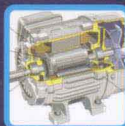
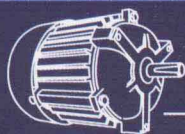
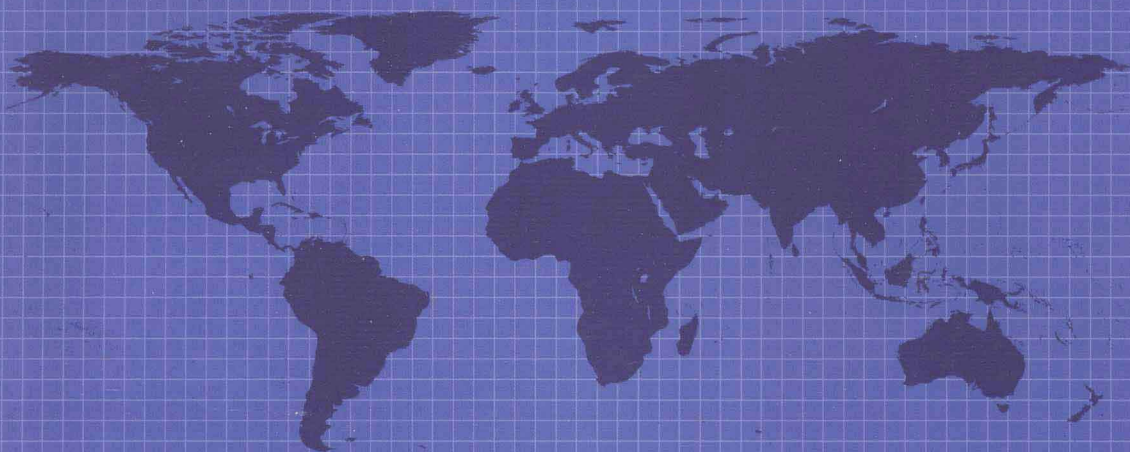




普通高等教育“十二五”机电类规划教材



交直流调速系统

李正熙 杨立永 编著

- 详细介绍工程设计法在调速系统中的应用
- 系统讲解永磁同步电动机的控制方法
- 注重工程应用
- 反映最新研究成果



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

普通高等教育“十二五”机电类规划教材

交直流调速系统

李正熙 杨立永 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书注重实践,以实际应用为导向,强调交直流调速系统的分析和设计方法。在保证理论体系完整性的前提下,避免复杂的理论推导和数学运算,兼顾理论的完整性和技术实践的可行性。

本书分为上、下两篇,上篇(第1~5章)为直流调速系统,下篇(第6~11章)为交流调速系统。直流调速系统部分详细阐述系统的分析方法和控制器的设计方法;交流调速系统部分强调矢量控制系统的物理意义,在此基础上介绍各种矢量控制系统的分析设计方法,并详细讲解永磁同步电动机的不同电流控制模式和两种弱磁调速的控制方法。

本书可作为电气工程、机电工程、自动化等专业的本科生和研究生的教材,也可作为相关工程技术人员的参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

交直流调速系统/李正熙,杨立永编著. —北京:电子工业出版社,2013.2
ISBN 978-7-121-19493-1

I. ①交… II. ①李… ②杨… III. ①直流电机—调速—高等学校—教材 ②交流电机—调速—高等学校—教材 IV. ①TM330.12 ②TM340.12

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第017797号

责任编辑:万子芬 特约编辑 徐 宏

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:19.25 字数:493千字

印 次:2013年2月第1次印刷

印 数:3500册 定价:38.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

交直流调速系统以交流电动机和直流电动机的控制技术为主要内容,是电气工程、机电工程、自动化等专业的主干课程。

近 20 年来,随着控制理论与控制工程、电力电子学和微处理器技术的飞速发展,交直流电动机控制技术的实践和理论研究也呈现突飞猛进之势,因此,在组织本书的内容时,作者尽量采用最新的研究成果,以反映电动机控制技术的新发展。

本书分为两篇,上篇为直流调速系统,下篇为交流调速系统。目前,交流调速系统已经在各个应用领域全面取代了直流调速系统,占据了统治地位。但是,从本质上讲,直流调速系统和交流调速系统又具有相似的控制结构,因此,直流调速系统是分析和设计交流调速系统的基础。

基于以上事实,本书在上篇直流调速系统部分,强调自动控制原理在电动机控制中的应用,主要讲解转速调节器和电流调节器的工程设计法,这种工程设计法经过改造后就可以应用到交流调速系统的设计中。

在下篇交流调速系统部分,以异步电动机的矢量控制系统为主要内容,强调在电动机物理模型基础上的矢量变换,突出了矢量控制系统的物理意义。鉴于永磁同步电动机的应用越来越广泛,本书详细地讲解了永磁同步电动机的几种电流控制模式,特别强调了永磁同步电动机的两种弱磁调速方法,希望这些内容能够对读者有所帮助。另外,下篇还总结了作者近年来的科研成果,较详细地讨论了逆变器的建模问题和异步电动机的磁链估计技术,这些内容都已经通过了作者的实验验证,对实际系统的开发将会有所帮助。

本书的上篇直流调速系统部分由李正熙教授编写,下篇交流调速系统部分由杨立永副教授编写,其中的部分内容参考了李华德教授编著的《电力拖动自动控制系统》。赵仁涛副教授为本书的出版提供了很多帮助,研究生张彦秋、闫素芳、陈强年和刘伟鹏等人也参加了本书的资料整理、录入和校对工作。另外,还有很多同志为本书的出版做出了很大的贡献,这里一并表示深深的谢意。

由于水平有限,尽管我们在编写过程中做出了很大的努力,但难免有错误和不足之处,敬请广大同行和读者批评指正。

作 者

2012 年 12 月 20 日

目 录

第 0 章 绪论	1
0.1 电力拖动自动控制系统与调速系统	1
0.2 调速系统的发展历史	2
0.3 交流调速系统的应用	4
0.4 交流调速系统的发展趋势	5

上篇 直流调速系统

第 1 章 直流调速系统的基本概念	10
1.1 直流电动机的调速方法	10
1.1.1 调压调速	10
1.1.2 调励磁调速	12
1.1.3 调电阻调速	12
1.2 晶闸管整流器-电动机开环调速系统	13
1.2.1 发电机-电动机系统	13
1.2.2 V-M 系统的组成及开环调速特性	14
1.3 PWM 直流电源	15
1.3.1 简单的不可逆 PWM 直流电源	16
1.3.2 具有制动能力的不可逆 PWM 直流电源	16
1.3.3 双极式可逆 PWM 直流电源	18
1.3.4 单极式和受限单极式可逆 PWM 直流电源	20
1.3.5 PWM-M 系统的开环机械特性	21
1.4 调速系统的性能指标	22
1.4.1 静态指标	22
1.4.2 动态指标	25
思考题与习题	28
第 2 章 单闭环直流调速系统	29
2.1 具有转速负反馈的直流调速系统	29
2.1.1 系统的组成及工作原理	29

2.1.2	系统的稳态性能分析	31
2.1.3	单闭环速度反馈系统的动态分析	35
2.2	具有电流截止负反馈的转速闭环调速系统	40
2.2.1	系统的组成	40
2.2.2	系统的性能分析	41
2.2.3	给定积分器	43
2.2.4	系统无静差的实现	44
2.2.5	具有电流截止负反馈的无静差调速系统	47
2.3	电压负反馈单闭环直流调速系统	49
	思考题与习题	52
第3章	转速、电流双闭环直流调速系统	54
3.1	快速系统与最佳过渡过程	54
3.1.1	快速系统	54
3.1.2	最大电流约束条件下的最佳起动过程	54
3.1.3	最大电流约束条件下的最佳制动过程	56
3.2	转速、电流双闭环直流调速系统基础	57
3.2.1	单闭环调速系统存在的问题	57
3.2.2	转速、电流双闭环调速系统的组成	58
3.2.3	双闭环调速系统的静特性	59
3.2.4	双闭环调速系统的动态性能	61
3.3	具有电流自适应功能的双闭环调速系统	64
3.3.1	电流断续问题的提出	64
3.3.2	电流自适应双闭环调速系统	65
3.4	带励磁控制的直流调速系统	68
3.4.1	恒转矩调速与恒功率调速	68
3.4.2	两种带励磁控制的调速系统	68
	思考题与习题	71
第4章	直流调速系统的工程设计与调试	72
4.1	典型系统的性能指标与参数的关系	72
4.1.1	典型Ⅰ型系统	73
4.1.2	典型Ⅱ型系统	75
4.1.3	典型Ⅰ、Ⅱ型系统的性能指标比较	80
4.2	系统的校正和调节器的设计	82
4.2.1	直接校正成典型系统	83
4.2.2	低频大惯性环节的近似处理	84
4.2.3	高频小惯性群的近似处理	86
4.2.4	高次项的近似处理	89

4.3 双闭环直流调速系统的工程设计	90
4.3.1 参数的确定和测试	91
4.3.2 电流环的设计	93
4.3.3 转速环的设计	96
4.4 双闭环直流调速系统的调试	103
4.4.1 整流装置中触发器的调试	103
4.4.2 电流环的调试	104
4.4.3 转速环的调试	104
4.4.4 系统的静特性调试	105
4.4.5 故障分析	105
思考题与习题	106
第 5 章 直流电动机的可逆调速系统	108
5.1 可逆调速系统的主电路	108
5.1.1 电枢反接可逆线路	108
5.1.2 励磁可逆线路	110
5.1.3 电枢可逆系统和磁场可逆系统的比较	111
5.2 V-M 可逆系统的工作状态分析	111
5.2.1 V-M 系统的两种工作状态	111
5.2.2 可逆系统的四象限运行	112
5.3 晶闸管反并联系统的可逆控制方案及实现方法	113
5.3.1 环流的产生、种类及抑制方法	113
5.3.2 $\alpha=\beta$ 配合控制的有环流可逆调速系统	115
5.3.3 可控环流可逆调速系统	117
5.4 逻辑无环流可逆调速系统	119
5.4.1 逻辑控制无环流系统的方案及特点	119
5.4.2 可逆系统对无环流逻辑控制器的要求	121
5.4.3 无环流逻辑控制器的实现	122
5.4.4 逻辑无环流可逆调速系统的工作原理	126
思考题与习题	128

下篇 交流调速系统

第 6 章 基于稳态数学模型的异步电动机变频调速系统	130
6.1 三相异步电动机的稳态等效电路	130
6.2 基于稳态数学模型的控制方式	131
6.2.1 电压-频率的协调控制方式	132
6.2.2 转差频率控制的基本原理	137
6.3 电压源型恒压频比控制的变频调速系统	141
6.4 转差频率控制的变频调速系统	144

6.4.1 电流源型转差频率控制的变频调速系统	144
6.4.2 电压源型转差频率控制的变频调速系统	146
思考题与习题	147
第 7 章 变频器及 PWM 调制技术	148
7.1 变频调速装置及其电源特性	148
7.2 变频器的基本结构	150
7.3 电压正弦 PWM 调制技术	152
7.3.1 SPWM 的基本原理	152
7.3.2 三相桥式逆变器的主电路	154
7.3.3 单极性 SPWM 调制方法	154
7.3.4 单极性 SPWM 波的谐波分析	157
7.3.5 双极性 SPWM 调制方法	158
7.3.6 SPWM 的调制方式	161
7.3.7 双极性 SPWM 调制方法的实现	163
7.4 PWM 模式的优化	166
7.4.1 准正弦波脉宽调制	166
7.4.2 消除特定谐波法	167
7.5 SVPWM 调制方法	169
7.5.1 电压空间矢量的定义	169
7.5.2 逆变器的开关状态和电压矢量	170
7.5.3 SVPWM 算法	171
7.5.4 电压矢量的作用顺序及电压利用率	172
7.6 死区机理及其补偿方法	173
7.6.1 逆变器输出电压的误差分析	174
7.6.2 死区补偿方法	178
思考题与习题	180
第 8 章 基于动态数学模型的异步电动机矢量控制系统	182
8.1 矢量控制的基本概念	182
8.1.1 直流电动机和异步电动机的电磁转矩	182
8.1.2 矢量控制的基本思想	183
8.2 异步电动机在不同坐标系上的数学模型	184
8.2.1 交流电动机的坐标系与空间矢量的概念	185
8.2.2 异步电动机在三相坐标系上的数学模型	187
8.2.3 坐标变换及变换矩阵	191
8.2.4 异步电动机在两相静止坐标系上的数学模型	199
8.2.5 异步电动机在两相同步旋转坐标系上的数学模型	201
8.2.6 异步电动机在两相坐标系上的状态方程	203
8.3 磁场定向和矢量控制方程式	205
8.3.1 按转子磁场定向的异步电动机矢量控制系统	205

8.3.2 异步电动机的其他两种磁场定向方法	207
8.4 异步电动机矢量控制系统	209
8.4.1 异步电动机的直接矢量控制系统	209
8.4.2 异步电动机的转差型矢量控制系统	211
思考题与习题	213
第 9 章 异步电动机的直接转矩控制技术	215
9.1 圆形磁链轨迹的直接转矩控制	215
9.1.1 直接转矩控制基础	215
9.1.2 圆形磁链轨迹直接转矩控制的原理	217
9.1.3 滞环控制器的数字实现	221
9.2 六边形磁链轨迹的直接转矩控制	224
9.2.1 六边形磁链运动轨迹和电压矢量的关系	224
9.2.2 六边形磁链轨迹的直接转矩控制系统的基本结构	226
9.3 使用 SVPWM 调制方法的直接转矩控制系统	228
9.3.1 转子磁场定向的 DTC-SVPWM 控制系统	229
9.3.2 带有转矩闭环的 DTC-SVPWM 控制系统	230
9.3.3 基于极坐标系的双闭环 DTC-SVPWM 控制系统	231
9.4 按定子磁场定向的 DTC-SVPWM 控制系统	232
9.4.1 按定子磁场定向的异步电动机的数学模型	233
9.4.2 DTC-SVPWM 控制系统的调节器设计方法	235
思考题与习题	238
第 10 章 异步电动机的磁链估计技术	239
10.1 磁链检测方法的分类	239
10.2 磁链的电压模型	240
10.2.1 磁链在 α - β 坐标系上的电压模型	240
10.2.2 磁链在 α - β 坐标系上的电流模型	244
10.2.3 在按转子磁场定向的 M - T 坐标系上的磁链观测器	246
10.3 定子相电压的估计与测量	247
10.3.1 相电压重构	248
10.3.2 相电压与线电压之间的关系	250
10.4 电压模型的改进	250
10.4.1 低通滤波器法	250
10.4.2 级联低通滤波器法	254
10.4.3 交叉校正法	257
思考题与习题	260
第 11 章 永磁同步电动机调速系统	261
11.1 永磁电动机	261
11.1.1 永磁电动机的分类	261

11.1.2 永磁体在转子上的安装方式	263
11.2 永磁同步电动机的数学模型及稳态特性	264
11.2.1 永磁同步电动机在 $d-q$ 坐标系上的数学模型	264
11.2.2 永磁同步电动机在 $\alpha-\beta$ 坐标系上的数学模型	266
11.2.3 永磁同步电动机的相角特性	268
11.3 电流控制方式	269
11.3.1 $i_d=0$ 的控制方式	269
11.3.2 MTPA 控制方式	270
11.3.3 MTPV 控制方式	272
11.3.4 弱磁控制方式	273
11.3.5 最小功率损耗控制	274
11.3.6 各种控制方式的比较	275
11.4 电流、电压限制下的最大输出转矩	276
11.5 永磁同步电动机的矢量控制系统	281
11.5.1 基速以下的控制方法	282
11.5.2 基速以下不同控制方式的比较	284
11.6 弱磁控制方法	286
11.6.1 前馈弱磁控制方法	286
11.6.2 反馈弱磁控制法	293
思考题与习题	294
参考文献	296

第0章 绪 论

0.1 电力拖动自动控制系统与调速系统

广义的电力拖动系统是指在各种工业生产过程中，按照一定的要求，实现由电能到机械能，或者由机械能到电能转换的系统。

目前，就世界范围内看，电力拖动系统消耗的总电能占总发电量的 50%，其中 75%~80% 的拖动系统处于恒速运行状态，在运行过程中不对转速进行调节；而在剩余 20%~25% 的电力拖动系统中，需要对转速或转矩进行控制，以满足生产工艺的要求，而且该比例还在迅速地增长。

电力拖动自动控制系统则是利用自动控制技术实现的能够满足具体生产要求的电力拖动系统，通常由电动机、传动机构、工作机械和变流装置等部分组成，其结构如图 0-1 所示。

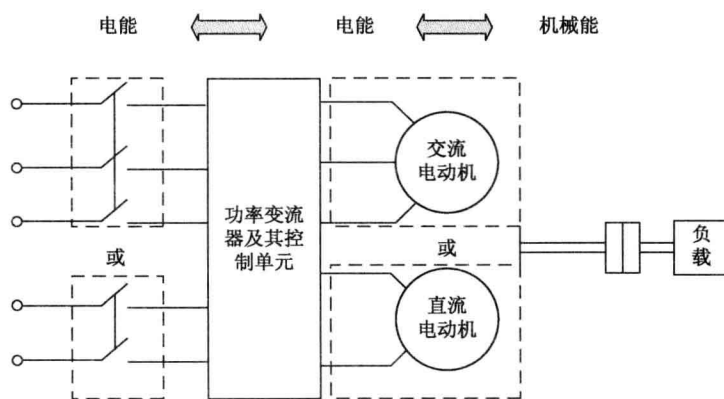


图 0-1 电力拖动自动控制系统的结构图

按照被控制量的不同，电力拖动自动控制系统又分为很多种类型，如张力控制系统、调速系统和位置伺服系统等。

(1) 张力控制系统是以电动机或负载的转矩为被控制量的电力拖动自动控制系统。

(2) 调速系统是以电动机或负载的转速为被控制量的电力拖动自动控制系统，按照所用电动机的不同又分为直流调速系统和交流调速系统。

(3) 位置伺服系统是以电动机或负载的角位移（直线位移）为被控制量的电力拖动自动控制系统。

虽然电力拖动自动控制系统的种类繁多，但是大部分系统是通过控制电动机的转速来工作的，因此，调速系统是最基本和最重要的电力拖动自动控制系统，故本书把调速系统作为研究对象。

0.2 调速系统的发展历史

19 世纪相继诞生了直流电动机和交流电动机,从此人类社会由机械时代进入了电气时代,由于电动机具有性能优良、高效可靠、控制方便等优点,以电动机作为原动机的调速系统(电力拖动自动控制系统)为人类社会的发展和进步做出了巨大的贡献。对于调速系统的发展,不仅要知其然而且要知其所以然,在此简要地回顾一下其发展的历史。

18 世纪末,人类开始把蒸汽作为动力,瓦特发明了能够连续运转的蒸汽机,开创了机器时代。

1821 年,英国的法拉第完成了一项重大的发明。之前两年,奥斯特已发现如果电路中有电流通过,它附近的罗盘磁针就会发生偏移。法拉第从中得到启发,认为假如磁铁固定,线圈就可能运动。根据这种设想,他成功地发明了一种简单的装置。在装置内,只要有电流通过线路,线路就会绕着一块磁铁不停地转动,事实上法拉第发明的是第一台电动机,虽然装置简陋,但它却是今天世界上使用的所有电动机的祖先。

1831 年,法拉第发现了电磁感应现象。

1834 年,德国的雅可比制造出了由电磁铁构成的直流电动机。

1838 年,雅可比用蓄电池给直流电动机供电以驱动快艇,这是首次使用电力传动装置。

1866 年,西门子发明了自励式直流发电机。

1871 年,凡麦尔发明了交流发电机。

1885 年,意大利物理学家费拉利斯发现两相电流(线圈)可以产生旋转磁场,并把旋转磁场的思想和铜盘产生感应涡流的思想结合在一起,制成了一台两相感应电动机。

1888 年,费拉利斯又发表了“利用交流电产生旋转磁场”的经典论文,同一时期,特斯拉也独立从事旋转磁场的研究,两个人几乎同时发明了感应电动机。

1889 年,俄罗斯的多利伏-多勃罗伏尔斯基提出了三相制的建议,并设计和制造了三相感应电动机,三相电动机在性能、效率和材料利用率等方面都比两相电动机要好。

1891 年,美国的 Harry Ward Leonard 利用 Ward Leonard 系统(发电机-电动机系统, G-M 系统)实现了对直流电动机的调速,从此以后 Ward Leonard 系统被广泛地应用于各种需要调速的场合。

1929 年, Park 发表了《同步电机的双反应理论(I)——通用分析方法》的经典论文,提出了 $d-q-0$ 变换和瞬态运行时同步电动机的电压方程(Park 方程),为交流电动机的瞬态分析奠定了理论基础。

1935—1938 年, Gabriel Kron 提出了原型机的概念,并利用张量来分析研究旋转电动机,这种方法的特点是,利用原型机的运动方程,通过特定的张量变换,就可以求出其他各种电动机的运动方程,揭示了各种电动机和各种分析方法之间的联系。

20 世纪 20 年代至 60 年代,水银整流器迅速发展并被大量应用,水银整流器是把水银封装在玻璃管内,利用其蒸汽的电弧对大电流进行控制,其性能与晶闸管相似,但水银整流器的压降高,功率损耗大,即使如此,水银整流器还是被广泛地应用于直流传动系统中,这一时期各种整流电路、逆变电路、周波变流电路的理论已经发展成熟并被广泛应用。

20 世纪 40 年代末至 50 年代,对串级调速和以离子变频器实现的交流调速系统进行了一些研究,并提出了无换向器电动机的原理。

1956年,美国贝尔实验室发明了晶闸管,1957年,美国通用电气公司(GE)开发出了第一只晶闸管产品,1958年,实现了商业化,标志着电力电子时代的开始,电子技术进入强电领域,电力电子器件成为弱电控制强电的纽带。

20世纪60年代,电力电子器件全面进入电力拖动领域,以晶闸管组成的可控直流供电系统逐步取代了直流机组和水银整流器。

1972年,F. Blaschke完善了矢量控制系统的基本理论,此后,Leonhard、Gabriel和Okuyama等人实现并完善了异步电动机矢量控制系统。矢量控制系统的基本思想是把一台异步电动机通过矢量变换,变换为一台直流电动机,从而实现了异步电动机中的磁链和转矩的解耦控制,使得交流调速系统的性能开始可以和直流调速系统相媲美,为交流调速系统全面取代直流调速系统奠定了基础。

20世纪70年代以后,由于大电流晶闸管的发展,出现了易于控制、体积小、噪声低的大容量直流电源,从而使直流电动机良好调速性能得以进一步发挥。

20世纪70年代后期,以GTO、BJT、Power-MOSFET为代表的全控型功率器件迅速发展,其显著特点是通过对门极(基极、栅极)的控制,既可以开通功率器件又可以关断功率器件,而且其开关速度普遍高于晶闸管,在此时期,脉宽调制(PWM)技术开始应用于对功率器件的控制中,该技术的广泛应用大大提高了电力电子装置的性能。

1977年,Allan B.Plunkett提出了类似于目前直接转矩控制思想的直接磁链和转矩调节方法,在这种控制方法中,转矩的给定值与反馈值之差通过PI调节器得到转差频率,此转差频率再加上电动机转子转速,得到逆变器应该输出的供电频率;定子磁链的给定值与反馈值之差通过PI调节器得到电压与频率之比,使之与定子频率相乘,得到逆变器应该输出的供电电压幅值,最后通过SPWM方法对电动机进行控制。

20世纪80年代以后,由于永磁材料、电力电子技术和自动控制技术的发展,永磁同步电动机、永磁无刷直流电动机和开关磁阻电动机得到了较快发展。

20世纪80年代中后期,德国鲁尔大学的M. Depenbrock(1988年)教授和日本的I.Takahashi(1986年)教授分别提出了六边形磁链轨迹的直接转矩控制方案和圆形磁链轨迹的直接转矩控制(DTC)方案。DTC具有不同于矢量控制的鲜明特点:不需要旋转坐标变换,在静止坐标系上实现对转矩和磁链的控制;采用砰-砰控制,转矩响应快,适合应用于使用电压源型变频器的机车牵引用传动系统中。

20世纪80年代后期,全数字控制的直流调速系统迅速取代了模拟控制的直流调速系统。以IGBT为代表的复合型器件迅速发展,并广泛应用,这类器件的驱动功率小、通态压降小、载流能力大、可承受电压高,性能十分优越,目前已经成为现代电力电子技术的主导器件。

20世纪90年代至今,交流调速系统的发展极为迅速,具体表现在以下几个方面:

(1) 新型电力电子器件不断涌现,例如,高压HV-IGBT器件、IGCT器件、IEGT器件,同时由于BJT、晶闸管本身存在不可克服的缺陷,目前,BJT已经被淘汰,晶闸管也将被逐步淘汰,1~1000kW的中小功率变频器主要采用IGBT器件。

(2) 以单片机和DSP为代表的控制芯片的性能不断提高,近期TI公司推出了TMS320F28335芯片,时钟频率达到150MHz,32位的CPU支持IEEE-754单精度浮点运算,带34KB的16位SRAM,具有丰富的片上外设。这些高性能的控制芯片大大提高了控制器的运算能力,为复杂算法的实现提供了物质条件。

(3) 交流调速系统的控制理论进一步发展。矢量控制技术和直接转矩控制技术被广泛应用, 已经成为高性能交流调速系统的标准。同时, 各种现代控制理论和控制方法也被引入交流调速系统中, 例如, 非线性反馈线性化控制、滑模变结构控制、逆系统控制、无源控制、Kalman 滤波器……

由以上介绍的发展历史中可以看出, 在 20 世纪的大部分时期内, 直流调速系统在整个电气传动领域占据主导地位, 交流调速系统的多种实现方案虽然早已问世, 并已获得了实际应用, 但其性能却始终无法与直流调速系统相匹敌。由 20 世纪 80 年代开始, 在电力电子技术、微处理器技术和电机控制理论的推动下, 交流调速系统的性能开始能够和直流调速系统的性能相媲美, 目前, 在各个功率等级和各种性能的调速系统中, 交流调速系统都已经取代直流调速系统, 占据了主导地位。

图 0-2 给出了 1990—2005 年直流调速系统和交流调速系统所占市场份额的变化情况。

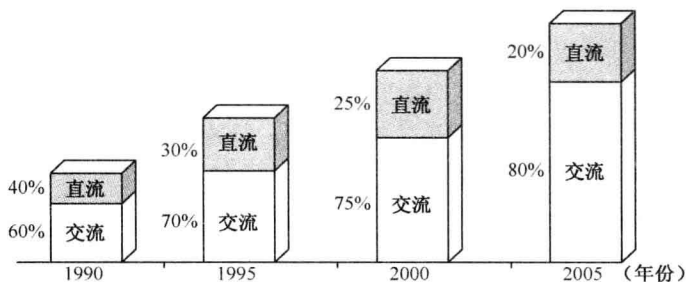


图 0-2 直流调速系统和交流调速系统的市场份额变化

目前, 直流调速系统已经被交流调速系统所取代, 有以下几个方面的原因:

(1) 机械式换向器的表面线速度及换向电压、换向电流都有一个极限容许值, 这就限制了单机的转速和功率, 其极限的功率转速积被限制在 $10^6 \text{ kW} \cdot \text{r/min}$ 。如果超过这个极限容许值, 则会大大增加电动机的制造成本和制造难度, 增加调速系统的复杂性, 因此, 在工业生产的一些要求特高转速、特大容量的场合, 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, 往往要增大电枢和换向器的直径, 这使得电动机的体积增大, 导致转动惯量增加, 因此, 对于要求快速响应的工艺, 若采用直流调速方案则难以实现。

(3) 必须对机械式换向器经常进行检查和维修, 电刷必须定期更换, 所以, 直流调速系统的维修工作量较大, 维修费用较高, 同时停机检修和更换电刷也影响正常的生产活动。

(4) 在一些易燃、易爆的生产场合, 或在一些多粉尘、多腐蚀性气体的生产场合, 都不宜使用直流电动机。

由于直流电动机在应用中存在以上的限制, 使得直流调速系统的发展也相应受到限制, 但是, 在目前工业生产的许多场合, 仍然沿用以往的直流调速系统, 因此, 在今后相当长的一个时期内, 直流调速系统和交流调速系统将并存, 直流调速系统还将继续发挥作用。

0.3 交流调速系统的应用

由于交流调速系统在电气传动领域已经占领了主导地位, 下面主要介绍交流调速系统的应用情况。交流调速系统已经被广泛应用到了各种工业领域, 如图 0-3 所示。由图可以看出,

功率等级从 0.1kW 到 100Mw，性能由要求不高的供热通风系统到高性能的机器人驱动，交流调速系统几乎涵盖了所有的传动领域。

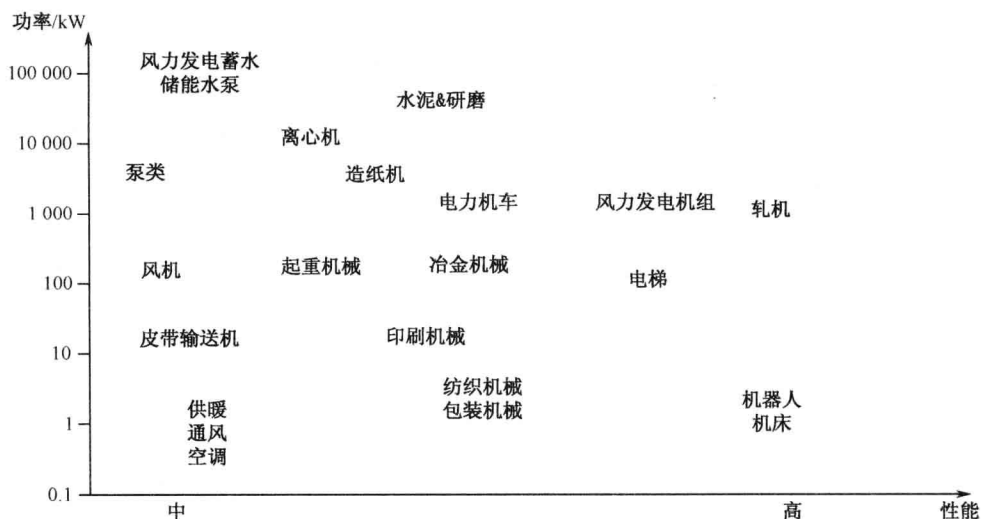


图 0-3 交流调速系统的应用情况

交流调速系统在节能方面的效益尤其显著。据统计，风机、泵类电动机用电量占全国用电量的 31%，占工业用电量的 50%。传统的风机、泵类负载采用挡板和阀门进行流量调节，而电动机的转速基本不变，不同流量时的耗电量变化不大。而此类负载使用变频调速装置后，当用户需要的平均流量较小时，可以通过改变电动机的转速来实现对流量的调节，风机、泵类负载的耗电功率基本上与转速的三次方成正比，据统计，进行这样的改造后，节电率可以达到 20%~60%。目前，已经进行了变频改造的风机、泵类负载的容量只有总容量的 5% 左右，故仍存在很大的节能空间。

近些年来，新能源产业的迅猛发展，也为交流调速系统的应用提供了新的领域。在风力发电机组中，不仅需要使用交流发电机把风能转化成电能，而且需要利用交流调速系统的理论对发电机（风机的转速）的转速进行控制，以得到最优的叶尖速比，获得最大的功率输出，因此，交流调速装置（变流装置）是风力发电机组的核心设备之一。

另外，交流调速装置也是电动车和电力机车的核心设备。

0.4 交流调速系统的发展趋势

当前交流调速系统正朝着高电压、大容量、高性能、高效率、高可靠性、数字化、绿色化、网络化的方向发展，主要体现在以下几个方面。

1. 高性能交流调速系统的研发

到目前为止，矢量控制和直接转矩控制是两种被广泛应用并被普遍认可的高性能控制方法，虽然这两种控制方法已经经过了几十年的使用和完善，但是都存在一些问题需要进一步解决。

矢量控制系统存在的主要问题是，转子磁场定向的精度受电动机参数变化影响严重，在电动机运行的过程中，其参数会发生不同程度的变化，造成磁场定向的误差，进一步导致转

矩控制误差,造成系统性能下降,严重时甚至会造成系统的不稳定,这是矢量控制系统需要进一步解决的问题。

直接转矩控制的主要研究方向是,进一步提高低速时的系统性能,扩大系统的调速范围。

近年来,为了进一步提高交流调速系统的性能,国内外学者已经将各种控制策略引入到交流调速系统中,虽然,这些控制方法大多还处于实验研究阶段,能够应用于实际系统的方法并不多,但是,这些有益探索为进一步提高交流调速系统的性能提供了新的可能。

2. 数字控制理论和设计方法的应用

目前,在对交流调速系统进行设计时,主要使用基于连续系统的控制理论与设计方法,例如,在设计双闭环调速系统中的速度调节器和电流调节器时,往往需要使用工程设计法,利用工程设计法得到控制器的参数后,还需要进行离散化才能得到数字控制器。以上的设计过程,在开关频率足够高、采样周期足够短和动态性能指标要求不高的情况下,才能够使系统的实际性能指标与设计指标相近。

但是,随着对调速系统的性能要求越来越高,必须提高速度环和电流环的响应速度,使得在以上设计过程中的某些假设条件不能得到满足,从而无法得到满意的设计结果,因此,就必须把基于数字控制理论的设计方法,全面引入交流调速系统中,建立一套完整的数字交流调速系统理论。

3. 调速系统的无速度传感器化

调速系统中的速度传感器不仅会增加整个调速系统的成本,而且还会降低整个系统的可靠性,为此,当前交流调速系统的一个发展方向是无速度传感器化。

要实现无速度传感器的交流调速系统,就需要解决转速估计问题,而在转速估计的过程中,又需要使用各种电动机参数,同时需要对电动机磁链进行准确的估计。

在电动机转速较高时,转速估计和磁链估计的难度不大,而在电动机转速较低(或接近零速)时,如何实现转速和磁链的准确估计,同时保证整个系统具有较高的动静态性能,仍然是需要解决的问题。

4. 双 PWM (背靠背) 变频器的广泛应用

双 PWM 变频器的主电路拓扑结构如图 0-4 所示,这种变频器的突出优点在于:

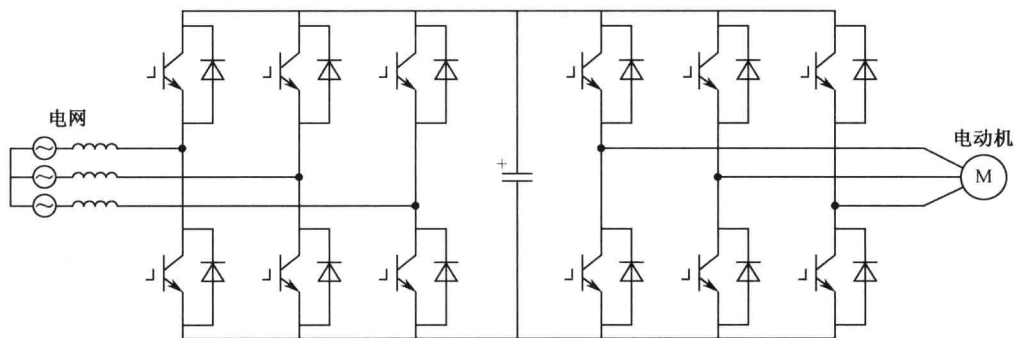


图 0-4 双 PWM 变频器的主电路拓扑结构

(1) 变频器的网侧功率因数可调。

(2) 能量可以双向流动,可以把在制动过程中的能量回馈给电网,从而提高整个系统的

效率，特别是对于势能类负载，节能效果明显。

(3) 网侧电流接近于正弦波，大大降低了对电网的谐波污染。

目前，双 PWM 变频器已经进入实用化阶段，必将迅速普及。

5. 新一代大功率变频装置的研究与开发

目前，大功率变频器已经得到了广泛应用，但是，其主电路的拓扑结构受到电力电子器件耐压等级的限制，目前的主电路具有结构复杂、功率器件多、体积大、控制难度大的缺点，随着变频器功率等级的不断提高，这种矛盾显得越来越突出。

美国 Cree 公司、SIEMENS 公司、东芝公司和 ABB 公司都投入了大量的人力和物力来研制新一代耐高压电力电子器件，可以预见的是，在不久的将来，新一代电力电子器件的研制会有突破性进展，从而新一代大功率变频装置也会随之诞生。