

高等学校机械工程及自动化

机械设计制造及其自动化

专业系列教材

机电传动控制

张海根 主 编

高安邦 副主编



高等教育出版社

高等学校机械工程及自动化
(机械设计制造及其自动化)专业系列教材

机电传动控制

张海根 主编

高安邦 副主编

参编 张镭 汪苏

高等教育出版社

内容提要

本书紧密结合典型机电自动控制系统,详细介绍了控制系统的组成以及设计方法。既有常用的电气控制方法,又有先进的控制技术。具有系统性、实用性和先进性。

全书除绪论和附录外共分5章,第1章机电传动断续控制,第2章可编程序控制器(PLC)及其应用,第3章步进电动机传动控制,第4章机电传动速度连续控制,第5章机电传动伺服系统。每章末均有思考题和习题。

本书是高等工科院校机械工程及自动化专业的系列教材之一,也可供机电相关专业选用及有关科研和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机电传动控制/张海根主编. —北京:高等教育出版社,2001.12

本科机械教材

ISBN 7-04-010171-8

I. 机... II. 张... III. 机电-传动系-控制系统
-高等学校-教材 IV. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 065311 号

责任编辑 沈 忠 封面设计 刘晓翔 责任绘图 朱 静
版式设计 马静如 责任校对 康晓燕 责任印制 张小强

机电传动控制
张海根 主编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街55号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 北京机工印刷厂

开 本 787×1092 1/16

版 次 2001年12月第1版

印 张 14

印 次 2001年12月第1次印刷

字 数 330 000

定 价 12.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

本书是在高等教育出版社的组织和指导下,根据天津大学、哈尔滨理工大学、北京航空航天大学、东北大学和哈尔滨工业大学等院校共同研究、拟订的机械工程及自动化专业教材编写大纲而编写的。本教材总结了各校多年的教学经验,在内容的选取上进一步体现了教材的系统性、实用性和先进性。

全书除绪论和附录外共分5章。第1章介绍了三相异步电动机、常用低压电器、基本控制电路以及控制电路的分析和设计。内容循序渐进,由浅入深。便于自学和尽快掌握继电器接触器控制技术。第2章是在第1章的基础上,进一步介绍可编程序控制器(PLC)及其应用。学习该章内容可逐步掌握如何采用计算机软件编程方式取代继电器接触器控制系统的有触点逻辑控制方式。把当代先进技术引入机电控制领域。第3章为步进电动机传动控制。该章详细讲述了步进电动机独特的工作方式以及在开环伺服系统中的具体应用。丰富的实例可以作为工程技术人员从事实践的指导。第4章介绍了交、直流电动机的无级调速系统,从元件到电路详细地讲述了在调速系统中广泛采用的先进技术。第5章介绍了伺服系统常用的元器件和检测、控制电路,讲述了伺服系统的设计方法以及实现高精度、快速控制的先进补偿技术。结合具体的应用实例,可帮助工程技术人员踏入尖端控制领域。

参加本书编写的有天津大学张海根(第1、4、5章),哈尔滨理工大学高安邦(第2、3章),东北大学张镭(第4章),北京航空航天大学汪苏(第5章)。由张海根担任主编,高安邦担任副主编。

本书由华中科技大学邓星钟教授主审,他提出了许多宝贵意见,并作了大量细致的工作,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2001年8月

目 录

绪论	1	2.2 PLC 的编程器件和编程方式	57
第 1 章 机电传动断续控制	3	2.2.1 PLC 的编程器件	57
1.1 三相异步电动机	3	2.2.2 PLC 的编程方式	59
1.1.1 三相异步电动机的工作原理	3	2.3 F1 系列 PLC 及其指令系统	60
1.1.2 三相异步电动机特性分析	5	2.3.1 F1 系列 PLC 系统构成	60
1.1.3 异步电动机的起动和制动	9	2.3.2 F1 系列 PLC 编程器件	62
1.2 常用低压电器	14	2.3.3 F1 系列 PLC 基本指令	63
1.2.1 执行电器	14	2.4 PLC 控制系统设计	69
1.2.2 检测电器	16	2.4.1 PLC 控制系统设计步骤	69
1.2.3 控制电器	19	2.4.2 PLC 移位寄存器控制方式应 用实例	73
1.2.4 保护电器	20	2.4.3 PLC 步进梯形指令控制方式 应用实例	77
1.3 基本控制电路	23	思考题和习题	88
1.3.1 电气控制原理图	23	第 3 章 步进电动机传动控制	89
1.3.2 三相异步电动机起动控制电路	24	3.1 步进电动机	90
1.3.3 三相异步电动机正反向运行控 制电路	26	3.1.1 步进电动机的结构与工作原理	90
1.3.4 三相异步电动机制动控制电路	28	3.1.2 小步距角步进电动机	91
1.3.5 双速电动机控制电路	29	3.1.3 步进电动机的分类	92
1.3.6 其它基本控制电路	29	3.2 步进电动机的环形分配器	96
1.3.7 电气保护电路	32	3.2.1 步进电动机的驱动方式	96
1.4 机电传动断续控制电路分析	33	3.2.2 步进电动机的环形分配器	97
1.4.1 通用机械设备电路分析	33	3.3 步进电动机的驱动电路	99
1.4.2 专用机械设备电路分析	39	3.3.1 单电压限流型驱动电路	99
1.5 机电传动断续控制电路设计	43	3.3.2 双电压驱动电路	99
1.5.1 电气设计的一般原则	43	3.3.3 斩波驱动电路	100
1.5.2 电动机容量的选择	45	3.3.4 升频升压驱动电路	101
1.5.3 电气原理图设计	47	3.3.5 细分驱动电路	101
1.5.4 常用电气元件选择	48	3.4 步进电动机的运行特性及使用	102
思考题和习题	52	3.4.1 步进电动机的运行特性及影响 因素	102
第 2 章 可编程序控制器(PLC) 及其应用	54	3.4.2 步进电动机的主要性能指标和 应用	106
2.1 PLC 的基本结构和工作方式	54	3.5 步进电动机的控制	108
2.1.1 PLC 的基本结构	54		
2.1.2 PLC 的工作方式	56		

3.5.1 步进电动机的开环控制	109	4.3.5 直流脉宽调速系统	136
3.5.2 步进电动机的闭环控制	110	4.4 交流电动机无级调速系统	143
3.6 步进电动机驱动系统设计举例 及传动控制应用实例	111	4.4.1 交流变频调速和控制方式	143
3.6.1 步进电动机传动控制在 xy 平面 绘图机中的设计举例	111	4.4.2 晶闸管变频器异步电动机调速 系统	144
3.6.2 步进电动机传动控制在数控立式 铣床中的应用实例	115	思考题和习题	158
3.6.3 步进电动机的 PLC 传动控制应 用实例	117	第 5 章 机电传动伺服系统	159
思考题和习题	119	5.1 伺服系统中主要元器件	159
第 4 章 机电传动速度连续控制	121	5.1.1 直流伺服电动机	159
4.1 概述	121	5.1.2 交流伺服电动机	164
4.1.1 无级调速	121	5.1.3 伺服系统的测速与测角(位移)	169
4.1.2 调速静态技术指标	121	5.2 伺服控制系统设计方法	185
4.2 电力电子器件简介	122	5.2.1 伺服系统的组成	185
4.2.1 电力电子器件的分类	122	5.2.2 系统品质与系统特性	187
4.2.2 电力电子器件的开关特性	122	5.2.3 常用的线性补偿	191
4.3 直流电动机无级调速系统	126	5.2.4 复合控制技术	196
4.3.1 他励直流电动机基本结构	126	5.2.5 非线性补偿技术	200
4.3.2 他励直流电动机调速方法	127	5.3 伺服系统应用举例	203
4.3.3 可控整流电路	129	5.3.1 运动控制专用微处理器	203
4.3.4 闭环控制直流调速系统	131	5.3.2 火炮方位伺服系统	210
		思考题和习题	213
		附录	215
		参考文献	216

绪 论

《机电传动控制》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。当原动机为电动机时,即由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”。

一般说来,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一起称为“电力拖动”部分;把满足加工工艺要求使电动机起动、制动、反向、调速、快速定位等电气控制和电气操作部分视为“电气自动控制”部分,或称电气自动控制装置。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。

从生产机械所应用的电器与控制方法看,最初是采用一些手动电器来控制执行电器。这类手动控制适用于一些容量小,操作单一的场所。以后发展为采用自动控制电器的继电器接触器控制系统。这种控制系统主要由一些继电器、接触器、按钮、行程开关等组成。其特点是结构简单,价格低廉,维护方便,抗干扰强,因此广泛应用于各类机械设备上。采用它不仅可以方便地实现生产过程自动化,而且还可以实现集中控制和远距离控制。目前,继电器接触器控制仍然是最基本的电气控制形式之一。但由于该控制形式是固定接线,通用性和灵活性差,又由于采用有触点的开关动作,工作频率低,触点易损坏,可靠性差。

在实际生产中,由于大量存在一些以开关量控制的程序控制过程,而生产工艺及流程经常变化,因而应用前述的继电器接触器控制电路,就不能满足这种需要。于是由集成电路组成的顺序控制器应运而生,它具有程序变更容易、程序存储量大,通用性强等优点,广泛应用于各类机械设备及自动线上。20世纪60年代末,又出现了具有运算功能和功率输出能力的可编程控制器(PLC)。它是由大规模集成电路、电子开关、功率输出器件等组成的专用微型电子计算机,用它可代替大量的继电器,且功耗小,体积小,在机电传动控制上具有广阔的应用前景。

速度调节是影响电气控制技术发展的另一个重要因素。电力拖动系统主要分为直流拖动和交流拖动两大类。由于所用电动机不同,它们的电气控制装置也就不同。交流拖动系统由于交流电动机结构简单、制造容易、造价低及容易维护等许多特点而应用广泛。但由于直流电动机具有良好的起动、制动特性和调速性能,能在很宽的范围内进行平滑调速,所以对调速性能要求较高及对速度需要精确控制的设备以往都采用直流拖动系统。而后,由于逆变技术的出现和高压大功率管的问世,交流电动机无级调速系统有了迅速发展,它是利用改变交流电的频率等来实现电动机转速的无级调速。因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,

故很有发展前途。

驱动机械设备各坐标轴追随指令运动的传动装置称为伺服系统,其中包括机械传动部件和产生主动力矩以及控制其运动的各种驱动装置。从调节原理的角度讲,伺服系统是一种精密的位置跟踪与定位系统。伺服系统的性能在很大程度上决定了设备的性能。例如数控机床的最高移动速度、跟踪精度、定位精度等重要指标均取决于伺服系统的动态和静态特性。

伺服系统按调节理论可分为开环、闭环。闭环系统又分为直流和交流伺服系统。直流(DC)伺服系统在 20 世纪 70、80 年代的设备中占据主导地位。大惯量直流伺服电动机具有良好的调速性能,输出转矩大,过载能力强,构成闭环易于调整。小惯量直流伺服电动机和大功率晶体管脉宽调制(PWM)驱动装置,具有可频繁起动、制动和快速定位的特点。20 世纪 80 年代后,由于交流(AC)伺服电动机的材料结构、控制理论和方法均有突破性发展,促使 AC 驱动与伺服系统发展很快,有逐渐取代 DC 伺服系统的趋势。

步进电动机驱动系统主要用于开环位置控制系统。它由步进电动机和步进电动机驱动电源组成,不加反馈环节。这种系统较简单,控制较容易,维修也较方便,且控制为全数字化。随着计算机技术的发展,除功率驱动电路之外,其它硬件电路均可由软件实现,从而简化了系统结构,降低了成本,提高了系统的可靠性。

总之,电气传动控制在机械设备上占有非常重要的地位。使机械设备不但在结构上受其电气控制的影响,而且它的性能、价格、性能 - 价格比逐步由主要决定于其机械部分而转为主要决定于其电气控制部分。由此可见,掌握电气自动控制方面的知识对从事机械电子工程的技术人员来说是尤为重要的。

第 1 章 机电传动断续控制

用电动机带动生产机械运动的传动方式称为机电传动。机电传动系统一般由电动机、工作机构、传动装置、控制设备以及电源等五个部分组成,如图 1.1 所示。

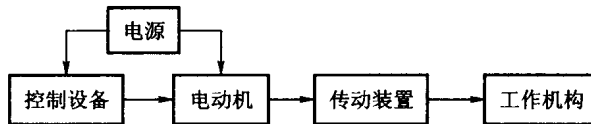


图 1.1 机电传动系统示意图

电动机把电能转换为机械能,用以拖动工作机构完成生产机械所规定的某一任务。传动装置用来实现电动机与工作机构的运动连接,并根据工作机构的需要完成速度和方向的变换。控制设备由各种电器元件组成,用以控制电动机的运转。

电动机自动控制方式大致可分为断续控制、连续控制和数字控制三种。在断续控制方式中,控制系统处理的信号为断续变化的开关量,如异步电动机的继电器接触器控制系统。在连续控制方式中,控制系统处理的信号为连续变化的模拟量,如某些设备的直流电动机调速系统。在数字控制方式中,控制系统处理的信号为离散的数字量,如机床的数控系统。

本章主要介绍异步电动机的继电器接触器控制系统。

1.1 三相异步电动机

三相异步电动机结构简单、运行可靠、价格低廉、维修方便,在工业中获得广泛应用。

1.1.1 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,如图 1.2 所示。定子铁心为圆桶形,由互相绝缘的硅钢片叠成,铁心内圆表面的槽中放置着对称的三相绕组 U_1U_2 、 V_1V_2 、 W_1W_2 。转子铁心为圆柱形,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型式。笼型的转子绕组做成笼状,就在转子铁心的槽中放入铜条,其两端用环联接。或者在槽中浇铸铝液,铸成一笼型。绕线型的转子绕组同定子绕组一样,也是三相,每相终端联在一起,始端通过滑环、电刷与外部电路相联。

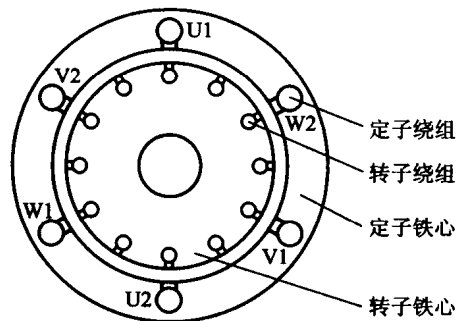


图 1.2 三相异步电动机结构原理图

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U1U2、V1V2、W1W2可以联接成星形也可以联接成三角形,如图1.3所示。

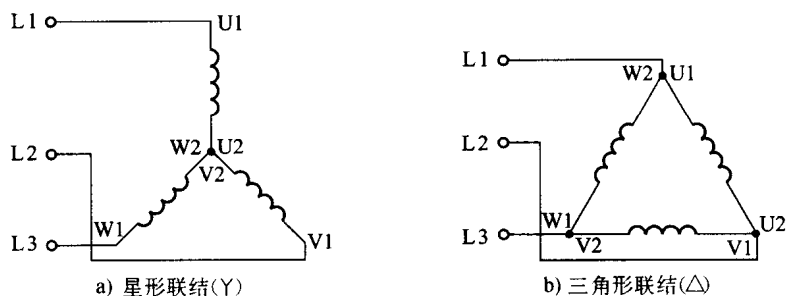


图 1.3 定子三相绕组的联结

假设将定子绕组联接成星形,并接在三相电源上,绕组中便通入三相对称电流

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

其波形如图1.4所示。

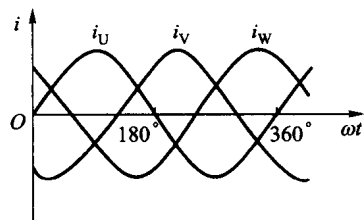


图 1.4 三相电流波形

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1.5所示。

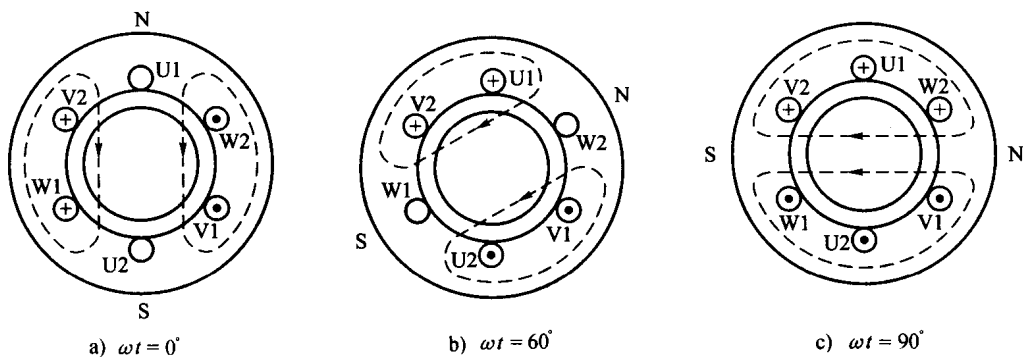


图 1.5 三相电流产生旋转磁场

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1.6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 施加于导体上。电磁力 F 的方向可由左手定则确定。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。如果将联接三相电源的三相绕组端子中的任意两相对调,就可改变转子的旋转方向。

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1.5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

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad (1.1)$$

式中: n_0 的单位为 r/min。

在我国,工频 $f_1 = 50$ Hz,电动机常见极对数 $p = 1 \sim 4$ 。

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

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (1.2)$$

一般异步电动机在额定负载时的转差率约为 $1\% \sim 9\%$ 。

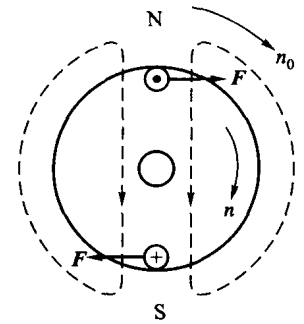


图 1.6 转子转动原理图

1.1.2 三相异步电动机特性分析

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,其每相电路图如图 1.7 所示。图中, 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。

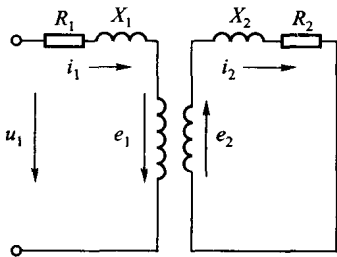


图 1.7 三相异步电动机每相电路图

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 为定子每相绕组匝数。

感应电动势的有效值为

$$E_1 = 4.44f_1 N_1 \Phi \quad (1.3)$$

式中: f_1 是 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 为转子每相绕组匝数。

电动势的有效值为

$$E_2 = 4.44f_2 N_2 \Phi \quad (1.4)$$

式中: f_2 是转子电动势 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

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

将上式代入式(1.4)得

$$E_2 = 4.44sf_1 N_2 \Phi \quad (1.5)$$

转子每相绕组漏磁感抗 X_2 与转子频率 f_2 有关,即

$$X_2 = 2\pi f_2 L_2 \quad (1.6)$$

式中: L_2 为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

$$X_{20} = 2\pi f_1 L_2 \quad (1.7)$$

由式(1.6)和式(1.7)得出

$$X_2 = sX_{20}$$

转子每相绕组的电流为

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \quad (1.8)$$

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

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \quad (1.9)$$

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

$$T = \frac{P_2}{\omega_2} = \frac{m_1 E_2 I_2 \cos \varphi_2}{s\omega_0} \quad (1.10)$$

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

将式(1.3)、(1.5)、(1.8)、(1.9)代入式(1.10)得

$$T = \frac{Km_1 p U_1^2 R_2 s}{2\pi f_1 [R_2^2 + (sX_{20})^2]} \quad (1.11)$$

式中: 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(1.11)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 1.8 所示。图中, 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

$$s_c = \frac{R_2}{X_{20}} \quad (1.12)$$

把式(1.12)代入式(1.11)得到

$$T_{\max} = \frac{Km_1 p U_1^2}{4\pi f_1 X_{20}} \quad (1.13)$$

1. 固有机械特性

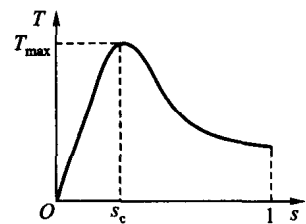


图 1.8 电动机的 $T = f(s)$ 曲线

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 T 与转差率 s 之间的关系,考虑到 $n = n_0(1 - s)$,则用 $n = f(T)$ 表示的异步电动机的机械特性如图 1.9 所示。

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) 起动点 A 对应这一点的转速 $n = 0 (s = 1)$,电磁转矩 T 为起动转矩 $T_{st} (T = T_{st})$,起动转矩 T_{st} 反映异步电动机直接起动时的带负载能力。起动电流 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 在这点,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 n_0 转速运转,需在外力下克服空载转矩方能实现。该点不但所带负载为零,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。

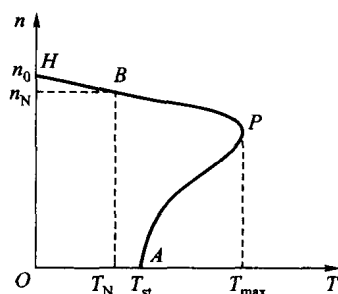


图 1.9 三相异步电动机的固有特性

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(1.11)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,因而只有降低定子电压的人为特性。

将 $s = 1$ 代入式(1.11)得电动机起动转矩表达式为

$$T_{st} = \frac{Km_1 p U_1^2 R_2}{2\pi f_1 [R_2^2 + X_{20}^2]} \quad (1.14)$$

由上式及式(1.13)可见,当其它参数不变只降低电压 U_1 时,电动机的最大转矩 T_{max} 和起动转矩 T_{st} 与 U_1^2 成正比地下降。又由式(1.12)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。见图 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电阻后,由式(1.12)知临界转差率 s_c 是随外串电阻 R_s 增大而增大,而由式(1.13)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 1.11 所示。

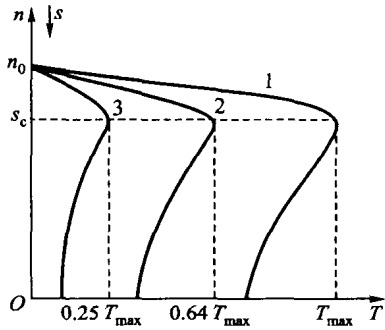


图 1.10 对应于不同电源电压的人为特性

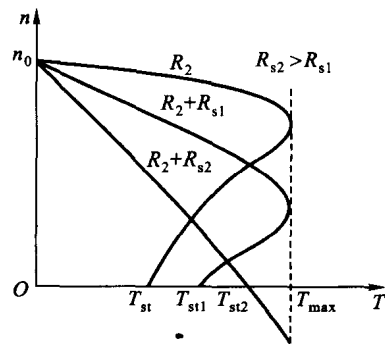


图 1.11 对应于不同转子电阻的人为特性

由式(1.14)知,起动转矩 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,即最大转矩发生在起动瞬时,以改善电动机的起动性能。但如果再增大电阻,起动转矩反而要减小。这是因为过大的电阻接入将使转子电流下降过大所致。

(3) 改变定子电源频率

若保持电动机极对数 p 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(1.13)和(1.14)知,如果减小 f_1 则最大转矩 T_{max} 和起动转矩 T_{st} 都将随 f_1 减小而增大,临界转差率 s_c 将成反比地增大。不同频率的人为特性见图 1.12 所示。

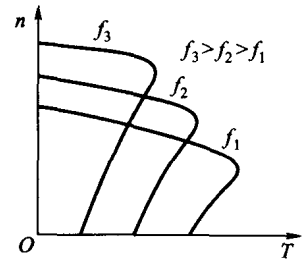


图 1.12 改变频率 f_1 的人为特性

(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速异步电动机。变极多速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 1.13 所示。

图 1.14 所示为双速异步电动机的 YY/ Δ 接法。图中 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 b 所示,电动机为高速运转。为保证电动机旋转方向不变,从一种接法变为另一种接法时,应改变电源的相序。

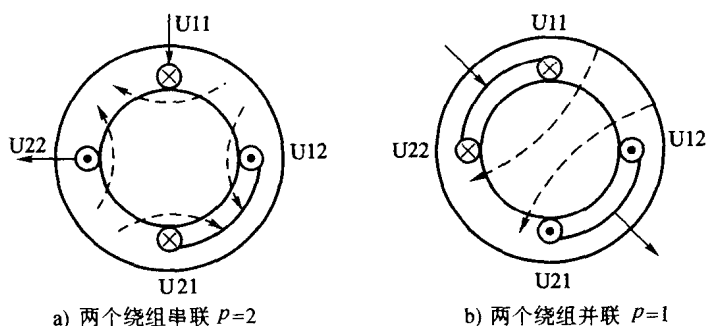


图 1.13 定子绕组极对数的改变

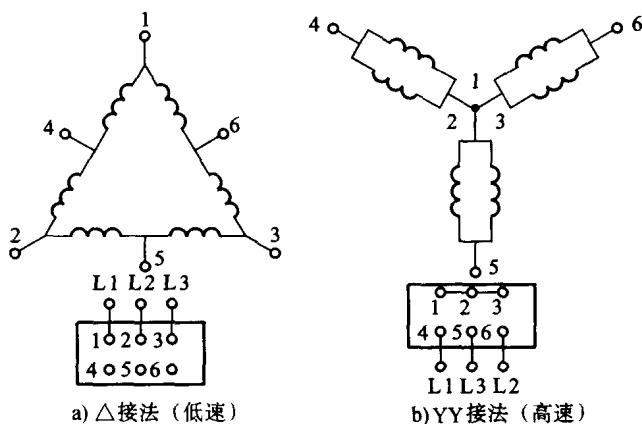


图 1.14 双速异步电动机的 YY/Δ 接法

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(1.12)、(1.13)和(1.14)中, 可得到如下关系式。

$$s_{cYY} = s_{c\Delta}; \quad T_{maxYY} = \frac{1}{6} T_{max\Delta}; \quad T_{stYY} = \frac{1}{6} T_{st\Delta}$$

即电动机的临界转差率不变, 而 YY 接法时的最大转矩和起动转矩均为 Δ 接法时的 1/6, 其机械特性的变化如图 1.15 所示。

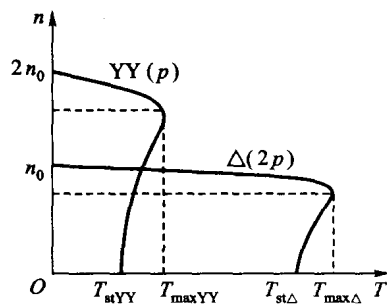


图 1.15 YY/Δ 变换的人为特性

1.1.3 异步电动机的起动和制动

1. 异步电动机的起动

电动机从静止状态一直加速到稳定转速的过程叫起动。最简单的起动方法是直接将异步电动机直接接到具有额定电压的电网上使它转动起来, 但这时起动电流很大; 因为这时转差率 $s = 1$, 转子电动势和转子电流很大, 对应的定子电流也必然很大。因而起动的关键在于限制起动电流。

下面分别介绍笼型和绕线型异步电动机的起动方法。

笼型异步电动机有直接起动和降压起动两种起动方法。绕线型异步电动机有转子串电阻分级起动方法。

(1) 直接起动

直接起动就是直接加额定电压起动,也叫全压起动。这是一种简便的起动方法,不需要复杂的起动设备,但起动电流大,一般可达额定电流的4~7倍。所以只适用于小容量电动机的起动。

这里所指的“小容量”,不仅取决于电动机本身容量的大小,而且还与供电电源的容量有关。电源容量越大允许直接起动的电动机容量也就越大。电源允许的起动电流倍数可用下面的经验公式估算

$$\frac{I_{st}}{I_N} = \frac{3}{4} + \frac{\text{电源总容量}/(\text{kVA})}{4 \times \text{电动机容量}/(\text{kW})}$$

式中: I_{st} 为电源允许的起动电流; I_N 为电动机定子额定电流。

只有当电动机的起动电流倍数小于或等于电源允许的起动电流倍数时,才允许采用直接起动的方法。

(2) 降压起动

为了限制起动电流,可以在定子电路中串联电阻或电抗,用降低每相绕组上电压的方法来限制起动电流,这就是降压起动。下面分析其起动电流和起动转矩。

由异步电动机的工作原理可知,异步电动机定子电流近似等于转子电流的折算值,即

$$I_1 \approx \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{KsU_1}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}}$$

起动瞬时 $s = 1$, 此时的定子起动电流为

$$I_{st} = \frac{KU_1}{\sqrt{R_2^2 + X_{20}^2}} \quad (1.15)$$

设全压起动时的起动电流和起动转矩分别为 I_{st} 和 T_{st} 。串入 R_{st} 或 X_{st} 后,定子上所承受的电压减小为 U_1' , 对应的起动电流和起动转矩分别为 I_{st}' 和 T_{st}' 。设 a 为全压起动电流 I_{st} 与降压起动电流 I_{st}' 之比值,从式(1.15)可知,起动瞬间的电流与此时定子上所加的电压成正比,即

$$a = \frac{I_{st}}{I_{st}'} = \frac{U_1}{U_1'}; \quad I_{st}' = \frac{1}{a} I_{st}; \quad U_1' = \frac{1}{a} U_1 \quad (1.16)$$

又由式(1.14)可知,起动转矩与定子电压的平方成正比,即

$$\frac{T_{st}'}{T_{st}} = \frac{U_1'^2}{U_1^2} = a^2; \quad T_{st}' = \frac{1}{a^2} T_{st} \quad (1.17)$$

从上述可知,降压起动时,起动电流降低到全压起动时的 $1/a$, 起动转矩降低到全压起动时的 $1/a^2$ 。这表明,降压起动虽然可以减小起动电流,但同时使起动转矩减小的更多。因此串电阻或电抗起动只适用于轻载起动。

对于运行时其定子绕组是连接为三角形的异步电动机,可采用星形-三角形(Y- Δ)换接的降压起动方法。起动时可先接为星形,这样定子每相绕组电压减为额定电压的 $1/\sqrt{3}$, 从而实现了降压起动,等到转速接近额定值时再换成三角形联结。下面分析起动电流和起动转矩。

采用三角形接法直接起动时,每相绕组的相电压 $U_{\Delta} = U_N$, U_N 为电源线电压;相电流 $I_{\Delta} = I_{st}/\sqrt{3}$, I_{st} 为电源线电流。

采用星形接法降压起动时,每相绕组相电压 $U_Y = U_N/\sqrt{3}$,相电流 $I_Y = I_{st}$ 。
由于相电流正比于相电压,则有

$$\frac{I_Y}{I_{\Delta}} = \frac{U_Y}{U_{\Delta}} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

所以

$$\frac{I'_{st}}{I_{st}/\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}}; \quad \frac{I'_{st}}{I_{st}} = \frac{1}{3}$$

两种情况下起动转矩之比为

$$\frac{T'_{st}}{T_{st}} = \frac{U_Y^2}{U_{\Delta}^2} = \frac{(U_N/\sqrt{3})^2}{U_N^2} = \frac{1}{3} \quad (1.18)$$

由上两式可见,用 Y- Δ 降压起动时,起动电流和起动转矩都降为直接起动时的 1/3。所以也只适用于轻载起动。

(3) 绕线型电动机转子串电阻起动

绕线型电动机转子串电阻分级起动,既可增大起动转矩,又可限制起动电流。可实现大容量电动机重载起动。

图 1.16 所示为绕线型三相异步电动机转子串对称电阻分级起动的接线图以及相应的机械特性。

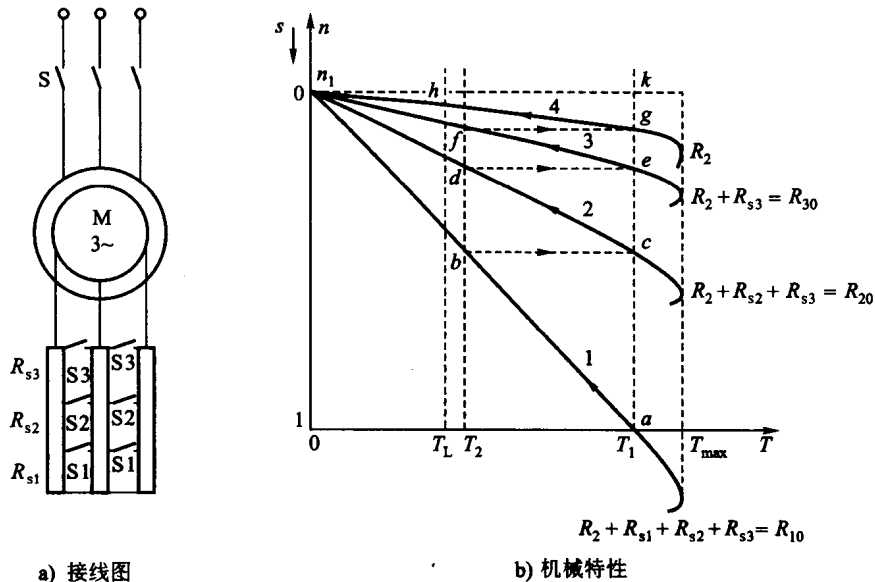


图 1.16 三相绕线型异步电动机转子串电阻分级启动

由前所述人为特性可知,转子串电阻可提高电动机起动转矩,绕线型异步电动机正是利用了这一点。当起动时,在转子电路中接入起动电阻 R_s 以提高起动转矩,同时也限制了起动电流。