

电机及机床电气控制

(第3版)

● 主编 王建明

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

电机及机床电气控制

(第3版)

主编 王建明

主审 张 益

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

电机及机床电气控制 / 王建明主编. —3 版. —北京: 北京理工大学出版社, 2020. 12

ISBN 978-7-5682-9358-7

I. ①电… II. ①王… III. ①电机学-高等学校-教材②机床-电气控制-高等学校-教材
IV. ①TM3②TG502. 35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 257300 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 14

字 数 / 323 千字

版 次 / 2020 年 12 月第 3 版 2020 年 12 月第 1 次印刷

定 价 / 66.00 元

责任编辑 / 多海鹏

文案编辑 / 多海鹏

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

出版说明 >>>>>

北京理工大学出版社为了顺应国家对机电专业技术人才的培养要求，满足企业对毕业生的技能需求，以服务教学、立足岗位、面向就业为方向，经过多年的大力发展，开发了近 30 多个系列 500 多个品种的高等职业教育机电类产品，覆盖了机械设计与制造、材料成型与控制技术、数控技术、模具设计与制造、机电一体化技术、焊接技术及自动化等 30 多个制造类专业。

为了进一步服务全国机电类高等职业教育的发展，北京理工大学出版社特邀请一批国内知名行业专业、国家示范性高等职业院校骨干教师、企业专家和相关作者，根据高等职业教育教材改革的发展趋势，从已出版的机电类教材中精心挑选一批质量高、销量好、院校覆盖面广的作品，集中研讨，分别针对每本书提出修改意见，修订出版了该高等职业教育“十二五”特色精品规划系列教材。

本系列教材立足于完整的专业课程体系，结构严整，同时又不失灵活性，配有大量的插图、表格和案例资料。作者结合已出版教材在各个院校的实际使用情况，本着“实用、适用、先进”的修订原则和“通俗、精炼、可操作”的编写风格，力求提高学生的实际操作能力，使学生更好地适应社会需求。

本系列教材在开发过程中，为了更适宜于教学，特开发配套立体资源包，包括以下内容：

- 教材使用说明；
- 电子教案，并附有课程说明、教学大纲、教学重难点及课时安排等；
- 教学课件，包括：PPT 课件及教学实训演示视频等；
- 教学拓展资源，包括：教学素材、教学案例及网络资源等；
- 教学题库及答案，包括：同步测试题及答案、阶段测试题及答案等；
- 教材交流支持平台。



Qianyan

前言 >>>>>

职业教育面临着培养动手能力强、职业素质高的技能型人才的任务。为了加速培养一批适应现代生产需要的技能型人才，全面落实《国务院关于大力发展职业教育的决定》提出的“以服务为宗旨、以就业为导向”的办学方针和教育部提出的“以就业为导向、以能力为本位”教育教学指导思想，本教材以项目为载体整合教材结构，按照生产过程导向安排教学内容，以期达到落实先进教学理念的辅助作用。

《电机及机床电气控制》是研究解决与生产机械的电气传动控制有关问题，阐述机电传动控制原理，介绍常用控制电路以及控制电路设计等技术的专业教材。电气传动控制是各类生产机械的重要组成部分，是机械电子工程技术人员必须掌握的专业知识。

现代生产机械一般由工作机构、传动机构、原动机及控制系统等几部分组成。当原动机为电动机，即电动机通过传动机构带动工作机构进行工作时，这种传动方式称为“机电传动”，而通过电气控制装置实施对电机控制方式内容的组合，即“电机及机床电气控制”。

一般来说，机电传动系统包括电动机、电气控制电路以及电动机和运动部件相互联系的传动机构。一般把电动机及传动机构合并在一起称为“电力拖动”部分；把满足加工工艺要求使电动机启动、制动、反向、调速、快速定位等电气控制和电气操作部分视为“电气控制”部分，或称电气控制装置，这也就是机电传动系统的两大组成部分。

随着生产机械逐步现代化，生产功能从简单到复杂，而操作上则是由笨重到轻巧。生产工艺上不断提出的要求是促进电气控制技术发展的动力，而新型电器和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。

本教材主要讲授在机电传动中的强电控制部分，共分为7个教学项目，每个项目分为不同的任务。教学中每个项目作为一个教学组合，根据工作过程导向安排教学。7个教学项目分别为交流电机及其控制、直流电机及其控制、步进电动机及其控制、常用控制电机、典型机床设备的电气控制、电气控制系统设计、电气系统可靠性设计。教学内容力求结合生产实

际，突出职业教育的特征，尽量减少理论推导内容，强化实用环节的教学。

本书可作为两年制或三年制高职高专、成人教育等自动化类专业的教材，也可供相关专业工程技术人员参考。

本书由天津轻工职业技术学院王建明教授担任主编，中荣包装（天津）公司王少华工程师担任副主编。具体分工如下：

项目一中的任务二、项目三、项目四、项目六和项目七由王建明编写；项目一中的任务一和项目二由王少华编写；项目一中的任务三由吴宝杰编写；项目五由罗相洋编写。全书由张益担任主审。

由于编者水平有限，不足之处请读者提出宝贵意见。

编 者



目 录

项目一 交流电动机及其控制 ····· 1	
任务一 三相异步电动机的认识····· 1	
第一节 变压器的基本知识····· 2	
第二节 三相异步电动机····· 3	
第三节 三相异步电动机的 启动与制动····· 10	
拓展与提高····· 20	
思考与练习····· 27	
任务二 常用低压电器····· 28	
第一节 概述····· 29	
第二节 低压电器的电磁 机构及执行机构····· 30	
第三节 接触器····· 32	
第四节 控制继电器····· 37	
第五节 熔断器····· 44	
第六节 低压隔离器····· 46	
第七节 低压断路器····· 47	
第八节 主令电器····· 48	
思考与练习····· 53	
任务三 机床控制线路的 基本环节····· 53	
第一节 机床电气原理图的 画法及阅读方法····· 54	
第二节 三相异步电动机的启动 控制线路····· 59	
第三节 三相异步电动机的 运行控制线路····· 68	
第四节 三相异步电动机的制动 控制线路····· 71	
第五节 电动机的保护环节····· 73	
思考与练习····· 75	
项目二 直流电机及其控制 ····· 81	
任务一 直流电机····· 81	
第一节 直流电机的基本 原理与结构····· 82	
第二节 直流电动机的电磁转矩和 电枢电动势····· 87	
第三节 他励直流电动机的运行 原理与机械特性····· 88	
第四节 他励直流电动机的 启动和反转····· 93	
第五节 他励直流电动机的 制动····· 95	
第六节 他励直流电动机的调速·· 98	
拓展与提高····· 101	
思考与练习····· 102	
任务二 直流电动机的控制····· 103	
第一节 直流电动机单向旋转 启动电路····· 103	
第二节 直流电动机可逆运转 启动电路····· 104	
第三节 直流电动机单向旋转串 电阻启动、能耗制动 电路····· 104	

第四节 直流电动机可逆旋转反接制动电路·····	105	任务二 Z3040 型摇臂钻床的电气控制分析·····	150
第五节 直流电动机调速控制·····	106	任务三 XA6132 型卧式万能铣床的电气控制分析·····	157
思考与练习·····	107	任务四 T68 型卧式镗床的电气控制分析·····	167
项目三 步进电动机及其控制 ·····	109	思考与练习·····	174
任务一 步进电动机·····	109	项目六 电气控制系统设计 ·····	176
第一节 步进电动机的结构与工作原理·····	110	任务一 电气控制设计的原则和内容·····	176
第二节 步进电动机的环形分配器·····	117	任务二 电力拖动方案的确定和电动机的选择·····	177
第三节 步进电动机的驱动电路·····	120	任务三 电气控制电路设计的一般要求·····	180
第四节 步进电动机的运行特性及使用·····	123	任务四 电气控制电路设计的方法与步骤·····	184
思考与练习·····	129	任务五 常用控制电器的选择·····	188
任务二 步进电动机的控制·····	130	任务六 电气控制的施工设计与施工·····	195
第一节 步进电动机的控制方式·····	131	思考与练习·····	199
第二节 步进电动机驱动系统设计举例及传动控制应用实例·····	133	项目七 电气系统可靠性分析 ·····	201
思考与练习·····	135	第一节 可靠性的基本概念·····	201
项目四 常用控制电机 ·····	136	第二节 可靠性特征与可靠性模型·····	203
任务一 伺服电动机·····	137	思考与练习·····	208
任务二 测速发电机·····	141	附录 常用电器元件符号 ·····	209
思考与练习·····	142	参考文献 ·····	212
项目五 典型机床设备的电气控制 ·····	143		
任务一 C650 型普通卧式车床电气控制分析·····	145		

项目一 交流电动机及其控制

交流电动机结构简单、运行可靠、价格低廉、维护方便，在工业中应用广泛。本项目任务一介绍三相异步电动机的结构与工作原理及其在空载和负载下的运行状态特点，重点分析三相异步电动机的机械特性及电力拖动的相关知识，对单相异步电动机也做了简要介绍；任务二主要介绍常用低压电器的结构、工作原理及应用，为学习电气控制做准备；任务三主要介绍机床控制线路的基本环节。

能力目标：

1. 三相异步电动机的工作特性；
2. 三相异步电动机的启动、制动方法；
3. 三相异步电动机的调速方法；
4. 常用低压电器的选择及使用；
5. 三相异步电动机的启动、制动控制电路。

✘ 任务一 三相异步电动机的认识 ✘

● 任务描述

交流电动机有同步和异步之分。异步电动机按相数不同，又可分为三相异步电动机和单相异步电动机；按其转子结构不同，又可分为笼型和绕线转子型，其中笼型三相异步电动机具有结构简单、运行可靠、价格低廉、维护方便的特点，应用最为广泛。本任务主要完成三相异步电动机的结构与工作原理及其负载特征，重点分析三相异步电动机的机械特性及电力拖动的相关知识，对单相异步电动机也做了简要介绍。

● 方法与步骤

1. 了解变压器的工作过程；
2. 了解交流异步电动机的结构；
3. 掌握交流异步电动机的负载特性；

4. 掌握交流异步电动机的启动方法；
5. 掌握交流异步电动机的制动方法。

● 相关知识与技能

第一节 变压器的基本知识

一、变压器的基本工作原理

变压器是在一个闭合的铁芯磁路中，套上两个相互独立的、绝缘的绕组，这两个绕组之间只有磁的耦合，没有电的联系，变压器的基本原理如图 1-1-1 所示。通常在一个绕组上接交流电源，称为一次绕组（也称原绕组或初级绕组），其匝数为 N_1 ；另一侧绕组接负载，称为二次绕组（也称副绕组或次级绕组），其匝数为 N_2 。

当在一次绕组中加上交流电压 e_1 时，流过交流电流为 i_1 ，并建立了交变的磁动势，在铁芯中产生交变磁通，该磁通同时交链一、二次绕组，根据电磁感应定律，在一、二次绕组中产生感应电动势 e_1 、 e_2 。二次绕组在感应电动势 e_2 的作用下向负载供电，实现电能传递，其感应电动势的瞬时值分别为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

则

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-1-1)$$

由此可知，改变一次或二次绕组的匝数，便可达到改变二次绕组输出电压 u_{20} 的目的。

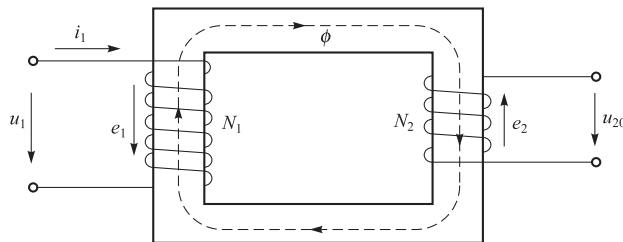


图 1-1-1 变压器的基本原理

二、变压器的应用与分类

变压器除了能够变换电压外，还有变换电流、变换阻抗的作用，因此在电力系统和电子设备中获得广泛的应用。

在电力系统中，变压器是输配电能的主要电气设备。三相变压器的输出容量 $S = \sqrt{3} UI$ ，

可见在同等容量的情况下电压 U 越高，线路电流越小，则输电线路上的压降和功率损耗也就越小，同时还可以减小输电线的截面积，节省材料，达到减小投资和降低运行费用的目的。我国规定高压输电线路电压有 110 kV、220 kV、330 kV 与 500 kV 等几种，但发电厂的交流发电机受绝缘和制造技术上的限制，难以达到这么高的电压，因此发电机发出的电压需经变压器升高后再输送。从用电方面考虑，均采用低压用电，这一方面是为了用电安全，另一方面也是为了使用电设备的绝缘等级降低，以降低制造成本，因此又必须经降压变压器降压，通常经过几次降压后才可供用户使用。在电力系统中变压器对电能的经济输送、灵活分配和安全使用具有重要意义，因此获得了广泛应用。

另外，在测量系统中使用的仪用互感器可将高电压变换成低电压，或将大电流变换成小电流，以隔离高压和便于测量；在实验室中使用的自耦变压器，可调节输出电压的大小，以满足负载对电压的不同要求；在电子线路中，有电源变压器，还可用变压器来耦合电路、传递信号和实现阻抗匹配等。

变压器的种类有很多，按用途不同主要分为：

- (1) 电力变压器：供输配电系统中升压或降压用。
- (2) 特殊变压器：如电炉变压器、电焊变压器和整流变压器等。
- (3) 仪用互感器：如电压互感器与电流互感器。
- (4) 试验变压器：高压试验用。
- (5) 控制用变压器：控制线路中使用。
- (6) 调压器：用来调节电压。

第二节 三相异步电动机

一、三相异步电动机的工作原理

1. 三相异步电动机的基本结构

三相异步电动机由定子和转子两个基本部分组成，其结构及原理如图 1-1-2 所示。定子铁芯为圆桶形，由互相绝缘的硅钢片叠成，铁芯内圆表面的槽中放置着对称的三相绕组 U_1-U_2 、 V_1-V_2 、 W_1-W_2 。转子铁芯为圆柱形，也用硅钢片叠成，表面的槽中有转子绕组。转子绕组有笼型和绕线型两种形式。笼型的转子绕组做成笼状，在转子铁芯的槽中放入铜条，其两端用环连接；或者在槽中浇铸铝液，铸成笼型。绕线型的转子绕组同定子绕组一样，也是三相，每相终端连在一起，始端通过滑环、电刷与外部电路相连。

2. 异步电动机的工作原理

笼型与绕线型只是在转子的结构上不同，它们的工作原理是一样的。电动机定子三相绕组： U_1-U_2 、 V_1-V_2 、 W_1-W_2 可以连接成星形，也可以连接成三角形，定子三相绕组的连接如图 1-1-3 所示。

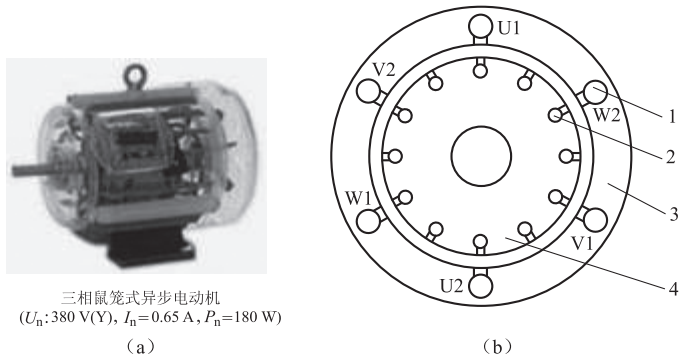


图 1-1-2 三相异步电动机结构原理图

(a) 结构图; (b) 原理图

1—定子绕组; 2—转子绕组; 3—定子铁芯; 4—转子铁芯

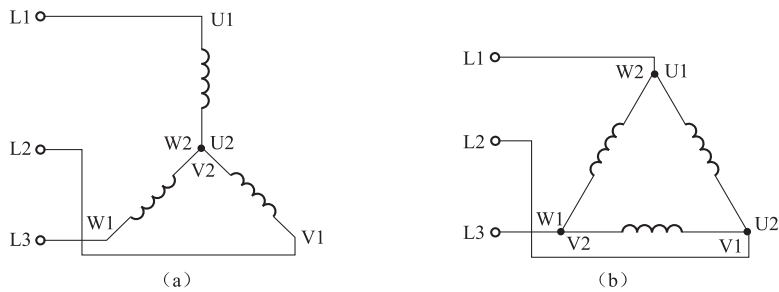


图 1-1-3 定子三相绕组的连接

(a) 星形连接 (Y); (b) 三角形连接 (Δ)

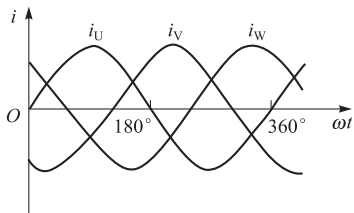


图 1-1-4 三相电流波形

假设将定子绕组连接成星形, 并接在三相电源上, 绕组中便通入三相对称电流, 其波形如图 1-1-4 所示。

$$\begin{aligned} i_U &= I_m \sin \omega t \\ i_V &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ i_W &= I_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (1-1-2)$$

三相电流共同产生的合成磁场将随着电流的交变而在空间不断地旋转, 即形成所谓的旋转磁场, 如图 1-1-5 所示。

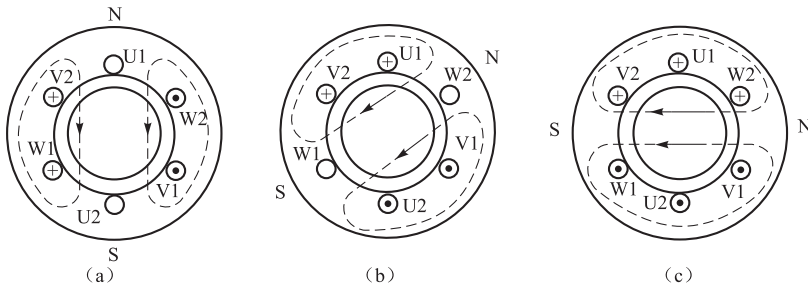


图 1-1-5 三相电流产生旋转磁场

(a) $\omega t = 0^\circ$; (b) $\omega t = 60^\circ$; (c) $\omega t = 90^\circ$

旋转磁场切割转子导体，便在其中感应出电动势和电流，如图 1-1-6 所示。电动势的方向可由右手定则确定。转子导体电流与旋转磁场相互作用便产生电磁力 F 并施加于导体上，电磁力 F 的方向可由左手定则确定。通常由电磁力产生电磁转矩，从而使电动机转子转动起来。转子转动的方向与磁场旋转的方向相同，而磁场旋转的方向与通入绕组的三相电流的相序有关。如果将连接三相电源的三相绕组端子中的任意两相对调，即可改变转子的旋转方向。

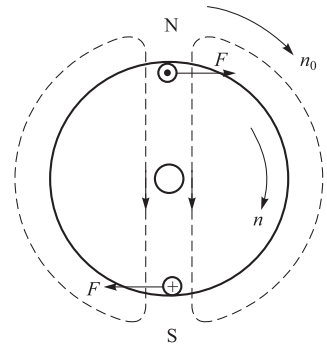


图 1-1-6 转子转动原理图

旋转磁场的转速 n_0 称为同步转速，其大小取决于电流频率 f_1 和磁场的极对数 p 。当定子每相绕组只有一个线圈时，绕组的始端之间相差 120° 空间角，如图 1-1-4 所示，则产生的旋转磁场具有一对极，即 $p=1$ 。当电流交变一次时，磁场在空间旋转一周，旋转磁场的（每分钟）转速 $n_0=60f_1$ 。若每相绕组有两个线圈串联，绕组的始端相差 60° 空间角，则产生两对极，即 $p=2$ 。电流交变一次时，磁场在空间旋转半周，即（每分钟）转速 $n_0=\frac{60f_1}{2}$ ，以此类推，可得

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad (1-1-3)$$

式中 n_0 的单位为 r/min。

由工作原理可知，转子的转速 n 必然小于旋转磁场的转速 n_0 ，即所谓“异步”。二者相差的程度用转差率 s 来表示

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (1-1-4)$$

一般异步电动机在额定负载时的转差率为 $1\% \sim 9\%$ 。

二、三相异步电动机的特性分析

三相异步电动机的定子绕组和转子绕组之间的电磁关系同变压器类似，其每相电路如图 1-1-7 所示。

图 1-1-7 中 u_1 为定子相电压， R_1 、 X_1 为定子每相绕组电阻和漏磁感抗， R_2 、 X_2 为转子每相绕组电阻和漏磁感抗。

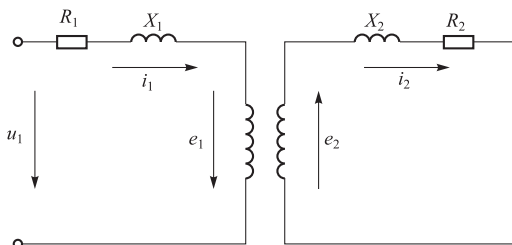


图 1-1-7 三相异步电动机每相电路

在定子电路中，旋转磁场通过每相绕组的磁通为 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ 。其中 Φ_m 是通过每相绕组的磁通最大值，在数值上等于旋转磁场的每极磁通 Φ 。定子每相绕组中由旋转磁通产生的感应电动势为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

式中 N_1 ——定子每相绕组匝数。

感应电动势的有效值为

$$E_1 = 4.44f_1 N_1 \Phi \quad (1-1-5)$$

式中 f_1 —— e_1 的频率。

由于绕组电阻 R_1 和漏磁感抗 X_1 较小，其上电压降与电动势 E_1 比较可忽略不计，因此 $U_1 \approx E_1$ 。

在转子电路中，旋转磁场在每相绕组中感应出的电动势为

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

式中 N_2 ——转子每相绕组匝数。

电动势的有效值为

$$E_2 = 4.44f_2 N_2 \Phi \quad (1-1-6)$$

式中 f_2 ——转子电动势 e_2 的频率。

因为旋转磁场和转子间的相对转速为 $n_0 - n$ ，所以

$$f_2 = \frac{p(n_0 - n)}{60} = sf_1 \quad (1-1-7)$$

将式(1-1-7)代入式(1-1-6)得

$$E_2 = 4.44sf_1 N_2 \Phi \quad (1-1-8)$$

转子每相绕组漏磁感抗 X_2 与转子频率 f_2 有关，即

$$X_2 = 2\pi f_2 L_2 \quad (1-1-9)$$

式中 L_2 ——转子每相绕组漏磁电感。

在 $n=0$ 即 $s=1$ 时，转子绕组漏磁感抗为

$$X_{20} = 2\pi f_1 L_2 \quad (1-1-10)$$

由式(1-1-9)和式(1-1-10)得出

$$X_2 = sX_{20}$$

转子每相绕组的电流为

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \quad (1-1-11)$$

由于转子绕组存在漏磁感抗 X_2 ，因此 I_2 比 E_2 滞后 φ_2 角。转子功率因数为

$$\cos\varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \quad (1-1-12)$$

异步电动机的电磁转矩 T （以下简称转矩）可由转子绕组的电磁功率 P_2 与转子相对于旋转磁场的角速度 ω_2 之比求出

$$T = \frac{P_2}{\omega_2} = \frac{m_1 E_2 I_2 \cos\varphi_2}{s\omega_0} \quad (1-1-13)$$

式中 m_1 ——定子绕组的相数，旋转磁场的角速度 $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$ 。

将式 (1-1-5)、式 (1-1-8)、式 (1-1-12) 代入式 (1-1-13) 得

$$T = \frac{Km_1 p U_1^2 R_2 s}{2\pi f_1 [R_2^2 + (sX_{20})^2]} \quad (1-1-14)$$

式中 K ——比例常数， $K = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$ 。

当电动机结构参数固定，电源电压不变时，可由式 (1-1-14) 得到转矩与转差率的关系曲线 $T=f(s)$ ，称为电动机的机械特性曲线，如图 1-1-8 所示。

图 1-1-8 中，与转矩最大值 T_{\max} 对应的转差率 s_c 称为临界转差率，可令 $dT/ds=0$ 求出

$$s_c = \frac{R_2}{X_{20}} \quad (1-1-15)$$

把式 (1-1-15) 代入式 (1-1-14) 得到

$$T_{\max} = \frac{Km_1 p U_1^2}{4\pi f_1 X_{20}} \quad (1-1-16)$$

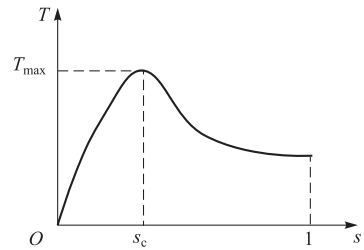


图 1-1-8 电动机的 $T=f(s)$ 曲线

1. 固有机械特性

三相异步电动机的固有机械特性是指异步电动机在额定电压和额定频率下，按规定的接线方式接线，定、转子电路外接电阻和电抗为零时的转速 n 与电磁转矩 T 之间的关系。

上面已找到电磁转矩与转差率之间的关系，考虑到 $n=n_0(1-s)$ ，则用 $n=f(T)$ 表示异步电动机的机械特性，如图 1-1-9 所示。

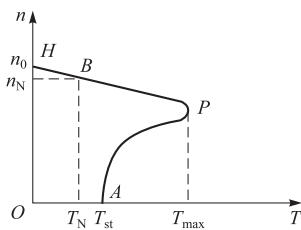


图 1-1-9 三相异步电动机的固有特性

为了描述三相异步电动机机械特性的特点，下面重点介绍几个反映电动机工作的特殊运行点。

(1) 启动点 A 。对应这一点的转速 $n=0$ ($s=1$)，电磁转矩 T 为启动转矩 T_{st} ($T=T_{st}$)，启动转矩 T_{st} 反映异步电动机直接启动时的带负载能力。启动电流 I_{st} 为 4~7 倍的额定电流 I_N 。

(2) 额定工作点 B 。对应于这一点的转速 n_N 、电磁转矩 T_N 、电流 I_N 都是额定值，这是电动机平稳运转时的工作点。

(3) 同步转速点 H 。在此点，电动机以同步转速 n_0 运行 ($s=0$)，转子的感应电动势为零， $I_2=0$ ， $T=0$ 。在这一点电动机不输出转矩，它以外力下克服空载转矩方能实现。该点不但所带负载为零，而且电动机转子电流也为零，是理想空载点。

(4) 最大电磁转矩点 P 。电动机在这点时能提供最大转矩，这是电动机能提供的极限转矩。这点也叫临界点，转矩为临界转矩，转差率为临界转差率。

2. 人为机械特性

在实际应用中，往往需要人为地改变某些参数，即可得到不同的机械特性，这样改变参

数后得到的机械特性称为人为机械特性。由式(1-1-14)可知,电动机的电磁转矩 T 是由某一转速 n 下的电压 U_1 、电源频率 f_1 、定子极对数 p 以及转子电路的参数 R_2 、 X_{20} 决定的。因此人为改变这些参数就可得到各种不同的机械特性。下面介绍几种常用的人为机械特性。

(1) 降低定子电压。

由于异步电动机受磁路饱和以及绝缘、温升等因素的限制,因而需降低定子电压的人为特性,将 $s=1$ 代入式(1-1-14),得电动机启动转矩表达式为

$$T_{st} = \frac{Km_1 p U_1^2 R_2}{2\pi f_1 [R_2^2 + X_{20}^2]} \quad (1-1-17)$$

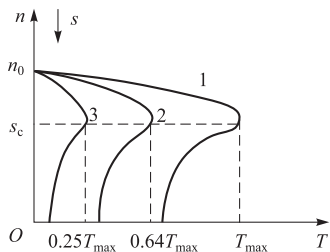


图 1-1-10 对应于不同电源电压的人为特性

由式(1-1-17)及式(1-1-16)可见,当其他参数不变而只降低电压 U_1 时,电动机的最大转矩 T_{max} 和启动转矩 T_{st} 与 U_1^2 成正比例下降。又由式(1-1-15)可知,临界转差率 s_c 与定子电压 U_1 无关,且电动机的同步转速 n_0 ($n_0 = 60f_1/p$) 也与电压 U_1 无关,可知降低定子电压的人为特性是一组过同步转速点 n_0 的曲线簇,如图 1-1-10 所示。

值得注意的是,若电压降低过多,使最大转矩 T_{max} 小于负载转矩,则会造成电动机停止运转。另外,因负载转矩不变,电磁转矩也不变,降低电压将使电动机转速降低,转差率增大使得转子电流因转子电动势的增大而增大,从而引起定子电流的增大;若电流超过额定值并长时间运行,将使电动机寿命降低。

(2) 转子电路串接对称电阻。

在绕线型异步电动机三相转子电路中分别串接阻值相等的电阻后,由式(1-1-15)知,临界转差率 s_c 是随外串电阻 R_s 增大而增大的,而由式(1-1-16)知最大转矩 T_{max} 不随外串电阻而变,又电动机的同步转速 n_0 与转子外串电阻无关,所以人为特性是一组过同步转速 n_0 点的一簇曲线,如图 1-1-11 所示。

由式(1-1-17)知,启动转矩 T_{st} 随外串电阻的增大而增大,可选择适当电阻 R_s 接入转子电路,使 T_{max} 发生在 $s_c=1$ 的时刻,即最大转矩发生在启动瞬时,以改善电动机的启动性能。但如果再增大电阻,启动转矩反而要减小。这是因为过大的电阻接入将使转子电流下降过大。

(3) 改变定子电源频率。

当电动机极对数 p 保持不变,改变电源频率时,同步转速 $n_0 = 60f_1/p$ 将随电源频率而变化。频率越高, n_0 则越高,反之 n_0 则减小。而由式(1-1-16)和式(1-1-17)知,如果减小 f_1 ,则最大转矩 T_{max} 和启动转矩 T_{st} 都将随 f_1 减小而增大,临界转差率 s_c 将成反比例增大。不同频率的人为特性如图 1-1-12 所示。

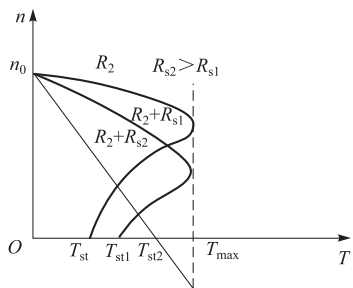


图 1-1-11 对应于不同转子电阻的人为特性

(4) 改变极对数。

在保持电源频率 f_1 不变的情况下, 改变极对数 p , 同步转速 $n_0 = 60f_1/p$ 将随 p 的增大而减小。

一个普通三相异步电动机的极对数是固定不变的, 但为了满足某些生产机械实现多级变速的要求, 专门生产有极对数可变的变频异步电动机。变频异步电动机是利用改变绕组的接法来改变电动机的极对数的, 下面以常用的双速异步电动机为例加以说明。

双速异步电动机的定子绕组每相均由两个相同的绕组组成, 这两个绕组可以并联, 也可以串联, 串联时极对数是并联时的两倍, 如图 1-1-13 所示。

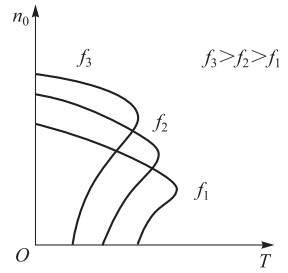


图 1-1-12 改变频率 f_1 的人为特性

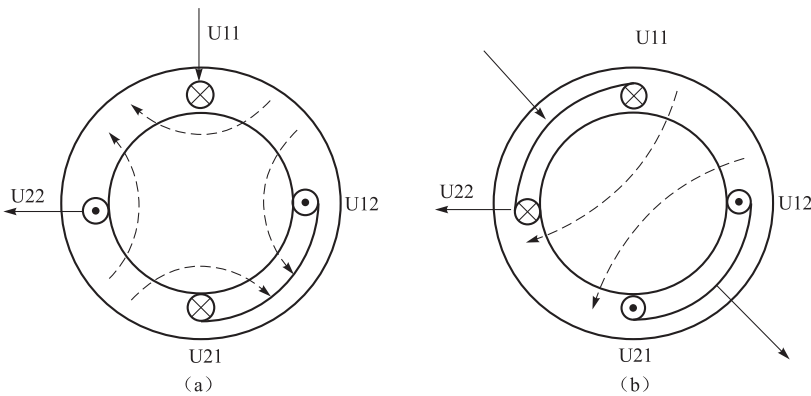


图 1-1-13 定子绕组极对数的改变

(a) 两个绕组串联 $p=2$; (b) 两个绕组并联 $p=1$

图 1-1-14 所示为双速异步电动机的 YY/Δ 接法。图 1-1-14(a) 表示电动机三相绕组呈三角形连接, 运行时 1、2、3 接电源, 4、5、6 空着不接, 电动机低速运行; 而当 1、2、3 连接在一起, 中间接线端 4、5、6 接电源时, 如图 1-1-14(b) 所示, 电动机为高速运转。为保证电动机旋转方向不变, 当从一种接法变为另一种接法时, 应改变电源的相序。

当电动机由 Δ 变为 YY 接法时, 极对数减少一半, 相电压 $U_{YY} = \frac{1}{\sqrt{3}}U_{\Delta}$, 将这些关系式代入式(1-1-15)~式(1-1-17)中, 可得到以下关系式:

$$s_{cYY} = s_{c\Delta}, T_{\max YY} = \frac{1}{6}T_{\max \Delta}, T_{st YY} = \frac{1}{6}T_{st \Delta}$$

即电动机的临界转差率不变, 而 YY 接法时的最大转矩和启动转矩均为 Δ 接法时的 $1/6$, 其机械特性的变化如图 1-1-15 所示。