

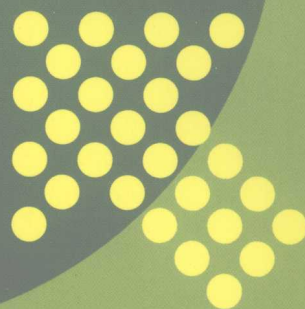
21世纪高等学校规划教材



DIANJI TIAOSU JI JIENENG JISHU

电机调速及节能技术

王玉彬 主 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

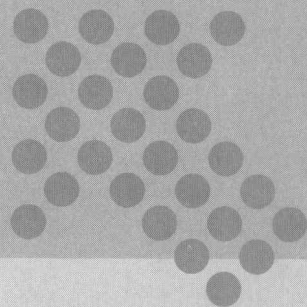
21世纪高等学校规划教材



DIANJI TIAOSU JI JIENENG JISHU

电机调速及节能技术

主 编 王玉彬
编 写 孙树敏
主 审 李贻斌 宋 锐



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

本书着重阐述了电机调速技术的理论与实践应用,并通过工程实例进行节能分析。全书共十章,主要内容包括现代交流电机调速理论、串级调速系统、串级调速系统的应用实例、变频器、变频调速系统基础理论、变频调速常用控制策略、高压交—交变频调速系统、功率单元串联式多电平电压源型变频调速系统、变频调速技术的应用实践与节能分析、高压变频调速技术在电力生产部门中的应用等。本书强调工学结合,突出以能力培养为主线,可最大限度地满足学生对应用性、工程性知识的需求。

本书可作为高等院校本科电气信息类专业和高职高专电力技术类相关专业课教材,也可作为相关专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机调速及节能技术/王玉彬主编. —北京:中国电力出版社, 2008

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8090 - 2

I. 电… II. 王… III. ①电机-调速-高等学校-教材②电机-节能-高等学校-教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 170447 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 12 月第一版 2008 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 9 印张 213 千字

定价 15.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

“电机调速及节能技术”是普通高等院校供用电技术、工业电气自动化、电气技术和机电一体化等专业学生必修的一门主干课程，它将电机学、电力拖动、电机调速及节能技术等有机结合起来，使学生具备高等工程技术应用型人才所必需电机调速与节能方面的基本知识和基本技能，为全面提高学生素质和学习新技术的能力方面打下了一定的基础。本书与生产实际联系紧密，反映了当前电机调速与节能领域的新知识、新技术、新工艺和新方法，具有很强的教学针对性。全书内容安排循序渐进，符合学生的认知和技能养成规律，有利于体现教师的主导性和学生的主体性。

本书主要讲述现代交流电机的调速理论及其在电力系统中应用，包括串级调速系统（尤其是内反馈调速系统）的基本原理，内反馈调速的应用实例和节能效果分析，变频调速系统的基本原理、常用的控制策略和控制方式，变频调速技术应用实例和节能效果分析等内容。

本书共分十章，第一、二、四、五章，第七～九章由山东电力高等专科学校王玉彬教授编写；第三章、第六章及第十章由山东电力研究院孙树敏高级工程师编写。全书由王玉彬主编，并进行全书的统稿工作。本书承山东大学李贻斌教授、宋锐副教授审稿并提出了许多宝贵的意见和建议；在本书的编写过程中，山东电力高等专科学校于洲春教授、曹志伟高级工程师对本书内容的编写提出了许多好的建议和意见，在此一并表示感谢！

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中难免有不当之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2008 年 9 月

目 录

前言

绪论	1
第一章 现代交流电机调速理论	3
第一节 调速电机的机械特性	3
第二节 三相异步电动机的调速技术分类及主要指标	6
第三节 大功率电动机的调速方式	9
第四节 各种交流调速方法的对比	11
第五节 电机调速技术的发展前景	13
第二章 串级调速系统	16
第一节 串级调速的基本原理和分类	16
第二节 内反馈交流调速三相异步电动机	19
第三节 高频斩波串级调速系统	19
第四节 串级调速系统的节能效益分析	24
第三章 串级调速系统的应用实例	27
第一节 高频斩波内馈调速系统在电厂中的应用	27
第二节 串级调速系统节能改造实例	29
第四章 变频器	33
第一节 变频器的额定数据及分类	33
第二节 变频器常用电力电子器件	34
第三节 变频器的控制电路	39
第四节 变频器的功能综述	43
第五节 几种中高压变频器典型线路介绍	50
第五章 变频调速系统	59
第一节 交流电动机调速的基本原理	59
第二节 变频调速拖动系统综述	62
第三节 变频调速系统的基本类型	68
第四节 变频调速系统的抗干扰问题	69
第五节 变频调速系统的节能问题综述	72
第六章 变频调速常用控制策略	78
第一节 U/f 控制和转差频率控制方式	78
第二节 矢量控制变频调速基本思想	83
第三节 直接转矩控制 (DTC)	87
第四节 直接速度控制 (DSC)	88

第七章 高压变频调速系统	90
第一节 高压交—交变频调速系统基本原理	90
第二节 高压变频调速系统的设计	93
第八章 功率单元串联式多电平电压源型高压变频调速系统.....	103
第一节 H 桥串联多电平高压变频调速系统的基本原理	103
第二节 H 桥串联多电平高压变频的相关技术	105
第三节 H 桥串联多电平高压变频调速系统的基本构成	110
第四节 其他派生的功率单元串联式多电平技术方案.....	112
第九章 变频调速技术的应用实践与节能分析	116
第一节 风机的变频调速与节能运行.....	116
第二节 桥式起重机的变频调速技术应用实践.....	121
第十章 变频调速技术在电力生产企业中的应用.....	127
附录.....	133
参考文献.....	136

绪 论

人类社会发展的历史进程中,能源永远是人类赖以生存的物质基础,科学技术的进步更是和能源的获取、变换、利用紧密联系在一起。由于电能的生产、变换高效,传输分配容易,使用控制方便,因而获得了最广泛的应用。能源的生产和利用更涉及机械与电两种形态能量之间的转换,电机(电动机、发电机)作为机电能量转换的设备所处位置关键,使得电机技术的发展直接关系到能源的有效变换和利用,能源的开发和节约。

伴随着全世界范围内的工业化和电气化,自20世纪80年代以来全世界范围内出现了能源危机,节约能源成为人们的普遍共识。我国也提出了以科学发展观为指导建设节约型社会的目标,目前,全国范围内各个行业都在进行节能减排、节能降耗设备的更新与改进。作为节约电能的重要手段,交流电机调速引起了人们的重视,尤其是拖动风机、水泵、压缩机的交流电机实施以调速来调节流量的运行方式改造后,产生了巨大的节能效果,更为有利地推动了交流调速技术本身的快速发展。交流电机的调速原理早在20世纪30年代就得到了深入的研究,但一直受实现技术或手段的限制而进展缓慢。早期传统的交流调速多采用电磁装置和水银整流器或闸流管等原始变流元件来实现。最早是绕线式异步电动机转子串电阻调速,在吊车、卷扬机等设备中得到了较为广泛的应用,但这种方式调速时会在电阻上浪费大量电能,运行效率低下。20世纪50年代发展了异步电机定子串饱和电抗器实现调压调速的方法,但由转子损耗引起的发热问题严重。笼型转子异步电机变级调速是一种高效的调速方法,但速度变化有级,应用范围受限制。为了提高绕线式异步电动机转子串电阻调速的运行效率,20世纪30年代就提出了串级调速的思想。这种方法把原本消耗在外接电阻上的转子滑差功率引出,经整流变为直流电能供给同轴连接的直流电动机,使这部分能量变为机械功加以利用。

交流电机变频调速是一种理想的调速方法,早在20世纪20年代对此就有明确认识:既能在广阔的速度范围内实现无级调速,也不会在调速过程中使运行效率下降,更可获得良好的起动运行特性。但由于当时采用的水银整流器和闸流管性能不理想而未能推广使用,采用旋转变流机也因技术性能不如直流调速而未能使用。交流电机调速技术的发展总是与电力电子技术和微机控制技术的进步紧密相连,电力电子器件和微机构成了交流调速系统的物质基础。电力电子器件的作用更为关键,可以说新一代电力电子器件带出了新一代变流器,又推动了新一代交流调速系统的形成。20世纪60年代初,中、小型异步电机多采用晶闸管调压调速或采用晶闸管可控整流的电磁滑差离合器,取代了传统的饱和电抗器调速;而在中、大型绕线式异步电机中,多采用晶闸管串级调速装置代替机组式串级调速系统,并广泛应用于风机、水泵的调速节能改造。至于变频调速,一旦变频技术取得突破、进入使用阶段以后,其发展便会极其迅猛,在不到二十年的时间里,以被国内外公认为是最理想最有发展前途的一种调速方式。

变频调速技术在我国推广应用已有十多年,总的来说,普及的面还很小,仍处于起步阶段。究其原因,主要有两个方面:

(1) 价格高昂，一直是阻碍变频调速技术推广应用的一个主要原因。

(2) 变频调速具有一定的技术难度，人们需要一个了解和熟悉过程。

但是，随着电力电子技术的不断进步，变频器的价格已经有所下降；加之我国正在大力提倡技术创新，《中华人民共和国节约能源法》第三十九条中，将变频器调速列入通用节能技术加以推广。因此，许多设备的技术改造势在必行，本书也将着重介绍变频调速技术在电机节能方面的应用。

第一章 现代交流电机调速理论

电机调速（或称电机速度控制），是指在电力传动系统中手动或自动的改变电动机的转速，以满足生产过程对生产机械的要求。

某些生产机械为满足生产工艺要求，有时需要在生产过程中改变运行的速度。例如龙门刨床，在低速时以 $4\sim 8\text{m/min}$ 速度运动，而高速时则以 80m/min 速度运行；大量的风机、水泵为节能采用变频调节取代传统的节流调节而广泛使用调速技术；起重、造纸、印染、水泥生产等行业的生产机械都要求有转速改变和自动调节过程。所以调速是电力传动控制技术的一个重要内容，也是这些机械运行的必要条件。

由于调速技术的应用受到科学技术和设备制造工艺水平的制约，在相当长的时间内，交流电动机调速技术应用发展缓慢，在需要调速的场合都是采用直流电动机调速或机械调速方式。在 20 世纪 60 年代以后，随着电力电子技术的发展，交流电动机调速技术得到迅速的发展，使原来无法采用调速技术的风机、水泵也能够用来进行流量的调节，而达到节能的目的。除此以外由于技术进步设计生产了大量调速性能良好，耗能少的高效调速方式，如各种类型的变频调速装置、串级调速装置等，用这些高效调速装置取代传统的直流调速机组或转子串电阻等能耗高的调速方式均能取得节电 $15\%\sim 20\%$ 的显著效果。因而电动机调速技术应用已成为电力传动系统技术改造及节电行之有效的措施。

第一节 调速电机的机械特性

一、负载的机械特性

生产机械的转矩 T 和转速 n 之间的关系，通常称为机械特性，表示这一特性的曲线称为特性曲线。它表示要带动的负载在不同转速 n 运转时必须克服的负载转矩 T_L 的大小。

不同类型的负载（生产机械）其机械特性各不相同，其分类如下：

1. 恒转矩负载

恒转矩负载是指负载转矩不随转速改变而改变，转矩在生产机械运转过程中保持恒值，其负载功率与转速成正比，如图 1-1 所示。这一类负载很多，如起重机、卷扬机、造纸机、印刷机、空气压缩机等。

2. 变转矩负载

变转矩负载是指生产机械的转矩随转速改变而改变。按照变化规律变转矩负载又可分为：

(1) 与转速成正比例的负载转矩。如图 1-2 中曲线①所示。励磁恒定、带电阻性负载的直流发电机就是这种的典型例子。

(2) 通风机负载转矩。与转速的二次方成正比的负载转矩，如图 1-2 中曲线②所示。属于此类性质的负载有离心式通风机、离心式泵等。

(3) 恒功率负载转矩。与转速成反比的负载转矩，负载的功率近似不变，如图 1-2 中曲线③所示。例如轧钢机的轧辊，造纸、纺织的卷取机，切削机床的主传动等均属此类。

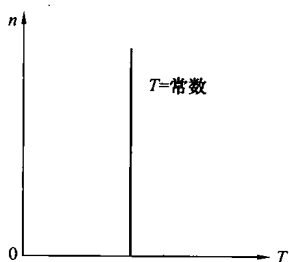


图 1-1 恒转矩负载特性

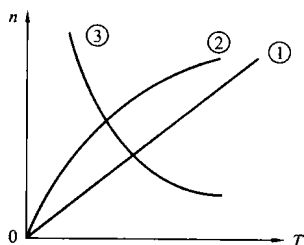


图 1-2 变转矩负载特性

不论是恒转矩负载或是恒功率负载，按动力学性质来分析，都可以分为反作用转矩特性及位能性转矩特性两类。反作用转矩的方向随转速方向改变而改变，负载转矩始终是起阻碍运动作用的，特性落在一、三象限内，如图 1-3 所示，多数恒转矩负载是呈反作用特性的。与反作用转矩相对应的是位能性转矩，其转矩的方向与转速的方向无关，如起重机的负载，无论是上升 ($n > 0$) 或下降 ($n < 0$)，负载转矩始终不变，其特性分布在一、四象限内，如图 1-4 所示。

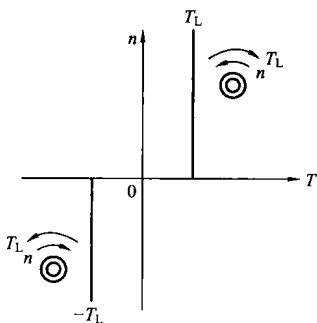


图 1-3 反作用转矩特性

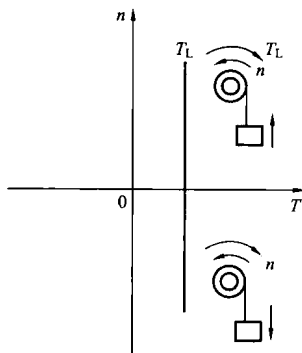


图 1-4 位能性转矩特性

二、电动机的机械特性

电动机的机械特性是指电动机的转矩与转速的关系。大部分工业中应用的电动机的机械特性是下降型的，即转速随着转矩增加而下降。如图 1-5 所示，不同类型电动机的变化程度各不相同，按照变化程度可以把电动机的机械特性分为三类：

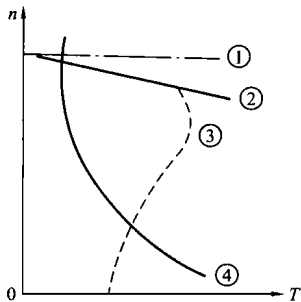


图 1-5 不同电动机的机械特性曲线

(1) 绝对硬特性。绝对硬特性是指转矩增加时转速保持不变，如同步电动机的机械特性，见图 1-5 中曲线①。

(2) 硬特性。硬特性是指转矩增加时转速略有下降，如异步电动机的机械特性，见图 1-5 中曲线②、③。

(3) 软特性。软特性是指转矩增加时转速下降很大，如直流串励电动机的机械特性，见图 1-5 中曲线④。

对于调速场合的电动机而言，当手动的或自动的改变电动机参数或电源电压、频率时，电动机的机械特性将随着变化。

图 1-6 表示异步电动机改变电源电压时的机械特性曲线；图 1-7 为绕线式异步电动机转子串电阻时的机械特性曲线。

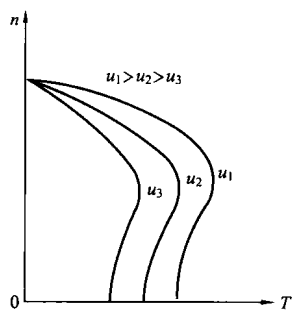


图 1-6 异步电动机改变电源电压时机械特性曲线

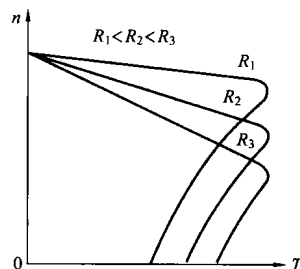


图 1-7 绕线式异步电动机转子串电阻时机械特性曲线

图 1-8 为异步电动机改变频率时的机械特性曲线 ($U/f = \text{常数}$)。图 1-9 为变极电动机改变极对数 p 时的机械特性曲线。

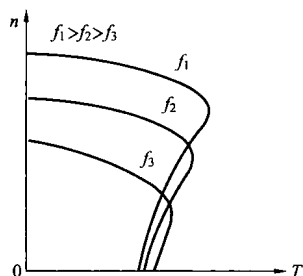


图 1-8 异步电动机变频时机械特性曲线

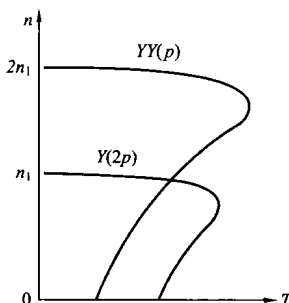


图 1-9 变极电动机机械特性曲线

三、电力传动的稳定条件

在生产机械的运转过程中，电动机的机械特性与生产机械（负载）的机械特性是共同存在的。当把这两个特性曲线画在一起时，它们的相交点即是电力传动的工作点。

两条特性曲线有交点是电力传动稳定运行的必要条件，因此对于用于调速的电动机，必须充分考虑在人为的改变其机械特性后，应与负载特性曲线有交点，当然还应考虑到改变后转速能满足生产要求。除此必要条件之外，还必须考虑到运行中受到某种干扰使转速有较小变动时，电动机的转矩特性能够使转速恢复到原来位置上，这种恢复能力与交点处两特性配合情况有关。

图 1-10 所示为一台带有调压装置的异步电动机拖动恒转矩负载的特性曲线。当电动机以额定电压运行时的特性曲线为②，与负载（转矩为 T_L ）曲线①相交于 A 点，稳定在 n_1 转速上运行。当受外界干扰转速稍有增加时，电动机的转矩小于负载转矩，合成转矩是负的，具有使电动机制动的功能，转速下降到 n_1 ，恢复到 A 点运行。相反，转速稍有下降时，电动机

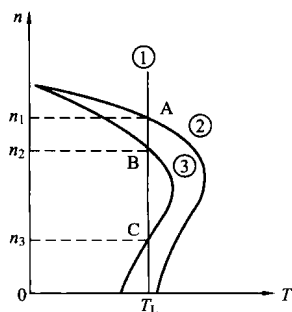


图 1-10 带调压装置的异步电动机传动恒转矩负载的特性曲线

的转矩大于负载转矩此时合成转矩为正值,进行加速,转速上升到 n_1 ,仍稳定在A点运行。

改变电动机的输入电压,使电动机的机械特性变为曲线③,运行点从A点移到B点,转速从 n_1 变到 n_2 。B点转矩接近电动机输出最大转矩,当负载稍有增加,就可能滑过最大转矩,此时两特性曲线相交于C点。用同样的方法分析C点运行是否稳定:当转速下降时,电机的输出转矩小于负载转矩,其合成转矩为负值,转速继续下降,将堵转而无法运行,因此,C点是不稳定点;转速上升时,电机的输出转矩大于负载转矩,其合成转矩为正值,转速继续上升,滑过最大转矩点,将稳定在B点运行,相当于起动状态。从上述例子可以看出,异步电动机带动恒转矩负载时,在电动机机械特性临界转差率(转速)以上部分是稳定运行区域,以下部分是不稳定运行区域。

判别电力传动能否在特性交点稳定运行的方法是在交点处取上下两个转速增量 Δn ,此时两个特性转矩间关系应满足:①特性交点处转速之上,电动机输出转矩 T 要小于负载转矩 T_L ,即 $T-T_L<0$;②特性交点处转速之下,要求 $T-T_L>0$ 。

对用于调速的电动机,必须按照生产机械负载特性调速范围等选择适用调速方式、电动机容量,以保持电动机稳定运行和调速装置的正常运行。

第二节 三相异步电动机的调速技术分类及主要指标

为使生产机械能在最佳的速度下工作,以保证产品质量和节约能源,就必须采用调速技术。从机械特性上看,调速就是通过改变电动机的参数或外加电压、频率的方法来改变电动机的机械特性及其与负载的机械特性的交点,从而使负载在新的速度上稳定运行。电动机的转速调节与固有的转速变化是两个不同概念。电动机的固有转速变化是指在一个已固定不变的机械特性曲线上,由于负载转矩变化而引起的转速变化;而电力传动的速度调节是指在某个一定的负载转矩下,通过手动或自动改变电动机的转速。

一、三相异步电动机的调速技术分类

(1) 按调速技术实施的机械名称分,可以分为三类,即机械调速、电气调速及机械与电气结合的调速方法(机电调速)。在机械调速系统中,只有一条固定的机械特性曲线,即电动机只有单一的转速,而速度的调节是通过几条变速齿轮、变速皮带轮或其他变速机械(如液力耦合器、油膜离合器)来实现的,大都属于有级调速。这种调速方法简单、工作可靠、便于维护,但不能满足多种速度的需要,不能获得最高的生产效率,所以通常适用于调速要求不高的生产机械。纯电气调速系统是人为的改变电动机的机械特性,获得不同转速,直接与工作机械相连。电气调速属于无级调速,是通过相应的电气设备来实现连续调速,这种调速方法控制灵活方便,调速范围较宽,容易满足生产工艺的需要,但有时调速设备较复杂。在机械与电气结合调速方法中,可以使电动机获得多种转速,同时又用几套机械变速机构进行组合,达到调速要求。这种调速方法控制更加灵活方便,调速范围更宽,更能充分发挥其长处,提高转动效率,且经济实用。

(2) 按调速原理分,三相异步电动机可分改变频率、改变转差率及改变极对数三大类。

(3) 按调速的平滑性可以分为无级调速和有级调速两类。

1) 无级调速又称连续调速,是指电动机转速可以平滑的调节,这对于要求能连续改变转速的工作机械是十分重要的。无级调速变化均匀、适应性强,并且容易实现控制自动化。

晶闸管整流器控制的直流电动机调速系统、晶闸管串级调速系统、变频调速系统及液力耦合器均属于无级调速。

2) 有级调速又称间断调速或分级调速, 它的转速规定在几个数值上, 如变级电动机调速系统、绕线式电动机转子串电阻调速系统等。

(4) 按调速的方向可以分为向上调速和向下调速。以电动机在额定负载时的额定转速为基准, 一般把向高于额定转速方向的调速叫向上调速, 如超同步的晶闸管串级调速等; 把向低于额定转速方向的调速叫向下调速, 如次同步串级调速、电磁转差离合器调速等。在某些机械上既要求向上调速又要求向下调速, 则称为双向调速, 如变频调速。

(5) 按输出转矩可分为恒转矩调速与恒功率调速两类。电动机输出功率的大小是由负载来决定的, 但对于每台电动机来说, 其输出功率是一定的, 即为电动机的额定容量。电动机容量受发热限制, 也就是说受到电动机的工作电流限制, 所以任何电动机的长期工作电流均应小于或等于额定电流。当电动机在不同的转速下运行时, 其允许的工作电流是不变的。但是, 对于不同类型的负载, 电动机所允许输出转矩和输出功率却不是一个固定值, 因此产生了下面两类不同的调速方法。

1) 恒转矩调速。在工矿企业中, 有很大一部分生产机械的负载属于恒转矩性质, 如提升机类。图 1-11 中 T_L 为常数的直线即为恒转矩负载的特性曲线。在调速过程中, 电动机特性曲线与该负载的机械特性相交于 1、2、3 三点, 分别表示不同稳定转速时的工作点。这些点的连线也就是垂直于 T 轴的负载线。因此对恒转矩负载, 电动机调速时的转矩是常数。

为了充分利用电动机容量, 应保持转速时电流为额定电流, 即使使电流也是常数。

恒转矩调速方式时, $T \propto I$ 且等于常数, 则有 $T = T_L$ 、 $I = I_N$ 关系。也就是说, 电动机无论是在高速或低速运行时, 其发热情况相同, 这就实现了电动机容量的充分利用。这种在调速过程中保持 $T \propto I$ 且等于额定值的调速方法称为恒转矩调速方法。交流电动机的变频调速、晶闸管串级调速等都属于恒转矩调速。

2) 恒功率调速。当负载是恒功率特性时, 即 P_L 为常数或 $T \propto 1/n$ 。这时如果仍采用恒转矩调速方法, 调速时 $T \propto I$, 那么在不同转速时就有不同的电流值, 如图 1-12 所示。这时图中 1 点是轻载, 3 点是过载。因此, 这时要保持 $I = I_N$ 就应使电动机输出功率 $P \propto I$, 且等于常数, 这种调速方法属于恒功率调速。例如直流电动机电枢电压一定时, 采用减弱磁通调速方法即是恒功率调速。此时, $I = I_N$, $T \propto \Phi$ (磁通), 因此 Φ 减少、 T 下降、 n 上升, P 近似保持不变, 这就是恒功率调速。

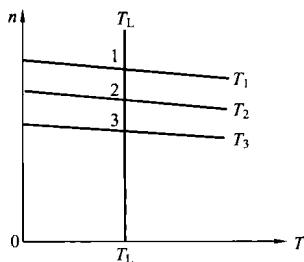


图 1-11 恒转矩调速配恒转矩负载

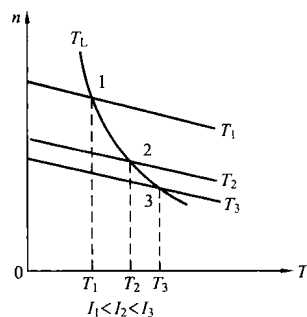


图 1-12 恒转矩调速配恒功率负载

同理,如果用恒功率调速方法去带动具有恒转矩性质的负载,也会出现轻载或过载现象,请读者自己画出机械特性曲线进行分析。因此,应该对恒转矩负载尽可能采用恒转矩调速方法,而恒功率负载尽可能采用恒功率调速方法,真正达到调速节能的目的。

二、三相异步电动机调速系统的主要指标

根据调速对象的负载特性和具体工作条件,选择适当的调速方案通常需要用某些技术指标作为依据,以便确定方案取舍。调速系统的主要技术指标如下。

(一) 静态指标

1. 调速范围

调速范围用系数 D 来表示,它是指额定负载下,传动系统的最高转速 $n_{\max}$ 与最低转速 $n_{\min}$ 之比,即

$$D = n_{\max} / n_{\min} \quad (1-1)$$

不同工作机械要求不同的调速范围,一般车床的 D 值为从几到几十,精密机床可达几百;而风机、水泵类的 D 只需取 2~3 即可。不同类型的电动机,采用不同调速方式所能达到的调速范围也不同。电气调速范围要大于机械调速范围,若采用闭环调速系统,可获得更宽的调速范围。为满足生产机械对调速的需要,调速系统的范围必须大于范围生产机械所需要的调速范围。

2. 静差率

静差率定义为:当电动机工作在某一条机械特性上,负载转矩由空载(转速为 n_0) 增加到额定负载(转速为 n_N) 时,转速降 Δn 和这条特性对应的空载转速 n_0 的比值,即

$$\delta = [(n_0 - n_N) / n_0] \times 100\% = \Delta n / n_0 \times 100\% \quad (1-2)$$

静差率又称速度变化率,用 δ 表示,它反映了电动机运行时转速相对稳定的程度。在不同的转速时静差率不是一个常数。图 1-13 中所示的机械特性中 T 是电磁转矩, T_L 是负载

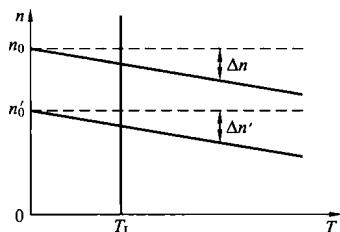


图 1-13 转速特性

转矩,高速时的同步转速大,低速时的同步转速小,但两者的转速降相同,故低速时的静差率 δ 要大于高速时的静差率 δ 。通常静差率 δ 越小,电动机的机械特性就越硬,转速相对稳定性也就越高。一般若在低速时能满足 δ 要求,则在高速时 δ 不会超出范围。在实际应用中,若负载波动范围小,则允许的静差率可以大些。调速范围越大,越不容易满足静差率的要求。另外,不同的机械设备对 δ 的要求不同,如对普通卧式车床允许 $\delta \leq 0.3$,而高精度机床允许 $\delta < 0.001$ 。

3. 调速的平滑性

电动机在一定转矩下,相邻两级转速 n_i 和 n_{i+1} (或 n_{i-1}) 之比称为调速的平滑性,通常用 K 表示,即

$$K = n_i / n_{i-1} = n_{i+1} / n_i \quad (1-3)$$

在调速中, K 是衡量速度逐级变化的程度,调速级数越多, K 值越接近 1,说明平滑性越好,如当 $n_i = 1000 \text{ r/min}$,且前一级转速为 $n_{i-1} = 500 \text{ r/min}$ 时, $K = 2$;而当 $n_{i-1} = 900 \text{ r/min}$ 时, $K = 1.11$ 。若为无级调速,则 $K = 1$,调速平滑性最好。

4. 调速的经济性

调速的经济性主要是考虑调速系统设备的投资、运行过程中能量的消耗、设备的维护检

修费用、电动机在调速过程中能量能否充分利用等。选择调速方案时,应在满足生产机械运行的条件下,进行综合考虑,以便达到最优的节能效果。

(二) 动态指标

1. 最大超调量

在阶跃信号作用下,系统转速输出超出稳态值的最大偏移量 $n_{\max} - n_{\infty}$ 与稳态转速输出量 n_{∞} 之比的百分值称为最大超调量 $\delta_{\max}$, 即

$$\delta_{\max} = [(n_{\max} - n_{\infty}) / n_{\infty}] \times 100\% \quad (1-4)$$

超调量反映了调速系统趋向于稳定性的程度,超调量小则说明动态响应较平稳。

2. 过渡过程时间

系统阶跃响应进入稳定值的 $\pm 5\%$ 范围,并不再超出这个范围所需的时间称为过渡过程时间,用 t_s 表示。 t_s 反映了系统响应的快速性。 n 与 t_s 的关系如图 1-14 所示。

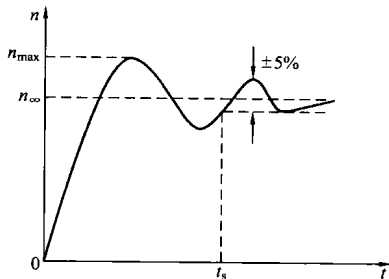


图 1-14 过渡过程时间 t_s

第三节 大功率电动机的调速方式

一、交流异步电动机的调速原理

三相异步电动机的转速表达式为

$$n = (1 - s)n_1 = (1 - s)60f/p \quad (1-5)$$

式中: n 为电动机实际转速; n_1 为同步转速; s 为转差率; f 为电源频率; p 为电动机极对数。

由式 (1-5) 可见,改变供电频率 f 、电动机的极对数 p 及转差率 s 均可达到改变转速的目的。

从调速的本质来看,不同的调速方式无非是改变交流电动机的同步转速或不改变同步转速两种。在生产机械中广泛使用不改变同步转速的调速方法有绕线式电动机的转子串电阻调速、斩波调速、串级调速,以及应用电磁转差离合器、液力耦合器、油膜离合器等调速。改变同步转速的有改变定子极对数的多速电动机,改变定子电压、频率的变频调速及无换向器电动机调速等。

从调速时的能耗观点来看,有高效调速原理和低效调速原理。按照交流异步电动机的基本原理,从定子传入转子的电磁功率 P_M 可分为两部分:一是拖动负载的一部分 $P_L = (1 - s)P_M$, 是拖动负载的有效功率;另一部分转差功率 $P_s = sP_M$, 与转差率 s 成正比。从能量转换的角度上看,转差功率是否增大,是消耗掉还是得到回收,显然是评价调速系统效率高低的一种标志。从这点出发,可以把异步电动机的调速原理作如下划分:

(1) 转差功率消耗型。全部转差功率都转化成热能的形式而消耗掉。降压调速、电磁转差离合器调速及绕线式异步电动机转子串电阻调速都应用了这一原理,这种原理调速原理简单,但效率最低,而且在恒转矩负载时是以增加转差功率的消耗来换取转速的降低,越向下调速效率越低。

(2) 转差功率回馈型。转差功率的一部分消耗掉,大部分则通过变流装置回馈电网或者化为机械能予以利用。转速越低时回馈的功率越多,串级调速的基本原理就源于此。显然,

此种原理的效率要高一些。

(3) 转差功率不变型。主要通过改变同步转速实现调速, 无论转速高低, 转差功率的消耗基本不变, 是一种真正的高效调速原理, 如变频调速、变级调速。变级调速属于有级调速, 应用场合有限; 变频调速的优点日益显现, 应用最广。

二、大功率电机调速方式

在工业生产领域中, 各种大功率负载主要是由大功率的交流异步电动机与同步电动机驱动。为适应生产工艺与节能的需要, 常要对电动机进行节能改造, 常见的大功率异步电动机调速方式有: ①调压调速; ②绕线转子异步电动机转子回路串电阻调速; ③绕线转子异步电动机串级调速; ④变级调速; ⑤变频调速等。根据前面所讲的交流电动机调速的基本原理, 读者可以自行分析哪种调速方式更高效、更节能。下面将着重介绍常用的几种调速方法。

1. 变频调速

由式(1-5)可以看出, 改变供电电源频率便可改变异步电动机的同步转速, 从而改变电动机转子的转速。变频调速就是在供电电源和电动机定子间加入一变频装置, 将 50Hz 工

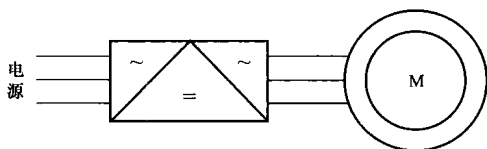


图 1-15 变频调速典型原理图

频电源变成频率和电压可调的电源后给定子供电。变频调速具有适用范围广、调速范围较大、有好的调速平滑性与硬机械特性的特点, 因此得到了较为广泛的关注和应用。其典型原理如图 1-15 所示。

在保证电动机变频时磁通不变, 变频调速方式通过调节电源频率实现无级调速。变频调速方式又分为交—交与交—直—交两大类型, 而交—直—交变频调速方式又分为电压源型与电流源型。

2. 串级调速

串级调速方式通过对绕线转子异步电动机转子串入一个反电动势进而达到调速的目的。串级调速有电子串级和电动机串级两种方式。电子串级方式由整流器、电抗滤波器和有源滤波器组成。转子中的转差功率通过整流器整流、电抗器滤波后, 由晶闸管变换装置转换为工频交流电, 经逆变变压器馈送给电网, 或馈送给电动机定子成为附加的电磁功率, 该方式也称为内反馈方式。电动机串级调速方式则采用附加的直流电动机将转差功率变为机械能, 馈送给主电动机(机械串级), 或通过异步发电机转变为工频电馈送给电网, 该方式目前有被内反馈取代的趋势。从如上分析可知串级调速可以将转差功率回收, 整体效率高; 但该方式如采用转速开环的方式, 电动机机械特性较软且仅适用于绕线转子异步电动机。

3. 双馈电动机调速

双馈电动机调速就是对绕线转子异步电动机的定子馈入恒压恒频电源、转子馈入变压变频电源的特殊型串级调速。该方式的容量在国内已达 2400kW, 国外已达几十兆瓦。该方式既可次同步调速又可超同步调速, 但缺点是仅适应于绕线转子异步电动机。

4. 变极调速

电动机的转速与电动机的极对数成反比。因此, 通过改变电动机定子绕组的接线方式, 或在定子槽内嵌放几套不同极对数的独立绕组, 使电动机运行在不同的极对数下, 便能得到不同的转速。这种调速方式原理简单, 但只能逐级调速, 不能实现平滑无级调速, 且电动机

制造与接线变得复杂。一种典型的变极调速接线方式如图 1-16 所示。

由图 1-16 可知, 变极调速通过改变定子绕组的接法去改变极对数, 进而实现有级调速; 若对高电压大功率电动机进行调速, 对所采用的转换开关的要求比较高, 一般采用油浸式或真空式开关。

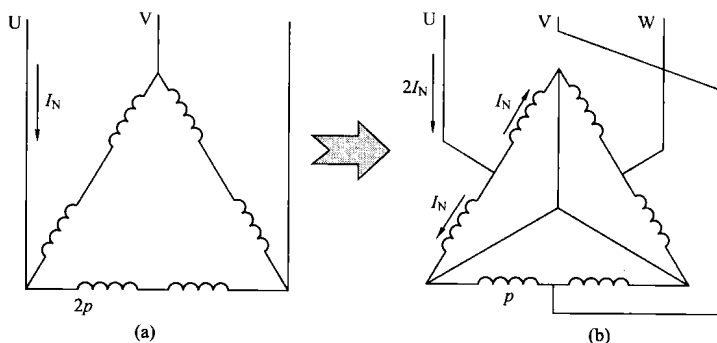


图 1-16 变极调速接线方式

(a) 定子绕组角接; (b) 定子绕组星接

5. 变阻调速

变阻调速方式通过在绕线转子异步电动机的转子回路中串入可变电阻以改变电流, 降低输出转矩, 即加大转差的方法进行调速。该方式调速范围小, 一般为 50%~100%; 为满足大功率调速的要求, 且所串电阻一般为液体 (水) 电阻或调频用频敏电阻。

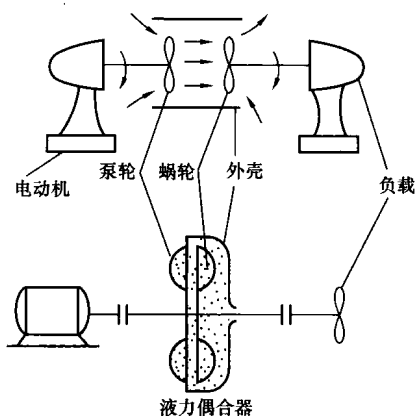


图 1-17 液力偶合无级调速

6. 液力偶合器调速

液力偶合器是一种中间环节的调速装置, 它以笼型电动机为原动机, 以液体 (油) 为工质, 由泵轮和蜗轮组成。泵轮由原动机驱动, 带动工质油旋转, 油所产生的动能和压力, 推动蜗轮旋转, 蜗轮驱动负载工作。通过调节充油量去改变油的动能和压力, 从而改变泵轮于蜗轮的转差, 实现液力偶合无级调速。其工作原理如图 1-17 所示。

第四节 各种交流调速方法的对比

一、机械特性曲线对比

各种调速方式下, 交流电动机的机械特性曲线变化如图 1-18 所示。

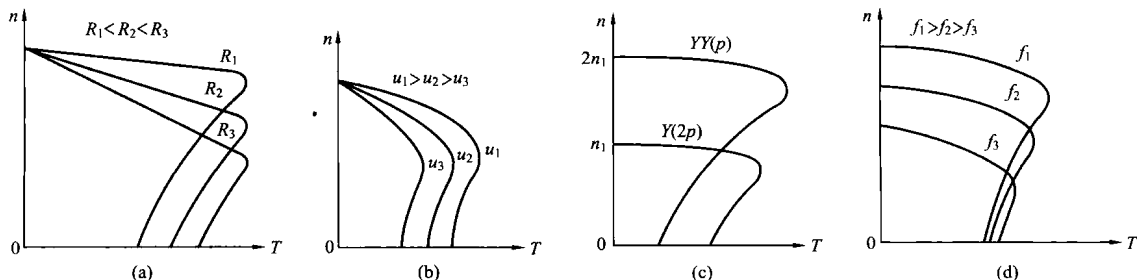


图 1-18 几种调速方式下交流电动机的机械特性曲线

(a) 绕线式异步电动机转子串电阻时机械特性曲线; (b) 异步电动机改变电压时机械特性曲线;

(c) 变极电动机机械特性曲线; (d) 异步电动机变频时机械特性曲线