

机电设备 传动与控制

◎ 主编 贾贵玺

DRIVE AND CONTROL OF
ELECTROMECHANICAL DEVICES



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

机电设备传动与控制

主编 贾贵玺

参编 肖宝兴 贾亦真

机械工业出版社

本书是依据“必需、够用和少而精”的原则编写的,第1章主要介绍了机电设备中常用的各种电动机,第2章介绍了常用低压电器和继电器-接触器控制电路,第3~6章介绍了可编程序控制器的原理及应用技术,第7章介绍了PLC控制系统设计方法,第8章介绍了典型机电控制系统设计实例。本书内容简明、重点突出、深入浅出、注重实用、便于自学。

本书可作为高等教育机械制造及自动化专业本科、高职高专学生的教材或参考书,也可供有关工程技术人员培训和自学使用。

图书在版编目(CIP)数据

机电设备传动与控制/贾贵玺主编. —北京:机械工业出版社,2016.3
ISBN 978-7-111-53094-7

I. ①机… II. ①贾… III. ①电力传动控制设备—职业教育—教材
IV. ①TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第039364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:何文军 责任编辑:张丽萍 责任校对:陈越

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京玥实印刷有限公司印刷

2016年3月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15印张·367千字

标准书号:ISBN 978-7-111-53094-7

定价:35.00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:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

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

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

“机电设备传动与控制”是高等工科院校机电类专业的一门技术基础课，教学内容涵盖面广、信息量大，其主要内容包括电动机、低压电器、继电-接触器控制技术、可编程序控制器及其控制技术。

本书作者是多年从事机电控制教学的资深教师，具有丰富的教学与实践经验，本书所有内容都经过作者精心选编，具有很强的实用性和指导性。本书力求做到讲述清楚、语言流畅、图文并茂、便于自学、理论和实践并重。

为了适应教学和自学的要求，本书在编写过程中，遵循少而精的原则，具有以下特色：

① 精选内容，突出基本要求。对基本概念、基本原理和基本方法的阐述简明，使自学者对机电设备控制技术的基本理论、基本知识和基本技能有明确、系统的认识。

② 在概念阐述上避免过深的论述，通过例题讲解使自学者加深对机电设备工作原理及其控制技术的理解。

③ 本书每章都有小结，便于自学者复习和总结；并配有足够数量的思考题与习题供自学者练习。

本书由贾贵玺任主编，其中，第1~5章由贾贵玺编写，第6、7章由贾亦真编写，第8章由肖宝兴编写。

由于编者水平有限，书中难免存在一些不足之处，恳请读者批评指正，以便进一步修改和完善。

编者

2015年12月

目 录

| | |
|--|-----|
| 前言 | |
| 第 1 章 电动机 | 1 |
| 1.1 三相异步电动机 | 1 |
| 1.2 单相异步电动机 | 20 |
| 1.3 直流电动机 | 22 |
| 1.4 永磁同步电动机与无刷直流电动机 | 26 |
| 1.5 电动机的选择 | 28 |
| 1.6 微特电机 | 31 |
| 【本章小结】 | 36 |
| 思考题与习题 | 37 |
| 第 2 章 继电器-接触器控制 | 40 |
| 2.1 常用低压控制电器 | 40 |
| 2.2 继电器-接触器控制电路 | 49 |
| 【本章小结】 | 53 |
| 思考题与习题 | 54 |
| 第 3 章 可编程序控制器概论 | 55 |
| 3.1 PLC 的发展史和定义 | 55 |
| 3.2 PLC 的结构组成 | 56 |
| 3.3 PLC 的功能与分类 | 59 |
| 3.4 PLC 的特点和工作原理 | 61 |
| 3.5 PLC 的发展动向 | 63 |
| 【本章小结】 | 64 |
| 思考题与习题 | 64 |
| 第 4 章 S7-200 PLC 的结构与编程 | |
| 基础 | 65 |
| 4.1 S7-200 PLC 的特点与组成原理 | 65 |
| 4.2 S7-200 PLC 的 CPU 模块 | 65 |
| 4.3 S7-200 PLC 的数字量 I/O 扩展模块 | 68 |
| 4.4 S7-200 PLC 的模拟量 I/O 扩展模块 | 68 |
| 4.5 S7-200 PLC 的通信扩展模块 | 68 |
| 4.6 S7-200 PLC 控制系统的配置原则 | 69 |
| 4.7 PLC 的编程语言 | 69 |
| 4.8 S7-200 PLC 的程序结构 | 70 |
| 4.9 S7-200 PLC 的数据类型 | 71 |
| 4.10 S7-200 PLC 的数据存储区 | 72 |
| 4.11 S7-200 PLC 的寻址方式 | 74 |
| 【本章小结】 | 76 |
| 思考题与习题 | 76 |
| 第 5 章 S7-200 PLC 的指令系统 | 78 |
| 5.1 位逻辑指令 | 78 |
| 5.2 定时器和计数器指令 | 85 |
| 5.3 数据处理指令 | 89 |
| 【本章小结】 | 96 |
| 思考题与习题 | 96 |
| 第 6 章 PLC 编程软件 STEP 7-Micro/ WIN 的应用 | 99 |
| 6.1 编程软件 STEP 7-Micro/WIN 的安装 方法及主要功能 | 99 |
| 6.2 S7-200 PLC 梯形图的编程规则及编程 方法 | 107 |
| 6.3 使用 STEP 7-Micro/WIN 进行程序开发与 调试的主要步骤 | 114 |
| 【本章小结】 | 125 |
| 思考题与习题 | 126 |
| 第 7 章 S7-200 PLC 的控制系统设计 方法 | 127 |
| 7.1 电气控制系统中常用输入、输出 元器件与 PLC 的连接方法 | 127 |
| 7.2 PLC 的选型原则 | 131 |
| 7.3 PLC 常用控制程序举例 | 133 |
| 7.4 典型控制系统设计方法 | 145 |
| 【本章小结】 | 157 |
| 思考题与习题 | 157 |
| 第 8 章 典型机电控制系统的 PLC 应用 设计实例 | 159 |
| 8.1 运料小车延时正、反转控制 | 159 |
| 8.2 电动机星形-三角形减压起动控制 | 162 |
| 8.3 带式输送机可重复顺序起动、逆序 停止控制 | 163 |
| 8.4 运料小车自动装料、卸料控制 | 167 |
| 8.5 洗衣机自动控制程序设计 | 168 |
| 8.6 步进电动机运转控制 | 170 |
| 8.7 Z3050 摇臂钻床的 PLC 控制 | 174 |
| 8.8 变频器控制电动机的多段转速运行 | 178 |

| | | | |
|--------------------------------|-----|------------------------------|-----|
| 8.9 T68 镗床的 PLC 控制 | 182 | 附录 A S7-200 PLC 的特殊寄存器 (SM) | |
| 8.10 X62W 万能铣床的 PLC 控制 | 187 | 数值和功能 | 217 |
| 8.11 B2021A 龙门刨床的 PLC 控制系统 ... | 191 | 附录 B S7-200 PLC 的指令系统表 | 224 |
| 8.12 搬运产品的机械手控制系统 | 209 | 附录 C S7-200 PLC 的错误代码 | 229 |
| 附录 | 217 | 参考文献 | 232 |

第1章 电动机

电机是实现电能与机械能相互转换的机电设备。将机械能转换成电能的电机称为发电机，将电能转换成机械能的电机称为电动机。

在现代化生产中广泛使用电动机拖动各种生产机械。

电动机可分为直流电动机和交流电动机两大类。直流电动机的特点是调速性能好，起动转矩大，适用于对调速性能要求高或需要起动转矩大的生产机械，如起重机、电力机车、大型龙门刨床、轧钢机等。直流电动机需要由直流电源供电。

交流电动机有同步电动机和异步电动机两种。同步电动机的特点是转速恒定，其转速与交流电源的频率同步，不受电源电压和负载变化的影响。同步电动机的另一特点是运行功率因数可调。因此同步电动机适用于需要转速恒定、功率较大、长期工作的生产机械，如通风机、水泵等。直流电动机和同步电动机的结构都比较复杂，运行和维护工作量大。

1.1 三相异步电动机

异步电动机又称为感应电动机，它具有结构简单、制造容易、价格低廉、维护方便等优点，因此，大多数生产机械都采用异步电动机拖动，尤其是三相异步电动机的使用最为广泛。近年来，随着交流变频调速技术的不断发展，使得异步电动机的调速性能有了很大提高，完全可以和直流电动机相媲美。据统计，目前在电力拖动中90%以上采用的是异步电动机，在电力系统总负荷中，三相异步电动机占50%以上，因此，本节重点介绍三相异步电动机。

1.1.1 三相异步电动机的结构

三相异步电动机的结构分为定子和转子两大部分。图1-1为三相异步电动机的结构。定子由机座、定子铁心、定子绕组和端盖等部件组成。定子铁心一般用厚0.5mm的环形硅钢

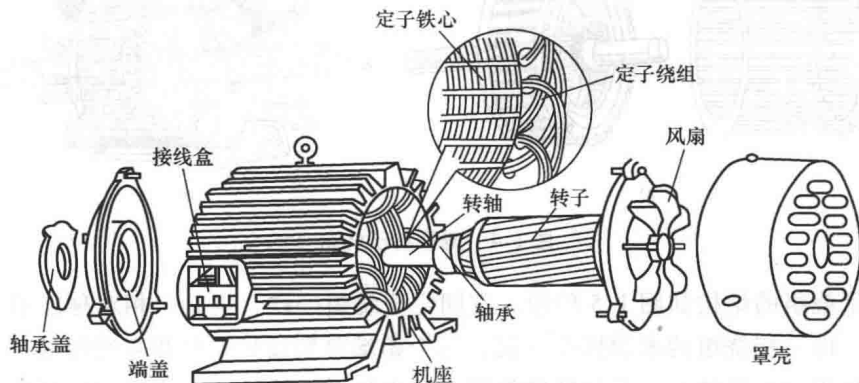


图 1-1 三相异步电动机的结构

片叠成，呈圆筒形，固定在机座里面。在定子铁心的内圆侧冲有间隔均匀的槽，如图 1-2 所示。定子三相绕组对称地嵌放在这些槽中，这对称三相绕组的首、末端 U_1 、 U_2 ， V_1 、 V_2 ， W_1 、 W_2 分别引出，接到机座的接线盒上，如图 1-3a 所示。根据电动机额定电压和供电电源电压的不同，可以用短接铜排将三相定子绕组的联结方式定为三角形联结，如图 1-3b 所示；也可以为星形联结，如图 1-3c 所示。

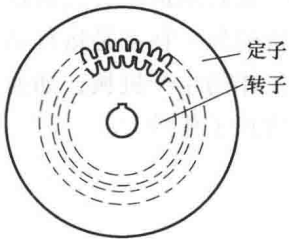
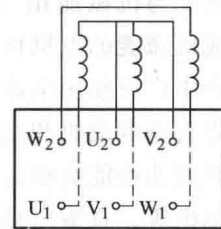
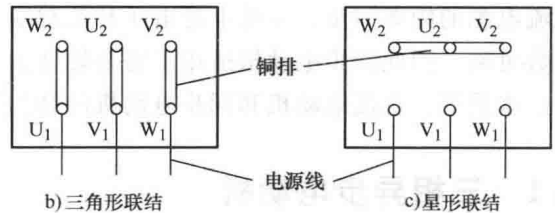


图 1-2 定子和转子铁心



a) 三相定子绕组



b) 三角形联结

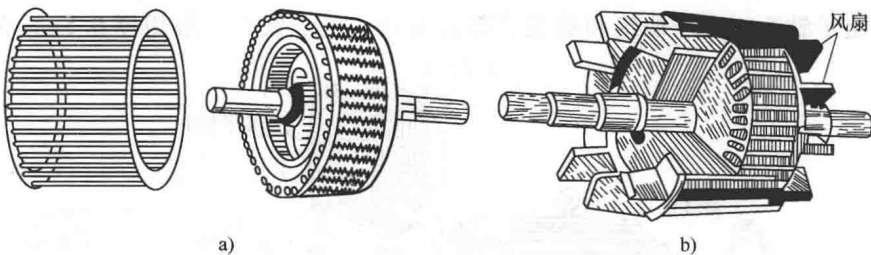
c) 星形联结

图 1-3 三相定子绕组的联结方式

端盖固定在机座上，端盖中央孔上装有轴承，支撑转子。转子拖动物机械负载。

转子由转子铁心、转子绕组和转轴组成，转子铁心也用硅钢片叠成，转子铁心固定在转轴上，呈圆柱形，外圆侧表面冲有均匀分布的槽，见图 1-2，槽内嵌放转子绕组。转子绕组有笼型和绕线型两种。

笼型转子绕组的制作方法有两种：一种是将铜条嵌入转子铁心槽中，两端用铜环将铜条一一短接构成闭合回路，如图 1-4a 所示。另一种方法是将熔化的铝液浇铸到转子铁心槽内，并同时铸出两端短路环和散热风扇叶片，如图 1-4b 所示。后一种制造方法成本较低，中小型笼型异步电动机转子一般都采用铸铝法制造。



a)

b)

图 1-4 笼型转子绕组

绕线转子绕组的结构如图 1-5 所示。它同定子绕组一样，也是三相对称绕组。转子绕组为星形联结，即三相绕组的末端接在一起，三个始端分别接到彼此相互绝缘的三个铜制集电环上。集电环固定在转轴上，并与转轴绝缘。集电环随轴旋转，与固定的电刷滑动接触。电刷安装在电刷架上，电刷的引出线与外接三相变阻器连接。通过集电环、电刷将转子绕组与

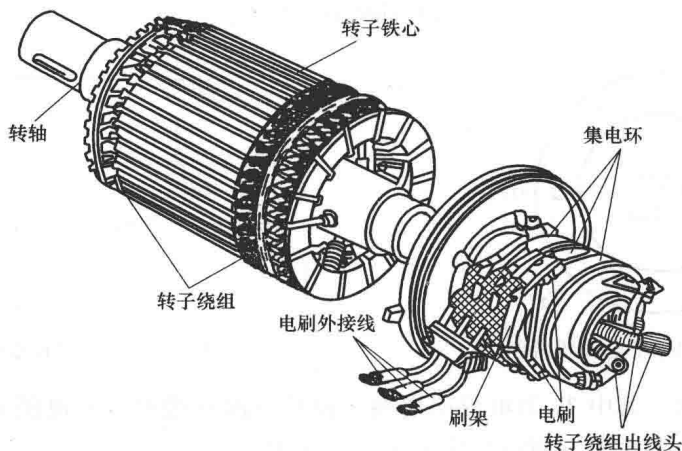


图 1-5 绕线转子绕组的结构

外接变阻器构成闭合回路。后面会讲到，绕线转子异步电动机可以通过调节外接变阻器改变转子电路电阻，达到改变电动机运行特性的目的。

1.1.2 三相异步电动机的工作原理

为了便于理解三相异步电动机的转动原理，先假设用一对旋转着的永久磁铁作为旋转磁场，如图 1-6 所示。设这个两极磁场顺时针方向旋转，旋转磁场中间是简化的、只有一匝绕组的转子，闭合的转子绕组受到旋转磁场的切割，在转子绕组中会产生感应电动势，由于转子绕组是闭合回路，所以在感应电动势的作用下出现感应电流，感应电流的方向如图 1-6 中所示。图中 \odot 表示电流从该端流出， \otimes 表示电流从该端流入。感应电流同旋转磁场相互作用产生电磁力 F ，电磁力的方向根据左手定则判定，在电磁力的作用下转子和旋转磁场同方向旋转。但是转子速度必然低于旋转磁场的转速，否则，转子绕组不受旋转磁场切割而不能产生感应电动势和电流，当然也就不能产生电磁力和转矩。通常称旋转磁场的转速为同步转速 n_1 ，转子的转速即异步电动机的转速为 n 。

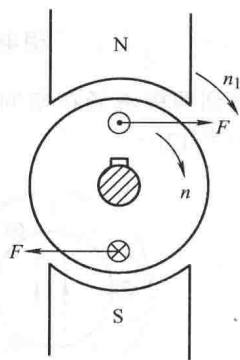


图 1-6 异步电动机的工作原理

三相异步电动机的旋转磁场是由三相交流电产生的。当给三相异步电动机的定子绕组通入三相对称电流后，随电流变化会合成产生一空间旋转磁场。

一、一对极（两极）的旋转磁场

一对极（两极）三相异步电动机的每相定子绕组只有一个线圈，这三个线圈的结构完全相同，对称地嵌放在定子铁心线槽中，绕组的首端与首端、末端与末端都互相间隔 120° ，如图 1-7 所示。为了清楚起见，三相对称绕组每相只用一匝线圈表示。设三相绕组为星形联结，如图 1-8 所示。当三相绕组的首端接通三相交流电源时，绕组中的三相对称电流分别为

$$i_{L1} = I_m \sin \omega t$$

$$i_{L2} = I_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_{L3} = I_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

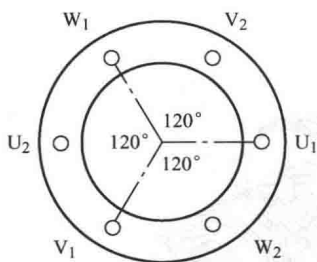


图 1-7 三相异步电动机绕组

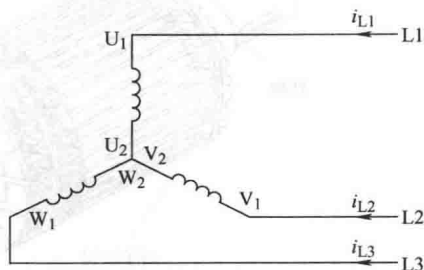


图 1-8 三相对称绕组

其波形如图 1-9 所示。其中 T_1 为电流的周期。设从线圈首端流入的电流为正，从末端流入的为负，则在 $t_1 \sim t_4$ 各瞬间三相绕组中的电流产生的合成磁场如图 1-9 所示。对照图 1-9 与图 1-10 分析如下：

在 t_1 时刻，即 $\omega t = 90^\circ$ 时， $i_{L1} = I_m$ ， $i_{L2} = i_{L3} = -\frac{1}{2}I_m$ ，用右手螺旋法则判定，三相电流产生的合成磁场为一个两极磁场，如图 1-10a 所示。

经过 $\frac{T_1}{3}$ 的时间，在 t_2 时刻，即 $\omega t = 210^\circ$ 时， $i_{L2} = I_m$ ， $i_{L1} = i_{L3} = -\frac{1}{2}I_m$ ，三相电流产生的合成磁场如图 1-10b 所示。此刻两极磁场在空间的位置较 $\omega t = 90^\circ$ 时沿顺时针方向旋转了 120° 。

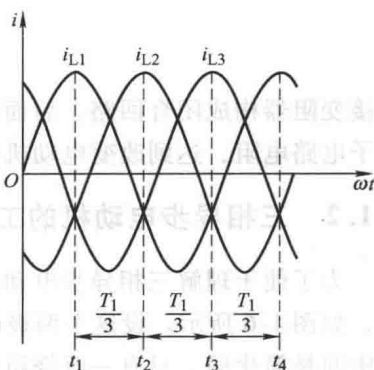


图 1-9 三相对称电流波形

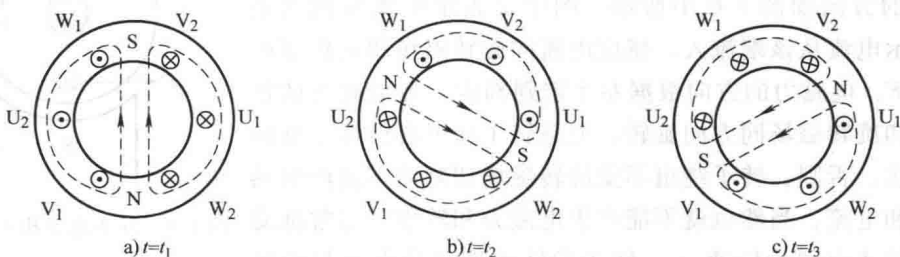


图 1-10 三相电流产生的旋转磁场（一对磁极）

再经过 $\frac{T_1}{3}$ 的时间，在 t_3 时刻，即 $\omega t = 330^\circ$ 时， $i_{L3} = I_m$ ， $i_{L1} = i_{L2} = -\frac{1}{2}I_m$ ，三相电流产生的合成磁场如图 1-10c 所示。两极磁场较 $\omega t = 210^\circ$ 时又沿顺时针方向旋转了 120° 。

再经过 $\frac{T_1}{3}$ 的时间，在 t_4 时刻，两极磁场沿顺时针方向又转到图 1-10a 所示的位置。

可见，三相电流经过一个周期，相位变化了 360° ，产生的合成磁场在空间也旋转了一周；磁场旋转的速度与电流的变化同步。

上述每相绕组节距（即每个绕组首、末端之间的几何角）为 180° 几何角，产生的旋转

磁场是一对极（两极）磁场。其转速为

$$n_1 = 60 \frac{1}{T_1} = 60f_1$$

式中, f_1 为定子电流的频率; n_1 的单位为转/分 (r/min)。

从图 1-10 中还可以观察到旋转磁场的旋转方向与通入定子三相绕组的电流相序有关。设将电流 i_{L1} 从 U 相线圈的 U_1 端通入, i_{L2} 、 i_{L3} 分别从 V_1 端和 W_1 端通入, 相序的排列顺序为顺时针方向, 磁场顺时针方向旋转; 反之, 磁场逆时针方向旋转。

二、同步转速与磁极对数的关系

若绕组采用 90° 几何角的节距, 每相绕组由两个线圈串联组成, 线圈的首端与首端, 末端与末端都互隔 60° 几何角。给三相绕组通入三相对称正弦电流, 则可产生两对极（四极）的旋转磁场, 如图 1-11 所示。两对极的磁场旋转一周需要 $2T_1$ 时间, 旋转的速度为

$$n_1 = 60 \frac{1}{2T_1} = 60 \frac{f_1}{2}$$

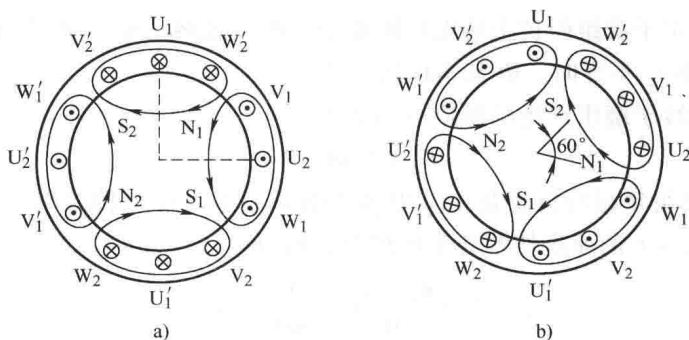


图 1-11 三相电流产生的磁场（两对磁极）

同理, 节距为 60° 的几何角的三相对称绕组, 通入三相对称正弦电流, 可以产生三对极（六极）的旋转磁场。三对磁极的旋转磁场旋转一周需要 $3T_1$ 时间, 依次类推, p 对磁极的旋转磁场旋转一周需要 pT_1 时间。所以, 同步转速的表达式为

$$n_1 = \frac{60}{pT_1} = \frac{60f_1}{p} \quad (1-1)$$

在工频 $f_1 = 50\text{Hz}$ 时, 同步转速 n_1 与磁极对数 p 的关系见表 1-1。

表 1-1 工频下同步转速 n_1 与磁极对数 p 的关系

| p | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|------|------|------|-----|-----|-----|
| $n_1 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ | 3000 | 1500 | 1000 | 750 | 600 | 500 |

三、转速与转差率

如前所述, 异步电动机的转子绕组受到旋转磁场的切割时, 产生电磁转矩, 使电动机转动起来。因此, 异步电动机的转速 n 必然低于同步转速 n_1 , 即 $n < n_1$ 。

异步机的同步转速 n_1 与转速 n 之差 Δn 称为转差, 即

$$\Delta n = n_1 - n \quad (1-2)$$

转差 Δn 与同步转速 n_1 的比值称为转差率 s , 即

$$s = \frac{\Delta n}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (1-3)$$

$$\text{转速} \quad n = (1 - s)n_1 \quad (1-4)$$

在电动机起动瞬间, 电动机的转速 $n = 0$, 即 $s = 1$ 。随着转速的提高, 转差率 s 减小。正常运行时, 异步电动机的转差率 s 在 0 与 1 之间, 即 $0 < s \leq 1$ 。一般异步电动机的额定转速 n_N 很接近同步转速 n_1 , 所以额定转差率 s_N 数值很小, 在 0.01 ~ 0.06 之间。

转差率 s 是异步电动机的一个重要参数, 在分析电动机的运行特性时经常用到。

1.1.3 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性

一、等效电路参数

在三相异步电动机中, 旋转磁场切割定子绕组产生的感应电动势 E_1 为

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

式中, f_1 为定子电流频率; N_1 为定子每相每极绕组的等效匝数; Φ 为旋转磁场每个磁极的磁通。

正常工作时, 定子绕组阻抗上的电压降很小, 可以忽略, 故 E_1 约等于电源电压 U_1 。在电源电压 U_1 和频率 f_1 不变时, Φ 基本保持不变。

旋转磁场通过转子绕组产生的感应电动势 E_2 为

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

式中, N_2 为转子绕组每相每极匝数; f_2 为转子电流频率。 f_2 与转差率 s 有关, 因为旋转磁场是以转差 $\Delta n = n_1 - n$ 的速度切割转子绕组的, 所以

$$f_2 = \frac{n_1 - n}{60} p = s \frac{n_1}{60} p = s f_1 \quad (1-7)$$

转子的每相绕组的等效电抗

$$X_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f_1 L_2 \quad (1-8)$$

也和转差率 s 有关。

在 $n = 0$, $s = 1$, 即转子静止不动时, $f_2 = f_1$, 转子感应电动势最大, 用 E_{20} 表示, 有

$$E_{20} = 4.44f_1 N_2 \Phi \quad (1-9)$$

此时的转子等效电抗也最大, 表示为 X_{20} , 有

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

则

$$E_2 = 4.44s f_1 N_2 \Phi = s E_{20} \quad (1-11)$$

$$X_2 = 2\pi s f_1 L_2 = s X_{20} \quad (1-12)$$

于是, 可以得到转子绕组中的电流为

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{s E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (s X_{20})^2}} \quad (1-13)$$

式中, R_2 为转子每相绕组的等效电阻。

转子电路的功率因数 λ_2 为

$$\lambda_2 = \cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (s X_{20})^2}} \quad (1-14)$$

I_2 、 λ_2 随转差率 s 变化的关系曲线如图 1-12 所示。

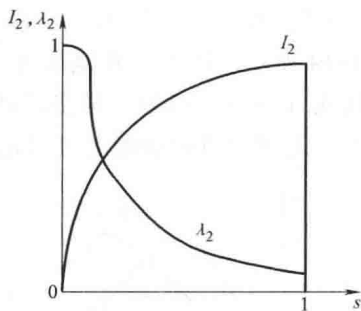
二、电磁转矩

三相异步电动机的电磁转矩是由旋转磁场与转子电流相互作用产生的。可以证明，转矩 T 与磁通 Φ 及转子电流 I_2 的关系为

$$T = C\Phi I_2 \cos\varphi_2 \quad (1-15)$$

式中， C 为与电动机结构有关的常数； Φ 为旋转磁场每极磁通； I_2 为转子电流有效值； $\lambda_2 = \cos\varphi_2$ 为转子电路功率因数； T 的单位为牛·米 ($\text{N}\cdot\text{m}$)。

图 1-12 I_2 、 λ_2 随转差率 s 变化的关系曲线



将式 (1-13) 和式 (1-14) 代入式 (1-15)，整理后得

$$T = C\Phi E_{20} \frac{sR_2}{R_2^2 + (sX_{20})^2} \quad (1-16)$$

又因为

$$\Phi = \frac{E_1}{4.44f_1 N_1} \approx \frac{U_1}{4.44f_1 N_1}$$

$$E_{20} = 4.44f_1 N_2 \Phi \approx \frac{N_2}{N_1} U_1$$

所以

$$T = C_T U_1^2 \frac{sR_2}{R_2^2 + (sX_{20})^2} \quad (1-17)$$

(当电源频率 f_1 一定时， C_T 为一常数。) 可见，三相异步电动机的电磁转矩不仅与转差率 s 、转子电路参数 R_2 和 X_2 有关，而且还与电源电压 U_1 的二次方成正比。因此，电源电压的波动对电动机的转矩影响很大。这是异步电动机的不足之处。

当电源电压 U_1 和频率 f_1 一定，且电动机参数不变时，异步电动机转矩 T 与转差率 s 的关系 $T=f(s)$ 称为转矩特性，其曲线如图 1-13 所示。

1. 最大转矩

从 $T=f(s)$ 曲线上可以看出，在 $s=0$ 时 $T=0$ ，为理想空载工作状态，实际中不存在。在 $0 < s < s_m$ 区间，转矩 T 随 s 的增大而增大；在 $s = s_m$ 时，转矩达到最大值 T_m ；在 $s_m < s < 1$ 区间，转矩 T 随转差率 s 的增大而减小。通常称 s_m 为临界转差率。

将式 (1-17) 对 s 求导，并令 $\frac{dT}{ds} = 0$ ，求得临界转差率

$$s_m = \frac{R_2}{X_{20}} \quad (1-18)$$

将式 (1-18) 代入式 (1-17)，可得最大转矩

$$T_m = C_T U_1^2 \frac{1}{2X_{20}} \quad (1-19)$$

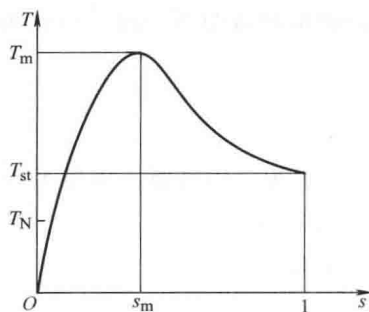


图 1-13 转矩特性曲线

从式 (1-18)、式 (1-19) 可以看出, 临界转差率 s_m 与转子电阻 R_2 成正比, 但最大转矩 T_m 与 R_2 无关。 R_2 增大, T_m 不变, s_m 增大, 这就使电动机发生最大转矩时的转速降低。如图 1-14 所示。因此, 在绕线转子异步电动机转子回路外接变阻器可实现调速的目的。

从式 (1-19) 可知, 异步电动机的最大转矩 T_m 与电源电压 U_1 的二次方成正比。所以供电电压的波动将影响电动机的运行情况。图 1-15 所示为不同电压下的 $T=f(s)$ 曲线。

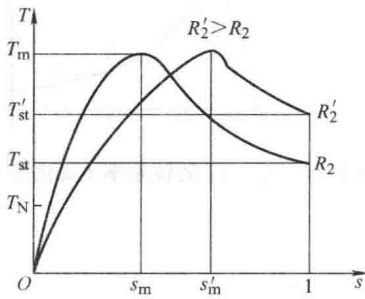


图 1-14 转子电阻不同时三相异步电动机的机械特性

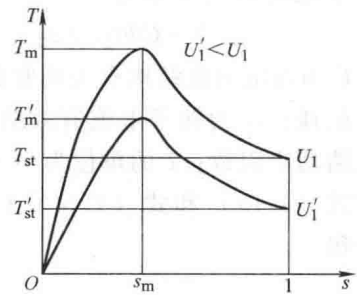


图 1-15 电源电压不同时转子的机械特性

2. 起动转矩

电动机起动瞬间, $n=0$, $s=1$, 这时产生的电磁转矩称为起动转矩 T_{st} 。将 $s=1$ 代入式 (1-17) 求得

$$T_{st} = C_T U_1^2 \frac{R_2}{R_2^2 + X_{20}^2} \quad (1-20)$$

改变 R_2 和 U_1 都会对 T_{st} 有影响, 如图 1-14、图 1-15 所示。

3. 额定转矩

异步电动机的额定转矩 T_N 是指其工作在额定状态下产生的电磁转矩。在忽略电动机本身的机械损耗阻力矩时, 可认为电磁转矩 T 近似等于电动机轴上的输出机械转矩 T_2 。即

$$T = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_2}{\frac{2\pi n}{60}} \quad (1-21)$$

式中, T 为电磁转矩, 单位为 $N \cdot m$; P_2 为电动机输出功率, 单位为 W , Ω 为机械角速度, 单位为 rad/min 。

于是

$$T_N = \frac{P_N}{\frac{2\pi n_N}{60}} = 9550 \frac{P_N}{n_N} \quad (1-22)$$

式中, T_N 为额定电磁转矩, 单位为 $N \cdot m$; P_N 为电动机的额定输出功率, 单位为 kW ; n_N 为额定转速, 单位为 r/min 。

电动机的最大转矩 T_m 与额定转矩 T_N 之比称为过载系数, 用 λ_m 表示。

$$\lambda_m = \frac{T_m}{T_N} \quad (1-23)$$

λ_m 表示电动机短时过载能力。一般三相异步电动机的 λ_m 在 $1.8 \sim 2.2$ 之间, 而冶金、起重等特殊电动机的 λ_m 在 $2.2 \sim 3$ 之间。

应该指出,电动机的负载转矩 T_L 在 $T_N < T_L < T_m$ 状态运行时,为过载状态。过载状态下只能短时运行,否则因电流太大,温升过高,会致使电动机绝缘老化,寿命缩短,严重时甚至烧毁绕组。因此,中、大容量的电动机均应装配热保护继电器,其目的就是避免电动机长时间过载运行。

电动机的起动转矩 T_{st} 与额定转矩 T_N 的比值 $K_{st} = \frac{T_{st}}{T_N}$ 表示电动机的起动能力。一般异步电动机的 K_{st} 值在 1.4 ~ 2.2 之间。

三、机械特性

异步电动机的转速 n 与转矩 T 之间的关系 $n = f(T)$ 称为机械特性,其曲线如图 1-16 所示。

当电动机所带负载转矩 T_L 小于起动转矩 T_{st} 时,可带负载起动,从 a 点 $\rightarrow b$ 点,电动机的转矩随转速的上升而增大,促使转速迅速提高,到达 b 点时转矩为最大值 T_m 。拐过 b 点以后,电动机的转矩则随转速的上升而减小,但只要是电磁转矩 T 大于负载转矩 T_L ,电动机的转速还保持继续上升,直到 $T = T_L$ 时,电动机的转速稳定下来。

当负载转矩发生变化时,只要 $T'_L < T_m$,则电动机可以自动调节,使电动机的电磁转矩重新适应负载的需要。例如,当负载转矩增加时,电动机的电磁转矩 T 不能马上改变,因而 $T < T'_L$ 导致电动机的转速下降,随着转速的下降,电磁转矩上升,直到 $T = T'_L$,电动机在一个新的工作点上稳定下来,此点的转速 $n' < n$,如图 1-16 所示。一般异步电动机 $n = f(T)$ 特性曲线的 bc 段较平,故在此区段内,负载转矩的变动引起的转速变化不大,这种特性称为硬机械特性。

如果负载转矩 T_L 突然增加,或电源电压突然降低使 T_m 下降,一旦 $T_m < T_L$,则电动机转速迅速下降,进入 ab 区段,电动机的电磁转矩随转速的下降而减小,导致电动机迅速停止运转,这一现象称为堵转。堵转后,电动机的电流立即升高为额定电流的数倍,如果没有保护措施及时切断电源,电动机将可能被烧毁。

1.1.4 三相异步电动机的运行特性和额定值

一、运行特性

异步电动机的运行特性是指电动机在额定电压、额定频率运行时转速 n 、电磁转矩 T ($\approx T_2$)、输入电流 I_1 、功率因数 λ_1 和效率 η 与输出机械功率 P_2 的关系,如图 1-17 所示。这些特性曲线可以通过实验的方法得到。

1. $n = f(P_2)$ 曲线

笼型异步电动机的机械特性属硬特性, n 随 P_2 的增减变化不大。当空载时, $P_2 = 0$, $n \approx n_1$, 随着负载增加,转速 n 略有下降。

2. $T = f(P_2)$ 曲线

由式 (1-21) 可知,三相异步电动机转矩 T

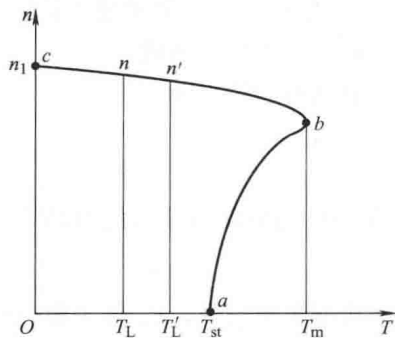


图 1-16 三相异步电动机的机械特性

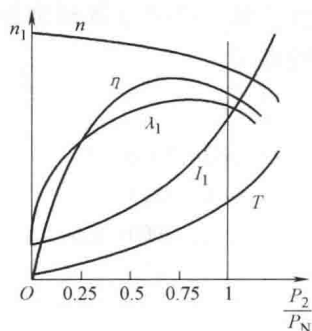


图 1-17 异步电动机的运行特性

近似地与输出功率 P_2 成正比，但由于转速特性 $n = f(P_2)$ 随 P_2 增加略有下降，故 $T = f(P_2)$ 曲线微有上翘。

3. $I_1 = f(P_2)$ 曲线

I_1 为三相异步电动机输入电源的线电流。电动机在带负载工作时， I_1 随 P_2 的增加而增大，以产生与负载相适应的电磁转矩。在额定负载时， $I_1 = I_N$ ；电动机空载时， $P_2 = 0$ ， $I_1 = I_0$ 。 I_0 的主要成分是建立旋转磁场的励磁电流，一般 I_0 为额定电流 I_N 的 20% ~ 30%。

4. $\eta = f(P_2)$ 曲线

电动机的效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (1-24)$$

式中， P_1 为电动机输入的电功率。由三相电路可知

$$P_1 = \sqrt{3} U_L I_L \cos\varphi_1 \quad (1-25)$$

根据功率平衡关系， P_1 等于输出机械功率 P_2 与损耗功率 ΔP 之和，即 $P_1 = P_2 + \Delta P$ ，而

$$\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu} \quad (1-26)$$

式中， ΔP_m 为转子机械摩擦与空气阻力损耗； ΔP_{Fe} 为定子、转子铁心中的损耗，称为铁损耗； ΔP_{Cu} 为定子、转子线圈电阻的损耗，称为铜损耗。 ΔP_m 与 ΔP_{Fe} 的数值基本上与负载变化无关，而 ΔP_{Cu} 则与电流的二次方成正比，故随负载增大而增大很快。

轻载时，电动机的效率较低，随 P_2 增加， η 上升很快，在 $\Delta P_m + \Delta P_{Fe} = \Delta P_{Cu}$ 时，效率最高，负载再继续增大， η 反而略有下降。为了经济运行，一般中小型电动机设计成负载为 75% 左右的额定负载时效率最高。

5. $\lambda_1 = \cos\varphi_1 = f(P_2)$ 曲线

空载时，异步电动机功率成分中主要是建立旋转磁场所吸收的感性无功功率，故空载时，功率因数很低，仅为 0.2 左右。随着 P_2 的增大，电动机消耗的有功功率上升很快，无功功率基本不变，故功率因数 λ_1 随 P_2 的增大而增大。在额定负载 80% ~ 100% 范围内的某一点达到最大值。在额定负载时，一般为 0.7 ~ 0.9。

从以上分析可知，三相异步电动机在空载和轻载运行时，效率和功率因数都较低。因此，要根据生产机械的需要，合理地选择电动机的功率，科学地安排生产工艺流程，尽量缩短空载和轻载运行时间，具有重大的经济意义。

二、三相异步电动机的型号与额定数据

电动机的型号和额定数据都标记在铭牌上，这里以 Y132S-2 电动机为例，说明铭牌上各个数据的意义。

| | | |
|--------------|----------|---------|
| 三相异步电动机 | | |
| 型号：Y132S-2 | 功率：7.5kW | 频率：50Hz |
| 电压：380V | 电流：15.0A | 接法：△ |
| 转速：2900r/min | 绝缘等级：B | 工作方式：连续 |
| 出厂年月 ×年×月 | | |

此外，Y132S-2 的额定功率因数为 0.84，额定效率为 87%。

1. 型号

电动机型号中包括产品类型代号、结构、磁极数和特殊环境代号，产品类型代号见表 1-2。例如：

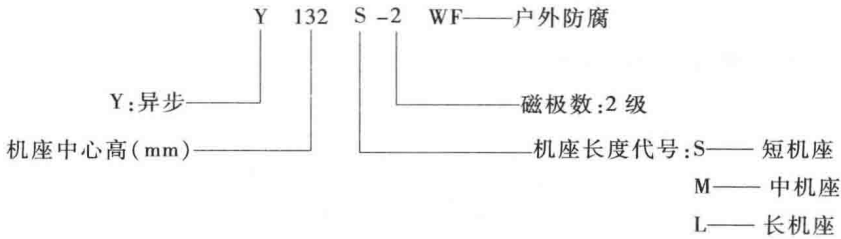


表 1-2 电动机产品类型代号

| 代号 | 产品名称 | 代号 | 产品名称 |
|----|------------|-----|-------------|
| Y | 笼型异步电动机 | YB | 隔爆笼型异步电动机 |
| YR | 绕线转子异步电动机 | YQS | 潜水笼型异步电动机 |
| YQ | 高起动转矩异步电动机 | YQY | 潜油笼型异步电动机 |
| YD | 多速异步电动机 | YRL | 立式绕线转子异步电动机 |

2. 额定电压 U_{1N}

电动机额定运行时应加的电源线电压，单位为伏（V）。一般规定电动机的电源电压与额定电压之间的允许偏差不应超过 $\pm 5\%$ 。

3. 额定电流 I_{1N}

电动机额定运行时的线电流，单位为安（A）。

4. 额定转速 n_N

电动机额定运行时的转速，单位为转/分（r/min）。

5. 额定功率 P_N

电动机额定运行时，电动机轴上输出的机械功率，单位为千瓦（kW）。

6. 额定频率 f_{1N}

我国电力系统交流电的频率统一采用 50Hz，因此国内用交流异步电动机的额定频率一般为 50Hz，有的国家采用 60Hz。

7. 绝缘等级

电动机的绝缘等级是按其所用绝缘材料所容许的温升（环境温度在 40℃ 时）或容许极限温度来分级的，见表 1-3。

表 1-3 电动机绝缘等级与容许温升、温度

| 绝缘等级 | 环境温度在 40℃ 时的容许温升/℃ | 容许极限温度/℃ |
|------|--------------------|----------|
| A | 60 | 105 |
| E | 75 | 120 |
| B | 80 | 130 |
| F | 100 | 155 |
| H | 125 | 180 |

8. 工作方式

工作方式也称定额。用英文字母 S 和数字标志。按运行状态对电动机温升的影响，工作方式细分为 9 种，可归为连续、短时和断续周期三大类，详见 1.5 节。