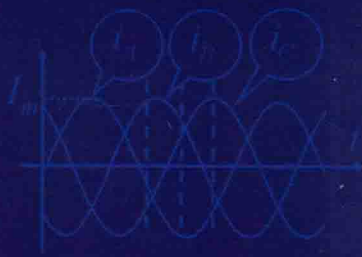




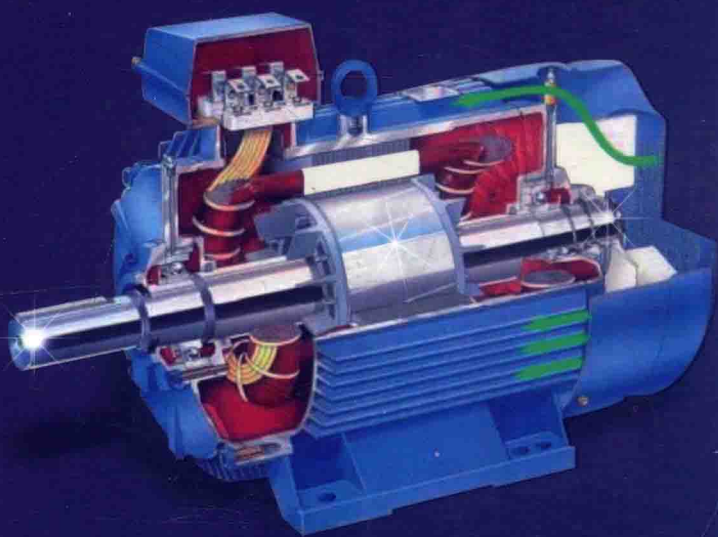
电气工程新技术丛书



异步电动机变频 调速控制技术

YIBU DIANDONGJI BIANPIN
TIAOSU KONGZHI JISHU

张勇军 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电气工程新技术丛书

异步电动机变频调速控制技术

张勇军 编著



机械工业出版社

本书系统、全面地介绍了异步电动机变频调速控制理论与相关技术，主要内容包括异步电动机变频调速技术的发展现状与趋势；基于稳态模型的异步电动机变频调速控制技术；异步电动机的动态数学模型；基于异步电动机动态数学模型的矢量控制与直接转矩控制技术；采用现代控制理论与方法的异步电动机变频调速新型控制策略。

本书可供从事交流调速控制、电力电子相关科研工作人员及高等院校电气自动化专业的研究生阅读，也可以作为科研院所、厂矿企业中从事电气传动领域工作的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

异步电动机变频调速控制技术 / 张勇军编著. —北京: 机械工业出版社, 2016.6

(电气工程新技术丛书)

ISBN 978-7-111-53650-5

I. ①异… II. ①张… III. ①异步电动机—变频调速—调速控制器
IV. ①TM343

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 088878 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: 时 静 责任编辑: 时 静

责任校对: 张艳霞 责任印制: 常天培

涿州市京南印刷厂印刷

2016 年 5 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm×260mm·10.25 印张·246 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-53650-5

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

网络服务

服务咨询热线: (010)88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: (010)68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

(010)88379203

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金 书 网: www.golden-book.com

《电气工程新技术丛书》编委会名单

主 编：严陆光（中国科学院电工研究所）

副主编：李华德（北京科技大学）

编 委：（按姓名拼音排序）

薄志谦（许继集团有限公司）

董朝阳（南方电网科学研究院）

干永革（中冶赛迪电气技术有限公司）

何怡刚（合肥工业大学）

金建勋（天津大学）

李欣然（湖南大学）

阮新波（南京航空航天大学）

孙秋野（东北大学）

唐跃进（华中科技大学）

王志新（上海交通大学）

肖登明（上海交通大学）

熊小伏（重庆大学）

张波（华南理工大学）

张承慧（山东大学）

张晓星（武汉大学）

程明（东南大学）

范瑜（北京交通大学）

戈宝军（哈尔滨理工大学）

江道灼（浙江大学）

李鹏（华北电力大学）

马小亮（天津电气科学研究院）

舒彬（北京电力经济技术研究院）

汤涌（中国电力科学研究院）

王建华（西安交通大学）

伍小杰（中国矿业大学）

肖立业（中国科学院电工研究所）

袁越（河海大学）

张潮海（哈尔滨工业大学）

张道农（华北电力设计院有限公司）

赵争鸣（清华大学）

出版说明

近年来，电气工程领域的研究有了长足的发展，为促进电气工程学科的发展和人才培养，现机械工业出版社会同全国在电气工程领域具有雄厚师资和技术力量的高等院校及科研机构，组成阵容强大的编委会，组织长期从事科研和教学的学者编写这套学术水平高、学科内容新、具备一定规模的“电气工程新技术丛书”，并将陆续出版。

这套丛书力求做到：学术水平高、学科内容新，能够反映国内外电气工程研究领域的最新成果和进展，具有科学性、准确性、权威性、前沿性和先进性；选题覆盖面广、深度适中，不仅体现电气工程领域的最新进展，而且注重理论联系实际。

这套丛书的选题是开放式的。随着电气工程学科日新月异的发展，我们将不断更新和补充选题，使这套丛书及时反映电气工程领域的新发展和新技术。我们也欢迎在电气工程领域中有丰富科研经验的教师及科技人员积极参与这项工作。

由于电气工程领域发展迅速，而且涉及面非常宽，所以这套丛书的选题和编审中如有缺点和不足之处，诚请各位老师和专家提出宝贵意见，以利于今后不断改进。

前 言

电动机作为机电能量转换的重要途径，一直以来都为现代社会的发展起着巨大的推动作用，交流电动机尤其是交流异步电动机无疑是其中最重要的应用类型，尤其是随着电力电子技术、计算机控制技术和矢量控制策略的快速发展，以高性能变频调速技术驱动的异步电动机有了更为广阔的应用空间。进入 21 世纪以来，交流调速技术继续向纵深方向发展，本书主要针对异步电动机变频调速技术的新发展和新方向而编著。

异步电动机本身具有显著的非线性和强耦合特征，而面向异步电动机的交流变频调速技术则融合了电力电子学、电机学、微电子学、计算机科学、控制科学等多种学科于一体，对研究人员有着较高的专业基础要求。本书的编写立足于对异步电动机变频控制系统的分析和设计，基于异步电动机的数学模型，由浅入深地对现代异步电动机交流变频调速系统相关的主要控制技术及其算法改进展开讨论。本书具有前沿性和先进性，题材主要来源于实践工作，融入了作者多方面的研究成果和研究内容，可供从事交流调速控制、电力电子相关科研工作人员及高等院校电气自动化专业的研究生阅读，也可以作为科研院所、厂矿企业中从事电气传动领域工作的工程技术人员的参考用书。

本书的编写遵循了深入浅出、循序渐进及理论联系实际的原则，编写过程中以控制理论、控制方法为主线贯穿始终。全书共分为 6 章，其中 4~6 章为本书的重点。第 1 章作为绪论主要介绍目前变频调速技术的现状与发展趋势；第 2 章介绍了以异步电动机稳态数学模型为基础的变频调速技术；第 3 章介绍了异步电动机在各种坐标系下的动态数学模型及其变换过程；第 4、5 章分别讨论了基于异步电动机动态数学模型的矢量控制技术和直接转矩控制技术；第 6 章重点对改善异步电动机变频调速性能的几种先进控制策略进行了阐述和探讨。

本书由北京科技大学高效轧制国家工程研究中心博士、副研究员张勇军编著。北京科技大学郝春辉老师、博士研究生苗磊、肖雄，硕士研究生汪伟、田亚卓、宋宪、李林林等参加了本书的整理、校对、录入及编辑工作；本书由北京科技大学李华德教授负责全书的统一规划、审查和补充。在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，在编写过程中难免出现缺点、错误及不当之处，敬请广大读者批评指正，并给予谅解。

作 者

目 录

《电气工程新技术丛书》编委会名单

出版说明

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电动机调速技术概况	1
1.2 变频调速控制技术的现状	5
1.3 变频调速控制技术的发展趋势	8
第 2 章 基于稳态模型的异步电动机变频调速技术	12
2.1 电压—频率协调控制方式	12
2.2 转差频率控制方式	16
2.3 电压源型变频调速系统	19
2.3.1 转速开环的恒压频比变频控制技术	19
2.3.2 转速闭环的转差频率控制技术	21
2.4 电流源型恒压频比变频调速系统	23
2.4.1 转速开环的恒压频比变频控制技术	23
2.4.2 转速闭环的转差频率控制技术	24
第 3 章 异步电动机的动态数学模型	26
3.1 坐标系与空间矢量概念	26
3.2 三相静止坐标系上的数学模型	27
3.3 坐标变换及变换矩阵	32
3.4 二相静止坐标系上的数学模型	42
3.5 任意二相旋转坐标系上的数学模型	47
3.6 二相同步旋转坐标系上的数学模型	49
3.7 任意二相坐标系上的状态方程	50
第 4 章 基于动态数学模型的矢量控制技术	53
4.1 矢量控制的基本概念	53
4.1.1 电动机控制统一理论	53
4.1.2 矢量控制基本思想	55
4.2 磁场定向和矢量控制技术构成	57
4.2.1 按转子磁场定向的异步电动机矢量控制技术	57
4.2.2 异步电动机其他磁场定向方法	60
4.3 转子磁链观测器	62
4.3.1 计算转子磁链的电流模型法	63
4.3.2 计算转子磁链的电压模型法	64
4.4 异步电动机矢量控制系统	65

4.4.1	具有转矩内环的双闭环异步电动机直接矢量控制系统	65
4.4.2	转差型异步电动机间接矢量控制系统	68
第 5 章	基于动态数学模型的直接自控制与直接转矩控制技术	70
5.1	直接转矩控制原理	70
5.1.1	直接转矩控制的基本思想	70
5.1.2	电动机定子磁链和电磁转矩控制原理	72
5.2	DSC 系统	79
5.2.1	DSC 系统的基本组成	79
5.2.2	在低速范围内 DSC 系统的转矩控制与调节方法	88
5.2.3	在弱磁范围内 DSC 系统的转矩控制及恒功率调节	94
5.3	DTC 系统	98
5.3.1	DTC 系统的磁链控制	98
5.3.2	DTC 系统的转矩控制	99
5.3.3	DTC 系统的构成	101
第 6 章	异步电动机变频调速先进控制策略	103
6.1	异步电动机变频调速系统先进控制策略综述	103
6.2	变频调速系统的逆系统控制方法	107
6.2.1	逆系统控制方法的理论基础	107
6.2.2	异步电动机动态模型的可逆性及其逆系统	109
6.2.3	闭环控制器的设计	112
6.3	面向高压大功率系统的定子磁链轨迹控制	113
6.3.1	定子磁链轨迹控制的产生背景	113
6.3.2	同步对称优化 PWM 技术	115
6.3.3	定子磁链轨迹控制原理与构成	117
6.3.4	定子磁链轨迹控制的闭环系统	121
6.4	变频调速系统内模控制技术	125
6.4.1	内模控制的基本原理和特点	125
6.4.2	定子电流的内模解耦控制	127
6.4.3	二自由度内模控制策略	128
6.4.4	变频调速系统的二自由度内模控制方法	130
6.5	异步电动机广义预测控制技术	132
6.5.1	广义预测控制系统的结构	133
6.5.2	广义预测控制律	134
6.5.3	基于广义预测控制的直接转矩控制	137
6.6	智能控制方法在变频调速系统中的应用	140
6.6.1	电动机的神经网络模型参考自适应控制方法	140
6.6.2	电动机模糊控制方法	143
6.6.3	电动机的自适应模糊神经网络控制方法	147
	参考文献	151

第1章 绪 论

1.1 电动机调速技术概况

电动机是用电量最多的电气设备，其总负荷约占总发电量的 70%。电动机分为直流电动机和交流电动机两大类，其中交流电动机无论在数量和装机容量上都远远超过直流电动机。据不完全统计，交流电动机用电量占电动机总用电量的 85%左右，可见交流电动机应用的广泛性及其在国民经济中的重要地位。交流电动机分为同步电动机和异步电动机（也称感应电动机）两大类，即转子转速与定子电流频率保持严格不变关系的同步电动机，以及转子转速与定子电流频率之间不严格对应关系的异步电动机。20 世纪 80 年代以来，在这两类交流电动机的基础上，开关磁阻电动机、永磁无刷直流电动机（梯形波永磁同步电动机）、正弦波永磁同步电动机等新型电动机得到了很快的发展和应。

电动机的调速控制一般可分为两类：一是要使电动机具有较高的机电能量转换效率；二是根据生产机械的工艺要求控制和调节电动机的旋转速度。电动机的调速性能如何对提高产品质量、提高劳动生产率和节省电能有着直接的决定性影响。以直流电动机作为控制对象的电力拖动自动控制系统称为直流调速系统；以交流电动机作为控制对象的电力拖动自动控制系统称为交流调速系统。根据交流电动机的分类，相应地有同步电动机调速系统和异步电动机调速系统。

20 世纪 60 年代以前，直流调速系统是以旋转变流机组供电为主（见图 1-1），还有一些静止式水银整流器供电的直流调速系统见图 1-2。1957 年，美国通用电气公司的 A.R. 约克制成了世界上第一只晶闸管（SCR），曾称可控硅整流元件（简称可控硅），这标志着电力电子时代的开始。20 世纪 60 年代以后，以晶闸管组成的直流供电系统逐步取代直流机组和水银整流器。20 世纪 80 年代末期，全数字控制直流调速系统迅速取代模拟控制的直流调速系统。

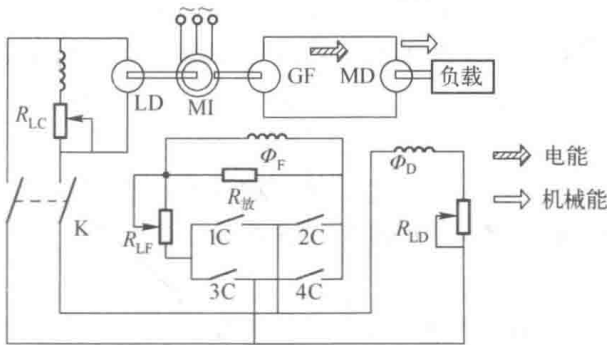


图 1-1 直流发电机—直流电动机系统

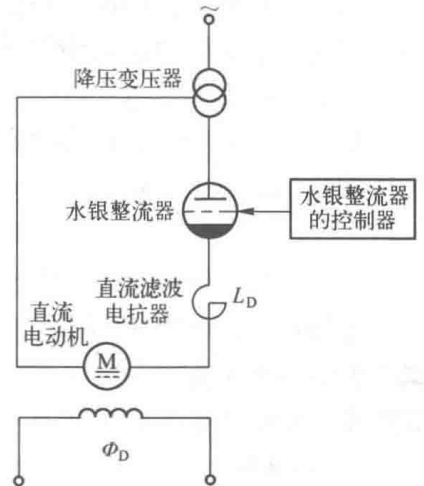


图 1-2 离子电力拖动的主回路

由于直流电动机的转速容易控制和调节，在额定转速以下，保持励磁电流恒定，可用改变电枢电压的方法实现恒转矩调速；在额定转速以上，保持电枢电压恒定，可用改变励磁的方法实现恒功率调速。近代采用晶闸管供电的转速、电流双闭环直流调速系统可获得优良的静、动态调速特性。因此，长期以来在变速传动领域中，直流调速一直占据主导地位。然而，由于直流电动机本身存在机械式换向器和电刷这一固有的结构性缺陷，给直流调速系统的发展带来了以下一系列限制：

1) 机械式换向器表面线速度及换向电压、电流有一极限容许值，这就限制了单机的转速和功率。如果要超过极限容许值，则大大增加电动机制造的难度和成本以及调速系统的复杂性。因此，在工业生产中，对一些要求特高转速、特大功率的场合则根本无法采用直流调速方案。

2) 为了使机械式换向器能够可靠工作，往往需要增大电枢和换向器直径，使得电动机体积变大，导致转动惯量大，对于要求快速响应的生产工艺，采用直流调速方案难以实现。

3) 机械式换向器必须经常检查和维修，电刷必须定期更换，使得直流调速系统维检工作量大，维修费用高，同时停机检修和更换电刷也直接影响了正常生产。

4) 机械式换向器易产生火花，在一些易燃、易爆的生产场合，一些多粉尘、多腐蚀性气体的生产场合不能或不宜使用直流调速系统。

由于直流电动机在应用中存在着这样的一些限制，使得直流调速系统的发展也相应受到限制。交流电动机具有结构简单、制造容易、价格便宜、坚固耐用、转动惯量小、运行可靠、很少维修、使用环境及结构发展不受限制等优点。特别是异步电动机，在实际的生产、生活中以其结构简单、制造和使用维护方便、运行可靠、适应性强、成本较低等优点，应用普及性远远超过同步电动机。对异步电动机调速控制技术的研究也成为与工业生产、日常生活直接相关的重要内容。

根据被控对象——交流电动机的种类不同，现代交流调速系统可分为异步电动机调速系统和同步电动机调速系统。

1. 同步电动机调速系统的基本类型

由同步电动机转速公式 $n=60f_s/n_p$ (f_s 为定子供电频率， n_p 为电动机极对数) 可知，同步电动机唯一依靠变频调速。根据频率控制方式的不同，同步电动机调速系统可分为两类，即他控式同步电动机调速系统和自控式同步电动机调速系统。

(1) 他控式同步电动机调速系统

用独立的变频装置作为同步电动机的变频电源叫作他控式同步电动机调速系统。他控式恒压频比的同步电动机调速系统目前多用于小容量场合，例如永磁同步电动机、磁阻同步电动机。

(2) 自控式同步电动机调速系统

采用频率闭环方式的同步电动机调速系统叫作自控式同步电动机调速系统，是用电动机轴上所装转子位置检测器来控制变频装置触发脉冲，使同步电动机工作在自同步状态。自控式同步电动机调速系统可分为两种类型。

1) 负载换向自控式同步电动机调速系统(无换向器电机)。负载换向自控式同步电动机调速系统主电路常采用交—直—交电流型变流器，利用同步电动机电流超前电压的特点，使

逆变器的晶闸管工作在自然换向状态。国际上简称这种系统为负载换相逆变器（Load Commutated Inverter, LCI）。目前这种调速系统容量已达到数万千伏安，电压等级达到万伏以上。值得注意的是，这种超大容量的系统所用同步电动机集电环式励磁系统已改用无刷励磁机系统。

2) 交—交变频供电的同步电动机调速系统。交—交变频同步电动机调速系统的逆变器采用交—交循环变流结构，由晶闸管组成，提供频率可变的三相正弦电流给同步电动机。采用矢量控制后，这种系统具有优良的动态性能，广泛用于轧钢机主传动调速中。交—交变频同步电动机调速系统容量可以做到 $10000\text{kV}\cdot\text{A}$ 以上。但是调速范围最高达到 20Hz （工频为 50Hz 时），这是这种调速系统的不足之处。

2. 异步电动机调速系统的基本类型

由异步电动机工作原理可知，从定子传入转子的电磁功率可分为两部分：一部分是拖动负载的有效功率；另一部分是转差功率，与转差率成正比。转差功率如何处理、是消耗掉还是回馈给电网，可衡量异步电动机调速系统的效率高。因此按转差功率处理方式的不同，可以把现代异步电动机调速系统分为三类。

(1) 转差功率消耗型调速系统

全部转差功率都转换成热能的形式而消耗掉，晶闸管调压调速属于这一类。在异步电动机调速系统中，这类系统的效率最低，是以增加转差功率的消耗为代价来换取转速的降低。但是由于这类系统结构最简单，所以对于小容量场合还有一定的应用。

(2) 转差功率回馈型调速系统

转差功率一小部分消耗掉，大部分则通过变流装置回馈给电网。转速越低，回馈的功率越多。绕线转子异步电动机串级调速和双馈调速属于这一类。显然这类调速系统效率比较高。图 1-3 所示为绕线转子异步电动机转子外串电阻调速原理图。

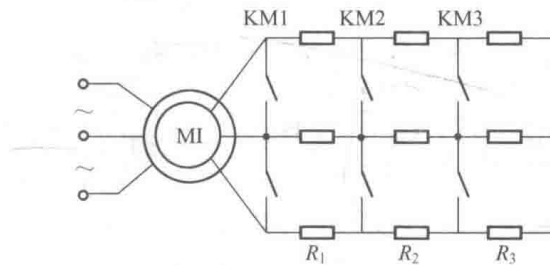


图 1-3 绕线转子异步电动机转子外串电阻调速原理图

(3) 转差功率不变型调速系统

转差功率中转子铜损部分的消耗是不可避免的，但在这类系统中，无论转速高低，转差功率的消耗基本不变，因此效率很高。变频调速属于这一类。目前在交流调速系统中，变频调速应用最多、最广泛，可以构成高动态性能的交流调速系统，取代直流调速。

在相当一段时间内，由于受科技水平的限制，把交流电动机作为调速电机的问题未能得到较好的解决，在早期只有一些调速性能差、低效耗能的调速方法，如笼型异步电动机变压调速方法（利用自耦变压器变压调速；利用饱和电抗器变压调速；利用晶闸管交流调压器调压调速，见图 1-4）。还有变极对数调速方法（见图 1-5）及后来的电磁（转差离合器）调速方法（见图 1-6）等。

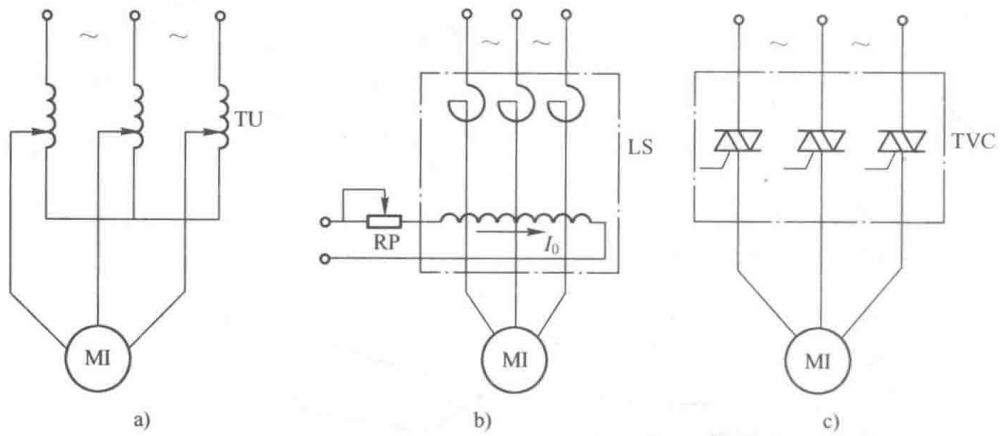


图 1-4 笼型异步电动机变压调速系统

a) 利用自耦变压器变压调速 b) 利用饱和电抗器变压调速 c) 利用晶闸管交流调压器调压调速

TU—自耦变压器 LS—饱和电抗器 TVC—双向晶闸管交流调压器

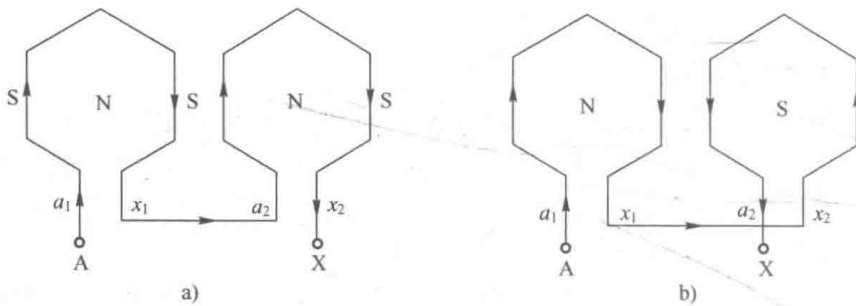


图 1-5 变极对数调速方法原理图

a) 顺向串联 $2n_p=4$ 极 b) 反向串联 $2n_p=2$ 极

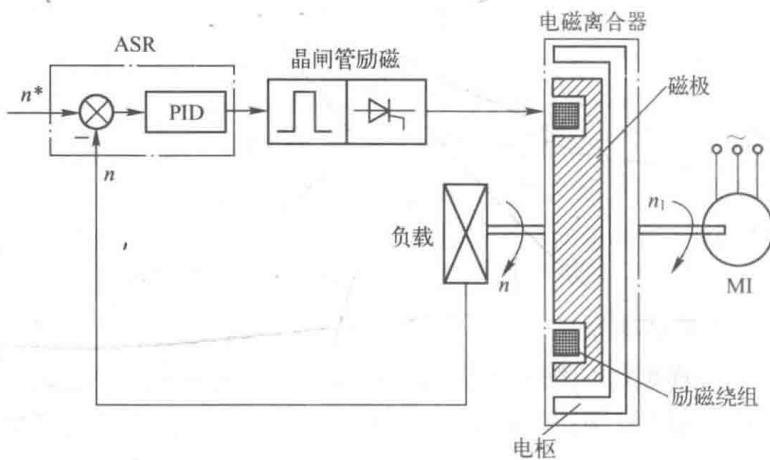


图 1-6 电磁转差离合器调速系统

图 1-5a 为一台 4 极电动机 A 相两个线圈连接示意图，每个线圈代表半个绕组。如果两个线圈处于首尾相连的顺向串联状态，根据电流方向可以确定出磁场的极性，显然为 4 极，如果将两个线圈改为图 1-5b 所示反向串联状态，则极数减半。

在图 1-6 中，当励磁绕组通以直流电，电枢为电动机所拖动以恒速定向旋转时，在电枢

中感应产生涡流，涡流与磁极的磁场作用产生电磁转矩，使磁极跟着电枢同方向旋转。改变励磁电流的大小就可以实现对负载的调速。

随着电力电子及数字控制技术的发展，变频调速已经成为交流电动机调速和转矩控制的主要技术。总体来看，交流变频调速系统一般由交流电动机、电力电子功率变换器、控制器和电量检测器等四大部分组成，如图 1-7 所示。电力电子功率变换器、控制器及电量检测器集中于一体，称为变频调速装置，即图 1-7 内点画线所框部分。从系统方面定义，图 1-7 外框所框部分称为交流变频调速系统。

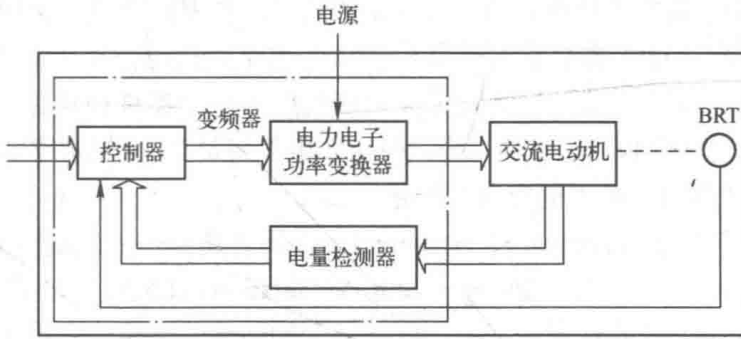


图 1-7 现代交流变频调速系统组成示意图

1.2 变频调速控制技术的现状

20 世纪 80 年代以来，科学技术的迅速进步为交流调速的进一步发展创造了极为有利的技术条件和物质基础，以变频调速技术为主要内容的现代交流调速系统在下述四个方面得到迅速发展。

1. 电力电子器件 (Power Electronic Device) 的蓬勃发展和迅速换代

电力电子器件是现代交流调速装置的支柱，其发展直接决定和影响交流调速技术的发展。20 世纪 80 年代中期以前，变频调速装置功率回路主要采用晶闸管器件。装置的效率、可靠性、成本、体积均无法与同容量的直流调速装置相比。20 世纪 80 年代中期以后，采用第二代电力电子器件——电力晶体管 (Giant Transistor, GTR)、门极关断 (Gate Turn-Off Thyristor, GTO) 晶闸管 (简称 GTO)、VDMOS-绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 等功率器件制造的变频器在性能上与直流调速装置相当。20 世纪 90 年代，第三代电力电子器件问世，在这个时期中，中、小功率的变频器 (1~1000kW) 主要采用 IGBT 器件，大功率的变频器采用 GTO 器件。20 世纪 90 年代末至今，电力电子器件的发展进入了第四代，主要实用的器件有：

(1) 高压 IGBT 器件

沟槽式结构的 IGBT (SIEMENS 公司的 HVIGBT) 问世，使 IGBT 器件的耐压水平由常规 1200V 提高到 4500V，实用功率容量为 3300V/1200A，表明 IGBT 器件突破了耐压限制，进入第四代高压 IGBT 阶段，与此相应的三电平 IGBT 中压 (2300~4160V) 大容量变频调速装置进入实用化阶段。

(2) 集成门极换流晶闸管 (Integrated Gate Commutated Transistor, IGCT) 器件

ABB 公司把环形门极 GTO 器件外加 MOSFET 功能, 研制成功全控型 IGCT (ETO) 器件, 使其耐压及容量保持了 GTO 的水平, 但门极控制功率大大减小, 仅为 0.5~1W。目前实用化的 IGCT 功率容量为 4500V/3000A, 相应的变频器容量为 (315~10000kW) / (6~10kV)。

(3) 注入增强栅晶体管 (Injection Enhanced Gate Transistor, IEGT) 器件

东芝-GE 公司研制的高压、大容量、全控型功率器件 IEGT 是把 IGBT 器件和 GTO 器件两者优点结合起来的注入增强栅晶体管。IEGT 器件实用功率容量为 4500V/1500A, 相应的变频器容量达 8~10MW。

由于 GTR、GTO 器件本身存在的不可克服的缺陷, 功率器件进入第四代以来, GTR 器件已被淘汰不再使用, GTO 器件也将被逐步淘汰。用第四代电力电子器件制造的变频器性能/价格比与直流调速装置相当。与此同时, 第四代电力电子器件模块化更为成熟, 如功率集成电路 (PIC) 智能功率模块 (IPM) 等, 模块化器件将是 21 世纪主宰器件。

2. 脉宽调制 (PWM) 技术的应用与优化

1964 年, 德国学者 A.Schonung 和 H.Stemmler 提出将通信中的调制技术应用到电机控制中, 于是产生了脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 技术, 简称脉宽调制 (PWM) 技术。脉宽调制技术的发展和优化了变频装置的性能, 适用于各类调速系统。

脉宽调制 (PWM) 种类很多, 并且正在不断发展之中, 基本上可分为四类, 即等宽 PWM、正弦 PWM (SPWM)、磁链追踪型 PWM (SVPWM) 及电流滞环跟踪型 PWM (CHBPWM)。PWM 技术的应用克服了相控方法的所有弊端, 使交流电动机定子得到了接近正弦波的电压和电流, 提高了电机的功率因数和输出功率。现代 PWM 生成电路大多采用具有高速输出口 (HSO) 的单片机 (如 80196) 及高速数字信号处理器 (DSP), 通过软件编程生成 PWM。近年来, 新型全数字化专用 PWM 生成芯片 HEF4752、SLE4520、MA818 等已实际应用。

3. 矢量控制理论的诞生和发展

1971 年, 德国学者伯拉斯切克 (F.Blaschke) 提出了交流电动机矢量控制理论, 这是实现高性能交流调速系统的一个重要突破。

矢量控制的基本思想是应用参数重构和状态重构的现代控制理论概念实现交流电动机定子电流的励磁分量和转矩分量之间的解耦, 将交流电动机的控制过程等效为直流电动机的控制过程, 从而使交流调速系统的动态性能得到了显著的提高, 这使交流调速最终取代直流调速成为可能。目前对调速特性要求较高的生产工艺已较多地采用了矢量控制型的变频调速装置。实践证明, 采用矢量控制的交流调速系统的优越性高于直流调速系统。

针对电机参数时变特点, 在矢量控制系统中采用了自适应控制技术。毫无疑问, 矢量控制在应用实践中将会更加完善, 其控制性能将得到进一步提高。

继矢量控制技术之后, 1985 年由德国学者 M.Dепенbrock 提出的直接自控制 (DSC) 的直接转矩控制, 以及 1986 年由日本学者 I.Takahashi 提出的直接转矩控制 (DTC) 都取得了实际应用的成功。近十几年的实际应用表明, 与矢量控制技术相比, 直接转矩控制可获得更大的瞬时转矩和快速的动态响应, 因此, 交流电动机直接转矩控制也是一种很有发展前途的控制技术, 目前, 采用直接转矩控制方式的 IGBT、IEGT、IGCT 变频器已广泛应用于工业生产及交通运输部门中。

4. 计算机控制技术的迅速发展和广泛应用

微型计算机控制技术的迅速发展和广泛应用为现代交流调速系统的成功应用提供了重

要的技术手段和保证。近十几年来，由于微机控制技术，特别是以单片微机及数字信号处理器（DSP）为控制核心的微机控制技术的迅速发展和广泛应用，促使交流调速系统的控制回路由模拟控制迅速走向数字控制。当今模拟控制器已被淘汰，全数字化的交流调速系统已普遍应用。

数字化使得控制器对信息处理能力大幅度提高，许多难以实现的复杂控制，如矢量控制中的坐标变换运算、解耦控制、滑模变结构控制、参数辨识的自适应控制等，采用微机控制器后都迎刃而解了。此外，微机控制技术又给交流调速系统增加了多方面的功能，特别是故障诊断技术得到了完全的实现。

计算机控制技术的应用提高了交流调速系统的可靠性和操作、设置的多样性和灵活性，降低了变频调速装置的成本和体积。以微处理器为核心的数字控制已成为现代交流调速系统的主要特征之一。

交流调速技术的发展过程表明，现代工业生产及社会发展的需要推动了交流调速的发展；现代控制理论的发展和运用、电力电子技术的发展和运用、微机控制技术及大规模集成电路的发展和运用为交流调速的发展创造了技术和物质条件。

20 世纪 90 年代以来，电力传动领域面貌焕然一新。各种类型的异步电动机变频调速系统、各种类型的同步电动机变频调速系统覆盖了电力传动领域的方方面面：电压等级从 110V 到 10000V，容量从数百瓦的伺服系统到数万千瓦的特大功率调速系统，从一般要求的调速传动到高精度、快速响应的高性能调速传动，从单机调速传动到多机协调调速传动，几乎无所不有。

交流变频调速控制系统的应用领域主要有以下三个方面：

（1）一般性能的节能调速

在过去的“不变速交流拖动”中，风机、水泵等通用机械的容量几乎占工业电力拖动总容量的一半以上，只是因为过去的交流电动机系统本身不能调速，不得不依赖挡板和阀门来调节送风和供水的流量，因而把许多电能白白浪费了。采用变频调速后，每台风机、水泵平均可以节约 20% 以上的电能。大量的空调装置采用了变频调速不但实现了节能，还提高了风量（或温度）调节的灵敏度，从而提高了人的舒适度。在我国，家用空调器正在使用“变频调速器+无刷直流电动机”作为驱动装置以提高空调器的舒适度，并降低能耗；目前，家用冰箱、洗衣机等也正在采用变频调速技术以节约电能。以上系统对调速范围和动态性能的要求都不高，只需要具有一般的调速性能即可。

（2）高性能的交流调速系统和交流伺服系统

许多要求调速精度高、动态响应好的场合，由于交流电动机比直流电动机结构简单、成本低廉、工作可靠、维护方便、惯量小、效率高、性能高，现在交流调速系统和交流伺服系统已逐步取代了直流调速和直流伺服系统。特别是一些高动态、高精度、宽调速范围的调速系统，采用永磁同步电动机控制系统已成为主流。

（3）直流调速难以实现的领域

在大容量、高转速的电机拖动等领域，直流电动机的换向能力限制了它的容量转速等。交流电动机没有换向问题，不受这种限制。因此，在以下领域交流调速系统大显身手：

- 1) 特大容量的拖动设备，如超大功率轧机、矿井卷扬机、电力机车、风力发电机等。
- 2) 极高转速的拖动，如高速磨头、离心机等。

- 3) 对功率密度比/体积密度比的要求较高的系统, 如电力机车、电动汽车等。
- 4) 要求防火、防爆的场所。

1.3 变频调速控制技术的发展趋势

交流调速取代直流调速已是不争的事实, 当前交流调速系统正朝着高电压、大容量、高性能、高效率、绿色化、网络化的方向发展, 主要表现在: 控制理论与控制技术方面的研究与开发; 变频器主电路拓扑结构的研究与开发; PWM 模式改进与优化研究; 中压变频装置(我国称为高压变频装置)的研究与开发。

1. 控制理论与控制技术方面的研究与开发

十几年的应用实践表明, 随着交流调速的发展, 矢量控制理论及其他现代控制理论的应用不断完善, 进一步提高了交流调速系统的控制性能。各种控制结构所依据的都是被控对象的数学模型, 因此, 为了建立交流调速系统的合理的控制结构, 仍需对交流电动机数学模型的性质、特点及内在规律做深入研究和探讨。

按转子磁链定向的异步电动机矢量控制系统实现了定子励磁电流和转矩电流的完全解耦, 然而转子参数估计的不准确及参数变化造成定向坐标的偏移是矢量控制研究中必须解决的重要问题之一。

直接转矩控制技术在应用实践中不断完善和提高, 其研究的主攻方向是进一步提高低速时的控制性能, 以扩大调速范围。实现无硬件测速传感器的系统已有许多应用, 但是转速推算精度和控制的实时性有待于深入研究与开发。

近年来, 为了进一步提高和改善交流调速系统的控制性能, 国内外学者致力于将先进的控制策略引入到交流调速系统中来, 如滑模变结构控制、非线性反馈线性化控制、Backstepping 控制、自适应逆控制、内模控制、自抗扰控制、智能控制等, 已经成为交流调速发展中新的研究内容。

2. 变频器主电路拓扑结构的研究与开发

提高变频器的输出效率是电力电子技术发展中主要解决的重要问题之一。提高变频器输出效率的主要措施是降低电力电子器件的开关损耗。具体解决方法是开发研制新型拓扑结构的变流器, 如 20 世纪 80 年代中期美国威斯康星大学 Divan 教授提出的谐振直流环逆变器, 可使电力电子器件在零电压或零电流下转换, 即工作在所谓“软开关”状态下, 从而使开关损耗降低到接近于零。

此外, 电力电子逆变器正朝着高频化、大功率方向发展, 这使装置内部电压、电流发生剧变, 不但使器件承受很大的电压、电流应力, 而且在输入、输出引线及周围空间里产生高频电磁噪声, 引发电气设备误动作, 这种公害称为电磁干扰 (Electro Magnetic Interference, EMI)。抑制 EMI 的有效方法也是采用软开关技术。具有软开关功能的谐振逆变器, 国内外都在积极进行研究与开发。串并联谐振式变频器将会有越来越多的应用。

针对交—交变频器的输出频率低(不到供电频率的 1/2)的缺点, 20 世纪 80 年代, 人们开始研究矩阵式变频器 (Matrix Converter) (见图 1-8)。矩阵式变频器是一种可选择的交—交变频器结构, 其输出频率可以提高到 45Hz 以上。这种变频器可以拓扑展成 AC-DC、

DC-AC 或 AC-AC 变换，且不受相数和频率的限制，并且能量可以双向流动，功率因数可调。尽管这种变频器所需功率器件较多，但它的一系列优点已经引起人们的广泛关注，必将有一个很好的发展前景。

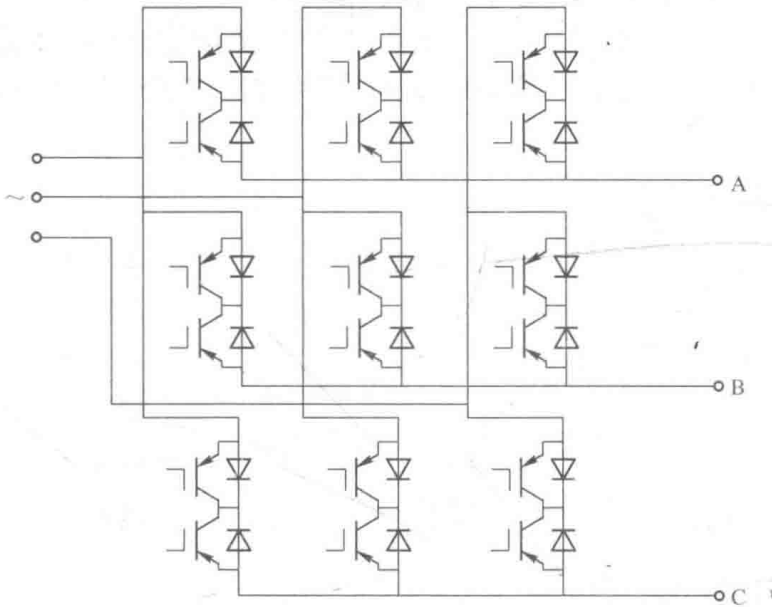


图 1-8 矩阵式变频器主电路原理图

具有 PWM 整流器/PWM 逆变器的“双 PWM 变频器”（见图 1-9）已进入实用化阶段，并且迅速向前发展。这种变频器的变流功率因数为 1，能量可以双向流动，网侧和负载侧的谐波量比较低，减少了对电网的公害和电动机的转矩脉动，被称为“绿色变频器”，代表了交流调速一个新的发展方向。

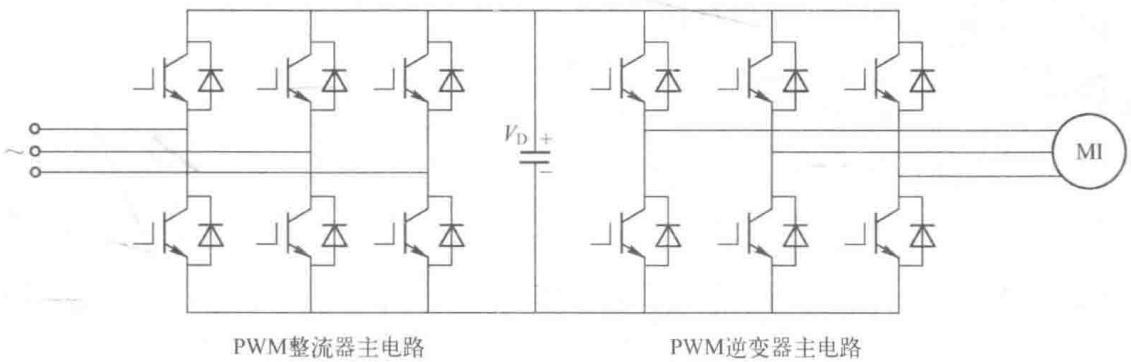


图 1-9 由三相、两电平变流器构成的双侧 PWM 变频器主电路

3. PWM 模式改进与优化研究

近年来，随着中压变频器的兴起，对于 SVPWM 模式进行了改进和优化研究，其中为解决三电平中压变频器中点电压偏移问题，研究了虚拟电压矢量合成 PWM 模式（不产生中点电压偏移时的电压长矢量、短矢量、零矢量的组合），已取得了具有实用价值的研究成果；用于级联式多电平中压变频器的脉冲移相 PWM 技术已有应用。