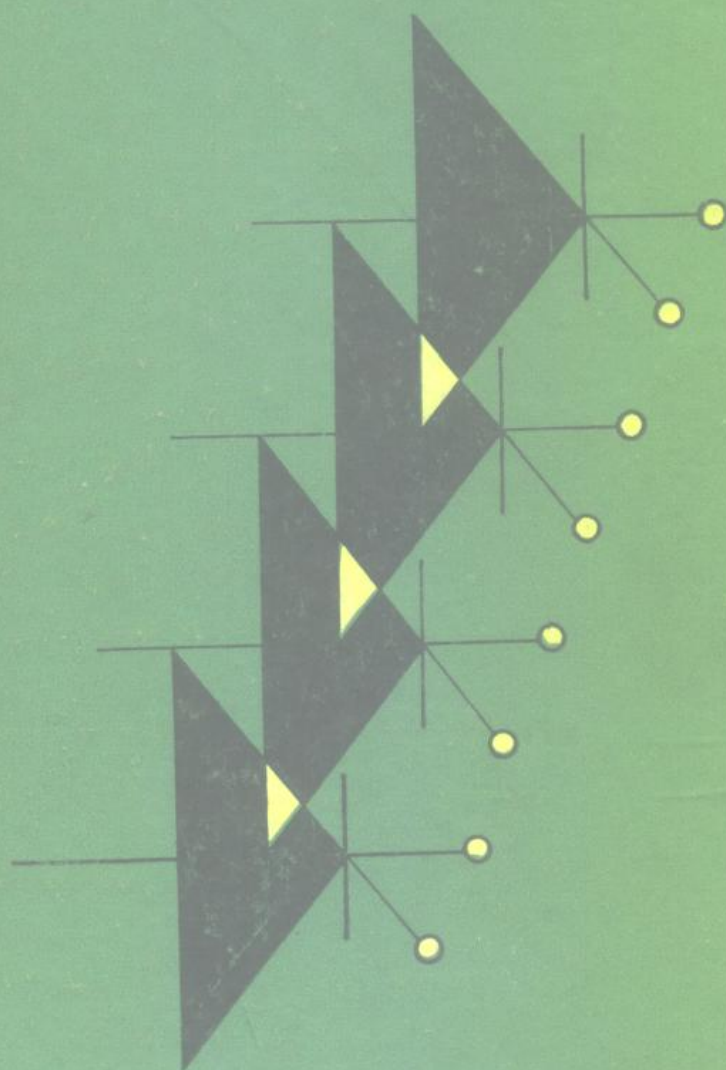


可控硅 串级调速的 原理及应用

魏泽国 主编



冶金工业出版社

可控硅串级调速的原理及应用

魏 泽 国 主编

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书较系统、全面地阐述了异步电动机低同步可控硅串级调速系统的工作原理和应用。全书共分两篇十三章，此外还有一个附录。第一篇为可控硅串级调速的理论篇，介绍了可控硅串级调速系统的工作原理、稳态分析、动力制动的机械特性曲线、能量指标、动态分析和动态校正的理论基础，系统的设计、调试、运行和改进，以及其它串调方式等；第二篇为可控硅串级调速的应用篇，介绍可控硅串级调速在泵类设备、热连轧机、穿孔轧机、矿井提升机以及钢丝绳牵引胶带运输机上的应用。

本书可供从事交流电气传动自动控制系统设计、科研、生产等方面工作的工程技术人员和大专院校师生参考。

主 编 魏泽国
审 校 魏泽国 陈德俭
编 写 魏泽国 汪荣海 李家驹 苗永兴 靳玉栋
董清三 陈德俭 朱世照 李利森 郝玉贤
责任编辑 阎光顺

0707/06

可控硅串级调速的原理及应用

魏 泽 国 主 编

冶金工业出版社出版

(北京北河沿铁街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张22 1/2插页1 字数 537千字

1985年 8 月第一版 1985年 8 月第一次印刷

印数00,001~4,910册

统一书号: 15062·4242 定价6.10元

0-1101113

前 言

电气传动是现代最主要的机电能量变换形式之一。电气传动技术广泛地应用于工农业、交通运输等国民经济的许多领域，并随着控制技术和控制理论的不断进展而非常迅速地发展着。

在电气传动技术进展的过程中，出现了交流和直流两种传动方式。早在十九世纪三十年代就出现了以蓄电池为能源的直流传动技术；后来进而又发展成为直流发电机供电形式。直到十九世纪八十年代，直流传动一直是唯一的电气传动方式。十九世纪末期出现了交流电，特别是出现了三相交流电源，并解决了输变电问题，制造出结构简单、牢固、造价低廉的异步电动机，这时才出现了交流传动，并在工业方面得到了广泛应用，从而开辟了电气传动的新时代。此后，交、直流传动便互为补充，相辅相成，有力地促进了技术与经济的发展。

虽然交流电动机结构简单、可靠、造价低廉，但调速性能不好，所以一般多用在不需调速的场合；而在要求调速的场合，则通常采用直流电动机。在调速领域中，直流电动机一直占据着统治地位。但是，直流电动机存在着“换向”这一理论和技术方面的实际困难，而且制造和维护也比交流电动机复杂，特别是随着科学技术的发展，直流电动机的单机容量、电压等级、转速和体积，往往不能满足实际需要，这些都是直流传动的薄弱环节。

为了克服上述缺点，很多国家一直在致力于发展交流传动技术。早在本世纪三十年代，国外就提出了无换向器调速的各种理论和方案；与此同时，出现了交流电机串级调速；四十年代曾使用过以单阳极金属汞整流器作为控制元件的串级调速装置。世界上第一台大容量的串级调速装置，是拖动轧钢机的880千瓦串级调速系统。五十年代出现了采用闸流管式三相逆变器供电的交流传动系统。但是，由于设备复杂、庞大以及控制性能欠佳等原因，直到五十年代末可控硅问世以前，交流传动系统一直没有得到推广应用，其中有的系统甚至没有走出实验室。六十年代以来，随着半导体电子技术的迅速发展，半导体变流技术的应用领域日益扩大，交流传动技术亦随之飞速发展，逐步进入到完全可以实用的阶段，国外已有了各种系列的产品。

目前，交流调速的方案很多。根据不同观点，对这些方案有不同的分类方法，通常可以分为采用无整流子电动机、变频调速电动机和转子转差功率调速电动机这三种调速方案。本书所讨论的异步电动机可控硅串级调速系统，属于转子转差功率调速方案，在我国交流调速技术的发展过程中，它是发展较快，应用较广，结构简单，难度较小的一种系统。其性能与可控硅供电的直流系统（SCR-D）相似，易于实现连续、平滑调速；对于调速精度要求较高的场合，还可以采用闭环系统；在设备投资方面，它和SCR-D系统大体相当，调速范围越小，比SCR-D系统越便宜；与采用在异步电动机转子附加电阻进行调速相比，它不但改善了调速性能，而且还可以回收大量转差功率，从而提高调速的经济效益。因此，串级调速技术得到了较为广泛的应用，如日本、西德、苏联等国，不但将之广泛地用于水泵、风机等泵类设备上（单机容量已超过一万千瓦），而且在冶金、橡胶、煤炭、造纸、纺织等工业部门也采用了这种技术。

自七十年代以来,在我国串级调速技术陆续在钢铁、化工、煤炭、纺织以及给排水等许多企业中应用。目前,采用这种技术的国产电动机的最大单机容量为1900千瓦(用于穿孔机)。我国的具体情况是:交流调速占的比例很大,一些部门一直采用异步电动机转子附加电阻进行调速,消耗了大量的转差能量,这对于能源来说是一种很大的浪费。世界普遍都极为重视能源问题,要求节能的呼声很高,在我国四化建设过程中,节约能源也是一项十分重要的工作。可控硅串级调速技术除可用于新装备设计外,还可以用于对旧设备进行技术改造,这样,不仅能改善调速性能,又可以节约能源,因此,在我国适当推广应用可控硅串级调速技术具有很大的技术和经济意义。

目前,有关可控硅串级调速的资料不多,内容也不全,又比较分散;更缺乏对工作原理、基本性能、设计计算和实际应用等进行系统分析和论述的书籍。为了试图弥补这方面的不足,作者承担了编写本书的任务。在编写过程中,作者力图尽可能联系我国实际,从工程观点出发,结合近年来有关串调理论、实验及实践方面的研究和应用成果,着重进行性能分析和论述工程实践,并对若干问题进行探讨。

本书共包括两篇十三章,另外还有一个附录。第一至第八章为第一篇(即串级调速理论篇),主要内容是:论述原理,对性能进行理论分析以及介绍工程设计与系统调试的一般方法;第九章至第十三章为第二篇(即串级调速应用篇),主要内容是:介绍我国应用串级调速技术的实例。在这些具有代表性的实例中,既有开环系统,又有闭环系统;既有平稳的泵类负荷,又有冲击性的轧机、提升机类负荷;既有单机传动,又有双机传动;在线路方面,既有宽脉冲触发线路,又有双窄脉冲触发线路;既有一个逆变变压器组成的系统,又有两个逆变变压器组成的系统。应用篇中每一章的选材,既包括有关基本知识,又有各自特点的分析;而各系统(装置)的调试及故障处理等,则是根据本系统(装置)的应用实践编写的,有一定的局限性,并不全面。但是,认真、仔细阅读整个应用篇,还是会使读者对串级调速技术的应用有比较全面的了解的。此外,由于篇幅所限,为避免不必要的重复等原因,每个实例的细节内容和控制系统图,一般均未列入本书。若需要详细了解这些内容,可参阅有关资料。

本书第一篇的第一、二、四、七章由魏泽国、汪荣海编写(其中,第七章第一节中的单桥和双桥并联的纵续控制由苗永兴编写);第三、五、六、八章及附录由魏泽国编写;第二篇的第九章由李家驹、苗永兴编写;第十章由靳玉栋、董清三编写;第十一章由陈德俭、朱世照编写;第十二章由李利森编写;第十三章由郝玉贤编写。

魏泽国对全书进行了修改、增删、订正;陈德俭对全书进行了审校;郝玉贤对本书部分章节的编写提出了有益意见,并对书稿的整理作了很多工作。

胡镇萍等同志参与了全部书稿的整理工作,付出了辛勤劳动。

由于作者水平有限、经验不足,对书中某些问题的阐述可能欠妥,书中难免有不当甚至谬误之处,敬请读者批评指正。

作者希望与从事可控硅串级调速工作的同志们一起,开展学术交流活动,互相学习,取长补短,共同提高技术、学术水平,同时努力提高经济效益,为祖国的四化事业作出更大贡献。

魏泽国

1982年2月

目 录

第一篇 异步电动机可控硅串级调速系统的理论分析

第一章 可控硅串级调速系统的工作原理	I
第一节 异步电动机的工作原理及基本特性	1
第二节 转子回路引入附加电势的异步电动机特性	9
第三节 异步电动机的串级调速及其分类	15
第四节 三相桥式整流器的工作原理	18
第五节 三相桥式有源逆变器的工作原理	33
第六节 可控硅串级调速系统的工作原理及直流电动机性质	46
第二章 可控硅串级调速系统的稳态分析	50
第一节 直流回路的电压和电流	50
第二节 转子整流器的换流重叠角	51
第三节 转子电流谐波的分析	53
第四节 定子回路的电势和电流	60
第五节 逆变变压器电流谐波的分析	61
第六节 系统的机械特性	62
第七节 电抗器 L_d 的电感值为非无穷大对系统机械特性和性能的影响	73
第八节 串级调速电动机运行万能机械特性曲线及其应用	83
第九节 闭环控制系统的静特性	90
第三章 可控硅串级调速动力制动的机械特性	95
第一节 异步电动机在动力制动状态下的主要特点和在转子电阻动力制动状态下的基本关系	96
第二节 串级调速动力制动的机械特性	100
第三节 串级调速动力制动的万能机械特性曲线	112
第四节 串级调速动力制动万能机械特性曲线的应用与实验研究	119
第四章 可控硅串级调速系统的能量指标	123
第一节 系统的能量流图	123
第二节 系统的总效率	125
第三节 系统的总功率因数	127
第四节 改善系统功率因数的方法（电容器法）	132
第五节 系统中高次谐波电流的抑制方法	133
第五章 可控硅串级调速系统动态校正的理论基础	138
第一节 开环系统的微分方程及其求解	138
第二节 具有转速负反馈的单闭环系统的微分方程及其分析	143
第三节 采用线性集成运算放大器的单闭环系统	145
第四节 双闭环控制系统	155
第五节 系统动态校正的理论基础	159
第六节 双闭环控制系统的动态校正方法及其分析	181
第六章 可控硅串级调速系统的设计	190

第一节	串级调速的异步电动机容量的计算、选择与校验	190
第二节	有源逆变器的计算与元件选择	197
第三节	转子整流器的计算与元件选择	201
第四节	可控硅元件和系统的保护	202
第五节	直流回路电抗器的计算	205
第六节	起动方式的选择	206
第七节	双闭环自动控制系统的设计	208
第八节	动力制动设备的参数计算与选择	214
第九节	动力制动的最佳运行方式及其控制方案	215
第七章	可控硅串级调速系统的改进和其它串级调速方式	227
第一节	纵续控制和叉相控制	227
第二节	双绕组电动机和双电动机的串级调速	238
第三节	分接头式串级调速	240
第四节	无刷串级调速	242
第五节	机械串级调速和电气-机械串级调速	243
第六节	超同步串级调速	244
第七节	串级调速系统的发展	253
第八章	可控硅串级调速系统的调试及运行	254
第一节	概述	254
第二节	调试前的准备工作	254
第三节	电气控制系统的调试	256
第四节	系统的开环调试	257
第五节	系统的闭环调试	258
第六节	系统的运行	260

第二篇 异步电动机可控硅串级调速系统的应用

第九章	可控硅串级调速系统在泵类设备上的应用	262
第一节	概述	262
第二节	可控硅串级调速系统在泥沙泵上的应用	265
第三节	可控硅串级调速系统在通风机上的应用	274
第十章	可控硅串级调速系统在热连轧机上的应用	277
第一节	热连轧机生产的工艺过程及其对电力拖动系统的要求	277
第二节	主回路主要设备和元件的计算与选择	280
第三节	闭环系统动态参数的计算与选择	281
第四节	系统的原理图及其说明	287
第五节	可控硅串级调速装置的调试、维护及运行	287
第六节	系统运行的情况与经济效果	290
第十一章	可控硅串级调速系统在穿孔轧机上的应用	292
第一节	穿孔轧机及其对电力拖动系统的要求	292
第二节	系统方案的确定及串联逆变器脉冲移相的组合方式	294
第三节	控制系统简介	299
第四节	系统的主要元件和动态参数的计算与选择	304

第五节	系统的运行情况和抗干扰措施	313
第十二章	可控硅串级调速系统在矿井提升机上的应用	315
第一节	矿井提升机的工作过程及其对电力拖动的要求	315
第二节	原始参数、力矩图及电流图的计算	316
第三节	电动机的校验及主要元、部件参数的选择	318
第四节	动力制动参数的计算	321
第五节	控制系统的说明及运行	323
第十三章	可控硅串级调速系统在钢丝绳牵引胶带运输机上的应用	329
第一节	钢丝绳牵引胶带运输机的工作原理与基本结构	329
第二节	钢丝绳牵引胶带运输机对电力拖动的要求及拖动方案的确定	331
第三节	钢丝绳牵引胶带运输机用可控硅串级调速系统的主要环节	335
第四节	钢丝绳牵引胶带运输机的张力平衡与串级调速装置的调节系统	342
附录	根据铭牌数据计算异步电动机的参数	348
参考文献		351

第一篇 异步电动机可控硅串级调速系统的理论分析

第一章 可控硅串级调速系统的工作原理

三相异步电动机是一种将交流电能转换为机械能的电气设备，由于它具有结构简单、运行可靠、价格便宜、维修方便等一系列优点，所以在国民经济各部门得到广泛应用。

从结构上看，三相异步电动机有鼠笼式和绕线式两种类型，鼠笼式电机的调速一般只能用改变电源频率、定子电压或定子极对数的方法来实现；绕线式电机也可以用上述方法调速，但最常用的调速方法是改变转差率。

三相绕线式异步电动机通过改变转差率调速时，需要另外附加一些电气装置，其中最常用的是转子附加电阻。由于这种方法所用的附加装置最简单、投资最少、维护也容易，所以其应用十分广泛。但是，采用此法调速是有级的，同时还把转差功率都消耗在转子的附加电阻上，因此调速的性能和经济性都很差。

三相绕线式异步电动机还有另一种通过改变转差率进行调速的方法，即通过向转子回路引入附加电势来实现调速。这时，改变附加电势的大小就可以改变电动机的转速，这就是所谓“异步电动机串级调速”。

根据引入转子之附加电势的产生方法的不同，串级调速可分为两类，即：电机型串级调速和电气型串级调速。电气串级调速的串级方式又可分两种，即：低同步串级和超同步串级。本书主要介绍低同步电气串级调速系统的工作原理、性能及应用等内容。

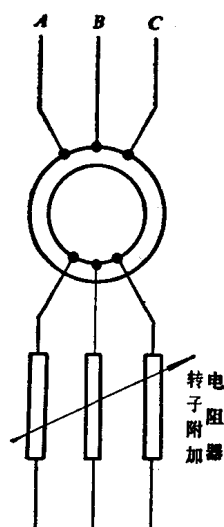


图 1-1 绕线型异步电动机
转子附加电阻器调速原理图

为了较全面地阐述低同步电气串级调速系统的工作原理、性能和应用，本章先回顾一下绕线型异步电动机（以下简称异步电动机）的工作原理及基本特性；然后分别介绍三相桥式电路在整流、逆变时的工作状态；最后再分析异步电动机低同步可控硅串级调速（以下简称可控硅串级调速或串级调速）的工作原理及性能。

第一节 异步电动机的工作原理及基本特性^[1]

一、工作原理

众所周知，异步绕线式电动机主要是由定子、转子和电刷滑环等组成的，在定子和转子圆周上分别布有三相绕组。在正常工作时，定子绕组通过供电设备与电网相联；而转子绕组则通过滑环、电刷短接，或者与控制装置相接，其中最常见的控制装置是转子附加电阻器，其工作原理如图1-1所示。

当定子绕组接入频率为 f_1 的三相交流正弦对称电压时，在定、转子之间的气隙中便产

生一个旋转磁场。此磁场的转速为 n_0 ，可用公式表示如下

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \text{ (转/分)} \quad (1-1)$$

式中 p ——定子绕组的极对数。

这个旋转速度为 n_0 的旋转磁场将同时切割定子绕组和转子绕组，并于两绕组内分别产生感应电势。当转子静止不转时，在定子和转子的每相绕组中感应电势的有效值分别为

$$E_1 = 4.44k_1W_1f_1\phi_m \text{ (伏)} \quad (1-2)$$

$$E_{2D} = 4.44k_2W_2f_2\phi_m = 4.44k_2W_2f_1\phi_m \text{ (伏)} \quad (1-3)$$

式中 ϕ_m ——交链定子和转子的磁通最大值；

k_1, k_2 ——定子、转子的绕组系数；

W_1, W_2 ——定子、转子每相绕组的匝数；

f_1, f_2 ——定子电压、转子电压的频率（ f_1 为电网频率；当电机转子静止时， $f_2 = f_1$ ）。

当转子以转速 n 旋转时，旋转磁场与转子的转速差为 $(n_0 - n)$ ，转速差的相对值称为转差率，并用 S 表示，即

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

转差率 S 是反映异步电动机运行特性的一个重要参量。由式1-4可知，当 $n = 0$ 时， $S = 1$ ；当 $n = n_0$ 时， $S = 0$ 。当 $S = 0$ 时，转子绕组与旋转磁场相互之间已没有相对运动，此时转子绕组中的感应电势 E_{2D} 和电流 I_2 也将都为零。这种状态下电机不产生转矩，转速自然会慢下来。因此，在正常电动运行时，一般都 $n < n_0$ ，转差率 S 在 $0 \sim 1$ 之间变化。所以上述这种电机称为异步电动机。

由于转子旋转后转子和旋转磁场的相对转速变为 $(n_0 - n)$ ，所以转子中感应电势的频率 f_2 变为

$$f_2 = \frac{(n_0 - n)p}{60} = \frac{(n_0 - n)p n_0}{60 n_0} = \frac{(n_0 - n)f_1}{n_0} = S f_1 \quad (1-5)$$

与此对应的转子每相绕组之电势为

$$\begin{aligned} E_{2S} &= 4.44k_2W_2f_2\phi_m = 4.44k_2W_2Sf_1\phi_m \\ &= S E_{2D} \end{aligned} \quad (1-6)$$

即当转子旋转后，转子电势及其频率的大小都与转差率成正比。

转子电流可根据下式计算

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2S}}{R_{2\sigma} + jSX_2} = \frac{S\dot{E}_{2D}}{R_{2\sigma} + jSX_2} \quad (1-7)$$

式中 $R_{2\sigma}$ ——转子每相总电阻（ $R_{2\sigma} = R_2 + R_\sigma$ ）；

R_2 ——转子每相的电阻；

R_σ ——转子每相的附加电阻；

X_2 ——转子每相的漏抗。

式1-7也是转子绕组的电压平衡方程式；同样也可写出定子绕组的电压平衡方程式，即

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \dot{Z}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (R_1 + jX_1) \quad (1-8)$$

式中 U_1 ——定子每相电压；

I_1 ——定子每相电流；

R_1 ——定子每相电阻；

X_1 ——定子每相漏抗。

利用等值电路图来分析异步电动机的转矩、机械特性和其它有关运行特性，是很方便的，因为这样就可将对异步电动机的分析转化成为一个电路的分析。从电机学可知，异步电动机的等值电路如图1-2 a 所示；大、中容量的电动机也可以简化成图1-2 b 所示的电路。

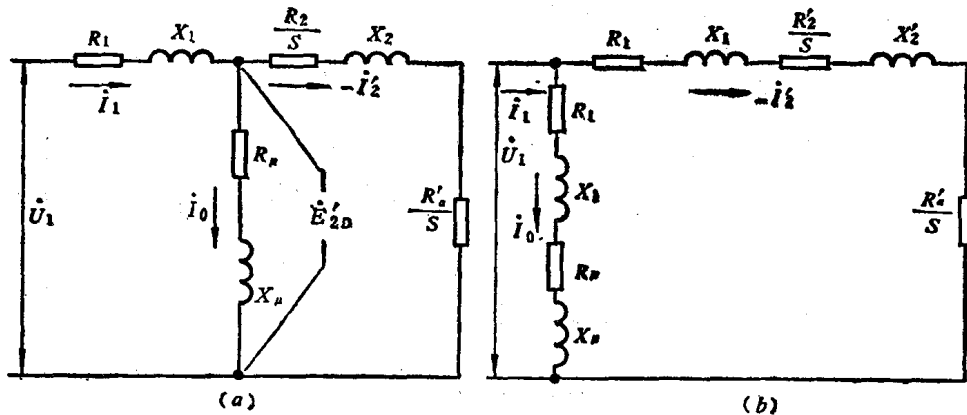


图 1-2 异步电动机的等值电路

a—异步机的等值电路； b—异步机的简化等值电路

根据图1-2可以求出转子电流为

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{E}'_{2D}}{\frac{R'_{2\sigma}}{S} + jX'_2}$$

或

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{U}_1}{\left(R_1 + \frac{R'_{2\sigma}}{S}\right) + j(X_1 + X'_2)} \quad (1-9)$$

转子电流的有效值为

$$\begin{aligned} I'_2 &= \frac{E'_{2D}}{\sqrt{\left(\frac{R'_{2\sigma}}{S}\right)^2 + X'^2_2}} \\ &= \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_{2\sigma}}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \end{aligned} \quad (1-10)$$

由式1-10可知，当其它参数一定时，转子电流 I'_2 是转差率 S 的函数，函数关系如图1-3所示。当 $S=0$ (同步转速) 时， $I'_2=0$ ；当 $S=1$ (转子静止) 时， I'_2 为启动电流 $I'_{2\sigma}$ ；当 $S>1$ 时， I'_2 将会更大。由此可知，对于大型电动机而言，若在额定电压下直接启动， $I'_{2\sigma}$ 将

会很大,可能超过其额定电流的许多倍,因此大型电动机是不允许直接启动的,必须使用启动设备。

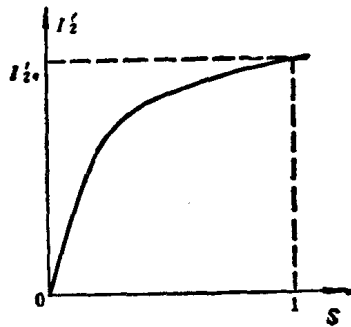


图 1-3 转子电流 I_2' 与转差率 s 的关系

另外,结合等值电路(图1-2)可得出异步电动机的基本方程式为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (R_1 + jX_1) \\ 0 &= -\dot{E}'_{2D} S + \dot{I}_2 Z'_2 = -\dot{E}'_{2D} S + \dot{I}'_2 (R'_{2D} + SX'_2) \\ \dot{E}'_{2D} &= \dot{E}_1 \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 &= \dot{I}_0 \\ -\dot{E}_1 &= \dot{I}_0 Z_\mu \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

式中 I_0 ——空载电流;

Z_μ ——激磁阻抗。

二、电磁转矩和机械特性

异步电动机的电磁转矩,可以根据从定子经过气隙传送到转子的电磁功率而求得;而电磁功率又可以由等值电路图求出,即

$$P_2 = 3I_2'^2 \frac{R'_{2a}}{S} = \frac{3U_1^2 \frac{R'_{2a}}{S}}{\left(R_1 + \frac{R'_{2a}}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \quad (\text{瓦}) \quad (1-12)$$

电磁转矩为

$$M = \frac{P_2}{\omega_0} = \frac{3pU_1^2 \frac{R'_{2a}}{S}}{2\pi f_1 \left[\left(R_1 + \frac{R'_{2a}}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]} \quad (\text{牛顿} \cdot \text{米}) \quad (1-13)$$

式中的 ω_0 称为同步角速度,其值为

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} \quad (\text{弧度/秒}) \quad (1-14)$$

式1-13的单位为牛顿·米,此单位如用9.81除之,则得公斤·米。由式1-13可以看出,如果电动机的参数都是常数,则电磁转矩 M 只是转差率 S 的函数。 M 与 S 的函数关系 $M =$

$f(S)$ ，称为异步电动机的机械特性。可按公式1-13作出如图1-4a所示的 $M=f(S)$ 曲线。当电动机运行在电动状态时， $1 > S > 0$ ；当电机运行在发电状态时， $S < 0$ ；当电机运行在反接制动状态时， $S > 1$ 。如果把电动状态下的 $M=f(S)$ 曲线变成习惯的表示形式，即 $n=f(M)$ ，则将如图1-4b所示。

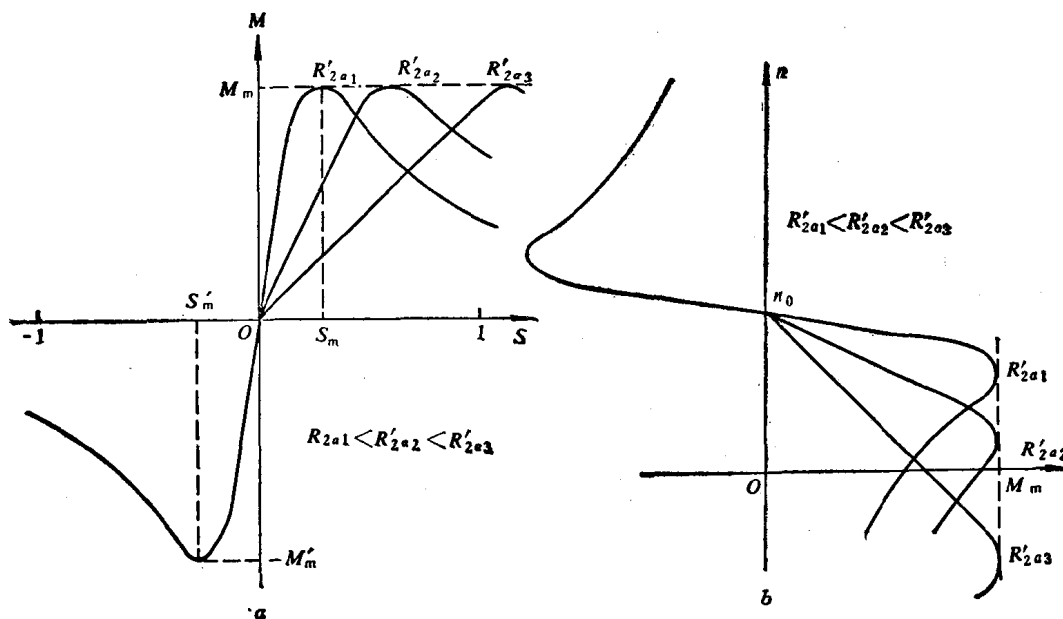


图 1-4 异步电动机的机械特性曲线
a— $M=f(S)$ 曲线，b— $n=f(M)$ 曲线

由图1-4可知，当转差率为某一数值时，电动机的转矩为其最大值 M_m ，此时的转差率称为临界转差率，用 S_m 表示。 S_m 与 M_m 的值，可以通过将式1-13对 S 求导，并令 $\frac{dM}{dS} = 0$ 来求得，即

$$S_m = \pm \frac{R'_{2a}}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad (1-15)$$

$$M_m = \pm \frac{1}{2} \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1 [\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}]} \text{ (牛顿·米)} \quad (1-16)$$

式中，正号用于电动运行状态；负号用于发电运行状态。由于 R_1 的存在，使运行于发电状态的最大电磁转矩 M'_m 略大于运行于电动状态的最大电磁转矩 M_m ，参见图 1-4a。

由式1-15与式1-16可以看出，最大转矩与转子回路的电阻 R'_{2a} 无关，而 S_m 却和 R'_{2a} 成正比。因此，当在转子回路中串入附加电阻 R'_a 且 R'_a 在变化时，机械特性也将随之相应变化，但最大转矩 M_m 不变，只是最大转矩点将随转子附加电阻的增大而向转速低的方向变化，反之亦然。这就是用转子附加电阻可以实现调速的原理，参见图1-4b。

实际上，大型电机的 R_1 是比较小的，在工程计算中常可以忽略不计。当忽略 R_1 后，式1-15和式1-16分别变为

$$S_m = \pm \frac{R'_{2a}}{X_1 + X'_2} \quad (1-17)$$

$$M_m = \pm \frac{1}{2} \frac{3pU_1^2}{2\pi f_1(X_1 + X_2')} (\text{牛顿} \cdot \text{米}) \quad (1-18)$$

从图1-4a可知,异步电动机的电磁转矩 M ,在 $S_m > S > 0$ 的范围内,将随着 S 的增大而增大;而在 $S > S_m$ 时,则将随着 S 的增大而减小。但是,由图1-3可以看出,电流 I_2' 将一直随着转差率 S 的增大而增大,也就是说,当 S 较大、转速较低时,电动机的转子电流很大而转矩却较小。产生这一现象的原因是,在起动瞬间或起动的初期转子的功率因数恶化,从而使无功电流增大。

上述分析表明,大型异步电动机的启动电流很大,但启动转矩却较小,所以不能直接启动。

在工程计算中,通常都希望只利用电机手册或产品目录中所给出的数据,就能计算与绘制机械特性。为此,忽略式1-13中的 R_1 ,并结合式1-17和式1-18,就可以得到下式

$$M = \frac{2M_m}{\frac{S}{S_m} + \frac{S_m}{S}} \quad (1-19)$$

这个公式非常简明、实用,故称为机械特性的实用公式。

最大转矩 M_m 与额定转矩 M_e 之比,称为过载倍数,用 K_M 表示,即

$$K_M = \frac{M_m}{M_e} \quad (1-20)$$

对于一般异步电动机, K_M 约为1.8~2.5,而起重型异步电动机的 K_M 则可达3.3左右。

三、调速和运行方式

在工矿企业中,由于生产工艺的要求,或者为了增加产品的产量和提高质量,常需要对电机的转速进行调节。电动机在工作过程中,在额定转矩下要求达到的最高转速与最低转速之比,称为调速范围,常用 D 表示,即

$$D = \frac{n_{\max \cdot e}}{n_{\min \cdot e}} \quad (1-21)$$

由于异步电动机的转速为

$$n = n_0(1 - S) = \frac{60f_1}{p}(1 - S) \quad (1-22)$$

因此,异步机的调速可以有变频调速、变转差率调速和变极对数调速三种基本方式。

(1) 变频调速。这种方式就是通过平滑地改变定子的供电频率 f_1 来实现对异步机转速的平滑调节。当 f_1 变化时,为了防止电机磁路饱和以及使电机保持同样的过载能力,要求 U_1/f_1 的值为定值,故电压 U_1 也应随 f_1 而相应变化。频率不同时的异步机机械特性,如图1-5所示。

变频调速可以得到良好的静特性和动特性,但是由于调速装置比较复杂、造价高,所以目前国内应用还不广泛。

(2) 变极对数调速。这种方式就是通过改变定子绕组的极对数来实现调速。由于极对数的改变只能是有级的,所以这种调速方法是有级、不平滑的。极对数不同时的电动机机械特性,如图1-6所示。

(3) 变转差率调速。变转差率 S 调速是一种广泛使用的调速方法。改变 S 的办法很

多，如改变定子的电阻和电抗；改变转子的电阻和电抗；在转子回路附加电势等等。改变定子电阻、电抗和转子电阻、电抗时的电动机机械特性如图1-7所示。

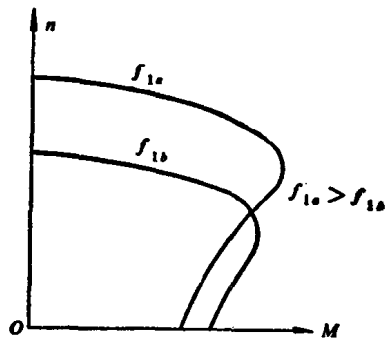


图 1-5 变频调速时的机械特性曲线

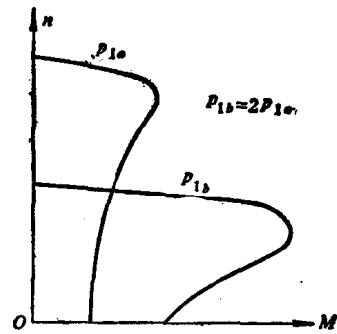


图 1-6 变极对数调速时的机械特性曲线

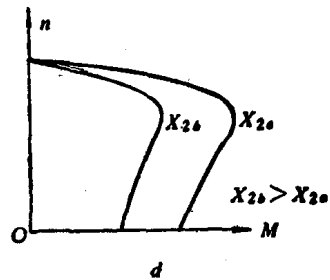
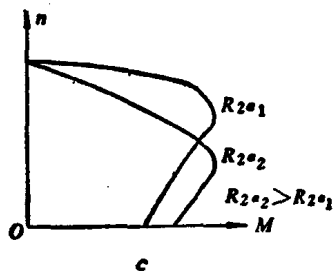
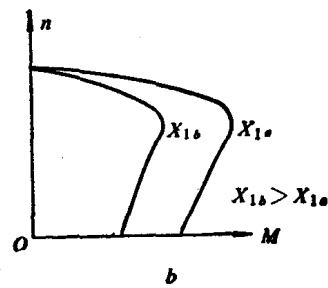
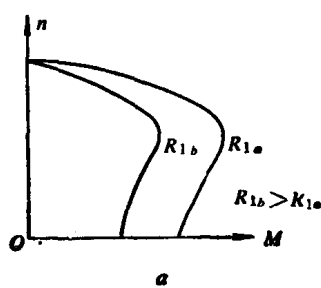


图 1-7 变转差率调速时的机械特性曲线

a—改变定子电阻；b—改变定子电抗；c—改变转子电阻；d—改变转子电抗

以上调速方案，各有优缺点，但在技术经济上都不是理想的。例如，改变转差率调速，是利用改变电机参数来实现调速的。由于利用改变定子或转子参数来实现调速的方法，都属于通过改变机械特性曲线斜率来调速，所以采用这种方法时调速范围不可能很大。因为电动机在低速时特性很软，致使负载的不大变化便可引起转速的很大波动，从而使转速不稳。变频调速和改变极对数调速，都属于通过改变同步转速来实现调速。由于采用这种调速方法时，电动机的机械特性曲线基本上是互相平行的，从而克服了低速时特性太软的缺点。但是，改变极对数调速是有级的调速，且适用此法调速的电动机体积较大。而变频调速，则需要一些特殊的变频设备，且投资也较高。

除去上述调速方案外，还可以利用改变定子电压以及在转子回路中引入附加电势等方

法进行调速。通过向转子回路中引入附加电势来进行调速的方法，称为串级调速。这种调速方法有很多优点，它克服了上述方案中的一些缺点，特别是本书所讨论的，通过向转子回路引入附加电势来进行调速的异步电动机低同步转速可控硅串级调速，是技术难度较小、性能又比较完善的一种调速方法。在下边的各章中，将分步讨论这种方法。

在讨论之前，我们先简要地讨论一下异步电动机的运行状态。异步电动机不但可以运行在电动状态，而且也可以运行在制动状态。

异步电动机在运转过程中，其电磁转矩和转速方向一致时，电动机处在电动运行状态(或方式)；如果两者方向相反，则电动机处于制动运行状态(或方式)。制动运行状态又分发电制动状态、反接制动状态和动力制动状态。电动机在电动和各种制动状态下运行时，其机械特性曲线如图1-8所示。

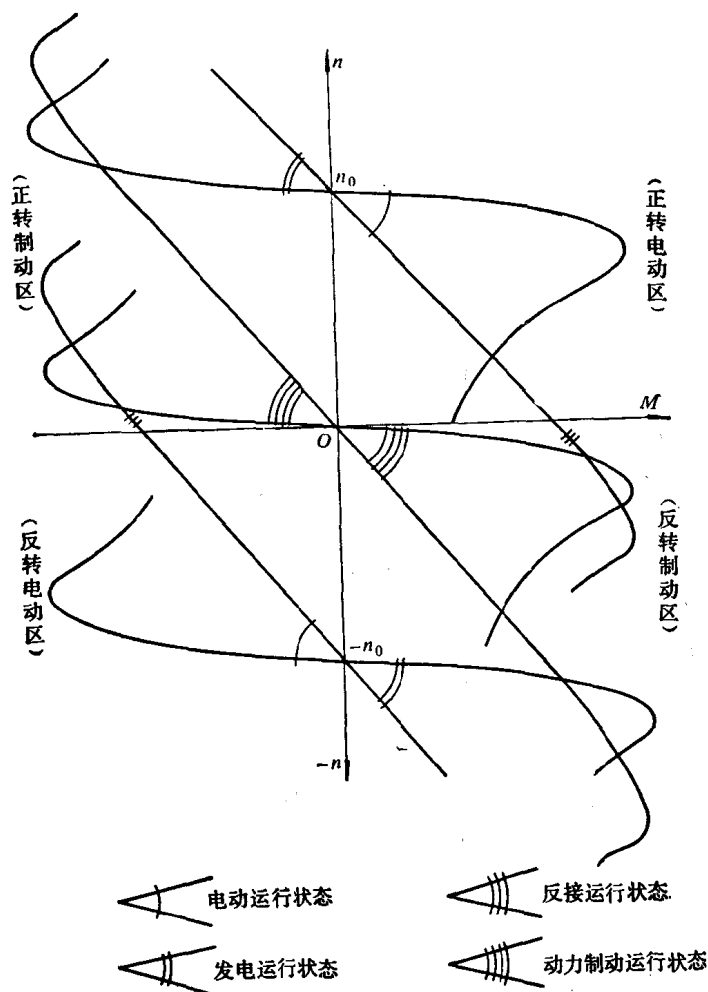


图 1-8 不同运行状态下的异步电动机机械特性

发电制动状态，是指转子被外力拖动，其转速超过同步转速 n_0 的运行状态。为了使一定制动转矩下的转速不致过高，此时转子回路不应附加电阻。

反接制动可利用两种方法实现，一是在电动运行期间，突然改变定子电源的相序，通常称这种方法为“电源反接制动”；另一种方法是在电动运行期间增加机械负载，使电机反转，这种方法称为“倒拉反接制动”。特别需要指出，在反接制动时，转子回路的感应

电流很大, 所以为了限制转子电流, 必须在转子回路中串入较大的附加电阻。

进行动力制动时, 将定子的三相交流电源断开, 并通入直流激磁电流, 使转子处于在外力或惯性的作用下旋转的运行状态。此时, 异步机相当于一台隐极式同步发电机, 其定子相当于激磁绕组, 而转子则相当于发电机的电枢。

根据不同生产负荷的要求, 可能需要异步电动机运行在电动状态或某种制动状态。在异步机低同步可控硅串级调速系统中, 结合生产负荷的要求, 选用的比较多的运行状态是“电动”和“动力制动”。因此, 下面主要分析串级调速的“电动”和“动力制动”这两种运行状态(或方式)。

第二节 转子回路引入附加电势的异步电动机特性^[2]

转子回路引入附加电势是异步电动机串级调速的基础。异步机在运行时, 其转子感应电势的频率将随转速变化而变化, 这就要求引入转子回路的附加电势的频率也相应变化, 并始终与转子感应电势的频率相同。转子回路引入与感应电势同频率的附加电势的工作原理, 如图 1-9 a 所示。若附加电势也向转子输入能量, 电网向定子输入能量, 则这种调速方式称为“双馈调速”。

转子回路引入附加电势对异步机工作性能的影响, 将取决于附加电势的大小与相位。如果转子中感应电势为 $S E'_{2D}$, 转子回路引入的附加电势为 $E_f e^{j\varphi}$, 此电势与转子感应电势的频率相同, 但超前 φ 角, 则根据上一节所讨论的内容, 便可以得到异步电动机在引入转子附加电势时的等值电路, 如图 1-9 b 所示, 其等值矢量图, 如图 1-10 所示。

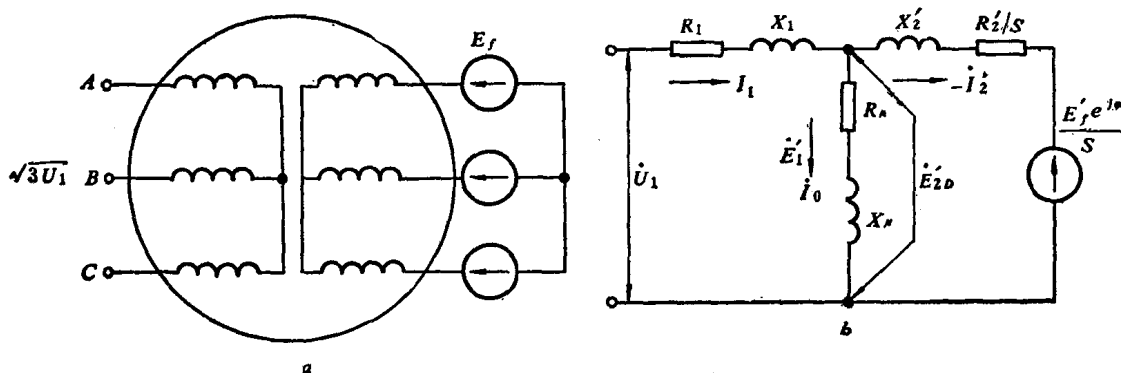


图 1-9 异步电动机转子回路引入附加电势的工作原理图和等值电路

a—异步电动机转子回路引入附加电势时的原理图; b—等值电路图

图 1-10 a 示出了转子附加电势为零时的情况, 即异步电动机在正常接线时的等值向量图。

图 1-10 b 示出了转子附加电势的相角 $\varphi < 90^\circ$ 时的情况。此时转子回路的合成电势为

$$\dot{E}'_{2\Sigma} = S \dot{E}'_{2D} + \dot{E}_f e^{j\varphi} \quad (1-23)$$

模 $E'_{2\Sigma}$ 大于转子原来的感应电势 E'_{2D} , 因此当 E_f 增大或 φ 角减小时, 转子电流 I_2 和转矩 M 都将相应增大, 转速也随之增高。

图 1-10 c 示出了转子附加电势的相角 $\varphi > 90^\circ$ 时的情况。此时转子回路合成电势 $E'_{2\Sigma}$ 小