



工业自动化实用技术丛书

GONGYE ZIDONGHUA SHIYONG JISHU CONGSHU

# PLC与 变频器

## 快速入门与实践

■ 岂兴明 主编

 人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



工业自动化实用技术丛书

GONGYE ZIDONGHUA SHIYONG JISHU CONGSHU

# PLC 与 变频器

## 快速入门与实践

■ 岂兴明 主编

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

PLC与变频器快速入门与实践 / 岂兴明 主编.

— 北京 : 人民邮电出版社, 2011. 1

(工业自动化实用技术丛书)

ISBN 978-7-115-23703-3

I. ①P… II. ①岂… III. ①可程序控制器  
②变频器 IV. ①TM571.6②TN773

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第186830号

## 内 容 提 要

本书介绍了变频器调速及控制等基础知识, 讲解了 PLC 功能指令、模块和变频器调速系统设计方法, 结合具体工程实例讲解了 PLC 和变频器控制系统的设计方法。

本书内容全面、条理清晰、实例丰富, 可供读者自学 PLC 编程和变频器应用使用, 也可作为大专院校相关专业的参考用书。本书有助于读者快速掌握 PLC 和变频器控制原理, 完成高质量的控制系统设计。

工业自动化实用技术丛书

## PLC 与变频器快速入门与实践

- 
- ◆ 主 编 岂兴明  
责任编辑 张 鹏
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京昌平百善印刷厂印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 22.5  
字数: 546 千字 2011 年 1 月第 1 版  
字数: 1-4 000 册 2011 年 1 月北京第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-115-23703-3

定价: 45.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

# 前 言

随着工业自动化技术的不断发展,各种生产设备对控制性能的要求不断提高;以 PLC 和变频器为代表的控制器技术不断完善与成熟,越来越多的设计者使用 PLC 来完成控制任务,可以说,PLC 已经成为工业控制系统中的一个组成部分。目前,市场上 PLC 与变频器的生产厂家众多,同系列的产品型号繁多,本书以主流的西门子、三菱和欧姆龙品牌 PLC 作为讲解重点。本书具有丰富而有代表性的应用实例,并且对每个细致挑选的实例进行了生动的图解说明,能够起到举一反三的作用。同时,还提供了实例的程序源代码,读者可以登录人民邮电出版社网站下载,对相应程序进行模拟仿真,以便能尽快地掌握 PLC 与变频器的使用方法。

本书系统地阐述了 PLC 与变频器的基本概念、原理、设计方法,还介绍了综合应用实例。全书通过 3 部分来讲述,分别为基础篇、提高篇和实践篇。

基础篇涵盖第 1 章~第 4 章。第 1 章概括地讲述了变频器的发展历程、工作原理、基本构成与分类情况。第 2 章围绕交流调速,介绍了电动机调速的 7 种方法、调速电动机的工作原理,阐述了 PWM 的控制原理。第 3 章主要讲解变频器运行过程中的参数设定及与 PLC 的硬件连接。第 4 章主要介绍了变频调速控制的基本原理,讲述了异步电动机工作的基本原理,阐述了变频调速的  $U/f$  恒定控制、转差率控制、矢量控制、直接转矩控制 4 种基本控制方式。

提高篇包括第 5 章和第 6 章。第 5 章从模拟量控制、高速计数比较控制和通信程序设计 3 个方面讲解了 PLC 的功能指令及功能模块。第 6 章从系统设计的角度,由变频器选择开始,分别讲解了变频器的主要控制功能、变频器周边设备的选择及变频器的安装。

实践篇包含第 7 章~第 9 章。第 7 章围绕 PLC 的顺序控制功能,讲解了开炼机变频调速控制系统、牵引机控制系统两个工程实例,介绍了使用日本欧姆龙公司 PLC 设计控制系统的流程,重点阐述了 PLC 和变频器综合控制系统设计中 PLC 和变频器的选型、PLC 与变频器的硬件连接以及 PLC 程序开发。第 8 章介绍了三菱公司主要的 PLC 模拟量模块和变频器产品,以自动喷涂控制系统设计为例,讲述了控制系统的开发流程及 PLC 实现模拟量控制的方法。第 9 章以 4 个工程实例为核心,深入浅出地讲解了 PLC 与变频器在恒压供水系统、挤出机控制系统、复贴机电控张力控制系统、造纸机传动调速系统中的设计与应用,详细分析了具体的工业控制需求,据此设计出控制系统硬件电路及满足相应控制精度要求的 PLC 程序。

本书层次清楚、内容翔实、图文并茂、由浅入深,适合作为 PLC 和变频器初、中级读者的自学教材,可以使初学者在较短的时间内学会 PLC 控制系统和变频器调速系统的设计方法。

本书由岂兴明主编。同时感谢周火金、张君、程世勇、于金龙、刘增莲、杨健、矫志斌、邢朝阳、朱冬、陈柯、龚明杨、周薇、刘佳等人对本书编写工作的指导和帮助。

限于我们水平,加之时间仓促,书中难免有不足与疏漏之处,望广大读者朋友批评指正。

编 者

# 目 录

## 基 础 篇

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第 1 章 变频器概述          | 3  |
| 1.1 变频器的发展           | 3  |
| 1.1.1 变频器的技术发展       | 3  |
| 1.1.2 我国变频器发展现状及前景   | 5  |
| 1.2 变频器的基本工作原理及特点    | 6  |
| 1.2.1 变频器的基本工作原理     | 6  |
| 1.2.2 变频器的特点         | 7  |
| 1.3 变频器的构成与功能        | 8  |
| 1.3.1 整流电路           | 9  |
| 1.3.2 中间电路           | 9  |
| 1.3.3 逆变电路           | 11 |
| 1.3.4 控制电路           | 11 |
| 1.4 变频器的分类           | 11 |
| 1.4.1 依据主电路结构形式分类    | 12 |
| 1.4.2 依据主电路工作方式分类    | 12 |
| 1.4.3 依据控制方式分类       | 13 |
| 1.4.4 依据逆变器开关方式分类    | 14 |
| 1.4.5 依据用途分类         | 15 |
| 1.5 变频器的配套设备         | 16 |
| 1.6 本章小结             | 20 |
| 第 2 章 交流调速基础         | 21 |
| 2.1 电动机调速的 7 种方法     | 21 |
| 2.2 变频调速概述           | 24 |
| 2.2.1 变频调速和 PWM 技术简介 | 24 |
| 2.2.2 变频调速控制技术的发展趋势  | 26 |
| 2.2.3 新型调速电动机的特点     | 28 |
| 2.3 PWM 控制原理         | 28 |
| 2.3.1 PWM 的调制模式      | 29 |

|              |                      |           |
|--------------|----------------------|-----------|
| 2.3.2        | PWM 的方法              | 30        |
| 2.3.3        | 正弦波脉宽调制 (SPWM)       | 35        |
| 2.3.4        | 电压空间矢量脉宽调制 (SVPWM)   | 41        |
| 2.3.5        | 特定谐波消除脉宽调制 (SHEPWM)  | 44        |
| 2.3.6        | SPWM 与 SVPWM 两种方法的比较 | 52        |
| 2.4          | 本章小结                 | 53        |
| <b>第 3 章</b> | <b>变频器的运行</b>        | <b>54</b> |
| 3.1          | 变频器常用运行参数及设定         | 54        |
| 3.1.1        | 变频器的常用运行参数           | 54        |
| 3.1.2        | 变频器的常用运行参数设定方法       | 56        |
| 3.2          | 变频器的运行方式             | 60        |
| 3.2.1        | 点动运行                 | 60        |
| 3.2.2        | 并联运行                 | 61        |
| 3.2.3        | 同步运行                 | 63        |
| 3.2.4        | 正、反转运行               | 65        |
| 3.2.5        | 瞬停再启动运行              | 66        |
| 3.2.6        | 正转运行                 | 67        |
| 3.2.7        | 多段速运行                | 67        |
| 3.2.8        | PID 运行               | 70        |
| 3.2.9        | 工频与变频运行              | 74        |
| 3.2.10       | 节能运行                 | 78        |
| 3.3          | 变频器与 PLC 的连接方式       | 80        |
| 3.3.1        | 运行信号的输入              | 80        |
| 3.3.2        | 频率指令信号的输入            | 82        |
| 3.3.3        | 触点输出信号               | 84        |
| 3.3.4        | 连接注意事项               | 84        |
| 3.4          | 本章小结                 | 85        |
| <b>第 4 章</b> | <b>变频调速控制原理</b>      | <b>87</b> |
| 4.1          | 异步电动机基本工作原理          | 87        |
| 4.1.1        | 异步电动机的结构             | 87        |
| 4.1.2        | 三相异步电动机旋转原理          | 89        |
| 4.2          | $U/f$ 恒定控制           | 91        |
| 4.2.1        | $U/f$ 控制基本原理         | 91        |
| 4.2.2        | 恒定控制方式               | 91        |
| 4.2.3        | 恒磁通控制方式              | 92        |
| 4.2.4        | 恒功率控制方式              | 93        |
| 4.2.5        | 电压型 $U/f$ 控制变频器      | 94        |

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 4.3   | 转差频率控制 .....             | 95  |
| 4.3.1 | 转差频率控制基本原理 .....         | 95  |
| 4.3.2 | 转差频率控制规律 .....           | 95  |
| 4.3.3 | 转差频率控制变频器的系统结构 .....     | 96  |
| 4.4   | 矢量控制 .....               | 97  |
| 4.4.1 | 矢量控制基本原理 .....           | 97  |
| 4.4.2 | 基于转差频率控制的矢量控制方式 .....    | 97  |
| 4.4.3 | 无速度传感器的矢量控制方式 .....      | 99  |
| 4.4.4 | 3种控制方式的特性比较 .....        | 99  |
| 4.5   | 直接转矩控制 .....             | 101 |
| 4.5.1 | 直接转矩控制基本原理 .....         | 101 |
| 4.5.2 | 直接转矩控制的特点 .....          | 101 |
| 4.5.3 | 直接转矩控制系统与矢量控制系统的比较 ..... | 102 |
| 4.6   | 本章小结 .....               | 103 |

## 提 高 篇

|       |                                    |     |
|-------|------------------------------------|-----|
| 第 5 章 | PLC 功能指令及功能模块 .....                | 107 |
| 5.1   | 模拟量控制 .....                        | 107 |
| 5.1.1 | 概述 .....                           | 107 |
| 5.1.2 | 模拟量基本 PID 控制 .....                 | 108 |
| 5.1.3 | 用 Omron PLC PID 指令实现 PID 控制 .....  | 109 |
| 5.1.4 | 用三菱 PLC PID 指令实现 PID 控制 .....      | 113 |
| 5.1.5 | 用西门子 PLC PID 指令、函数块实现 PID 控制 ..... | 116 |
| 5.2   | 高速计数比较控制 .....                     | 121 |
| 5.2.1 | 概述 .....                           | 121 |
| 5.2.2 | 用罗克韦尔 (A-B) PLC 内置高速计数器比较控制 .....  | 121 |
| 5.2.3 | 用三菱 PLC 高速计数模块比较控制 .....           | 124 |
| 5.3   | PLC 通信程序 .....                     | 125 |
| 5.3.1 | 概述 .....                           | 125 |
| 5.3.2 | 西门子 S7-200 系列 .....                | 126 |
| 5.3.3 | 三菱 FX 系列 PLC .....                 | 130 |
| 5.3.4 | PLC 与智能装置间的通信程序设计 .....            | 131 |
| 5.4   | 本章小结 .....                         | 132 |
| 第 6 章 | 变频器调速系统设计 .....                    | 133 |
| 6.1   | 变频器的选择和容量计算 .....                  | 133 |
| 6.1.1 | 负载的转矩特性 .....                      | 133 |
| 6.1.2 | 变频器容量计算 .....                      | 135 |



|       |                 |     |
|-------|-----------------|-----|
| 6.1.3 | 变频器的选择          | 139 |
| 6.2   | 变频器的主要控制功能与参数设定 | 142 |
| 6.2.1 | 变频器的外部接口电路      | 142 |
| 6.2.2 | 变频器的主要控制功能      | 144 |
| 6.2.3 | 变频器的参数设定        | 148 |
| 6.3   | 变频器周边设备的选择      | 150 |
| 6.3.1 | 电源协调用交流电抗器      | 150 |
| 6.3.2 | 改善功率因数直流电抗器     | 151 |
| 6.3.3 | 电源滤波器           | 152 |
| 6.3.4 | 制动电阻与制动单元       | 153 |
| 6.4   | 变频器的安装          | 155 |
| 6.4.1 | 安装环境的要求         | 155 |
| 6.4.2 | 安装方法            | 157 |
| 6.4.3 | 安装柜设计           | 158 |
| 6.4.4 | 变频器的接线          | 159 |
| 6.5   | 本章小结            | 163 |

## 实 践 篇

|       |                            |     |
|-------|----------------------------|-----|
| 第 7 章 | 顺序控制与工程实例                  | 167 |
| 7.1   | 欧姆龙 (Omron) PLC 介绍         | 167 |
| 7.2   | 欧姆龙 (Omron) 变频器介绍          | 170 |
| 7.3   | 开炼机变频器控制系统设计               | 172 |
| 7.3.1 | 开炼机控制系统功能说明                | 172 |
| 7.3.2 | 开炼机控制系统硬件选型                | 174 |
| 7.3.3 | 开炼机变频调速 (台达变频器) 控制系统设计     | 182 |
| 7.4   | PLC 控制牵引机变频器启动、停止的实现       | 185 |
| 7.4.1 | 牵引机控制系统概述                  | 185 |
| 7.4.2 | 牵引机控制系统功能说明                | 186 |
| 7.4.3 | Omron PLC 控制变频器控制系统的设计     | 186 |
| 7.5   | 本章小结                       | 197 |
| 第 8 章 | 模拟量控制与工程实例                 | 198 |
| 8.1   | 三菱 PLC 模拟量模块介绍             | 198 |
| 8.2   | FX 系列的 12 位模拟量输入/输出模块的公共特性 | 199 |
| 8.3   | 三菱变频器介绍                    | 201 |
| 8.4   | 控制系统的设计流程                  | 205 |
| 8.4.1 | PLC 控制系统的设计内容              | 206 |
| 8.4.2 | PLC 控制系统的设计步骤              | 206 |





|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 8.4.3 电气控制原理图——硬件设计        | 207        |
| 8.5 自动喷涂控制系统设计             | 215        |
| 8.5.1 分析控制需求               | 215        |
| 8.5.2 系统的运动控制方案            | 216        |
| 8.5.3 硬件系统                 | 216        |
| 8.5.4 软件系统                 | 220        |
| 8.6 本章小结                   | 227        |
| <b>第9章 PLC与变频器通信综合应用实例</b> | <b>228</b> |
| 9.1 变频调速恒压供水系统             | 228        |
| 9.1.1 变频调速恒压供水系统概述         | 229        |
| 9.1.2 系统硬件选择及系统电路设计        | 234        |
| 9.1.3 PLC程序设计              | 240        |
| 9.2 西门子PLC挤出机控制系统设计        | 255        |
| 9.2.1 挤出机系统概述              | 256        |
| 9.2.2 系统硬件选择及系统电路设计        | 262        |
| 9.2.3 PLC控制软件设计            | 277        |
| 9.3 基于PLC的复贴机电控张力控制系统设计    | 284        |
| 9.3.1 PLC复贴机电控张力控制系统概述     | 285        |
| 9.3.2 系统硬件选择及电路设计          | 290        |
| 9.3.3 PLC控制软件设计            | 296        |
| 9.4 基于现场总线的造纸机传动调速系统设计     | 310        |
| 9.4.1 造纸机传动调速系统概述          | 310        |
| 9.4.2 系统硬件选择及系统电路设计        | 315        |
| 9.4.3 PLC程序设计              | 323        |
| 9.5 本章小结                   | 330        |
| <b>附录1 Omron公司PLC性能简介</b>  | <b>331</b> |
| <b>附录2 典型通用变频器技术规范</b>     | <b>336</b> |
| <b>附录3 变频器常用附件的选用</b>      | <b>343</b> |
| <b>附录4 变频器典型应用电路</b>       | <b>347</b> |

# 基础篇

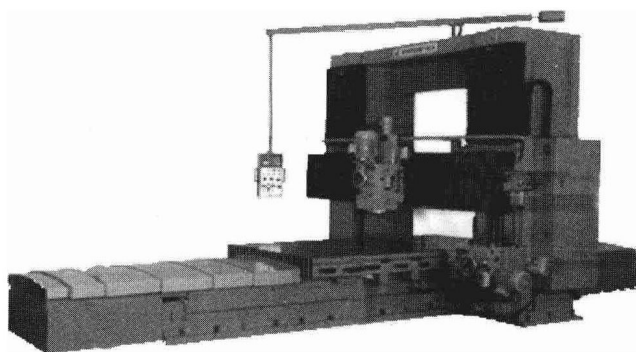
---

第 1 章 变频器概述

第 2 章 交流调速基础

第 3 章 变频器的运行

第 4 章 变频调速控制原理





# 第 1 章 变频器概述

随着工业自动化的快速发展和对调速性能要求的越来越高，变频器在各行各业的应用越来越广泛。交流电动机变频调速技术是当今节能、改善工艺流程以提高产品性能、推动技术进步的一种重要手段，其发展与电力电子技术、微机控制技术和网络通信技术的发展息息相关。变频调速以其优良的高效连续调速和启制动性能，高功率因数和节能效果，广泛的应用范围及其他许多优点而被国内外相关专家公认为最具发展前景的调速方式，代表着现代电气传动技术的发展方向。本章将主要介绍变频器的发展历史以及相关技术的发展历程，进而概述变频调速的基本原理以及变频器的结构，最后详细讨论变频器的类型和选用变频器时所需的一些相关配套设备。

## 1.1 变频器的发展

变频器（Variable Frequency Drive, VFD）是应用变频技术与微电子技术，通过改变电动机工作电源的频率和幅值来控制交流电动机的电力传动元件。变频器曾被简称为 VVVF（Variable Voltage Variable Frequency Inverter）。

随着生产技术的不断提高，因为直流电动机有换向器，维护量大，容量和转速易受限制，所以其驱动技术在现实应用中的弊端越来越明显。与直流电动机相比，交流电动机具有很多优点：结构简单、运行可靠、维护方便、制造成本低；因无换向器而不会产生换向火花，可以应用于易燃易爆等恶劣环境；转子转动惯量可以做得很小，动态响应特性好；同时也可以获得和直流伺服电动机相同的调速性能。因此，人们期待能在大部分场合中用交流电动机来代替直流电动机，并在交流电动机的调速控制方法等方面进行了深入的研究开发工作。从 20 世纪 30 年代起，人们开始重点研究交流调速控制技术，然而因受实际生产条件的限制研究进展缓慢。在相当长的一段时间内，交流调速系统的研究开发一直未能取得较大成果，电气传动领域一直被直流调速技术所垄断。直至 20 世纪 70 年代，晶闸管、晶体管、耐高压绝缘栅双极型晶闸管等电子器件的成功生产，为变频调速技术的研究开发和广泛应用奠定了基础，尤其是脉宽调制变压变频调速技术的问世，极大地促进了变频器的发展。目前，直流调速变频器逐渐被变频调速变频器所替代。

### 1.1.1 变频器的技术发展

#### 1. 电力电子器件

从 1958 年美国通用电气（GE）公司研制出世界上第一只工业应用晶闸管开始，电能的

变换和控制方式逐渐步入由电力电子器件构成的变频器时代,这标志着电力电子技术的诞生。电子元器件的性能对于变频器的性能来说至关重要。图 1-1 给出了电力电子器件的发展历程,器件的快速更新换代促进了电力电子变换技术的不断发展。其中 IGBT 的发展为变频技术的快速应用和提高奠定了基础,它采用电压驱动方式,其优点主要是驱动功率小,开关频率高,损耗低,饱和压降低,输入阻抗高,具有耐脉冲电流冲击的能力。

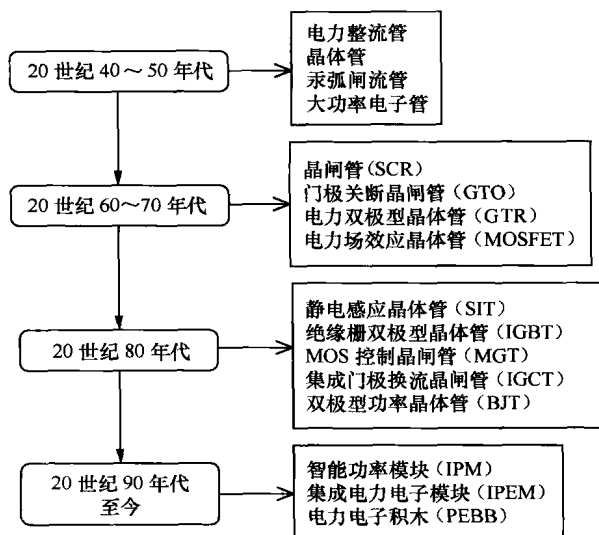


图 1-1 电力电子器件的发展历程

智能功率模块 (IPM) 不仅由 IGBT 芯片和门极驱动电路构成,而且内藏有过电压、过电流和过热等故障信号检测电路,并可将检测信号发送至 CPU,能使功率芯片的容量得到最大限度的利用,即使发生事故,也可防止因过载或系统相互干扰损坏电路芯片。IPM 以其高可靠性、使用简单赢得越来越大的市场,尤其适合于驱动电动机的变频器和各种逆变电源,是冶金机械、电力牵引、伺服驱动和变频空调的一种非常理想的电子器件。

根据开关特性,电力电子器件可以分为:半控型器件、全控型器件和不可控型器件。根据控制信号也可将电力电子器件分为电压驱动型器件和电流驱动型器件。

## 2. 控制方式的发展

自 20 世纪 70 年代开始,脉宽调制变压变频 (PWM-VVVF) 调速研究引起了人们的高度重视。20 世纪 80 年代,作为变频技术核心的 PWM 模式优化问题引起人们的浓厚兴趣,并得出诸多优化模式,其中以鞍形波 PWM 模式效果最佳。20 世纪 80 年代后半期,美、日、德、英等发达国家开发的  $U/f$  控制变频器投入市场并得到广泛使用。

$U/f$  控制变频器的控制方式较为简单,它主要是根据电动机的电压与频率比 ( $U/f$ ) 进行调速的,机械硬度特性也较好,能够满足平滑调速的一般要求,已在产业的各个领域得到广泛应用。但是,这种控制方式在低频时由于输出电压较小,受定子电阻压降的影响比较显著,故造成输出最大转矩减小。另外,其机械特性终究没有直流电动机硬,动态转矩能力和静态调速性能都还不尽如人意,因此人们又提出矢量控制思想。

转差频率控制方式是对  $U/f$  控制的一种改进，它是检测电动机转速，然后把电动机转速与转差频率的和作为给定逆变器的输出。由于能够任意控制与转矩电流有直接关系的转差频率，与  $U/f$  控制相比，其加减速特性和限制过电流的能力得到了提高。另外，它应用了速度控制器，利用它和速度反馈进行速度闭环控制。

矢量变换控制方法通过测量和控制异步电动机定子电流矢量，根据磁场定向原理分别对异步电动机的励磁电流和转矩电流进行控制，从而控制异步电动机的转矩。20 世纪 70 年代，西门子公司工程师 F.Blaschke 首先提出异步电动机矢量控制理论来解决交流电动机转矩控制问题。矢量控制方法的提出具有划时代的意义，它使得异步电动机的机械特性和他励直流电动机的机械特性完全一样。然而在实际应用中，其控制效果很难达到预期，主要有以下几方面的原因：转子磁链难以准确确定，系统特性受电动机参数影响大，所采用的矢量旋转变换较为复杂。目前矢量控制方法已被广泛地应用在西门子、ABB、富士电动机和三菱等国际化大公司的变频器上。

1985 年，德国鲁尔大学的 Depenbrock 教授首次提出了直接转矩控制技术。该技术在很大程度上弥补了矢量控制方式的不足，并以新颖的控制思想、简洁明了的系统结构、优良的动静态性能得到了迅速发展。目前，该技术已成功地应用在电力机车牵引的大功率交流传动设备上。

### 3. 变频器新技术

由于微机控制技术及电子元器件生产工艺的发展，新一代变频器除了能够完成基本的电动机调速功能外，还整合了一些新技术、新功能模块。

变频器能够根据电动机负载情况来自动设置加减速时间；它还可以内置编程软件，可以在计算机中调试程序，甚至也有人性化的用户界面，操作维护简单方便；为了方便远距离实时监视、实时控制、实时预警系统，还产生了变频器远程控制新技术。新型交流制动技术制动速度比直流快，制动能量以热能的形式散掉。

#### 1.1.2 我国变频器发展现状及前景

表 1-1 列出了我国变频器的发展历程。近年来随着变频技术的发展，采用无速度传感器控制的矢量控制方式，直接转矩控制系统的高动态性能变频控制技术以及无速度传感器控制技术成为高性能通用变频器和一般通用变频器的分水岭。变频器在功能上利用先进控制理论，开发了诸如卷取、提升、主从等控制功能，使应用系统的结构更加简单，使变频器的应用技术提高到一个新的水平。据不完全统计，全国现有的变频器生产商达 70 多家，年销售额在 7 亿元左右，仅占全国变频器市场容量的一小部分，约 70% 的国内市场被各种国外品牌所占领（其中 40% 是日本品牌，30% 为欧美品牌）。

表 1-1

我国变频器发展历程

| 时 期            | 具 体 内 容   |
|----------------|---|
| 20 世纪 40~50 年代 | 国外已经诞生了异步电动机变频调速技术，不过那时的变频器是由直流电动机—同步发电机组成的变频机组<br>20 世纪 50 年代在我国的胶片厂等易燃车间已经采用了变频机组实现交流调速 |

| 时 期            | 具 体 内 容   |
|----------------|---|
| 20 世纪 60~70 年代 | 20 世纪 60 年代静止变频器成功生产<br>1963 年我国成功研制出国内第一只晶闸管，比日本还要早一年  |
| 20 世纪 80 年代    | 国内许多相关高校及研究单位成功开发了 GTR 变频器，并将技术成果转让给企业生产，但因企业无自动化生产线而无法生产高可靠性变频器  |
| 20 世纪 90 年代    | 国外生产的变频器逐渐进入中国市场，国外生产设备迅速涌入中国，国产变频器厂家纷纷崛起，国产 VVVF 通用变频器开始出现。但核心器件 IGBT 始终依赖进口，成为制约国产变频器发展的瓶颈<br>1995~1997 年的 3 年间我国风机、水泵变频调速技术改造投入资金 3.5 亿元，改造总容量达 100 万千瓦，可年节电 7 亿度，平均投资回收期约 2 年 |
| 本世纪初           | 国内具备了 IGBT 和 MOSFET 的制造技术，完整的变频器产业链开始逐渐形成<br>直接速度控制理论（DSC）的诞生，标志着中国在电动机控制技术方面不仅超越了自我，也超越了国外同行   |

目前，国内已经有较多变频器生产商，大多产品都是基于  $U/f$  控制和电压空间矢量控制方式，无法应用于调速精度和动态性能要求较高的场合。与国外品牌相比，国内变频器的性能相对要低些，这使得国内市场被国外占据。国内最大的变频器制造商——希望森兰，从生产  $U/f$  控制变频器起步，逐步完善和提高变频控制技术，通过多年研究与实践，对引进的先进技术消化吸收，已经能够开发出具有先进水平拟超导技术矢量控制变频器，解决了由于转差变化引起的转速波动，在谐波控制、电磁干扰、超转矩控制、散热等技术方面取得了重大突破，把变频器的高性能、多功能集成、灵活易用功能升级和扩展提高到了一个新的高度。其开发的 560kW 的低压大功率变频器，填补了国内低压大容量变频器设计制造方面的空白。尽管国内变频技术与国外相比还有差距，但这种差距已经缩小了。

## 1.2 变频器的基本工作原理及特点

近年来，随着电力电子技术、微机控制技术的迅猛发展，生产工艺的优化改进及功率半导体器件成本的降低，交流电动机变频调速技术越来越广泛地应用于工业领域。下面重点介绍变频器的基本工作原理及特点。

### 1.2.1 变频器的基本工作原理

变频调速就是通过改变电动机定子供电频率，以平滑改变电动机转速。当频率  $f$  在  $0 \sim 50\text{Hz}$  的范围内变化时，电动机转速调节范围非常宽。在整个调速过程中，都可以保持有限的转差功率，具有高精度、高效率的调速性能。

由电动机基本理论知道，三相异步电动机的转速表达式为

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

式中： $n$ ——异步电动机的转速；  
 $f$ ——异步电动机定子频率；  
 $s$ ——电动机转差率；  
 $p$ ——电动机极对数。

由式(1-1)可知，转速 $n$ 与频率 $f$ 成正比，只要改变频率 $f$ 即可改变三相异步电动机的转速。但是由异步电动机电动势公式

$$E = 4.44 f N \Phi \approx U \quad (1-2)$$

式中： $E$ ——定子每相绕组感应电动势的有效值；  
 $f$ ——定子频率；  
 $N$ ——定子每相绕组的有效匝数；  
 $\Phi$ ——每极磁通量；  
 $U$ ——定子电压。

可知，定子电压与磁通和频率成正比，当 $U$ 不变时， $f$ 和 $\Phi$ 成反比， $f$ 的升高势必导致磁通的降低。通常电动机是按50Hz的频率设计制造的，其额定转矩也是在这个频率范围内给出的。当变频器频率调到大于50Hz时，电动机产生的转矩要以和频率成反比的线性关系下降。为了有效维持磁通的恒定，我们必须在改变频率时同步改变电动机电压 $U$ ，即保持 $U$ 与 $f$ 成比例变化。关于变频调速方式有恒比例控制、恒磁通控制、恒功率控制和恒电流控制等几种。在后续章节中会陆续介绍，这里不再赘述。

## 1.2.2 变频器的特点

变频器与电动机组成的驱动系统，可以通过频率和电压都可调来控制电动机转速。变频传动有很多固有特点和技术优势，正是这些特点，使得变频器的应用领域越来越广泛。

### 1. 节能效果显著

很多大功率的风机和泵类机械在调节风量或水量时，往往采用风门及阀门，造成了能量的重大浪费。在设计机械配用动力驱动时，为了保证生产可靠性，都有一定程度的盈余量。电动机不能长期工作在满载荷下，否则会损坏电动机及浪费能量。在压力偏高时，可降低电动机的运行速度，使其在恒压的同时节约电能。电动机轴功率与转速变化的关系如下

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^3 \quad (1-3)$$

由此可见降低电动机转速可得到立方级的节能效果。此外，为迅速适应负载扰动，变频器具有动态调整特性，始终保持电动机的输出高效率运行；在保证电动机输出力矩的情况下，变频器自身具有 $U/f$ 调节功能，减少电动机输出力矩，降低输入电流，达到节能状态。

利用变频调速达到节能，以风机和泵类机械效果最为明显。在搅拌机、工业洗衣机等恒转矩负载机械领域中，当低速运行时，也可以获得节能效果。据有关文献资料分析，在某些应用场合中，变频器启动节能率可以达到66%，运行时节能率达到61.4%。中国电力消耗中，工业用电达到74%，而工业用电中的60%是电动机所消耗的，其中大约50%的电动机是用于风机泵和压塑机类，如果使用变频器平均节能潜力达到25%。



## 2. 维护简单

变频器故障率一般较低，通常只需定期检查、及时更换易坏件和清扫。定期检查与清扫主要是为了避免灰尘过多影响散热而影响器件寿命，尤其是在一些像采矿等恶劣环境中应用时更应注意。此外，因灰尘过多，很可能导致电子元器件短路等事故发生。定期更换易坏件，是因为在变频器中，某些零部件寿命相对较短，如频繁工作的风扇电容等。变频器保护功能完善，能自诊断显示故障所在，维护简便。

## 3. 启、停特性好

异步电动机在工频条件下，启动电流很大，对电网的影响较大。使用变频器后，电动机直接在线启动属于无级启动方式，电压和频率渐次上升达到规定值；启动转矩大，启动电流小，减小对电网和设备的冲击，并具有转矩提升功能，节省软启动装置的功能。采用变频启动、停机时，我们可以提前设置加减速时间，可在较小电流下进行平滑启、停操作。其启动特性，比变压不变频的软启动器要好。通过设定合适的控制参数，启动转矩可在一定范围内调节，以适应多种启动要求。

变频器传动可以方便实现电动机的电气制动，有时在某些应用中还应与机械制动相互配合使用。电气制动包括能耗制动、直流制动和回馈（再生）制动3种方式。能耗制动一般应用在设备静止或减速后使设备静止的过程中，制动频度很低，但仅要求停车时可采用直流制动，回馈制动主要应用在设备的稳速运行和减速过程中。

## 4. 调速性能好

因电动机的应用相当广泛，与其配套使用的变频器种类甚多，为此很多厂家针对不同的工作环境生产了与之相适应的变频器来满足用户的需求。对于恒转矩负载要选用过载能力大的变频器；对于恒功率负载，由于转速与转矩成反比，需要解决低速段转矩问题；对于风机、泵类负载，负载与转速的平方成正比，只要注意基频以上时的变频器和电动机的功率。

当变频器采用正弦波脉冲宽度调制时，内部采用微处理器实现全数字化控制。当采用按转子磁场定向的矢量控制技术时，即使不安装测速发电机或编码器也能得到很宽的调速范围、平滑的调速特性及快速的动态响应。当采用变压变频控制方式时，基本可保持磁通在各级转速上稳定，机械特性随转速下降而平行下移，硬度特性好。

另外，不需单独采用接触器就能可靠实现正、反转的连锁控制。

变频器除了上述特点外，还具有以下优点：体积小、重量轻、占地面积小；操作方便、简单；内设功能多，可满足不同的工艺要求；内置功能齐全的保护电路（如过电流、过载、过电压保护等）、检测电路；功率因数高，节省电容补偿装置。随着变频技术的发展，电动机运行的声音可以趋近于工频电网运行情况，极大地降低了噪声影响；环境适应性很好，如在易爆等恶劣环境中，可以采用电动机转差控制方式的变频器控制电动机。

# 1.3 变频器的构成与功能

目前市场上流行的变频器主要由主电路、控制电路组成。主电路是给异步电动机提供调压