

〔日〕上山直彦 編著

现代交流调速

吴铁坚 译

ニュードライブエレクトロニクス

水利电力出版社

现代交流调速

[日]上山直彦 编著

吴铁坚 译

水利电力出版社

内 容 提 要

本书系统地阐明了交流调速系统的工作原理、组成、特性、试验维修以及应用场合。全书共分九章，包括：交流电动机的类型和特性；电力半导体元件发展动向；电压型逆变器；电流型逆变器；交-交变频器；矢量控制及其应用；交流电动机的维修与试验；交流伺服电动机；控制装置的维修与检查。本书列举了交流调速系统的各种线路、实验图表曲线，并简明扼要地介绍了使用装置的注意事项。

本书可供从事工业电气自动化设计、研究与运行工作的工程技术人员阅读，也可供大专院校的工企专业、应用电子专业等师生参考。

上山直彦编著

ニュードライブエレクトロニクス

電気書院 昭和59年2月改订版

现代交流调速

[日] 上山直彦 编著

吴铁坚 译

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路17号)

各地新华书店经售

北京四季青印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 11.25印张 294千字

1989年7月第一版 1989年7月北京第一次印刷

印数0001—4060册

ISBN 7-120-00798-X/TM·219

定价8.70元

译 者 序

在要求响应快、精度高的调速系统中，过去都采用直流调速系统，近几年，由于交流调速技术的迅速发展，情况有了很大变化。其中一个很重要的原因，是由于半导体本身的发展及其应用技术的进步，一方面使晶闸管的耐压和电流容量有很大提高，另一方面又新研制成以GTO、GTR等为代表的、可以说接近于理想的自控式大功率开关元件，这样不仅减小了功率变换器的体积，并且提高了性能。另一个原因是由于微机的应用，使许多复杂的控制方式得以实现，提高了系统的控制性能，例如采用了转差频率控制、矢量控制的调速系统，其性能完全可以与直流调速系统相媲美，再加上异步电动机本身所具有的、结构简单坚牢、效率高、省维修以及可适用于恶劣环境等优点，使许多本应或无法采用直流调速的系统，已为交流调速系统所代替，这种发展趋势，日见明显。

此外，象风机水泵等过去是恒速运行的拖动系统，改用变频器调速运行之后，在节能方面将可以取得很大经济效益，这对解决能源短缺的问题，尤有重要意义。

由于上述原因，交流调速系统的组成以及应用，越来越重要，并已成为一门新的学科，受到人们的普遍重视。

本书是以变频调速为主，介绍各种变频用功率变换器的工作原理、组成以及新的控制方式，还包括运行、保护、调试、维修等与实际有关的大量线路、图表、曲线以及实验数据，很适合于从事工业电气自动化设计、研究与运行工作的工程技术人员阅读，亦可供大专院校有关专业的师生参考使用。

本书的文字符号表示前后不尽统一，在翻译过程中，除了个别地方以外，都一一作了统一和修正。

译者在翻译过程中，庄跃民同志对个别章节部分内容进行了

校订，在此表示衷心感谢。

由于译者水平有限，译文错误在所难免，切望读者批评指正。

北京联合大学机械工程学院教授

吴铁坚

一九八九年一月

目 录

第一章 交流电动机的类型和特性	1
1-1 交流电动机的分类.....	1
1-2 交流电动机的特性.....	1
1-3 电力拖动基础.....	4
1-3-1 转矩的产生.....	4
1-3-2 电压的产生.....	4
1-3-3 功率的关系.....	5
1-3-4 转动惯量与旋转物体加减速的关系.....	6
1-3-5 基本运动方程式.....	7
1-3-6 起动时间和加减速时间.....	8
1-4 异步电动机.....	8
1-4-1 异步电动机的种类.....	9
1-4-2 异步电动机的特征.....	9
1-4-3 异步电动机的特性.....	10
1-5 同步电动机.....	11
1-5-1 同步电动机的种类.....	11
1-5-2 同步电动机的特征.....	16
1-5-3 同步电动机的特性.....	17
1-6 电磁转差离合器电动机.....	19
1-6-1 电磁转差离合器电动机的特征.....	19
1-6-2 电磁转差离合器电动机的特性.....	20
1-7 交流换向器电动机.....	20
1-7-1 单相串激电动机.....	21
1-7-2 单相推斥电动机.....	22
1-7-3 三相串激电动机.....	22
1-7-4 三相并激电动机.....	23
第二章 电力半导体元件发展动向	25

2-1 大幅度提高晶闸管的容量和开关速度	25
2-1-1 定额的变迁	25
2-1-2 大幅度提高功率的先进技术	26
2-1-3 向着高耐压、大电流的方向发展	30
2-1-4 提高开关速度	31
2-2 光控晶闸管	33
2-3 自控式开关元件	36
2-3-1 大功率晶体管	36
2-3-2 可关断晶闸管	40
2-3-3 大功率MOS场效应管	43
2-3-4 各种开关元件的比较	45
2-4 复合化	46
2-4-1 双向导通晶闸管	46
2-4-2 逆导晶闸管	46
2-4-3 模块化	47
2-5 可靠性	48
第三章 电压型逆变器	51
3-1 概述	51
3-2 电压型逆变器的种类和特性	51
3-2-1 电压型逆变器的基本电路	51
3-2-2 电压型逆变器的分类	53
3-2-3 晶闸管逆变器	55
3-2-4 晶体管逆变器	59
3-2-5 可关断晶闸管 GTO 逆变器	60
3-3 PAM控制和PWM控制	62
3-3-1 电压型逆变器的电压控制	62
3-3-2 PAM 控制	64
3-3-3 PWM控制	66
3-3-4 改进波形的方法	71
3-4 电压型逆变器的保护	74
3-4-1 逆变器所使用元件的特性及其保护	74
3-4-2 晶闸管逆变器的保护	75

3-4-3	晶体管逆变器的保护	78
3-4-4	GTO逆变器的保护	81
3-5	电压型逆变器在 V/F 控制中的应用	83
3-5-1	V/F 控制电压型逆变器的电路和特性	83
3-5-2	异步电动机的不稳定现象	84
3-5-3	再生制动方式	87
3-5-4	瞬时断电补偿及工频电源与逆变器的切换	89
3-6	电压型逆变器在调速系统中的应用	92
3-6-1	转差频率控制	92
3-6-2	异步电动机的矢量控制	93
3-6-3	同步电动机的调速系统	95
3-7	异步电动机的逆变器驱动和效率	96
3-7-1	逆变器所使用的半导体元件和效率	96
3-7-2	PWM逆变器的开关频率和效率	97
3-7-3	异步电动机的高效率运行	98
3-8	使用电压型逆变器时的注意事项	99
3-8-1	使用升压变压器的情况	99
3-8-2	电压型逆变器输出的接通与关闭	100
3-8-3	异步电动机改善功率因数用电容器	100
3-8-4	PWM逆变器的输入电流不对称	101
3-8-5	无线电噪音	101
3-8-6	电动机的温升	102
3-8-7	接地继电器的应用	102
3-8-8	异步电动机的磁噪音	103
3-8-9	逆变器容量及其配套电动机的容量	103
第四章	电流型逆变器	105
4-1	概述	105
4-1-1	电流型逆变器的分类	105
4-1-2	电流型逆变器电路的工作原理	106
4-2	电流型逆变器电路	108
4-2-1	串联二极管式电流型逆变器电路	108
4-2-2	利用大功率晶体管同时换流的逆变器电路	112

4-2-3 带辅助换流晶闸管的电流型逆变器电路	115
4-3 电流型逆变器的调速系统	118
4-3-1 主电路的工作原理	118
4-3-2 控制电路的工作原理	119
4-3-3 保护电路	122
4-3-4 V/F控制的特点和特性	123
4-4 交流电动机的控制方式	124
4-4-1 异步电动机的V/F控制	124
4-4-2 异步电动机的转差频率控制	125
4-4-3 同步电动机的调速运行	127
4-5 电流型逆变器输出电流波形的改进	129
4-5-1 输出电流分量和异步电动机转矩脉动	129
4-5-2 多重电流型逆变器	130
4-5-3 PWM控制电流型逆变器	135
4-6 代替直流电动机的应用	136
4-6-1 V/F控制电流型逆变器的应用	136
4-6-2 矢量控制电流型逆变器的应用	139
4-7 在节能方面的应用	143
4-7-1 实现节能运行的应用实例	144
4-7-2 节能运行的控制方式	145
4-7-3 应用节能技术时注意事项	150
第五章 交-交变频器	155
5-1 交-交变频器的基本组成	155
5-2 可控整流器	155
5-2-1 三相桥式整流器	155
5-3 交-交变频器	162
5-3-1 正弦波交-交变频器的工作原理	162
5-3-2 三相桥式正弦波交-交变频器	167
5-4 交-交变频器新的控制方式	180
5-4-1 降低交-交变频器的无功功率	180
5-4-2 降低交-交变频器输入电流高次谐波	195
5-4-3 电流控制特性的改善	200

5-4-4	异步电动机的高速运行	204
5-4-5	控制电路的简化	205
第六章 矢量控制及其应用		208
6-1	电动机的控制	208
6-1-1	速度控制的基本原理	208
6-1-2	直流电动机	209
6-1-3	同步电动机	211
6-1-4	异步电动机	214
6-2	矢量控制	216
6-2-1	矢量控制基本原理	217
6-2-2	矢量控制基本电路	221
6-2-3	检测磁通方式的矢量控制	225
6-2-4	转差频率方式的矢量控制	228
6-2-5	矢量控制的特性	231
6-3	矢量控制电路的组成	235
6-3-1	正交分量的矢量运算	236
6-3-2	极坐标分量的矢量运算	237
6-3-3	采用微机的矢量运算	238
6-3-4	混合式的矢量控制	241
6-3-5	多微机矢量控制系统	243
6-4	矢量控制的应用	247
6-4-1	矢量控制的特点	247
6-4-2	在伺服电动机上应用	249
6-4-3	在研光机生产线上应用	249
6-4-4	在铁板卷取机上应用	250
6-4-5	在主轧机上应用	251
第七章 交流电动机的维修与试验		253
7-1	交流电动机的维修	253
7-1-1	电动机的起动	254
7-1-2	电动机的运行	255
7-1-3	电动机的日常检查	256
7-1-4	电动机的定期检查	257

7-1-5 特殊电动机的维修	259
7-2 轴承	259
7-2-1 滚动轴承	259
7-2-2 滑动轴承	262
7-2-3 滚动轴承和滑动轴承的连接	263
7-3 振动	263
7-3-1 振动原因的调查	263
7-3-2 振动原因及排除措施	264
7-3-3 振动的允许值	268
7-4 噪声	268
7-4-1 电磁噪声	268
7-4-2 机械噪声	270
7-4-3 通风噪声	271
7-5 轴电压	271
7-5-1 由于轴电流所造成的损伤	271
7-5-2 轴电压的大小	271
7-5-3 解决轴电压的措施	272
7-6 绝缘	273
7-6-1 绝缘老化的原因	273
7-6-2 绝缘诊断的要领	274
7-7 试验	275
7-7-1 测定仪表	276
7-7-2 试验方法	279
第八章 交流伺服电动机	293
8-1 交流伺服电动机	293
8-1-1 工作原理	293
8-1-2 伺服电动机的设计	295
8-2 同步式伺服电动机	298
8-2-1 控制装置的组成	298
8-2-2 特性	300
8-2-3 永久磁铁及其种类	302
8-3 异步式伺服电动机	303

8-3-1	控制装置的组成	303
8-3-2	利用微机作运算处理	304
8-3-3	特性	305
8-4	速度检测器	307
8-4-1	各种速度检测器的比较	307
8-4-2	应用旋转变压器的数字式旋转检测器	309
8-5	在应用上注意事项	310
8-5-1	系统分析	310
8-5-2	伺服电动机的选择	311
第九章	控制装置的维修与检查	315
9-1	控制装置的试验	315
9-1-1	一般性试验	315
9-1-2	通电准备	316
9-2	电压型大功率晶体管逆变器装置的试验	319
9-2-1	电路组成	319
9-2-2	控制电源的检查	319
9-2-3	保护电路的设定	320
9-2-4	加减速限制电路的设定	324
9-2-5	基准频率的设定	325
9-2-6	GTR基极驱动电路的检查	325
9-2-7	主电路的检查	326
9-2-8	V/F比的设定	326
9-3	电流型晶闸管逆变器装置的试验	329
9-3-1	电路组成	329
9-3-2	控制电源的检查	329
9-3-3	保护电路的设定	330
9-3-4	控制电路	331
9-3-5	主电路运行调试	332
9-4	电压型GTO逆变器装置的试验	336
9-4-1	电路组成	336
9-4-2	控制极电路	337
9-4-3	缓冲电路	339

9-4-4 保护电路	340
9-5 控制装置的维修与检查	340
9-5-1 日常检查	340
9-5-2 定期检查	341
9-5-3 主电路元件好坏判断及其更换	343
9-5-4 大容量电解电容的老化	346
9-5-5 故障排除	346

第一章 交流电动机的类型和特性

电动机是把电能转换为机械能的电磁机械，依靠磁通和电流之间的电磁力产生转矩。目前使用的电动机种类繁多，其中有一些属于特殊电机，这里主要介绍，在工业上用得最多的交流电动机的种类和特性。

1-1 交流电动机的分类

交流电动机的类型，可根据特性、结构及驱动方式等加以区分。不同类型的交流电动机、或介乎两种类型之间的交流电动机，有时很难严格加以区分。因此，根据结构和特性，对常用的交流电动机进行分类，如表1-1所示。同一种类型交流电动机，如果采取特殊控制方式，就会显示出不同特性的电动机；或是实用价值不大的特殊交流电动机；都不在讨论之列。在特征上，我们列举了各种交流电动机的特性和常用的控制方式，但在工业上应用时，除须充分考虑控制对象所要求的特性之外，还要很好地分析各种交流电动机的静特性和动特性。

1-2 交流电动机的特性

交流电动机的特性，一般按转矩和转速的关系分类。工业上通常使用的特性如表1-2所示。

(a) 恒速电动机

无论负载大小，大体上以恒速运行的电动机，在工业上广为采用。其中最典型的是三相笼型异步电动机，普遍使用于水泵、风机、搅拌机、加工机械、炼铁及造纸机械等。

(b) 多速电动机

表 1-1

交流电动机的分类

分 类	交流电动机种类		按速度特 性 分 类	特 点
有 换 向 器	交 流 换 向 器 电 机	三相并激电动机	可 调 速	转子馈电式的三相并激电动机等
		三相串激电动机	可 调 速	
		单相串激电动机	可 调 速	交直两用电动机等
无 换 向 器	异 步 电 动 机	三相笼型电动机	恒 速	工业上广泛采用
			可 调 速	改变极数, 定子侧控制, 用半导体控制
		三相绕线型电动机	可 调 速	转子回路串电阻, 串级调速
		单相笼型电动机	恒 速	按起动方式分类
			可 调 速	定子侧控制, 用半导体器件控制
	同 步 电 动 机	三相同步电动机	恒 速	按起动特性分类
			可 调 速	无换向器电动机控制及其他
		单相同步电动机	恒 速	小 功 率
		永磁式电动机	恒 速	一般小功率
			可 调 速	逆变器, 无换向器电动机控制
		反应式电动机	恒 速	只限于小功率
			可 调 速	用逆变器控制等
		爪极式电动机	恒 速	无 刷 式
			可 调 速	无换向器电动机控制等
		电枢旋转式电动机	恒 速	有 刷 式
			可 调 速	无换向器电动机控制
		电磁转差离合器电动机	可 调 速	控制离合器电流

表 1-2

交 流 电 动 机 的 特 性

特 性	电 动 机	用 途
恒 速	异步电动机、同步电动机、反应式电动机等	风机水泵等各种机械
多 速	变极电动机等	隧道通风机、加工机械
可 调 速	无换向器电机、谢菲尔毕斯电动机、克雷默电动机	轧机、研光机、泵等
变 速	高转差异步电动机等	卷取机、伺服机、铁道牵引等

多速电动机是恒速电动机的一种，可按若干等级切换转速，其中最典型的是变极异步电动机，用于隧道通风机和轧机等，它靠切换电动机线圈结构改变转速。

(c) 可调速电动机

可调速电动机是针对恒速电动机说的，恒速电动机适用于基本上以恒速运行的负载，而可调速电动机则适用于速度需要细致调节的机械，这在电力电子拖动中也是一种先进的技术。在调速系统中，长期以来直流电动机占据了统治地位，但它的最大缺点是有换向器和电刷，由于机械磨损等原因，给维修上带来了许多困难，从而促使人们去研究交流电机（无电刷和换向器）的调速系统。近几年，无换向器电机、逆变器电动机以及串级调速系统等均已在各个领域推广使用。今后将根据用途适当选择类型。本书主要介绍采用半导体器件的新的交流电动机的控制方式。

(d) 变速电动机

变速电动机在电源的条件保持不变时，转速是按负载的要求而改变。根据变化程度的大小，有些可合并到恒速电动机中去，但这里所指的是变化明显的、最典型的交流串激换向器电动机和高转差异步电动机等。这些电动机具有串激特性，即负载转矩增大时，转速下降，电动机输出转矩增大。多使用于简单的卷取

机、加工机械等，也有外设电阻器或相应的控制设备，供这种特性的电动机使用。

1-3 电力拖动基础

电力拖动最根本的原理是以最适当的形式、给负载提供它所要求的动力。关于电动机的种类及特性如上所述，现在将介绍有关如何选择这些电动机或拖动系统的基本内容，即如何更好地满足电动机负载所要求的转矩、响应速度以及起动条件等要求。

1-3-1 转矩的产生

电动机的作用是将电能转换为机械能，给所拖动的机械提供动力。设磁场中磁通密度为 B (Wb/m^2)，电流为 I (A)，根据费来明左手定则，导体的单位长度产生的电磁力可用下式表示

$$F = I \times B \text{ (矢积) } (\text{N/m}) \quad (1-1)$$

F 是与 I 和 B 垂直，其方向为右旋螺丝钉从 I 旋往 B 时，螺丝钉前进的方向。所有电动机转矩的产生均应符合式 (1-1)，但也有些在转子上没有绕阻的电动机（例如反应式电动机），其转矩的产生仅用式 (1-1) 是难以说明的。

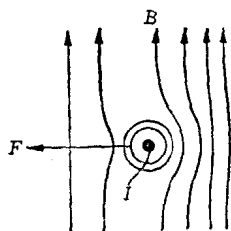


图 1-1 带电流导体在磁场中的受力

电流的周围所形成的磁通，以及由于麦克斯韦扭力定则而作用在物体上的力以及力的方向如图 1-1 所示。也就是说，磁通产生一种仿佛具有张力的力，单位面积的力的大小由下式所示

$$F = B^2 / 2\mu \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (1-2)$$

式中， μ 为磁路的磁导率。

1-3-2 电压的产生

图 1-2 是表示速度电势的原理图。在该图中，假设运动物体在时间为 t 时处于 x 位置，而在 $t + dt$ 时移到 $x + dx$ 位置，此