



“十三五”职业教育规划教材

工业控制技术应用

变频器 PLC 组态软件

主 编 何 萍
副主编 王 政



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



配套课件



“十三五” 职业教育规划教材

工业控制技术应用

变频器 PLC 组态软件

主 编 何 萍

副主编 王 政

编 写 李俊仕 张继东 李 瑜

主 审 常 冀 梅 英 张 彬

藏书章



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”职业教育规划教材。

本书从工业控制技术应用出发,设计了七个学习任务,从理论到实践,从设计到应用,由浅入深地阐述了变频器、PLC、组态控制技术的实际应用。

本书系统地介绍了变频器的原理和选用、控制线路的设计及运行参数的设定方法、变频器的维修与安装等内容,书中以西门子 MM440 和三菱 D700 为例,较详细地阐述了变频器的使用。

本书在学生掌握 PLC 的基本指令、编程方法和组态控制技术基础知识的基础上,突出介绍了变频器、PLC、组态控制系统的设计、开发过程,通过具体实例的讲解和训练,以期达到举一反三的效果。

本书适合作为高等职业院校相关专业的教学参考用书,也适合从事相关领域的工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

工业控制技术应用:变频器 PLC 组态软件/何萍主编. —北京:中国电力出版社,2017.8
“十三五”职业教育规划教材
ISBN 978-7-5198-0261-5

I. ①工… II. ①何… III. ①工业控制系统—职业教育—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 312300 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:乔 莉(010-63412535)

责任校对:闫秀英

装帧设计:赵姗姗

责任印制:吴 迪

印 刷:三河市百盛印装有限公司

版 次:2017 年 8 月第一版

印 次:2017 年 8 月北京第一次印刷

开 本:787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张:13.5

字 数:323 千字

定 价:32.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

前言

随着现代工业控制技术的发展，变频器、PLC、组态控制技术已经成为实现工业自动化控制的核心设备和技术，在各种生产机械和生产线中得到了非常广泛的应用。变频器具有调速范围宽、调速精度高、动态响应快、运行效率高、功率因数高、操作方便且便于其他设备连接等一系列优点，在调速系统中得到广泛的应用。

变频器是运动控制系统中的功率变换器。目前的运动控制系统包含多种学科的技术领域，总的发展趋势是驱动的交流化，功率变换器的高频化，控制的数字化、智能化和网络化。因此，变频器作为系统的重要功率变换部件，因能够提供可控的高性能变压变频的交流电源而得到迅猛的发展。PLC 作为通用工业控制计算机，是面向工矿企业的工控设备，是自动控制系统中核心元件之一，因其编程语言易于接受而被广泛应用。组态软件是指一些数据采集与过程控制的专用软件，为用户提供快速构建工业自动控制系统监控功能。

通过本书七个任务的学习，学生能够较系统地掌握变频器的工作原理，学会变频器的调试、安装与维护，并通过五个工业控制系统典型案例的学习，提升对变频器、PLC 及组态软件的应用能力。

本书由包头职业技术学院何萍任主编，王政任副主编。学习任务一由张继东编写，学习任务二由王政编写，学习任务三、四、七由李俊仕编写，学习任务五、六由何萍编写，附录由李瑜编写。本书由何萍统稿，由包头职业技术学院董海英和包头钢铁集团公司张彬审阅。在编写过程中得到多位教师同仁以及企业专家的帮助，提出了许多宝贵意见和建议，在此深表谢意。

限于编者水平，书中不妥及疏漏之处在所难免，敬请广大读者给予批评指正。

编者

2017年5月

目 录

前言

学习任务一 变频器基本知识的学习	1
子任务一 变频技术的总体认识	1
1.1 变频技术	1
1.2 变频器应用及发展趋势	1
1.3 三相异步电动机变频调速基础知识	3
习题	12
子任务二 变频器基本结构的认识	14
1.4 变频器分类	14
1.5 通用变频器结构	15
1.6 变频器主回路组成及原理	19
1.7 变频器逆变电路	21
习题	30
子任务三 变频器控制方式的学习	31
1.8 变频器控制方式分类	31
1.9 变频器 V/F 控制方式	32
1.10 变频器矢量控制方式	38
1.11 变频器主要参数	39
1.12 变频器的选择	40
习题	43
学习任务二 变频器使用的基本技能训练	45
子任务一 变频器操作概述	45
2.1 变频器操作模式	45
2.2 变频器功能预置	46
2.3 频率给定功能	46
2.4 变频器 PID 调节功能	50
2.5 控制方式的选择功能	52
2.6 保护控制功能	53
2.7 适用负载选择功能	54
子任务二 三菱变频器 D700 系列操作训练	55
2.8 技能训练一 D700 系列变频器面板操作	55
2.9 技能训练二 D700 系列变频器外部端子的点动控制	62

2.10	技能训练三	D700 系列变频器控制三相异步电动机正反转	65
2.11	技能训练四	D700 系列变频器常用功能训练	66
2.12	技能训练五	D700 系列变频器对三相异步电动机实现无级调速	68
2.13	技能训练六	D700 系列变频器实现瞬时停电再起动控制	70
2.14	技能训练七	D700 系列变频器多段速度选择	71
2.15	技能训练八	D700 系列变频器外部模拟量控制方式的变频调速	74
子任务三 西门子变频器操作训练			76
2.16	西门子变频器概述		77
2.17	技能训练一	西门子变频器功能参数设置与操作	79
2.18	技能训练二	西门子变频器外部端子点动控制	81
2.19	技能训练三	西门子变频器控制电动机正反转运动控制	84
2.20	技能训练四	西门子变频器报警与保护功能使用	86
2.21	技能训练五	西门子变频器控制电动机运行时间的操作	88
2.22	技能训练六	西门子变频器电压/电流监视器信号输出	90
2.23	技能训练七	西门子变频器断电后得电自动再起动控制	91
2.24	技能训练八	西门子变频器频率跳转运行控制	93
2.25	技能训练九	西门子变频器电压/电流方式的变频调速控制	94
2.26	技能训练十	西门子变频器三相异步电动机的变频调速	95
2.27	技能训练十一	西门子变频器多段速度选择变频调速	97
学习任务三 变频器的安装与调试			100
3.1	变频器的存放与安装		100
3.2	变频器布线导线的线径选择		102
3.3	变频器的抗干扰措施		103
3.4	变频器的调试、保养和维护		107
习题			112
学习任务四 变频器的应用分析			114
4.1	变频器在中央空调中的应用		114
4.2	变频器在锅炉燃烧控制系统的应用		116
4.3	变频器在印染控制系统的应用		118
学习任务五 可编程序控制器编程学习			122
子任务一 可编程序控制器基础知识			122
5.1	PLC 基础知识		122
5.2	技能训练 西门子 S7-200 系列 PLC 基本指令的应用		134
子任务二 PLC 控制系统的设计			139
5.3	PLC 控制系统的设计内容及设计步骤		139
5.4	PLC 程序设计常用的方法		140
学习任务六 组态工程的制作与学习			146
6.1	组态控制技术基本概念		146
6.2	组态王软件基本概念		149

6.3	技能训练一	如何新建一个工程	151
6.4	技能训练二	组态王工程变量的建立及 I/O 设备管理	153
6.5	技能训练三	组态王工程组态画面制作	156
6.6	技能训练四	图片如何导入组态王工程	158
6.7	技能训练五	组态王工程安全管理	160
6.8	技能训练六	组态王软件常用功能的使用	162
6.9	技能训练七	组态工程制作示例——机械手工程制作与调试	165
学习任务七 变频器、PLC、组态软件应用篇			172
7.1	技能训练一	电动机双向运行控制系统的设计与调试	172
7.2	技能训练二	物料分拣控制系统的设计与调试	175
7.3	技能训练三	电动机多段速运行控制系统的设计与调试	180
7.4	技能训练四	单容水箱液位控制系统的设计与调试	187
7.5	技能训练五	恒压供水控制系统的设计与调试	193
附录 三菱变频器主要参数一览表			195
参考文献			206

学习任务一 变频器基本知识的学习

子任务一 变频技术的总体认识

任务目标

1. 了解交流电动机的调速方式, 以及变频调速的优点。
2. 了解变频器的类型及发展, 对变频技术有个初步认识。
3. 了解变频器的应用领域及意义。

1.1 变频技术

变频技术是一种将直流电逆变成不同频率的交流电的转换技术, 是应交流电机无极调速的需要而诞生的。它可将交流电变成直流电后再逆变成不同频率的交流电, 或是将直流电变成交流电后再将交流电变成直流电。这一切都只有频率的变化, 而没有电能的变化。

变频器 (Variable-frequency Drive, VFD) 是应用变频技术与微电子技术, 将工频电源 (50Hz 或 60Hz) 变换成频率和电压可调的交流电源的电气控制设备, 通过改变频率来驱动交流异步电动机进行变频调速。变换过程中没有中间环节的, 称为交—交变频器, 有中间环节的称为交—直—交变频器。

1.2 变频器应用及发展趋势

变频器的出现, 使交流电动机的调速变得和直流电动机一样方便, 并可由计算机联网控制, 因此其得到了广泛的应用。

随着变频调速技术的发展, 变频调速被认为是一种理想的交流调速方法。20 世纪 60 年代中期, 随着普通的晶闸管、小功率管的实用化, 出现了静止变频装置; 它是将三相的工频电源经变换后, 得到频率可调的交流电的装置。这个时期的变频装置, 多为分立元件, 且体积大、造价高, 大多是为特定的控制对象而研制的, 容量普遍偏小, 控制方式也很不完善, 调速后电动机的静、动态性能还有待提高, 特别是低速的性能不理想, 因此仅用于纺织、磨床等特定场合。

20 世纪 70 年代以后, 电力电子技术和微电子技术以惊人的速度向前发展, 变频调速传动技术也随之取得了日新月异的进步, 开始出现通用变频器。它功能丰富, 可以适用于不同的负载和场合。

20 世纪 90 年代, 随着半导体开关器件 IGBT、矢量控制技术的成熟, 微机控制的变频调速成为主流, 调速后异步电动机的静、动态特性已经可以和直流调速相媲美。随着变频器的专用大规模集成电路、半导体开关器件、传感器的性能越来越高, 变频器的性能和功能得到了进一步提高。现在的变频器功能很多, 操作很方便, 寿命和可靠性较以前也有了很大的进步。

1. 我国变频器的发展历程

随着变频器产品在发达国家的广泛应用,20 世纪 80 年代后期,以日本品牌为代表的外资品牌开始涌进中国大陆。经过多年的推广和使用,变频器这一产品已经得到广大企业用户的认可,外资品牌从三肯、富士两个品牌发展到目前的 40 余个,同时涌现了近百个内资品牌,品牌总数达到 140 多个。

21 世纪以来,我国的变频器行业高度裂变。众多外资品牌在我国建厂,实施本地化经营。原有内资品牌的人员和资金不断分离,成立了众多企业,主要集中在沿海如广东、浙江、山东、上海等地区。在国家宏观政策的支持和鼓励之下,近几年内资品牌中出现了少数优势企业,其生产规模和产品综合性能已有较大提高。

2. 我国变频器的应用现状

变频器自 20 世纪 80 年代被引进我国以来,作为节能应用与速度工艺控制中越来越重要的自动化设备,得到了快速发展和广泛应用。

变频器产生的最初用途是速度控制,但目前在国内应用较多的是节能。我国是能耗大国,能源利用率很低,而能源储备不足。我国在 2003 年的电力消耗中,60%~70%为动力电,而在总容量为 5.8 亿 kW 的电动机总容量中,只有不到 2000 万 kW 的电动机是带变频控制的。据分析,我国带变动负载、具有节能潜力的电机容量至少有 1.8 亿 kW,因此国家大力提倡节能措施,并着重推荐了变频调速技术。

应用变频调速,不仅可以大大提高电机转速的控制精度,而且可以使电机在节能的转速下运行。以风机水泵为例,根据流体力学原理,轴功率与转速的三次方成正比。当所需风量减少,风机转速降低时,其功率按转速的三次方下降。因此,精确调速的节电效果非常可观。与此类似,许多变动负载电机一般按最大需求来生产电动机的容量,故设计裕量偏大。而在实际运行中,轻载运行的时间所占比例却非常高。如采用变频调速,可大大提高轻载运行时的工作效率。因此,变动负载的节能潜力巨大。

以节能为目的,变频器被广泛应用于各行业。以电力行业为例,由于我国大面积缺电,电力投资将持续增长,同时国家电改方案对电厂的成本控制提出了要求,降低内部电耗成为电厂关注焦点,因此变频器在电力行业有着巨大的发展潜力,尤其是高压变频器和大功率变频器。

目前,我国的设备控制水平与发达国家相比还比较低,制造工艺和效率都不高,因此提高设备控制水平至关重要。由于变频调速具有调速范围广、调速精度高、动态响应好等优点,在许多需要精确速度控制的应用中,变频器正在发挥着提升工艺质量和生产效率的显著作用。

除了工业相关行业,在普通家庭中,节约电费、提高家电性能、保护环境等受到越来越多的关注,带有变频控制的冰箱、洗衣机、家用空调等,在节电、减小电压冲击、降低噪声、提高控制精度等方面有很大的优势。因此,变频家电成为变频器的另一个广阔市场和应用趋势。

3. 变频器的发展趋势

(1) 低电磁噪声、静音化。新型通用变频器除了采用高频载波方式的正弦波 SPWM 调制实现静音化外,还在通用变频器输入侧加交流电抗器或有源功率因数校正电路,在逆变电路中采取 Soft-PWM 控制技术等,以改善输入电流波形、降低电网谐波,在抗干扰和抑制高次谐波方面符合 EMC 国际标准,实现所谓的清洁电能的变换。如三菱公司的柔性 PWM 控制技

术，实现了更低噪声运行。

(2) 系统化。通用变频器除了发展单机的数字化、智能化、多功能化外，还向集成化、系统化方向发展。如西门子公司提出的集通信、设计和数据管理三者于一体的“全集成自动化(TIA)”平台概念。该平台可以使变频器、伺服装置、控制器及通信装置等集成配置，甚至自动化和驱动系统、通信和数据管理系统都可以像驱动装置嵌入“全集成自动化”系统那样进行，目的是为用户提供最佳的系统功能。

(3) 网络化。新型通用变频器可提供多种兼容的通信接口，支持多种不同的通信协议，内装 RS-485 接口，可由个人计算机向通用变频器输入运行命令和设定功能码数据等，通过选件可与现场总线 Profibus-DP、Interbus-S、Device Net、Modbus Plus、CC-Link、LonWorks、Ethernet、CAN Open、T-LINK 等通信。如西门子、VACON、富士、日立、三菱、台安等品牌的通用变频器，均可通过各自可提供的选件支持上述几种或全部类型的现场总线。

(4) 专门化和一体化。变频器的制造专门化，可以使变频器在某一领域的性能更强，如风机、水泵用变频器、电梯专用变频器、起重机械专用变频器、张力控制专用变频器等。除此以外，变频器有与电动机一体化的趋势，变频器成为电动机的一部分，可以使体积更小，控制更方便。

(5) 环保无公害。保护环境，制造“绿色”产品是人类的新理念。21 世纪的电力拖动装置应着重考虑节能和变频器能量转换过程的低公害，从而使变频器在使用过程中的噪声、电源谐波对电网的污染等问题减少到最小。

(6) 适应新能源。新能源发电设备的最大特点是容量小而分散，将来的变频器就要适应这样的新能源，既要高效，又要低耗。

1.3 三相异步电动机变频调速基础知识

1.3.1 三相异步电动机的工作原理

在变频器调速拖动系统中，使用的电动机大多数是三相异步电动机。为了说明变频器的功能和应用，有必要先了解三相异步电动机的相关知识。

1. 三相异步电动机的结构

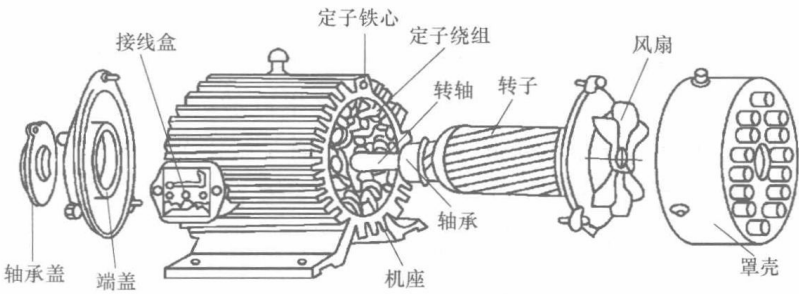


图 1-1 封闭式三相异步电动机的结构

三相异步电动机外形有开启式、防护式、封闭式等多种形式，以适应不同的工作需要。在某些特殊场合，还有特殊的外形防护型式，如防爆式、潜水泵式等。不管外形如何，电动机结构基本上是相同的。现以封闭式电动机为例，介绍三相异步电动机的结构。

封闭式三相异步电动机的结构如图 1-1 所示。三相异步电动机可分为定子、转子两大部

分。定子是电机中固定不动的部分, 转子是电机的旋转部分。由于异步电动机的定子产生励磁旋转磁场, 同时从电源吸收电能, 并通过旋转磁场将电能转换成转子轴上的机械能, 所以与直流电机不同, 交流电机定子是电枢。另外, 定、转子之间还必须有一定间隙 (称为空气隙), 以保证转子的自由转动。

(1) 定子部分。定子部分由机座、定子铁心、定子绕组及端盖、轴承等部件组成。

机座用来支承定子铁心和固定端盖。中、小型电动机机座一般用铸铁浇铸而成, 大型电动机多采用钢板焊接而成。

定子铁心是电动机磁路的一部分。为了减小涡流和磁滞损耗, 通常用 0.5mm 厚的硅钢片叠压成圆筒, 硅钢片表面的氧化层 (大型电动机要求涂绝缘漆) 作为片间绝缘, 在铁心的内圆上均匀分布有与轴平行的槽, 用以嵌放定子绕组。

定子绕组是电动机的电路部分, 也是最重要的部分, 一般是由绝缘铜 (或铝) 导线绕制的绕组连接而成, 按一定的排列方式嵌入定子槽内, 构成对称的三相绕组。三相对称定子绕组可接成星形和三角形, 它的作用是利用通入的三相交流电产生旋转磁场。槽内绕组匝间、绕组与铁心之间都要有良好的绝缘。

轴承是电动机定、转子衔接的部位。轴承有滚动轴承和滑动轴承两类。滚动轴承又有滚珠轴承 (也称为球轴承), 目前多数电动机都采用滚动轴承。这种轴承的外部有储存润滑油的油箱, 轴承上还装有油环, 轴转动时带动油环转动, 将油箱中的润滑油带到轴与轴承的接触面上。为使润滑油能分布在整个接触面上, 轴承上紧贴轴的一面一般开有油槽。滑动轴承是在滑动摩擦下工作的轴承。在液体润滑条件下, 滑动的表面被润滑油分开而不发生直接接触, 大大减小摩擦损失和表面磨损, 油膜还具有一定的吸振能力。滑动轴承一般应用在低速重载工况条件下。

(2) 转子部分。转子是电动机中的旋转部分, 一般由转轴、转子铁心、转子绕组、风扇等组成。转轴用碳钢制成, 两端轴颈与轴承相配合。出轴端铣有键槽, 用以固定皮带轮或联轴器。转轴是输出转矩、带动负载的部件。转子铁心也是电动机磁路的一部分, 由 0.5mm 厚的硅钢片叠压成圆柱体, 并紧固在转子轴上。转子铁心的外表面有均匀分布的线槽, 用以嵌放转子绕组。

三相异步电动机按照转子绕组形式的不同, 一般可分为笼型异步电动机和绕线转子异步电动机。

笼型异步电动机转子线槽一般都是斜槽 (线槽与轴线不平行), 目的是改善起动与调速性能。笼型转子绕组 (也称为导条) 是在转子铁心的槽里嵌放裸铜条或铝条, 然后用两个金属环 (称为端环) 分别在裸金属导条两端把它们全部接通 (短接), 即构成了自行闭合的转子绕组。小型笼型电动机一般用铸铝转子, 这种转子是用熔化的铝液浇在转子铁心上, 导条、端环一次浇铸出来。如果去掉铁心, 整个绕组形似鼠笼, 所以得名笼型绕组, 如图 1-2 所示。图 1-2 (a) 为笼型直条形式, 图 1-2 (b) 为笼型斜条形式。

一般电动机转子上还装有风扇或风翼, 便于电动机运转时通风散热。铸铝转子一般是将风翼和绕组 (导条) 一起浇铸出来, 如图 1-2 (b) 所示。

绕线转子异步电动机转子绕组与定子绕组类似, 由镶嵌在转子铁心槽中的三相绕组组成。绕组一般采用星形连接, 三相绕组的尾端接在一起, 首端分别接到转轴上的 3 个铜滑环上, 通过电刷将 3 根旋转的线变成了固定线, 与外部的变阻器连接, 构成转子的闭合回路, 以便于控制, 如图 1-3 所示。有的电动机还装有提刷短路装置, 当电动机起动后又不需要调速时,

可提起电刷，同时使用 3 个滑环短路，以减少电刷磨损。

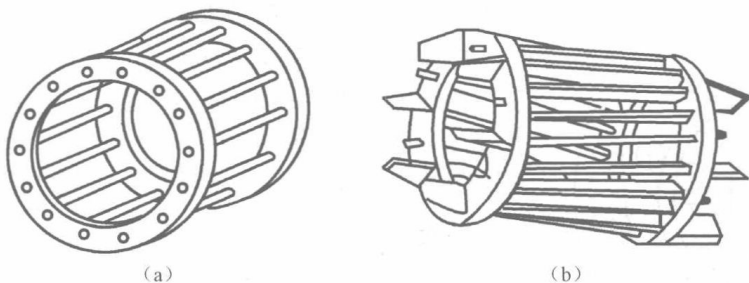


图 1-2 笼型异步电动机的转子绕组形式

(a) 直条形式；(b) 斜条形式

两种转子相比较，笼型转子结构简单，造价低廉，运行可靠，因而应用十分广泛。绕线转子结构较复杂，造价也高，但是它的起动性能较好，并能利用变阻器阻值的变化，使电动机在一定范围内调速；在起动频繁，需要较大起动转矩的生产机械（如起重机）中常常被采用。

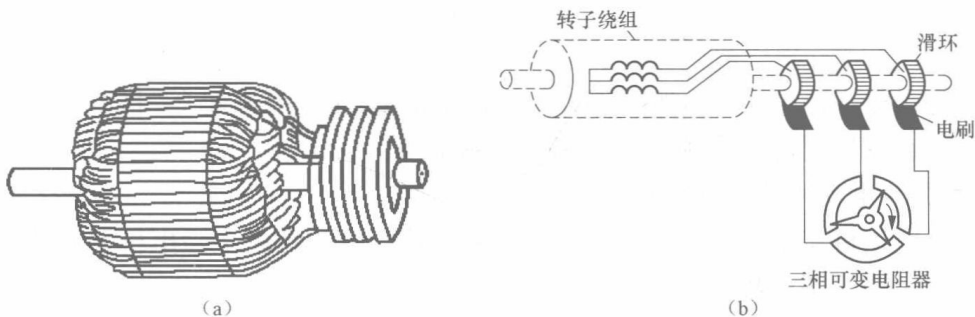


图 1-3 绕线转子异步电动机的转子

(a) 绕组外观；(b) 绕组接线图

(3) 气隙。所谓气隙就是定子与转子之间的空隙。中小型异步电动机的气隙一般为 0.2~1.5mm。气隙的大小对电动机性能影响较大。气隙大，磁阻也大，产生同样大小的磁通，所需的励磁电流也越大，电动机的功率因数也就越低。但气隙过小，将给装配造成困难，运行时定、转子容易发生摩擦，使电动机运行不可靠。

2. 三相异步电动机的转动

(1) 旋转磁场。在三相对称定子绕组中通入三相交流电，便产生一个旋转磁场，旋转磁场的转速与三相交流电的频率和电动机的磁极对数有关，表达式为

$$n_1 = 60 \frac{f_1}{p} \quad (1-1)$$

式中： n_1 为旋转磁场转速，又称为同步转速，单位为 r/min； f_1 为电源的频率，单位为 Hz； p 为旋转磁场的磁极对数。

同步转速 n_1 的旋转方向由电源的相序决定。设电源为正序，同步转速 n_1 为顺时针方向旋转，若将三相定子绕组与三相电源接线中的任意两相对调， n_1 则为逆时针方向旋转。

(2) 转子的转动。当定子绕组接通三相交流电源，在定子空间产生旋转磁场。图 1-4 所示为某瞬时旋转磁场的。假设旋转磁场按顺时针方向旋转，则相当于转子按逆时针方向切割

磁场, 转子绕组中便产生感应电动势, 转子回路产生感应电流, 这个电流在磁场中受到力的作用, 产生与旋转磁场方向一致的电磁转矩 T 。当 $T > T_L$ 时, 电动机拖动负载转动。

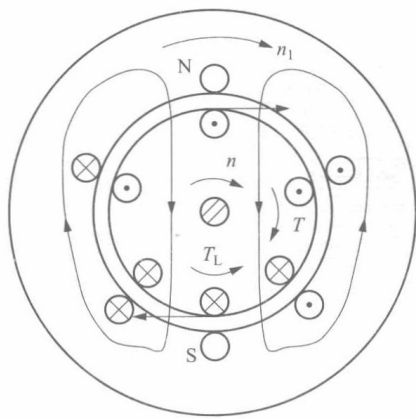


图 1-4 三相异步电动机的转动原理

由于转子只有在切割旋转磁场的情况下, 才能产生感应电流, 从而产生电磁力矩使转子转动, 因此转子的转速 n 要比旋转磁场的转速 n_1 低一点, 它们之间的差值用转速差 Δn 表示, 即 $\Delta n = n_1 - n$ 。转速差与同步转速的比值称为转差率 s , 即

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (1-2)$$

s 是分析异步电动机运行状态的重要参数。

在电动机起动的瞬间, 转子转速 $n=0$, 转差率 $s=1$; 当电动机以额定转速运行时, 转差率很小, 约为 $0.02 \sim 0.06$; 当电动机空载运行时, 转子转速略小于同步转速, 转差率约等于零。

由式 (1-1) 和式 (1-2) 整理可得到转子转速的表达式为

$$n = (1 - s) \frac{60 f_1}{p} \quad (1-3)$$

由此可见, 转子转速 n 与电源频率 f_1 、磁极对数 p 、转差率 s 有关。因此, 三相异步电动机的调速方式有变极调速、变频调速、变转差率调速。

3. 三相异步电动机的铭牌数据

三相异步电动机在出厂时, 机座上都固定着一块铭牌, 铭牌上除电机型号外, 还标注着额定数据。其主要的额定数据为:

(1) 额定功率 P_N (W), 是指电动机额定工作状态时, 电动机轴上输出的机械功率, 表达式为

$$P_N = \sqrt{3} I_N U_N \cos \varphi_N \eta_N \quad (1-4)$$

(2) 额定电压 U_N (V), 是指电动机额定工作状态时, 电源加于定子绕组出线端的线电压。

(3) 额定电流 I_N (A), 是指电动机额定工作状态时, 电源供给定子绕组上的线电流。

(4) 额定转速 n_N (r/min), 是指电动机额定工作状态时, 转轴上的每分钟的转速。

(5) 额定频率 f_N (Hz), 是指电动机所接交流电源的频率, 我国工频电频率 50Hz。

(6) 额定工作制, 是指电动机在额定状态下工作, 可以持续运转的时间和顺序, 可分为额定连续工作的定额 S1、短时工作的定额 S2、断续工作的定额 S3 三种。

此外, 铭牌上还标明绕组的相数与接法 (接成星形或三角形)、绝缘等级及温升等。对于绕线转子异步电动机, 还应标明转子的额定电动势及额定电流。

1.3.2 三相异步电动机及拖动负载的机械特性

1. 电力拖动系统

(1) 电力拖动系统组成。由电动机带动生产机械运行的系统称作电力拖动系统, 一般由电动机、传动机构、生产机械、控制系统等部分组成, 如图 1-5 所示。电动机是拖动生产机械的原动力。控制系统主要包括控制电动机的起动、调速、制动等相关环节的设备和电路。在变频调速控制系统中, 用于控制转速的就是变频器。传动机构在拖动系统中的作用主要是变速以及实现转矩与飞轮力矩的传递和变换。

(2) 传动机构系统参数折算。

1) 传动比。大多数的传动机构都具有变速的功能。变速的多少由传动比来衡量, 常用 λ 表示, 其表达式为

$$\lambda = \frac{n_{\max}}{n_{L\max}} \quad (1-5)$$

式中: $n_{\max}$ 是电动机的最高转速; $n_{L\max}$ 是负载的最高转速。

$\lambda > 1$ 时, 传动机构为减速机构; $\lambda < 1$ 时, 传动机构为增速机构。

2) 拖动系统的参数折算。拖动系统的运行状态是对电动机和负载的机械特性进行比较而得到的。

传动机构改变了同一状态下电动机和负载的转速, 使它们无法在同一个坐标系里进行比较。为了解决这个问题, 需要将电动机的电磁转矩、负载转矩、飞轮力矩折算到同一根轴上, 一般是折算到电动机的轴上。折算的原则是保证各轴所传递的机械功率不变且储存的动能相同。在图 1-5 中, 如忽略传动机构的功率损耗, 则传动机构输入侧和输出侧的机械功率应相等。由此可知

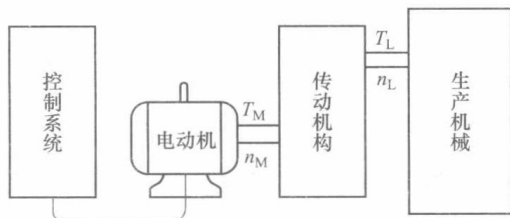


图 1-5 电力拖动系统的组成

$$\frac{T_M n_M}{9550} = \frac{T_L n_L}{9550} \quad (1-6)$$

$$\frac{T_M}{T_L} = \frac{n_L}{n_M} = \frac{1}{\lambda} \quad (1-7)$$

用 n'_L 、 T'_L 来表示负载转速、转矩折算到电动机轴上的值, 在数值上它们应该与 n_M 、 T_M 相等, 因此可以得到

$$n'_L = n_L \lambda \quad (1-8)$$

$$T'_L = \frac{T_L}{\lambda} \quad (1-9)$$

2. 机械特性

机械特性包括三相异步电动机的机械特性以及生产机械负载的机械特性。

电动机的机械特性是指电动机的转速 n 与电动机轴上产生的电磁转矩 T 的关系。生产机械负载的机械特性反映的是负载转矩 T_L 与生产机械的转速 n 的关系。

(1) 三相异步电动机的机械特性。三相异步电动机的机械特性是指在电动机定子电压、频率以及绕组参数一定的条件下, 电动机电磁转矩与转速或转差率的关系, 即 $n=f(T)$ 或 $s=f(T)$ 。

机械特性可用函数表示, 也可用曲线表示。用函数表示时, 有物理表达式、参数表达式和实用表达式三种表达式。

1) 函数表达式。

a) 物理表达式

$$\begin{aligned} T &= \frac{P_{\text{em}}}{\Omega_1} = \frac{m_1 E'_2 I'_2 \cos \varphi_2}{\frac{2\pi n_1}{60}} = \frac{m_1 (4.44 f_1 N_1 k_{w1} \Phi_m) I'_2 \cos \varphi_2}{\frac{2\pi f_1}{p}} \\ &= \frac{pm_1 N_1 k_{w1}}{\sqrt{2}} \Phi_m I'_2 \cos \varphi_2 = C_T \Phi_m I'_2 \cos \varphi_2 \end{aligned} \quad (1-10)$$

式中: P_{em} 为异步电动机电磁功率; Ω_1 为异步电动机同步角速度; C_T 为电动机电磁转矩常数, 与电机结构有关; m_1 为异步电动机定子绕组相; $\cos\varphi_2$ 为转子电路的功率因数; E'_2 为转子感应电动势折算值; I'_2 为转子电流的折算值; Φ_m 为主磁通; f_1 为交流电频率; p 为磁极对数; N_1 为电机每相绕组匝数; K_{w1} 为电机定子绕组绕组系数。

物理表达式反映了不同转速时电磁转矩 T 与主磁通 Φ_m 以及转子电流有功分量 $I'_2 \cos\varphi_2$ 之间的关系。该表达式一般用来定性分析在不同运行状态下的转矩大小和性质。

b) 参数表达式

$$T = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s}}{\frac{2\pi f_1}{p}} = \frac{3p U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]} \quad (1-11)$$

异步电动机的电磁转矩 T 与定子每相电压 U_1 平方成正比, 若电源电压波动大, 会对转矩造成很大影响。

2) 曲线表达方式。在电压、频率及绕组参数一定的条件下, 电磁转矩 T 与转差率 s 之间的关系可用曲线表示。

a) 固有机机械特性曲线。三相异步电动机的固有机机械特性是指 $U_1=U_{1N}$, $f_1=f_{1N}$, 定子三相绕组按规定方式连接, 定子和转子电路中不外接任何元件时测得的机械特性 $n=f(T)$ 或 $T=f(s)$ 曲线, 如图 1-6 所示。

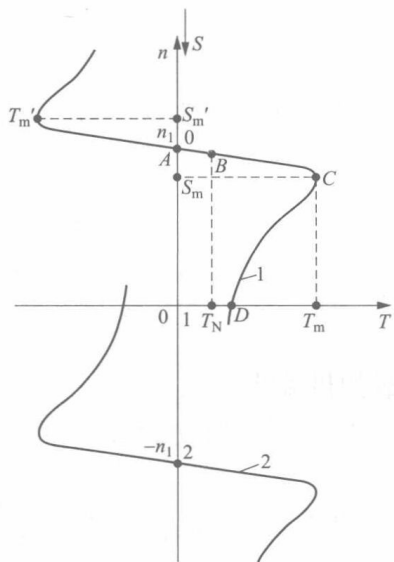


图 1-6 异步电动机固有机机械特性

1—正转特性; 2—反转特性

对于同一台三相异步电动机有正转 (曲线 1) 和反转 (曲线 2) 两条固有机机械特性。

三相异步电动机固有机机械特性的几个特殊运行点:

①同步转速点 A。同步转速点又称理想空载点, 在该点处, $s=0$, $n=n_1$, $T=0$, 转子感应电动势 $E_{2s}=0$, $I_2=0$, $I_1=I_0$, 电动机处于理想空载状态。

②额定运行点 B。在该点处, $n=n_N$, $T=T_N$, $I_1=I_{1N}$, $I_2=I_{2N}$, $P_2=P_N$, 电动机处于额定运行状态。

③临界点 C。在该点处, $s=s_m$, $T=T_m$, 对应的电磁转矩是电动机所能提供的最大转矩。 T'_m 是异步电动机回馈制动状态所对应的最大转矩, 若忽略 r_1 的影响时, 有 $T'_m = T_m$ 。

④起动点 D。在该点处, $s=1$, $n=0$, $T=T_{st}$, $I=I_{st}$ 。

b) 人为机械特性。异步电动机的人为机械特性是指人为改变电动机的电气参数而得到的机械特性。

由参数表达式可知, 改变定子电压 U_1 、定子频率 f_1 、极对数 p 、定子回路电阻 r_1 和电抗 x_1 、转子回路电阻 r_2' 和电抗 x_2' , 都可得到不同的人为机械特性。

(2) 拖动负载的机械特性。生产机械的负载转矩 T_L , 大部分情况下与电动机的电磁转矩 T 方向相反。不同负载的机械特性是不一样的, 可以将其归纳以下几种类型:

1) 恒转矩负载。恒转矩负载是指那些负载转矩的大小, 仅仅取决于负载的大小, 而和转速大小无关的负载。带式输送机是恒转矩负载的典型例子之一, 其基本结构和工作情况如图 1-7 所示。

恒转矩负载阻转矩 T_L 表达式为

$$T_L = Fr \quad (1-12)$$

式中： F 为皮带与滚筒间的摩擦阻力。

a) 恒转矩负载转矩特点。由于 F 和 r 都和转速的快慢无关，所以在调节转速 n_L 的过程中，负载的阻转矩 T_L 保持不变，即具有恒转矩的特点，即

$$T_L = \text{常数} \quad (1-13)$$

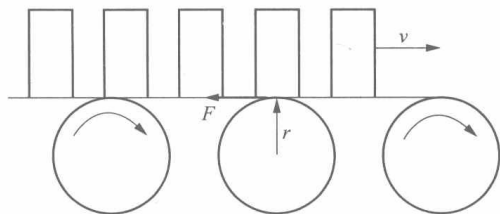


图 1-7 恒转矩负载基本机构和工作情况



注意

这里所说的转矩大小的是否变化，是相对于转速变化而言的，不能和负载大小变化时转矩大小的变化相混淆。或者说，“恒转矩”负载的特点是，负载转矩的大小仅仅取决于负载的大小，而和转速大小无关。以带式输送机为例，当传输带上的物品较多时，不论转速有多大，负载转矩都较大；而当传输带上的物品较少时，也不论转速有多大，负载转矩都较小。

b) 恒转矩负载功率特点。根据负载的机械功率 P_L 和转矩 T_L 、转速 n_L 之间的关系，有

$$P_L = \frac{T_L n_L}{9550} \propto n_L \quad (1-14)$$

即负载功率与转速成正比。

2) 恒功率负载。恒功率负载是指负载转矩 T_L 的大小与转速 n 成反比，而其功率基本维持不变的负载。

a) 恒功率负载特点。薄膜在卷取过程中，要求被卷物的张力 F 必须保持恒定，其基本手段是使线速度 V 保持恒定。所以，在不同的转速下，负载的功率基本恒定，即

$$P_L = \text{常数} \quad (1-15)$$

负载功率的大小与转速的高低无关，其功率特性曲线如图 1-8 所示。

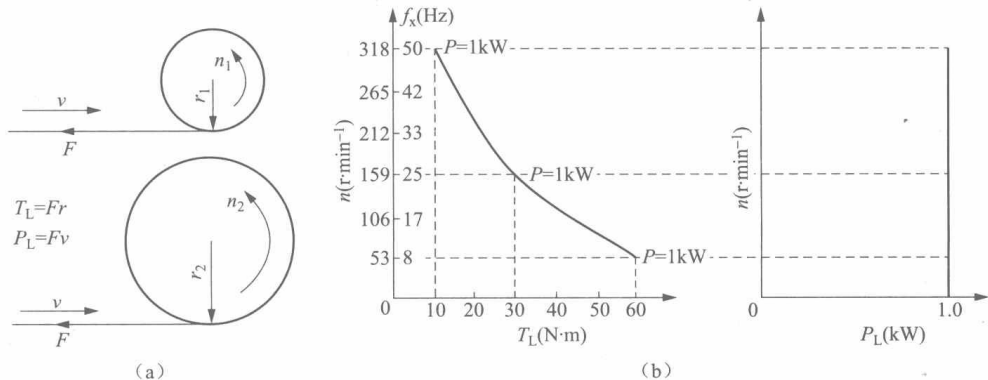


图 1-8 恒功率负载功率特性曲线

(a) 恒功率负载张力与速度关系；(b) 恒功率负载功率特性曲线



注意

这里所说的恒功率，是指在转速变化过程中，功率基本不变，不能和负载大小的变化相混淆。就卷取机械而言，当被卷物体的材质不同时，所要求的张力和线速度是不一样的，其卷取功率的大小也就不相等。

b) 恒功率转矩特点。随着卷取物不断地卷绕到卷取辊上, 卷取半径将越来越大, 负载转矩也随之增大。另外, 由于要求线速度 v 保持恒定, 故随着卷取半径 r 的不断增大, 转速 n_L 必将不断减小。

根据负载的机械功率得 P_L 和转矩 T_L 、转速 n_L 之间的关系为

$$T_L = \frac{9550 P_L}{n_L} \quad (1-16)$$

即, 负载阻转矩的大小与转速成反比。

3) 二次方律负载。二次方律负载是指转矩与速度的二次方成正比例变化的负载, 如风扇、风机、泵、螺旋桨等机械的负载转矩, 如图 1-9 所示。在低速时由于流体的流速低, 所以负载转矩很小, 随着电动机转速的增加, 流速增快, 负载转矩和功率也越来越大。

二次方律负载的机械特性和功率特性如图 1-9 所示。

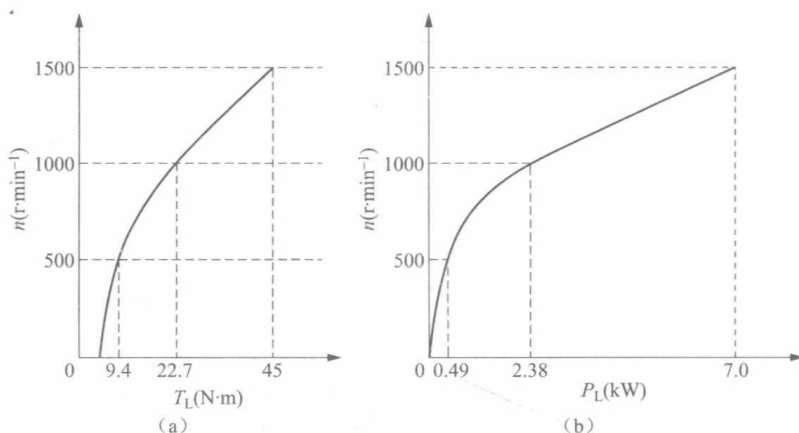


图 1-9 二次方律负载机械特性和功率特性

(a) 机械特性; (b) 功率特性

1.3.3 三相异步电动机的起动与调速

1. 起动

对于小容量三相异步电动机可采用直接起动, 但是容量较大的三相笼型异步电动机常见的起动方法有自耦变压器减压起动、Y—△起动、定子串电阻或串电抗等减压起动。三相绕线型异步电动机采用转子串电阻、串频敏变阻器起动。

由于上述起动方法会导致起动过程存在较大的冲击电流, 不但对负载造成很大冲击, 还易导致电网电压波动。因此, 一种利用电力电子技术与自动控制技术实现电机软起动、软停车的控制器应用范围逐渐扩大。

2. 调速

根据式 (1-3) 分析 $n = (1-s)60f_1/p$ 得到, 三相异步电动机调速方法有变极调速、变频调速、变转差率调速。

(1) 变级调速。这种调速方法是用改变定子绕组的接线方式来改变笼型电动机定子极对数达到调速目的。其特点为: 具有较硬的机械特性, 稳定性良好; 无转差损耗, 效率高; 接线简单, 控制方便, 价格低; 有级调速, 级差较大, 不能获得平滑调速; 与调压调速、电磁转差离合器配合使用, 可获得较高效率的平滑调速特性。

本方法适用于不需要无级调速的生产机械, 如金属切削机床、升降机、起重设备、风机、