ 曲线。

1. 固有机机械特性的分析

三相感应电动机的固有机机械特性是指感应电动机工作在额定电压和额定频率下, 按规定

的接线方式接线,定、转子外接电阻为零时, n 与 T_{em} 的关系。

图 1-6 所示为感应电动机的固有特性曲线,对于负载一定的电动机,在某一转差率 s_m 时,转矩有一最大值 T_m , s_m 称为临界转差率,整个机械特性曲线可看作由两部分组成。

1) $H-P$ 部分 (转矩为 $0 \sim T_m$, 转差率为 $0 \sim s_m$)。在这一部分随着转矩 T 的增加,转速降低,根据电力拖动系统稳定运行的条件,称这部分为可靠稳定运行部分或称为工作部分 (电动机基本上工作在这一部分)。感应电动机的机械特性曲线的工作部分接近于一条直线,只是在转矩接近于最大值时,弯曲较大,故一般在额定转矩以内,可看作直线。

2) $P-A$ 部分 (转矩为 $T_m \sim T_{st}$, 转差率为 $s_m \sim 1$)。在这一部分随着转矩的减小,转速也减小,特性曲线为一曲线,称为机械特性的曲线部分。只有当电动机带动通风机负载时,才能在这一部分稳定运行;而对恒转矩负载或恒功率负载,在这一部分不能稳定运行,因此有时也称这一部分为非工作部分。

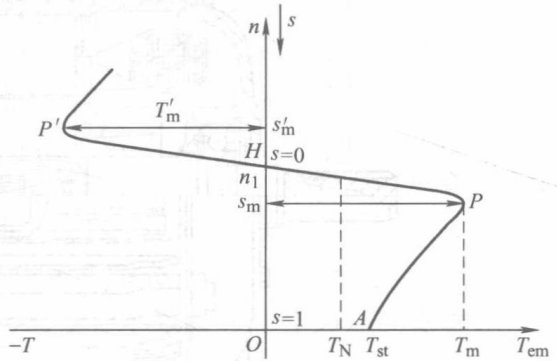


图 1-6 感应电动机的固有特性曲线

2. 人为机械特性的分析

人为机械特性是人为地改变电动机参数或电源参数而得到的机械特性,三相感应电动机的人为机械特性种类很多,本节着重讨论两种人为特性。

(1) 降低定子电压时的人为机械特性 当定子电压 U_1 降低时,电动机的电磁转矩 (包括最大转矩 T_m 和起动转矩 T_{st}) 将与 U_1^2 成正比地降低,但产生最大转矩的临界转差率 s_m 因与电压无关而保持不变;由于电动机的同步转速 n_1 也与电压无关,因此同步点也不变。可见降低定子电压的人为机械特性曲线为一组通过同步点的曲线簇。图 1-7 给出了 $U_1 = U_N$ 的固有特性曲线和 $U_1 = 0.8U_N$ 及 $U_1 = 0.5U_N$ 时的人为机械特性曲线。

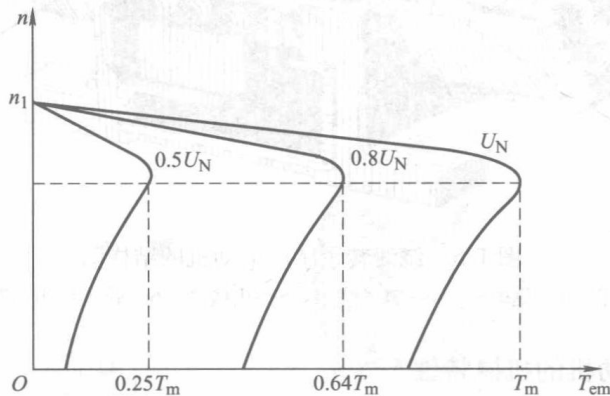


图 1-7 感应电动机降低电压时的人为特性曲线

由图 1-7 可见,当电动机在某一负载下运行时,若降低电压,将使电动机转速降低,转差率增大,转子电流将因此增大,从而引起定子电流的增大。若电动机电流超过额定值,则电动机最终温升将超过允许值,导致电动机寿命缩短,甚至使电动机烧坏。如果电压降低过

多,致使最大转矩 T_m 小于总的负载转矩时,则会发生电动机停转事故。

(2) 转子电路中串接对称电阻时的人为机械特性 在绕线转子感应电动机转子电路内,三相分别串接大小相等的电阻 R_{pa} ,由以上分析可知,此时电动机的同步转速 n_1 不变,最大转矩 T_m 不变,而临界转差率 s_m 则随 R_{pa} 的增大而增大,人为特性曲线为一组通过同步点的曲线簇,如图 1-8 所示。

显然在一定范围内增加转子电阻,可以增大电动机的起动转矩 T_{st} ,如果串接某一数值的电阻后使 $T_{st} = T_m$,这时若继续增大转子电阻,起动转矩将开始减小。

转子电路串接附加电阻适用于绕线转子感应电动机的起动和调速。

三相感应电动机人为机械特性的种类很多,除了上述两种外,还有改变定子极对数、改变电源频率的人为特性等,以后将在讨论感应电动机的各种运行状态时进行分析。

1.1.1.3 三相感应电动机的起动

1. 三相笼型转子感应电动机的起动

三相笼型转子感应电动机有直接起动与减压起动两种方法。

(1) 直接起动 直接起动也称为全压起动,起动时,电动机定子绕组直接承受额定电压。这种起动方法最简单,也不需要复杂的起动设备,但是,这时起动的电流较大,一般可达额定电流的 4~7 倍。过大的起动电流对电动机本身和电网电压的波动均会带来不利影响,一般直接起动只允许在小功率电动机中使用 ($P_N \leq 7.5\text{kW}$)。

(2) 减压起动 减压起动的目的是限制起动电流,通过起动设备使定子绕组承受的电压小于额定电压,待电动机转速达到某一数值时,再使定子绕组承受额定电压,使电动机在额定电压下稳定工作。

1) 电阻减压或电抗减压起动。图 1-9 所示为电阻减压起动的原理图,电动机起动时,在定子电路中串接电阻,这样就降低了加在定子绕组上的电压,从而减小了起动电流。若起动瞬时加在定子绕组上的电压为 $U_N/\sqrt{3}$,则起动电流 I'_{st} 将为全压起动时起动电流 I_{st} 的 $1/\sqrt{3}$,即 $I'_{st} = I_{st}/\sqrt{3}$ 。因为转矩与电压的二次方成正比,所以起动转矩 T'_{st} 仅为全压起动时起动转矩 T_{st} 的 $1/3$,即 $T'_{st} = T_{st}/3$ 。这种起动方法由于起动时能量损耗较多,故目前已被其他方法所代替。

2) 星-三角 ($Y-\Delta$) 起动。用这种起动方法的感应电动机,必须是定子绕组正常接法为“ Δ ”的电动机。在起动时,先将三相定子绕组接成星形,待转速接近稳定时,再改接成三角形,图 1-10 所示为星-三角起动电路的原理图。起动时,开关 S2 投向“Y”位置,定子绕组为星形联结,这时定子绕组承受的电压只有三角形联结时的 $1/\sqrt{3}$,电动机减压起动,当电动机转速接近稳定值时,将开关 S2 迅速投向“ Δ ”位置。定子绕组接成三角形运行,起动过程结束。

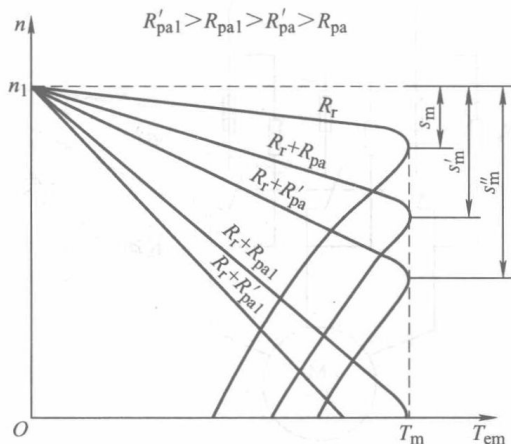


图 1-8 转子电路中串接对称电阻时的人为机械特性曲线

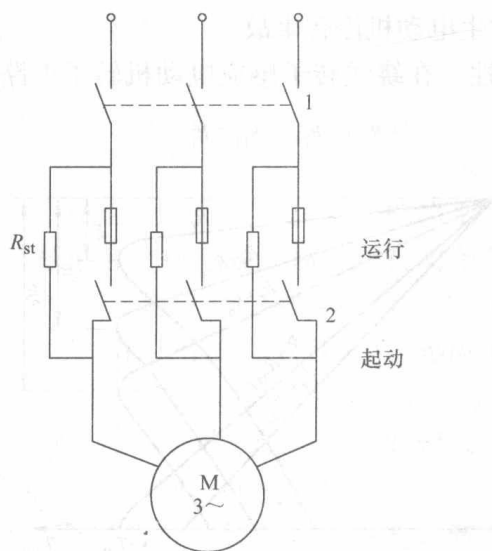


图 1-9 电阻减压起动

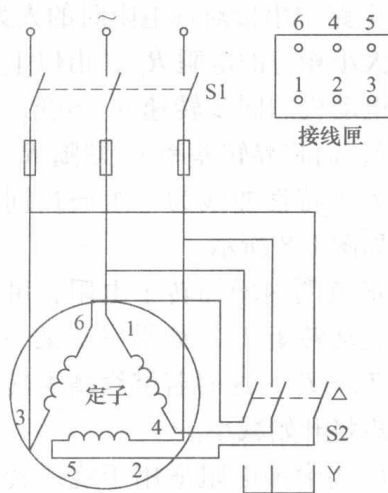


图 1-10 电动机的星-三角 (Y-Δ) 起动

电动机停转时,可直接断开电源开关 S1,但必须同时将开关 S2 放在中间位置,以免再次起动时造成直接起动。

Y-Δ 起动时,定子电压为直接起动的 $1/\sqrt{3}$,起动转矩则为直接起动的 $1/3$,由于三角形联结时绕组内的电流是线路电流的 $1/\sqrt{3}$,而星形联结时,线路电流等于绕组内的电流。因此,接成星形起动时的线路电流只有接成三角形直接起动时的 $1/3$ 。

Y-Δ 起动操作方便,起动设备简单,应用较广泛,但它仅适用于正常运转时定子绕组接成三角形的电动机。为此,对于一般用途的小型感应电动机。当容量大于 4kW 时,定子绕组的正常接法都采用三角形。

2. 三相绕线转子感应电动机的起动

(1) 转子串联电阻起动 在上一节分析转子串电阻的人为特性时,已经说明适当增加转子电路电阻,可以提高电动机的起动转矩,绕线转子感应电动机正是利用了这一特性。当起动时,在转子电路中接入起动电阻器,借以提高起动转矩,同时,增加转子电阻也限制了起动电流。为了在整个起动过程中得到比较大的加速转矩,并使起动过程平滑,将起动电阻也分成几级,在起动过程中逐步切除。

图 1-11 所示为绕线转子感应电动机起动时的接线图和特性曲线。其中曲线 1 对应于转子电阻为 $R_3 = R_r + R_{st3} + R_{st2} + R_{st1}$ 的人为特性曲线 (R_r 为内阻)。相应的曲线 2 对应于转子电阻为 $R_2 = R_r + R_{st2} + R_{st1}$ 的人为特性曲线,曲线 3 对应于转子电阻为 $R_1 = R_r + R_{st1}$ 的人为特性曲线,曲线 4 则为固有机械特性曲线。

开始起动时, $n = 0$,电阻全部接入,这时起动转矩为 T_{st1} ,随着转速上升,转矩沿曲线 1 变化,逐渐减小,当减小到 T_{st2} 时,接触器触点 KM1 闭合, R_{st3} 被短接,电动机的运行点由曲线 1 (g 点) 移到曲线 2 (f 点) 上,转矩跃升为 T_{st1} ;电动机的转速和转矩沿曲线 2 变化,待转矩又减小到 T_{st2} 时,接触器触点 KM2 闭合,电阻 R_{st2} 被短接,电动机的运行点由曲线 2 (e 点) 移到曲线 3 (d 点) 上,电动机的转速和转矩沿曲线 3 变化,最后接触器触点 KM3 闭合,起动电阻全部切除,转子绕组直接短路,电动机运行点沿固有特性曲线变化,直到电磁转矩与负载转矩平衡,电动机稳定工作。

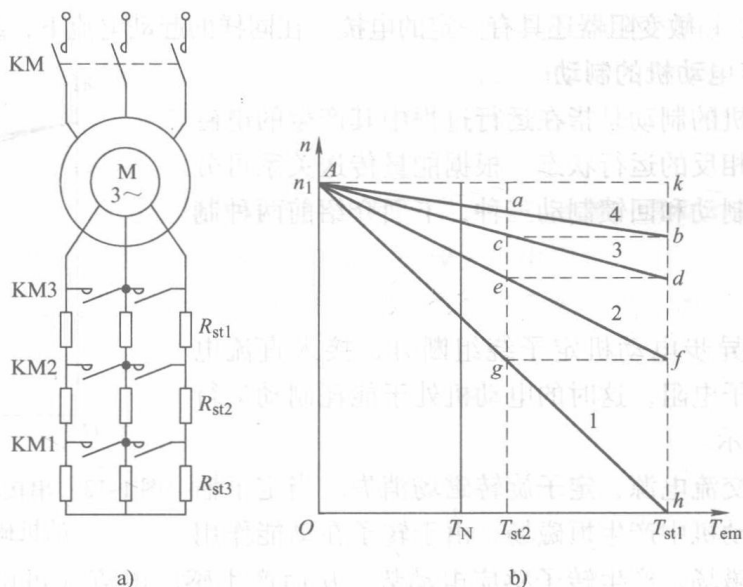


图 1-11 绕线转子感应电动机起动时的接线图和特性曲线

在起动过程中，一般取起动转矩的最大值 T_{st1} 为 $(0.7 \sim 0.85) T_m$ ，最小值 T_{st2} 为 $(1.1 \sim 1.2) T_N$ 。

起动电阻通常用高电阻系数合金或铸铁电阻片制成，在大容量电动机中，也有用水电阻的。

(2) 转子串接频敏变阻器起动 绕线转子感应电动机采用转子串接起动电阻的起动方法，可以增大起动转矩，减小起动电流，但是若要在起动过程中始终保持有较大的起动转矩，使起动平稳，就必须增加起动级数，这就会使起动设备复杂化。为此可以采用在转子电路中串入频敏变阻器的起动方法。所谓频敏变阻器，实质上就是一个铁耗很大的三相电抗器，从结构上看，它好似一个没有二次绕组的三相心式变压器，只是它的铁心不是用硅钢片而是用厚 $30 \sim 50\text{mm}$ 的钢板叠成，以增大铁心损耗，三个绕组分别绕在三个铁心柱上，并且接成星形，然后接到转子集电环上，如图 1-12 所示。

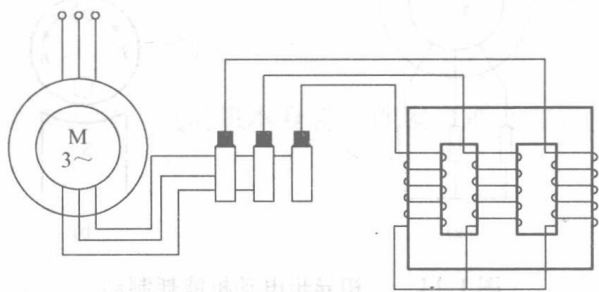


图 1-12 转子串接频敏变阻器起动

当电动机起动时，转子频率较高，由于 $f_2 = f_1$ ， f_1 为电源频率，频敏变阻器的铁耗就大，因此等效电阻 R_m 也较大。在起动过程中，随着转子转速的上升，转子频率逐步降低，频敏变阻器的铁耗和相应的等效电阻 R_m 也就随之减小，这就相当于在起动过程中逐渐切除转子电路串入的电阻。起动结束后，转子频率很低 ($f_2 = 1 \sim 3\text{Hz}$)，频敏变阻器的等效电阻和电抗都很小，于是可将频敏变阻器切除，转子绕组直接短路。因为等效电阻 R_m 是随着频率的变化而自动变化的，因此称为频敏变阻器（相当于一种无触点的变阻器）。在起动过程中，它能够自动、无级地减小电阻，如果频敏变阻器的参数选择恰当，可以在起动过程中保持起动转矩不变，这时的机械特性曲线如图 1-13 中曲线 2 所示，曲线 1 为固有特性曲线。

频敏变阻器结构简单，运行可靠，使用维护方便，因此应用日益广泛，但与转子串电阻的

起动方法相比，由于频敏变阻器还具有一定的电抗，在同样的起动电流下，起动转矩要小些。

1.1.1.4 三相异步电动机的制动

三相异步电动机的制动是指在运行过程中其产生的电磁转矩与转速的方向相反的运行状态。根据能量传送关系可分为能耗制动、反接制动和回馈制动三种，下面介绍前两种制动方式。

1. 能耗制动

将运行的三相异步电动机定子绕组断开，接入直流电源，串入适当的转子电阻，这时的电动机处于能耗制动运行状态，如图 1-14 所示。

断开定子三相交流电源，定子旋转磁场消失。当定子输入直流电时，在电动机中产生恒磁场，由于转子在动能作用下转动，切割恒定磁场，产生转子感应电动势，从而产生感应电流（可由右手定则判断）；转子电流与磁场作用产生的电磁转矩与转速方向相反（可由左手定则判断）。其特性曲线如图 1-15 所示。

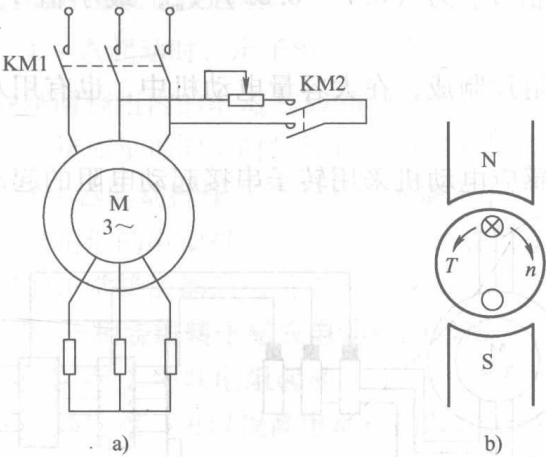


图 1-14 三相异步电动机能耗制动

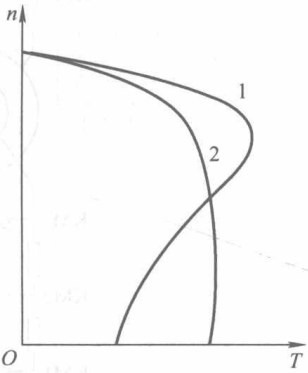


图 1-13 串接频敏变阻器起动时的机械特性曲线

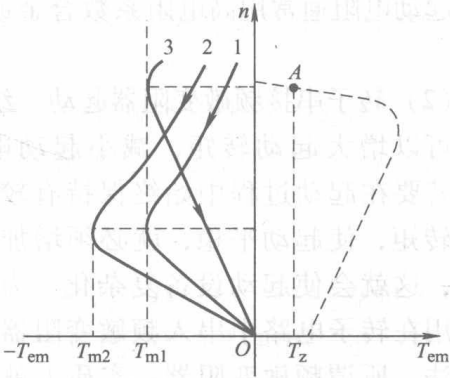


图 1-15 能耗制动特性曲线

三相异步电动机在能耗制动过程中，利用转子的动能进行发电，在转子电阻中以热的形式消耗掉。

能耗过程中，由于定子磁场固定，转子转速为 n ，所以转差 $\Delta n = n$ ，转差率 $s = \frac{\Delta n}{n_1} = \frac{n}{n_1}$ ，转子感应电动势频率 $f_2 = \frac{pn}{60} = \frac{psn_1}{60} = sf_1$ 。

定子直流励磁电流越大→磁场越强→感应电动势越大→转子电流越大→制动电磁转矩越大→制动效果越好。但电流过大会使绕组过热，根据经验，对于笼型异步电动机，取直流励磁电流的 4~5 倍，即 $(4 \sim 5) I_0$ ；对绕线转子异步电动机，取 $(2 \sim 3) I_0$ 。能耗制动的优点是制动转矩较大，制动平稳，主要用于快速平稳停车。

2. 反接制动

反接制动分为电源反接制动与倒拉反接制动两种。