



通用变频器

应用技术

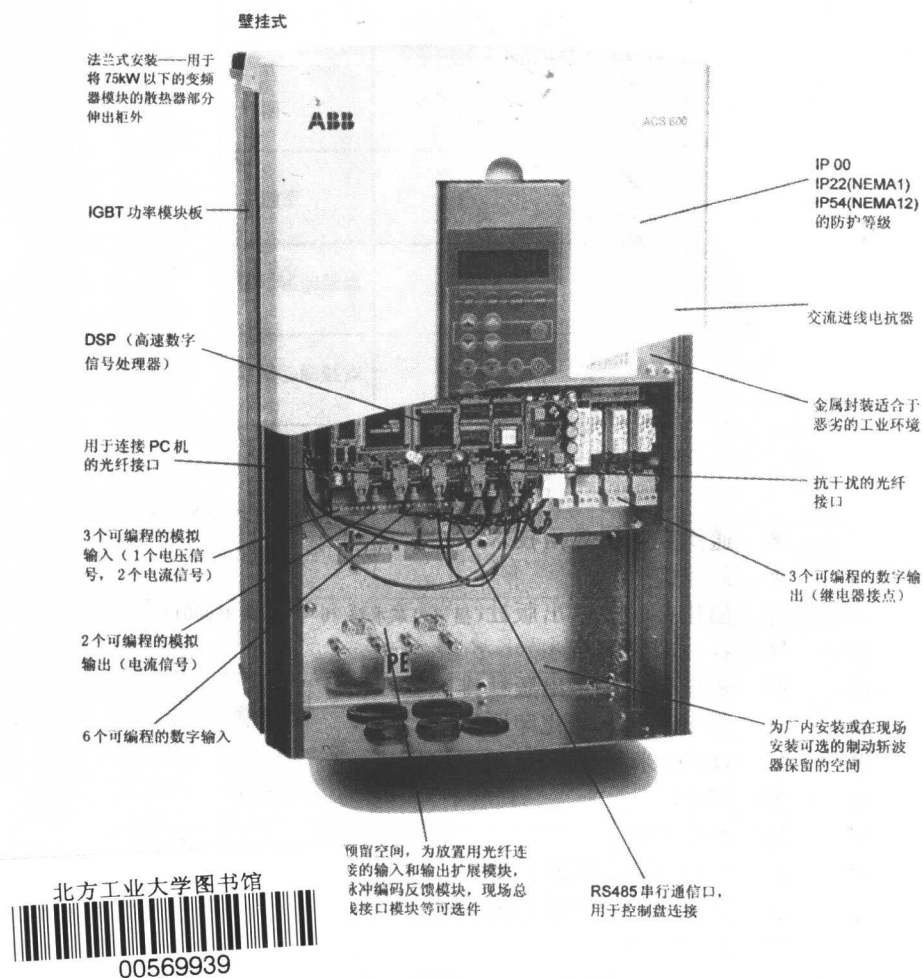
刘美俊 编著



福建科学技术出版社

通用变频器应用技术

刘美俊 编著



福建科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

通用变频器应用技术/刘美俊编著. —福州:福建科学技术出版社, 2004. 12

ISBN 7-5335-2506-X

I. 通… II. 刘… III. 变频器—基本知识
IV. TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 116127 号

书 名	通用变频器应用技术
作 者	刘美俊
出版发行	福建科学技术出版社(福州市东水路 76 号, 邮编 350001)
经 销	各地新华书店
排 版	福建科学技术出版社排版室
印 刷	福州市晋安文化印刷厂
开 本	787 毫米×1092 毫米 1/16.
印 张	17.25
字 数	426 千字
版 次	2004 年 12 月第 1 版
印 次	2004 年 12 月第 1 次印刷
印 数	1—4 000
书 号	ISBN 7-5335-2506-X/TN·315
定 价	26.80 元

书中如有印装质量问题,可直接向本社调换

前 言

在现代工业自动化中,通用变频器充当了极为重要的角色。它是计算机技术、现代控制技术和网络技术的有机结合,具有调速范围宽、调速精度高、动态响应快、运行效率高、功率因数高、操作方便、节能效果显著等一系列优点。它已成为当今改造传统工业、改善工艺流程、提高生产过程自动化水平、提高产品质量、推动技术进步的主要手段之一,普遍应用于风机、水泵、生产线、机床、纺织机械、塑料机械、造纸机械、冶炼机械等。随着电力电子器件和数字控制手段的发展,变频器也不断更新换代,不断向小型化、多功能化、高性能化方向发展。

由于变频器技术含量高、故障保护功能强大、品种繁多,如何正确使用好变频器,最大限度地发挥其功能,以及维护好变频器,是广大变频器用户所关心的问题。同时,变频器有共同的原理体系,各品牌型号的变频器在结构上和应用上有共通性。作者自上世纪90年代初即开始跟踪国内外变频器技术的发展,在新产品开发和变频调速系统设计方面有成功的经验。作者根据多年来的实践经验和相关科研与教学工作的体会,参考最新的国内外技术资料,编著成此书,试图为广大从事变频器应用与研究工作的科技工作者、工矿企业工程技术人员、大中专院校电类专业师生等提供一本实用的技术参考书。

本书内容包括电动机、电力半导体有关知识,各类型变频器工作原理,变频器各运行方式,变频器各品牌介绍和容量计算方法,变频器可靠性原理及抗干扰措施,变频器安装、操作、维护方法,根据对象的调速系统设计方法,以及一些典型应用实例。书中以富士品牌为背景机对变频器的具体功能、操作等进行了介绍,由于各变频器有共通性,读者结合其他品牌的产品说明,可做到举一反三,触类旁通。

随着控制技术的数字化发展,交流电动机网络控制技术成为当前的发展趋势。现代交流电动机的传动控制已不再局限于单一的调速控制要求,而更多的是要求控制装置系统化、网络化,以获得更高的动态和静态性能。现代的变频器不仅可以与设备网的现场总线直接连接,还可与信息网交换实时数据,与生产线控制系统及现场设备一起构成一个多级分布式控制系统。这也是通用变频器技术日新月异地发展的基础。从这个现实出发,本书介绍了变频器与可编程序控制器组成的典型应用控制系统,特别介绍了通用变频器在PROFIBUS现场总线中的应用情况。

本书具有下列主要特点:(1)全书系统地论述了通用变频器的原理和应用技术,包括一些典型应用、现场总线应用等,符合现代工业自动化技术发展的需求。(2)条理清楚、全面,介绍翔实,内容兼具普遍性和具体性。(3)密切联系工程实际,取材先进、新颖,引入学科交叉内容,介绍了一些实用的新思想、新方法和新技术,有较好的启发和指导作用。(4)着重应用,突出理论联系实际,面向广大工程技术人员,具有很强的工程性、实用性。内容较多地取自于生产一线,深入浅出,便于工程应用。(5)写作上力求文字精练,通俗易懂,便于读者理解和自学。

本书编写过程中,得到了胡俊达教授及刘群、刘天任、李永坚和李立等同志的支持和帮助,也得到了许多变频器同行和用户的协助。同时,编写中曾参考和引用了国内外许多专

家、学者最新发表的论文和著作等资料。作者在此一并致谢。

由于作者水平所限，书中难免存在错误和不妥，热忱欢迎广大读者批评指正，将不胜感谢。

作 者

2004 年 9 月

目 录

第一章 基础知识	(1)
1.1 调速综述	(1)
1.1.1 调速方法	(1)
1.1.2 调速的主要技术指标	(2)
1.2 异步电动机	(3)
1.2.1 异步电动机的基本工作原理	(3)
1.2.2 异步电动机的基本结构	(5)
1.2.3 异步电动机的机械特性	(6)
1.2.4 异步电动机工作状况分析	(8)
1.2.5 异步电动机的制动	(10)
1.3 电力半导体器件	(13)
1.3.1 双极晶体管 (GTR 或 BJT)	(13)
1.3.2 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	(18)
1.3.3 可关断晶闸管 (GTO 晶闸管)	(21)
1.3.4 电力场效应晶体管 (Power MOSFET)	(24)
1.3.5 智能功率模块 (IPM)	(26)
1.3.6 集成门极换相晶闸管 (IGCT)	(30)
1.3.7 MOS 门控晶闸管	(32)
第二章 变频器工作原理	(33)
2.1 概述	(33)
2.1.1 变频调速概况	(33)
2.1.2 通用变频器概况	(35)
2.2 变频调速原理	(38)
2.2.1 变频调速的基本方式与选择	(38)
2.2.2 变频器的基本构成	(40)
2.2.3 变频器的类别	(41)
2.2.4 变频器的额定值和技术指标	(45)
2.3 交-直-交变频器	(46)
2.3.1 交—直部分	(47)
2.3.2 直—交部分	(48)
2.3.3 制动电阻和制动单元	(48)
2.4 交-交变频器	(48)
2.4.1 方波型变频器	(49)
2.4.2 正弦波交-交变频器	(50)

2.5	矢量控制变频器	(51)
2.5.1	矢量控制的基本思想	(51)
2.5.2	PWM 变频器的矢量控制	(53)
2.6	直接转矩控制变频器	(56)
2.6.1	PWM 逆变器输出电压的矢量表示	(56)
2.6.2	磁通轨迹控制	(58)
2.6.3	直接转矩控制变频调速系统	(59)
2.7	变频器的端子和功能码	(60)
2.7.1	变频器主要端子介绍	(60)
2.7.2	通用变频器的功能特点及功能码	(60)
第三章	变频器的运行	(64)
3.1	变频器的运行方式	(64)
3.1.1	寸动运行	(64)
3.1.2	正反转运行	(64)
3.1.3	正转运行	(66)
3.1.4	并联运行	(67)
3.1.5	同步运行	(67)
3.1.6	远距离操作运行	(68)
3.1.7	瞬停再起动运行	(69)
3.1.8	工频与变频运行	(70)
3.1.9	多速运行	(72)
3.1.10	可选外置单元的应用	(75)
3.2	运行参数	(77)
3.2.1	几个频率参数	(77)
3.2.2	频率的给定	(78)
3.3	起动	(79)
3.3.1	升速特性	(79)
3.3.2	起动方法	(80)
3.4	制动	(81)
3.4.1	降速特性	(81)
3.4.2	制动方法	(81)
3.5	节能运行	(84)
3.5.1	节能运行分析	(84)
3.5.2	节能运行的具体应用	(85)
第四章	变频器的选择	(88)
4.1	通用变频器品牌及参数	(88)
4.1.1	常见品牌介绍	(88)
4.1.2	变频器参数应用知识	(90)

4.2	变频器类型的选择	(92)
4.3	变频器容量的计算	(93)
4.3.1	连续运转时	(93)
4.3.2	加减速时	(93)
4.3.3	频繁加减速运行时	(94)
4.3.4	一台变频器拖动多台电动机并联运行时	(94)
4.3.5	电动机直接起动时	(95)
4.3.6	大惯性负载起动时	(95)
4.3.7	多台电动机并联起动且部分直接起动时	(95)
4.3.8	并联运行中追加投入起动时	(95)
4.3.9	与离心泵配合使用时	(96)
4.3.10	轻载时	(96)
4.4	变频器选择注意事项	(97)
4.4.1	起动转矩与低速区转矩	(97)
4.4.2	从电网到变频器的切换	(98)
4.4.3	瞬停再起动	(98)
4.5	变频器的外围设备及选择	(98)
4.5.1	输入变压器	(98)
4.5.2	断路器和接触器	(98)
4.5.3	电抗器	(99)
4.5.4	制动电阻	(103)
4.5.5	滤波器	(105)
第五章	变频器的可靠性	(106)
5.1	变频器常见保护功能及外加保护	(106)
5.1.1	过电流保护	(106)
5.1.2	过载保护	(106)
5.1.3	电压保护	(108)
5.1.4	其他保护	(109)
5.2	高次谐波及其抑制	(110)
5.2.1	高次谐波产生机理	(110)
5.2.2	高次谐波对其他设备的影响	(114)
5.2.3	减小和防止高次谐波的方法	(114)
5.3	变频器抗干扰措施	(117)
5.3.1	外来干扰	(118)
5.3.2	变频器产生的干扰及抑制	(122)
5.4	具体保护功能和有关操作 (以富士为例)	(123)
5.4.1	保护功能	(123)
5.4.2	保护动作及故障诊断	(129)

第六章 变频器的安装与使用	(137)
6.1 变频器的安装	(137)
6.1.1 安装使用环境要求	(137)
6.1.2 安装空间	(138)
6.1.3 安装柜的设计	(140)
6.1.4 密封安装柜的设计及变频器的防尘	(142)
6.1.5 变频器与电机的距离	(144)
6.2 变频器的接线	(144)
6.2.1 主电路的接线	(145)
6.2.2 控制电路的接线	(148)
6.3 变频器的测量	(151)
6.3.1 测量仪器及测定方法	(151)
6.3.2 输入侧的测量	(154)
6.3.3 输出侧的测量	(156)
6.3.4 绝缘电阻的测量	(157)
6.4 变频器的调试与维护	(157)
6.4.1 通电前检查	(157)
6.4.2 通电与预置	(158)
6.4.3 带电动机空载试验	(158)
6.4.4 带负载调试	(159)
6.4.5 维护与检查	(160)
6.4.6 故障排除实例	(162)
6.5 变频器的使用操作	(164)
6.5.1 变频器在使用中的几个问题	(164)
6.5.2 具体使用 (以富士变频器为例)	(166)
6.6 变频器的通信组网	(172)
6.6.1 变频器与 PLC 的连接	(172)
6.6.2 变频器在现场总线控制系统中的应用	(173)
 第七章 变频调速拖动系统的设计	 (180)
7.1 根据控制对象设计	(180)
7.1.1 速度	(180)
7.1.2 张力	(183)
7.2 根据负载特性设计	(186)
7.2.1 恒转矩负载	(186)
7.2.2 恒功率负载	(188)
7.2.3 二次平方负载	(189)
7.2.4 负负载	(190)
7.2.5 冲击负载	(194)
7.3 根据系统性能设计	(196)

7.3.1	响应快	(196)
7.3.2	精度高	(199)
7.4	特殊电动机的变频调速	(200)
7.4.1	齿轮减速电动机	(200)
7.4.2	电磁制动电机	(200)
7.5	电动机的选择	(201)
7.5.1	电动机类型的选择	(201)
7.5.2	电压等级及转速的选择	(202)
7.5.3	电机型式的选择	(203)
7.5.4	异步电动机容量的选择	(203)
7.5.5	负载功率的计算实例	(204)
7.5.6	异步电动机选用时的要点	(205)

第八章 变频器的应用

(208)

8.1	变频器在高炉卷扬机中的应用	(208)
8.1.1	电动机的选择	(209)
8.1.2	变频器的选择	(209)
8.1.3	系统设计特点	(209)
8.2	变频器在行车上的应用	(212)
8.2.1	方案比较	(212)
8.2.2	具体实现方法	(212)
8.3	线材卷绕机的变频调速	(214)
8.3.1	变频调速系统的器件选型	(214)
8.3.2	变频调速系统组成	(215)
8.3.3	变频器的参数预置及调试	(216)
8.4	变频器在窑炉温度控制中的应用	(217)
8.4.1	系统组成	(217)
8.4.2	工作原理	(218)
8.5	变频器在恒压供水系统中的应用	(219)
8.5.1	变频恒压供水控制系统的工作原理	(219)
8.5.2	双位控制的变频调速供水电路	(220)
8.5.3	单片机组成的变频恒压供水系统	(221)
8.5.4	内置PID调节的变频恒压供水系统	(224)
8.6	变频器在低压加热器疏水系统中的应用	(226)
8.6.1	变频调速方式及系统组成	(226)
8.6.2	变频器的选择及控制线路设计	(227)
8.7	变频器在化工行业中的应用	(229)
8.7.1	元件选型及接线原理	(229)
8.7.2	参数设置及常见故障分析	(230)
8.8	变频器在卷烟行业中的应用	(231)

8.8.1 变频器的外围电路及参数设置	(231)
8.8.2 变频器的使用	(232)
8.9 变频器在塑料行业中的应用	(232)
8.9.1 TD3300 变频器简介	(233)
8.9.2 变频器的接线及有关参数计算	(233)
8.10 变频器在铣床中的应用	(235)
8.10.1 变频器的控制方式	(235)
8.10.2 变频器的容量计算及参数设定	(236)
8.10.3 变频器的连接与 PLC 程序设计	(237)
8.10.4 变频器接线注意事项及系统调试	(239)
8.11 变频器在矿井控制系统中的应用	(240)
8.11.1 提升系统工况分析	(240)
8.11.2 变频器的选择及连接	(241)
8.11.3 变频器的参数设置及 PLC 程序	(242)
附录	(244)
附 1 三菱变频器功能码	(244)
附 2 富士 FRENIC 5000G11S/P11S 变频器功能码	(245)
附 3 西门子 MicroMaster 420 通用变频器功能码	(247)
附 4 富士 FVR-G7S 系列变频器技术规格	(248)
附 5 富士 FRENIC 5000G11S/P11S 3 相 400V 系列变频器技术规格	(251)
附 6 三肯 SAMCO-L 系列变频器技术规格	(252)
附 7 西门子 (SIEMENS) 420/430/440 变频器技术规格	(253)
附 8 三菱 FR 系列变频器技术规格	(255)
附 9 三菱变频器主要选用件参数	(260)
附 10 西门子 MicroMaster 变频器结构示意图与内部照片	(263)
附 11 富士 FRENIC 变频器内外结构图	(264)
常用电气控制器件图标符号表	(265)
参考文献	(266)

第一章 基础知识

1.1 调速综述

1.1.1 调速方法

电动机调速,是指在机械传动系统中人为地或自动地改变电动机的转速,以满足工作机械对不同转速的要求。调速是机床或其他控制对象对其电力拖动系统提出的重要要求。如机床加工工件时,由于工件直径大小不同,材料的硬度、性质不同,要求的精度和表面粗糙度不同,所用刀具也可能不一样,为保证得到最经济的切削速度,则要求机床能在不同的转速下工作。这就对电力拖动系统提出了速度要求。

为了满足各种工作速度的要求,目前常用的调速传动方法有三种:

1. 机械式有级调速传动

机械式有级调速传动采用机械式动力源调节传动速度,是最为古老的调速方式。在卧式车床、钻床、铣床、小型镗床等机床主传动中,常常采用不调速的笼型异步电动机拖动,在这种系统中电动机转速不变,通过改变齿轮变速箱的变速比得到机床主轴的不同转速。这种机械式有级变速方式,不能保证最有利的切削速度,而且调速装置体积大、造价高。

2. 电气和机械配合的有级调速

传动系统采用多速异步电动机,再与齿轮变速箱相配合而获得不同的转速。这样可以减小变速箱体积,而且可以得到较多的速度挡,但多速电机比单速电动机造价要高得多。

3. 电气无级调速

电气无级调速是通过直接改变电动机的转速而得到执行机构所需的不同转速。这样机床的齿轮变速箱改为减速器,从而使传动系统变得很简单。同时电气无级调速系统调速范围宽、控制灵活,可以实现远距离操作。根据拖动系统采用的调速电动机种类不同,电气无级调速系统有直流调速和交流调速两种类型。调速电动机分类见图 1.1.1。

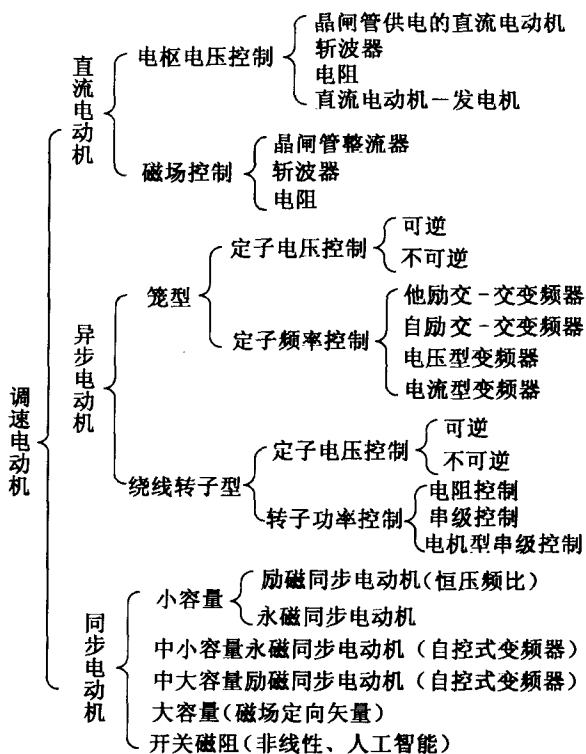


图 1.1.1 调速电动机分类

对于电气无级调速中直流调速和交流变频调速两种主要方法的进一步介绍和比较, 请见本书 2.1 等处。

1.1.2 调速的主要技术指标

不同的控制对象对控制系统有不同的调速要求。例如, 精密机床要求加工精度达到百分之几毫米甚至几微米; 大型铣床的送进机构, 快速移动最高速度达到 $600\text{mm}/\text{min}$, 而精加工时最低速度只有 $2\text{mm}/\text{min}$, 这些要求, 可以转化为电力拖动控制系统(调速系统)的静态或动态技术指标。调速系统的主要技术指标有调速范围 D , 静差率 S , 调速的平滑性和经济性等。

1. 调速范围 D

在额定负载转矩 T_N 下, 电动机的最高转速 $n_{\max}$ 与最低转速 $n_{\min}$ 之比称为调速范围 D 。

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

如图 1.1.2 所示, 通常将 $n_{\max}$ 视为电动机的额定转速 n_N 。一般希望调速系统 D 大一些好。

2. 静差率 S

静差率 S 是指电动机由理想空载增加到额定负载时, 对应的转速降 Δn_N 与其理想空载转速 n_0 之比, 采用百分数表示, 即

$$S = \frac{n_0 - n_N}{n_0} \times 100\% = \frac{\Delta n_N}{n_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

静差率主要表示负载变化时, 调速系统转速变化的程度。在同一负载下, 高速运行和低速运行时, 转速降 Δn 是相同的(图 1.1.2), 但在高速和低速运行时, 对应的理想空载转速 n_{01} 和 n_{02} 却不同, $n_{01} > n_{02}$, 显然高速时 S 较小, 低速时 S 较大, 如低速时 S 能满足调速要求, 则高速时更能满足要求, 所以可以用调速范围 D 内最低速时的静差率, 代表调速系统能达到的静差率。

通过数学变换, 可以求出 D 、 S 和 Δn_N 三者之间的关系。

$$\begin{aligned} D &= \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_{\max}}{n_{0\min} - \Delta n_N} = \frac{n_N}{\Delta n_N (n_{0\min} / \Delta n_N - 1)} \\ &= \frac{n_N}{\Delta n_N (\frac{1}{S} - 1)} = \frac{n_N S}{\Delta n_N (1 - S)} \end{aligned} \quad (1-3)$$

由式(1-3)可知, Δn_N 一定时, S 越小, 则调速范围 D 也越小; 若要满足 D 和 S 的要求, 则要设法减小 Δn_N 。

3. 调速的平滑性

该指标用两个相邻转速之比 Φ 表示

$$\Phi = \frac{n_i}{n_{i-1}} \quad (1-4)$$

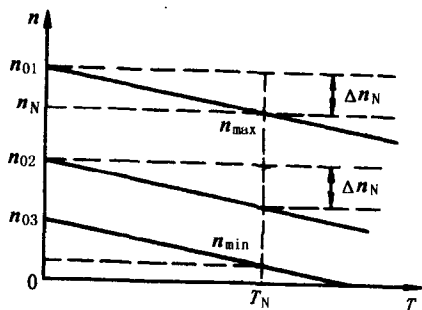


图 1.1.2 不同转速对 S 的影响

即从某一转速 n_i 与能调节到的最邻近的转速 n_{i-1} 之比。显然 Φ 值愈小, 说明调速愈平滑, 无级调速时 $\Phi \approx 1$ 。

4. 调速的经济性

主要从以下三个方面进行考察:

(1) 设备投资。这是用户在选择调速方案时, 常常首先考虑的问题, 但是, 过分地强调这一方面也是不可取的, 应同时结合后面两个方面进行综合评估。

(2) 调速后的运行效率。有的调速方法本身是以损耗能量来获得调速性能的, 如绕线转子异步电动机, 是靠增大转子回路里的电阻, 从而增加能耗来调速的。有的调速方法由于能量转换的环节较多, 调速时的工作效率也明显下降, 如电磁调速电动机等。

近代无级调速系统, 如直流电动机的晶闸管调压调速系统和交流电动机的变频调速系统等, 虽然调速装置本身也要消耗功率, 但所占比例甚小, 总体来说, 运行效率是很高的。

(3) 调速系统的故障率。包括电动机本身的故障率。生产机械如因调速系统发生故障而导致停工修理, 则每停工一次所造成的经济损失, 往往超过调速装置本身价格的许多倍。在这个方面, 三相交流笼型异步电动机与直流电动机相比, 具有明显的优势。所以, 尽管变频调速器价格相对较贵, 但普及应用仍然十分迅速。

综上所述, 主要用调速的设备费用、能量消耗、维护及运转的费用来评价其经济性。

1.2 异步电动机

交流电机分为同步电机与异步电机两大类, 两者都有电动机与发电机之分。其中, 异步电动机结构简单、运行可靠、维护方便、价格低廉, 应用最广。

1.2.1 异步电动机的工作原理

图 1.2.1 所示为一台异步电动机模型。图中, 两个磁极之间装有一铁磁材料制成的可转动圆柱体, 称为转子。转子表面沿轴向开有若干槽, 槽内嵌放着一组被端环短路的导体, 其称为笼型转子绕组。当磁极在图中所示转向下, 以一定转速 n_0 旋转时, 会在转子导体中感应出一定大小的电动势, 根据右手定则, 可判定感应电动势的方向如图中的“+”“·”所示。如认为此电动势产生的电流与电动势同相位, 则转子导体在磁场中所受电磁力 F 的方向如图 1.2.1 中箭头所示。在 F 建立的电磁转矩推动下, 转子将以转速 n , 顺磁场旋转方向旋转, 并从轴上输出一定大小的机械功率。这就是异步电动机最基本的工作原理。它的主要特点是:

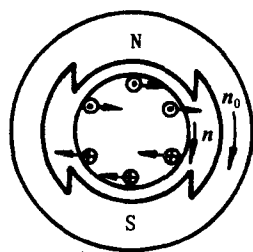


图 1.2.1 异步电动机模型

(1) 电动机内必须有一个在空间以一定转速 n_0 旋转的磁场, 这是异步电动机实现机电能量转换的前提。

(2) 转子的转速 n 不能与磁场旋转速度 n_0 相等, 否则转子导体中将不可能出现感应电流, 因而无法产生电磁转矩。或者说, 转子的转速不可能与旋转磁场的转速同步, 这也是异步电动机名称的由来。

电动机内的旋转磁场, 是由空间对称分布的多相绕组中通过多相电流形成的合成旋转磁通势建立, 这种多相绕组通称交流绕组。图 1.2.2 所示为一种最简单的三相交流绕组。图中

三个匝数和电阻值均相同的线圈—— U_1-U_2 、 V_1-V_2 、 W_1-W_2 对称地嵌放在一环形铁磁圆柱体内壁上的轴向槽中，并按星形接线，如图 1.2.2 (b) 所示。当此三相交流绕组接入对称的三相电源时，绕组内产生的三相电流也是对称的，电流波形如图 1.2.3 (a) 所示。若取电流由各相绕组首端—— U_1 、 V_1 、 W_1 流出，末端—— U_2 、 V_2 、 W_2 流进为假定正向，则可确定图 1.2.3 (a) 中 $\omega t=0$ 、 $\frac{2}{3}\pi$ 、 $\frac{4}{3}\pi$ 和 2π 电角度时三相合成磁场的空间位置，如图 1.2.3 (b) ~ (e) 所示。

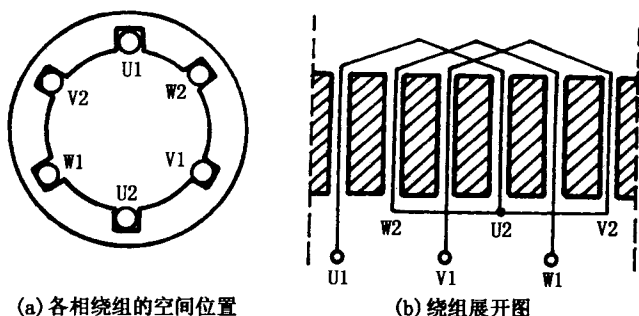


图 1.2.2 最简单的三相交流绕组之一 ($p=1$)

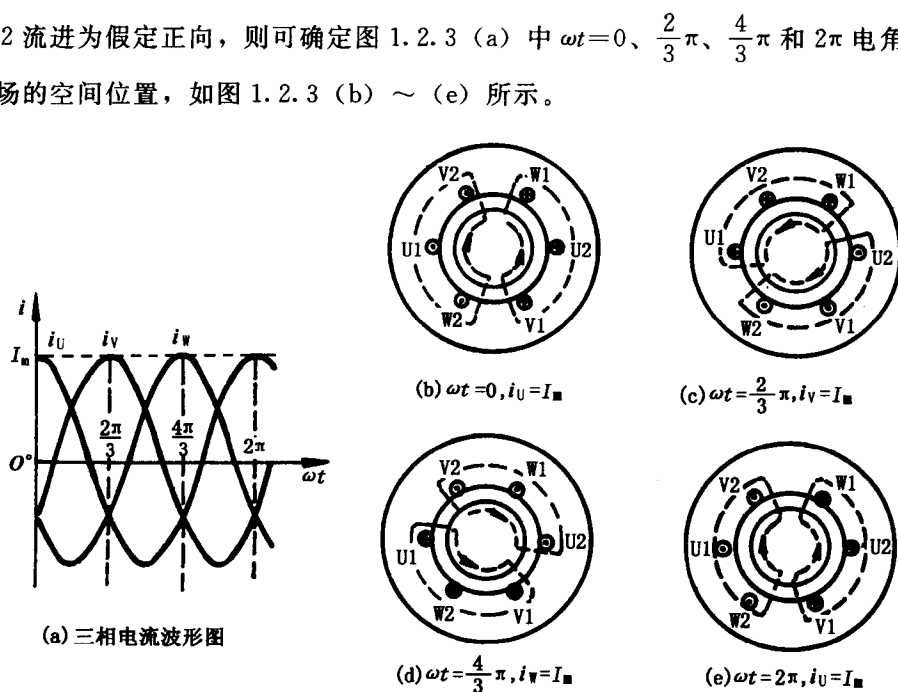


图 1.2.3 两极旋转磁通势的形成

由图 1.2.3 可以看出：

(1) 空间依次滞后 120° 机械角度、对称分布的三相绕组通过三相对称的交流电流时，产生的合成磁场为极对数 $p=1$ 的空间旋转磁场，它在一个电源电压周期内旋转一周，即两个极距。

(2) 某相绕组中的电流达到最大值时，磁极轴线恰好旋转至该相绕组的轴线上。

若每相空间对称分布的串联线圈数增加，则合成磁场磁极对数 p 亦相应增加。例如，图 1.2.4 中每相绕组均由两个线圈串联而成，三相中的六个线圈—— $U_{11}-U_{12}$ 、 $U_{21}-U_{22}$ ， $V_{11}-V_{12}$ 、 $V_{21}-V_{22}$ ， $W_{11}-W_{12}$ 、 $W_{21}-W_{22}$ 依次滞后 60° 机械角度，对称分布于铁磁圆柱的内壁上。分别作出 $\omega t=0$ 、 $\frac{2}{3}\pi$ 、 $\frac{4}{3}\pi$ 和 2π 时的空间合成磁通势后即可看出，合成磁场磁极对数增加为 $p=2$ 。这种情况下，当电源电压变化一周时，磁场在空间旋转半周，即

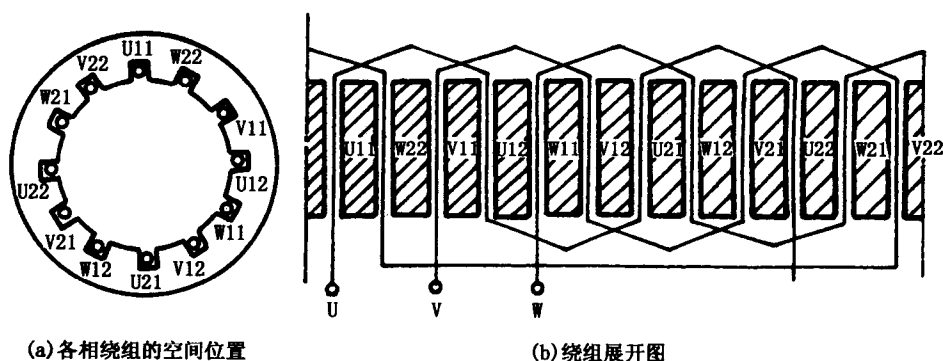
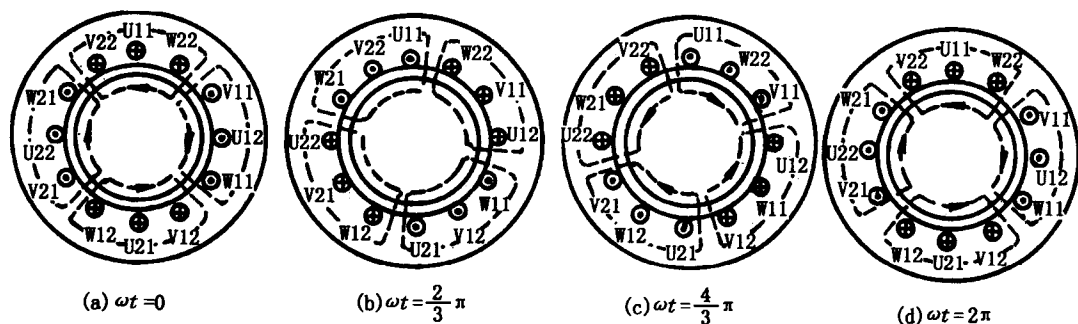
图 1.2.4 最简单的三相交流绕组之二 ($p=2$)

图 1.2.5 四极旋转磁场的形成

180° 机械角度, 但因 $p=2$, 故对应的电角度仍为 $p \times 180^\circ = 360^\circ$, 即两个极距, 如图 1.2.5 所示。

由此可知, 合成磁场转速 n_0 一般可表达为:

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad (1-5)$$

式中: f ——供电电源频率。

1.2.2 异步电动机的基本结构

三相异步电动机由定子和转子两大部分构成, 两者之间有一定大小的空气隙。下面简要介绍三相异步电动机的主要结构及部件。

1. 定子

定子是电动机的静止部分, 由定子铁心、定子绕组和机座三部分组成。

定子铁心是电动机磁路的一部分, 由涂有绝缘漆的硅钢片冲片叠压而成。叠片上冲有定子槽, 用于嵌放定子绕组。为改善铁心的散热条件, 功率较大的电动机定子铁心上开有径向通风沟。

定子绕组在作为励磁绕组建立电动机内旋转磁场的同时, 还兼作电枢绕组承受负载电流。它由铝质或铜质绝缘导线绕制的线圈连接而成, 嵌在定子槽内, 绕组与槽壁之间必须可靠地绝缘。如定子槽中分上下两层嵌放两个线圈边, 上、下层之间也必须可靠地绝缘。

机座主要用作支撑定子铁心和固定端盖。中小型异步电动机的机座采用铸铁铸成，封闭式异步电动机的机座上还铸有散热片，以增大电动机表面的散热面积。大型异步电动机的机座则用钢板焊接而成。

2. 转子

转子是电动机的旋转部分，由转子铁心、转子绕组和转轴三部分组成。

转子铁心也是电动机磁路的一部分，亦由表面涂有绝缘漆的硅钢片冲片叠压而成。叠片上冲有转子槽，用于嵌放转子绕组。小型异步电动机的转子铁心直接压装在转轴上。为改善散热条件，功率较大的电动机转子铁心上设有轴向通风孔和径向通风沟。

转子绕组是旋转磁场中建立电磁转矩的载流导体，有笼型与绕线型两种型式。笼型绕组由转子槽中的裸导条和联接这些导条的端环组成。小型异步电动机的笼型绕组通常采用熔化的铝液在转子铁心上一次浇铸而成，端环上铸有风扇叶片，以供电动机内部通风散热，如图 1.2.6 (a) 所示。100kW 以上异步电动机的笼型绕组则由插入转子槽中的铜条焊上端环构成，如图 1.2.6 (b) 所示。具有笼型转

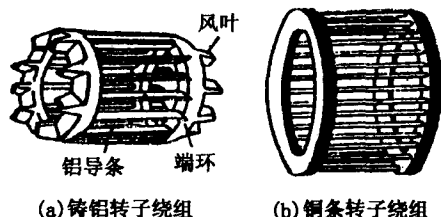


图 1.2.6 笼型转子绕组

子绕组的异步电动机称为笼型异步电动机。绕线型转子绕组结构与定子绕组相同，绕组的三个出线端与安装在转轴上的三个集电环相接，并通过三只电刷引出。具有绕线型转子绕组的异步电动机称为绕线转子异步电动机。

转轴的作用是支承转子铁心和传递机械功率，要求具有一定的机械强度和刚度。

三相异步电动机的铭牌数据包括：

- 额定功率 P_N 指额定运行状态下轴上输出的机械功率，单位为 kW；
- 额定电压 U_N 指额定运行状态下施加在定子绕组上的线电压，单位为 V 或 kV；
- 额定电流 I_N 指额定电压下电动机输出额定功率时定子绕组的线电流，单位为 A；
- 额定转速 n_N 指电动机在额定功率、额定电压和额定频率下的转速，单位为 r/min；
- 额定频率 f_N 我国工业电网标准频率为 50Hz。

此外，绕线转子异步电动机还标有转子额定电动势和转子额定电流。前者指定子绕组加额定电压、转子绕组开路时两集电环之间的电动势；后者指定子电流为额定值时转子绕组的线电流。

1.2.3 异步电动机的机械特性

三相异步电动机的机械特性指在定子电压、定子频率和电动机参数固定的条件下，电动机轴上输出转矩 T 与运行转速 n 间的函数关系 $n=f(T)$ 。由于轴上输出转矩与电动机电磁变量和参数之间无明确的解析表达式，应用不便，以下分析中采用直流电力拖动系统中的处理方式，将电动机的空载转矩 T_0 作为外部制动转矩归并到负载转矩中一起考虑，这样，电动机的机械特性即可表示为电磁转矩 T_{em} 与转速 n 之间的函数关系 $n=f(T_{em})$ 。

由电机学知识可知，异步电动机的 T 型等值电路如图 1.2.7 所示。

图中： R_s 为一相定子绕组电阻； X_s 为一相定子绕组漏电抗； R_m 为一相等效励磁电阻； X_m 为一相等效励磁电抗； R'_r 为一相转子绕组电阻 R_r 折算到定子绕组后的等效电阻值； X'_r 为一相转子绕组漏电抗 X_r 折算到定子绕组后的等效漏电抗； $\dot{E}_s$ 为定子绕组电动势； $\dot{E}'_r$ 为