

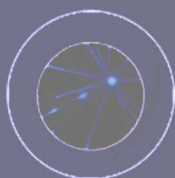
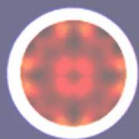
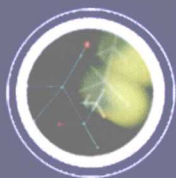


BIANPIN TIAOSU JISHU JICHU JIAOCHENG

变频调速技术

基础教程

曾允文 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

变频调速技术基础教程

曾允文 编

图书在版编目(CIP)数据

变频调速技术基础教程 / 曾允文著. — 北京: 机械工业出版社, 2009.1
社, 3009.1

ISBN 978-7-111-25396-9

I. 变… II. 曾… III. 变频调速—教材 W. TM631.21

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第163812号

机械工业出版社(北京百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑: 孙 颖 责任编辑: 李 娟

责任校对: 樊钟英 封面设计: 李 娟

北京地区印刷厂印刷

2009年1月第1版第1次印刷

148mm×210mm·7.375印张·216千字

0001—4000册

标准书号: ISBN 978-7-111-25396-9

定价: 19.00元



凡购本书, 如蒙赠书, 函索即寄, 由本社发行部处理

销售热线: (010) 88379252 邮购热线: (010) 88379252

机械工业出版社

地址: 北京百万庄大街22号

邮编: 100037

本书共分8章, 主要内容包括变频器的基本结构与工作原理、电力电子器件、电动机的运行与负载、变频调速系统的控制与数字化、变频器对周边电气设备的影响及对策、通用变频器及其应用、高压变频器及其应用、同步电动机的变频调速, 概括了变频调速技术的全部内容, 为学习该门技术打下良好的基础。

变频调速已经被公认为电气传动领域中最好的调速技术, 得到广泛的应用, 已有一统调速天下之势。它是电力电子技术、电气传动、控制理论、计算机技术等多门学科的综合, 内容丰富, 自成系统, 实际上已经成为一门重要学科分支。本书作为基础教程, 可供大专院校有关专业作为教材或参考书, 也可供工程技术人员作入门读本。

图书在版编目 (CIP) 数据

变频调速技术基础教程/曾允文著. —北京: 机械工业出版社, 2009.1

ISBN 978-7-111-25396-9

I. 变… II. 曾… III. 变频调速—教材 IV. TM921.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 162915 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 罗莉 责任编辑: 罗莉

责任校对: 樊钟英 封面设计: 陈沛 责任印制: 李妍

北京地质印刷厂印刷

2009年1月第1版第1次印刷

148mm × 210mm · 7.375 印张 · 216 千字

0001—4000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-25396-9

定价: 19.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379762

封面无防伪标均为盗版

前 言

自从20世纪50年代末晶闸管诞生后,60年代交付生产的变频调速装置相继产生。随着时间的流逝,迄今已有半个世纪,依托着电力电子技术、电气传动技术、控制理论和计算机技术等学科不断地发展丰富,变频调速技术已从昔日的谐波严重、调速范围不宽、效率不高、应用不广等“原始”状态,发展到今天的开关器件不断更新换代,PWM技术日益成熟,近代控制理论得到应用,计算机技术引入,促使变频调速的控制性能、操作安全不断提高完善,应用遍及各行各业。新型变频器不断涌现,群星灿烂,各显奇能。因此不仅取代昔日称雄调速领域的直流调速,而且有一统调速天下之势。

变频调速技术就是完成变频传动任务的技术,根据它的发展过程,可以说变频调速技术是电力电子技术、电气传动、控制理论、计算机技术等多门学科的综合,内容十分丰富、广阔、深邃,自成系统。因此我们认为它是一门重要的学科分支,有必要从“交流调速系统”或“电力电子技术”课程中分离出来,成为单独的一门课程,单独讲授。这不仅是为了便于教学、研究,而且也是生产实际的需要。

这门课程,既要讲述变频器的结构和工作原理,所用的电力电子器件、电动机工作运行的特性;还要讲述系统所驱动的各类工作机械,即负载的特性和要求。为了达到传动系统的转速、转矩要求,保证静动态性能稳定,还要讲述各种控制技术及其应用。此外,变频器谐波影响和消除,变频器实际应用的经验也属于讲述内容。

为此,应当有相应的教材配合,本书即为此而作。但在变频调速技术未分离出来之前,也可以用作有关课程的部分教材或参考书。由于变频调速技术内容丰富,本书只是打下一个必要的基础,故称基础教程。

在编写本书时,参考和引用了不少资料,谨向原编著者致以衷心的感谢。限于作者水平,书中错误之处在所难免,恳请专家和读者指正。

作者

目 录

| | |
|--------------------|----|
| 前言 | 1 |
| 绪论 | 1 |
| 一、历史沧桑话调速 | 1 |
| 二、一枝独秀——变频调速 | 2 |
| 三、变频调速系统概述 | 5 |
| 四、变频调速的发展过程 | 7 |
| 五、变频调速技术的主要内容 | 8 |
| 第一章 变频器的基本结构和工作原理 | 10 |
| 一、交-直-交电压型变频器 | 10 |
| (一) 工作原理 | 10 |
| (二) 电压型三相变频器分类 | 14 |
| 二、PWM 变频器 | 17 |
| (一) 谐波的影响 | 17 |
| (二) PWM 变频器 | 17 |
| (三) SPWM 波形成的方法 | 20 |
| (四) SPWM 的优点 | 21 |
| (五) 采用 SPWM 应注意的问题 | 22 |
| 三、SVPWM 逆变器 | 23 |
| (一) 定义与调制原理 | 23 |
| (二) 电压矢量切换方式与磁链轨迹 | 23 |
| 四、交-直-交电流型变频器 | 28 |
| (一) 强迫换相式逆变器 | 28 |
| (二) 输出滤波器换相式逆变器 | 30 |
| (三) 自换相式逆变器 | 31 |
| 五、交-交变频器 | 31 |
| (一) 概述 | 31 |
| (二) 交-交变频器的基本结构 | 32 |
| (三) 交-交变频器的工作原理 | 33 |

| | |
|----------------------------------|-----------|
| (四) 交-交变频器的运行方式 | 36 |
| (五) 换相及触发脉冲产生原理 | 38 |
| 第二章 电力电子器件 | 43 |
| 一、概述 | 43 |
| 二、变频器对电力电子器件的要求 | 45 |
| 三、二极管 | 46 |
| 四、开关器件及其驱动、保护电路 | 46 |
| (一) 晶闸管 (SCR) | 46 |
| (二) 门极关断 (GTO) 晶闸管 | 47 |
| (三) 大功率晶体管 (GTR、BJT) | 50 |
| (四) 功率 MOS 场效应晶体管 (MOSFET) | 52 |
| (五) 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) | 53 |
| (六) 智能功率模块 (IPM) | 56 |
| (七) 集成门极换流晶闸管 (IGCT) | 57 |
| (八) MOS 控制晶闸管 (MCT) | 60 |
| (九) 注入增强栅晶体管 (IECT) | 61 |
| (十) 静电感应晶体管 (SIT) | 61 |
| (十一) 静电感应晶闸管 (SITH) | 61 |
| (十二) 碳化硅 (SiC) 功率器件 | 62 |
| 五、开关器件串并联技术 | 62 |
| (一) 晶闸管的串并联 | 62 |
| (二) GTO 晶闸管的串并联 | 64 |
| (三) MOSFET 的串并联 | 65 |
| (四) GTR 的串并联 | 66 |
| (五) IGBT 的串并联 | 66 |
| (六) IGCT 的串联 | 68 |
| 第三章 电动机的运行和负载 | 69 |
| 一、异步电动机的运转状态与控制 | 69 |
| (一) 起动 | 69 |
| (二) 升速和调速 | 71 |
| (三) 降速和制动 | 72 |
| (四) 反转、四象限运行 | 73 |
| 二、变频调速电动机的机械特性 | 74 |
| (一) 恒 U_1/f_1 运行方式的机械特性 | 74 |

| | |
|-----------------------------|------------|
| (二) 恒最大转矩 M_m 运行方式的机械特性 | 76 |
| 三、电动机的负载 | 76 |
| (一) 恒转矩负载 | 78 |
| (二) 降转矩负载 | 78 |
| (三) 恒功率负载 | 79 |
| 四、主要负载的特征与变频传动 | 80 |
| (一) 风机泵类 | 80 |
| (二) 机床 | 82 |
| (三) 卷取机 | 84 |
| (四) 注塑机 | 85 |
| (五) 轧钢系统 | 86 |
| (六) 机车牵引 | 87 |
| (七) 提升机械 | 89 |
| (八) 家用电器 | 90 |
| 第四章 变频调速系统的控制与数字化 | 92 |
| 一、变频调速的主要技术指标 | 92 |
| 二、开环控制 | 93 |
| 三、闭环控制 | 94 |
| (一) 转差频率控制 | 94 |
| (二) 矢量变换控制 | 97 |
| (三) 直接转矩控制 (DTC) | 103 |
| 四、数字控制 | 107 |
| (一) 大规模集成电路与应用 | 107 |
| (二) 计算机的应用 | 109 |
| 第五章 变频器对周边电气设备的影响及对策 | 118 |
| 一、输入侧谐波的影响和对策 | 118 |
| (一) 产生的原因及影响 | 118 |
| (二) 消除污染的对策 | 120 |
| (三) 功率因数问题 | 125 |
| 二、输出侧谐波影响的对策 | 125 |
| (一) 输出波形的谐波分量 | 126 |
| (二) 谐波等效电路与谐波电流计算 | 126 |
| (三) 谐波损耗与电动机效率 | 127 |
| (四) 谐波转矩 | 129 |

| | |
|---------------------------------|------------|
| (五) 消除输出谐波影响的对策 | 131 |
| 三、电波噪声的产生及电磁兼容 (EMC) | 132 |
| (一) 传导噪声及其对策 | 133 |
| (二) 辐射噪声及其对策 | 133 |
| (三) 感应噪声及其对策 | 134 |
| (四) 共模电压及对策 | 134 |
| (五) 变频器的可靠性 | 135 |
| 第六章 通用变频器及其应用 | 138 |
| 一、通用变频器概述 | 138 |
| 二、通用变频器的功能与使用 | 139 |
| (一) 结构与功能 | 139 |
| (二) 主要功能的设定 | 142 |
| (三) 保护、自诊断、显示及报警系统 | 146 |
| (四) 选用件功能与使用 | 147 |
| 三、通用变频器应用实例 | 149 |
| (一) 变频器在水泵和风机传动中的应用 | 149 |
| (二) 变频器在机车牵引中的应用 | 154 |
| (三) 变频器在陶瓷生产中的应用 | 155 |
| (四) 在冶金起重设备中的应用 | 158 |
| 四、变频传动电气系统的配电与控制设备 | 163 |
| (一) 变压器 | 163 |
| (二) 高压断路器及选择 | 164 |
| (三) 熔断器 | 166 |
| (四) 低压断路器 | 167 |
| (五) 电磁接触器 | 167 |
| (六) 过载继电器 | 168 |
| (七) 可编程序控制器 (PLC) 简介 | 169 |
| 第七章 高压变频器及其应用 | 173 |
| 一、概述 | 173 |
| 二、高-低-高方式高压变频器 | 174 |
| 三、高-高方式高压变频器 | 177 |
| (一) 开关器件串联高压变频器 | 177 |
| (二) 钳位式多电平高压变频器 | 180 |
| 四、高-低方式高压变频器——功率单元串联高压变频器 | 194 |

| | |
|--|---------------------|
| 1E1 (一) 功率单元串联变频器的结构与原理 | 194 |
| 2E1 (二) 功率单元串联变频器分类 | 196 |
| 3E1 (三) 故障处理技术 | 202 |
| 4E1 (四) 功率单元串联变频器的优点 | 204 |
| 5E1 (五) 功率单元串联变频器的应用实例——水泥行业中的典型应用 | 205 |
| 第八章 同步电动机的变频调速 | 208 |
| 8E1、概述 | 208 |
| 8E2、同步电动机的起动 | 209 |
| 8E3、同步电动机的调速 | 212 |
| 9E1 (一) 他控式变频调速系统 | 213 |
| 9E1 (二) 自控式变频调速系统 | 214 |
| 8E4、同步电动机调速的控制 | 219 |
| 9E1 (一) 转速电流双闭环反馈控制 | 219 |
| 9E1 (二) 同步电动机调速系统的矢量控制 | 221 |
| 参考文献 | 225 |
| 1E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (一) |
| 2E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (二) |
| 3E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (三) |
| 4E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (四) |
| 5E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (五) |
| 6E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (六) |
| 7E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (七) |
| 8E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (八) |
| 9E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (九) |
| 1E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (十) |
| 2E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (十一) |
| 3E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (十二) |
| 4E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (十三) |
| 5E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (十四) |
| 6E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (十五) |
| 7E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (十六) |
| 8E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (十七) |
| 9E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (十八) |
| 1E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (十九) |
| 2E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (二十) |
| 3E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (二十一) |
| 4E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (二十二) |
| 5E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (二十三) |
| 6E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (二十四) |
| 7E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (二十五) |
| 8E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (二十六) |
| 9E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (二十七) |
| 1E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (二十八) |
| 2E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (二十九) |
| 3E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (三十) |
| 4E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (三十一) |
| 5E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (三十二) |
| 6E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (三十三) |
| 7E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (三十四) |
| 8E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (三十五) |
| 9E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (三十六) |
| 1E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (三十七) |
| 2E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (三十八) |
| 3E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (三十九) |
| 4E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (四十) |
| 5E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (四十一) |
| 6E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (四十二) |
| 7E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (四十三) |
| 8E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (四十四) |
| 9E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (四十五) |
| 1E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (四十六) |
| 2E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (四十七) |
| 3E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (四十八) |
| 4E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (四十九) |
| 5E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (五十) |
| 6E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (五十一) |
| 7E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (五十二) |
| 8E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (五十三) |
| 9E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (五十四) |
| 1E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (五十五) |
| 2E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (五十六) |
| 3E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (五十七) |
| 4E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (五十八) |
| 5E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (五十九) |
| 6E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (六十) |
| 7E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (六十一) |
| 8E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (六十二) |
| 9E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (六十三) |
| 1E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (六十四) |
| 2E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (六十五) |
| 3E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (六十六) |
| 4E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (六十七) |
| 5E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (六十八) |
| 6E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (六十九) |
| 7E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (七十) |
| 8E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (七十一) |
| 9E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (七十二) |
| 1E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (七十三) |
| 2E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (七十四) |
| 3E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (七十五) |
| 4E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (七十六) |
| 5E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (七十七) |
| 6E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (七十八) |
| 7E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (七十九) |
| 8E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (八十) |
| 9E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (八十一) |
| 1E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (八十二) |
| 2E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (八十三) |
| 3E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (八十四) |
| 4E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (八十五) |
| 5E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (八十六) |
| 6E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (八十七) |
| 7E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (八十八) |
| 8E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (八十九) |
| 9E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (九十) |
| 1E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (九十一) |
| 2E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (九十二) |
| 3E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (九十三) |
| 4E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (九十四) |
| 5E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (九十五) |
| 6E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (九十六) |
| 7E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (九十七) |
| 8E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (九十八) |
| 9E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (九十九) |
| 1E1 | 变频调速异步电动机调速系统 (一百) |

绪 论

一、历史沧桑话调速

工业生产的工作机或称生产机械必须用原动机带动才能工作，最早的原动机是蒸汽机、内燃机、水轮机等，都是些效率不高又笨重的装置。电动机发明以后，由于使用方便、效率较高、装置轻小、占地面积少等一系列优点，很快就取代了那些原动机。用电动机作原动机带动工作机叫做电机传动或电气传动，于是工业生产进入电气传动时代。不仅工业生产，而且各种科研、交通运输、日用工具等都用上电动机进行电气传动。

由于生产的需要，电气传动系统往往必须有调节速度的功能，才能达到提高工效、保证质量和节能的要求；直流电动机首先能满足这一要求。因为直流电动机可以方便地通过调节电压或调节励磁，便可调节速度，而且是平滑连续无级调速。而交流电动机由于结构关系和当时的技术条件不能满足这个要求，故此在电气传动中，直流电动机调速简称直流调速，基本上处于垄断地位。

然而直流电动机却有着不可克服的缺点。第一，结构复杂导致造价较高；其次，具有换向器和电刷，经常要清理和置换，增加维护工作量和成本；再有就是因有换向器和电刷，不适宜工作于恶劣工作条件，如潮湿、粉尘等环境，特别是有瓦斯的场合，电刷产生的火花会引起爆炸。可是与此相反，交流电动机特别是笼型异步电动机没有这些缺点。它具有结构简单、坚固、体积小、重量轻、占地小、维护简单、价格低廉，能适应恶劣工作条件等一系列优点。据统计，同功率同速度定额，笼型电动机的投资只是直流电动机的 $1/6$ ，功率重量比却是直流机的两倍。因此它们在电气传动中得到广泛应用，如把它们排斥在调速传动之外显然是不合理的现象，也是一个显著的矛盾；解决这个矛盾，广泛采用交流电动机调速即交流调速传动，一直是人们

的愿望。

现代工业生产的需要使这一矛盾更为突出，因为要求电动机具有大容量、高电压和高转速，直流电动机已经不能满足需要。这是由于它受到换向器和电刷结构的限制，单机容量只能做到 12000 ~ 15000kW，电压只能做到 1kV，转速只能做到 3000r/min。而交流电动机单机容量已做到几万千瓦，电压达 10 ~ 15kV，转速可达 1 万转/分以上，因而广泛采用交流调速更为迫切。

过去交流调速实际上也有几种方案，常见的有改变极对数调速和改变绕线转子电动机转子回路中所串电阻调速，这些调速均属有级调速，且后者损耗大、效率低，故应用不多。改变电源频率实现无级平滑调速，人们也有所尝试。早期采用变频机组供电作变频调速，由于投资大、效率低，不易推广。后来相继用汞弧（水银）整流器和闸流管制造变频器，也由于造价高且性能不好，很少被采用。所以总的来说，过去有一段较长的时间，交流调速发展很慢，采用很少，直流调速得以垄断调速传动的领域。

由于电力电子技术的发展，可控的电力电子器件的研制成功，情况大有改变。首先是 1957 年晶闸管的问世，交流电动机的无级调速问题得到了突破。由于晶闸管具有良好的开关特性与控制特性，促使交流调速发展很快，出现多种调速方案，在调速传动系统中得到越来越多的应用。许多先进工业国家已经有系列产品，所用电动机容量从几个千瓦到几十兆瓦。机械、冶金、造纸、化纤、食品、纺织、交通运输等工业，广泛予以采用，据统计国外在 20 世纪 70 年代后期，仅交流变频调速在调速传动领域中已占了相当大的比重，过后新的功率器件如大功率晶体管、GTO 晶闸管、IGBT 等诞生，加速了交流调速的发展，极大地扩充调速领域。由于采用新型功率开关器件，加上良好的控制技术，交流调速既有良好的调速特性，又能充分发挥交流电动机的优越性，所以有人预言交流调速有完全取代直流调速的趋势。

二、一枝独秀——变频调速

大家知道，交流电动机的转速公式是

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

式中 n ——转速 (r/min);

f ——电源频率 (Hz);

p ——极对数;

s ——转差率, 对于同步电动机 $s=0$ 。

可见只要改变 f 、 s 或 p 三个参数之一即可调节电动机的转速, 其中改变 f 或 s 为无级调速。改变 p 是有级调速, 只在某些场合作为辅助手段。

根据上述调速的基本原理, 出现了许多采用电力电子器件的交流调速方案, 常用的可归纳为五种基本方案; 即定子调压调速、电磁转差离合器调速、串级调速、变频调速和无换向器电动机调速。前三种属于改变转差率, 后两种属于改变频率。现分别简要介绍于下:

1. 定子电压调压调速

又称一次电压调压调速, 简称调压调速, 属于调转差率。它是通过晶闸管来改变定子绕组端电压来调速, 代替了过去用电阻调压, 优点是装置简单、控制方便、投资小、响应快。但其损耗与转差率成正比, 低速时损耗严重, 效率很低, 往往要降低电动机功率运行, 故称为能耗调速。再者, 调压调速的调速范围不宽, 机械特性软, 故属于不理想的方案, 以前常用于电梯系统, 现在已很少见。

2. 电磁转差离合器调速

属于调转差率, 用电磁转差离合器作为电动机和工作机的联轴器, 用晶闸管改变离合器的励磁电流就能改变工作机的转速。通常将电动机与离合器装成一体, 使用方便, 控制简单, 但损耗大, 也属于能耗调速。以前, 国内在纺织、印染、印刷、化工等机械上常见到, 现在也很少见。

3. 串级调速

此方案只限于绕线转子异步电动机, 又分超同步和次同步两种串级调速也属于调转差率。其特点是能利用晶闸管制成的逆变器将转差功率反馈给电网, 因此效率较高, 造价较低。但功率因数低, 常需要用移相电容补偿, 因而增加投资。另外, 机械特性较软, 功率因数

低，故也不理想。

4. 变频调速

属于改变频率 f 调速，采用各种电力电子器件制成的变频器，可以平滑地无级调速。它适用于异步电动机和同步电动机，但用于笼型异步电动机更显得优越。此种方案运行时转差率很小，故损耗小，效率和力能指标较高；同时，它既可向下调速又可以向上调速，因而调速范围宽，连续平滑调速分辨力不到1Hz；闭环控制时可得到很高的转矩、调速精度，还可以作多电动机传动。

5. 无换向器电动机调速

由晶闸管变频器和同步电动机组合组成，又称晶闸管电动机。它相当于用晶闸管变频器代替直流电动机的换向器和电刷，因此它具有直流电动机的调速特性而无直流电动机的缺点，所以此种调速方案也是较好的一种交流调速方案，有时也把它归于变频调速。但是调速装置较复杂，投资也较高，只适合于大容量调速系统，至今仍应用。

基于上述，我们可以看出变频调速优点全面，适应面很广，所以是发展的主要方向。虽然此方案突出的缺点是造价高，比直流调速约高20%~50%（用晶闸管可控整流代替直流发电机组以后），但由于新的电力电子器件不断诞生，控制装置集成化、模块化、数字化，造价问题也将逐步获得解决。因此总的来说，变频调速是最佳调速传动方案，可以说是一枝独秀，其用途见表0-1。

表 0-1 变频调速技术应用范围及用途

| 变频器传动的效能 | 应用领域 | 主要相关技术 | 适用变频器 |
|----------|---------------------------------|---------------------------------|--------------|
| 节能 | 风扇、鼓风机、泵、提升机、挤压机、搅拌机、传送带、工业用洗衣机 | 为提高运行可靠性，台数控制和调速控制并用 | 通用变频器 |
| 提高生产率 | 提升机、起重机、机床、食品机械、挤压机和自动仓库 | 运行程序或加工工艺的最佳速度，原有设备的增速运行运转可靠性提高 | 通用变频器、专用型变频器 |

(续)

| 变频器传动的效能 | 应用领域 | 主要相关技术 | 适用变频器 |
|------------------------------------|---|--|----------------------------|
| 提高产品质量 | 风扇、鼓风机、泵、机床、食品机械、造纸机、薄膜生产线、钢板加工生产线、印刷电路板基板钻孔机、高速雕刻机 | 平滑加减速,加工对象所需最佳速度选定,高精度转矩控制,高精度定位停止,无转矩脉动,高速传动 | 通用变频器、系统用矢量控制变频器,高速通用变频器 |
| 设备合理化,少维护,低成本,机械的标准化、简单化与工厂自动化(FA) | 搬送机械,金属加工机械、纤维机械,造纸产生线、薄膜生产线、钢板加工生产线 | 原有设备的增速运行,高精度转矩控制,多台电动机联动运行,多台电动机联动比例运行,提高运转可靠性,传送控制 | 通用变频器、通用矢量控制变频器、系统用矢量控制变频器 |
| 改善或适应环境 | 空调机、风扇、鼓风机、压缩机、电梯 | 静音化,平滑加减速,使用防爆电动机、安全性等技术 | 通用变频器、专用变频器 |

三、变频调速系统概述

变频调速系统由变频器、传动电动机和控制装置组成,有的把控制装置归并在变频器,如图0-1所示,有的还包括负载,如图0-2所示。变频器将电网固定频率变成可调的频率,输送给电动机,实现变频调速,因此变频器是调速系统的核心部件。

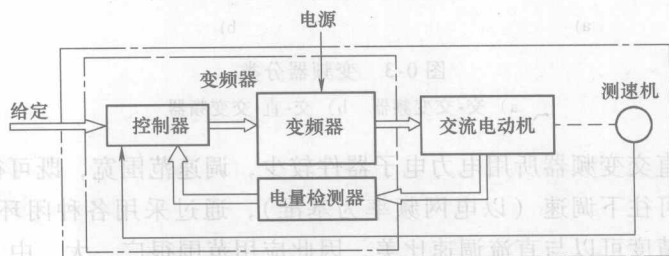


图0-1 变频调速系统

变频器依照变频原理可分为两大类:一类是将电网固定频率的交流电直接变成可调频率的交流电,叫做交流-交流变频器,简称交-交

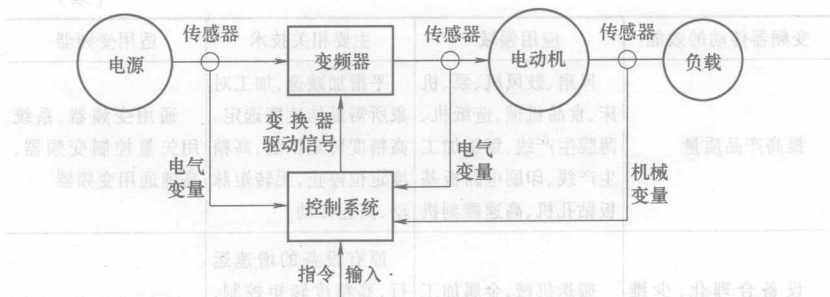


图 0-2 变频调速系统 (包括了负载)

变频器 (如图 0-3a 所示)。另一类是先将电网固定频率的交流电整流成直流电, 经过滤波, 使直流较平直, 再将直流电逆变成频率可调的交流电, 称为交流-直流-交流变频器, 简称交-直-交变频器, 它由整流器、滤波器和逆变器组成 (如图 0-3b 所示), 逆变器完成直流电变交流电的任务。

交-交变频器不要直流环节, 效率较高, 但输出频率不能达到电网频率 (我国为 50Hz), 一般只有电网频率 $1/3 \sim 1/2$; 所需电力电子器件也较多, 故一般用于大容量、低转速的传动场合。

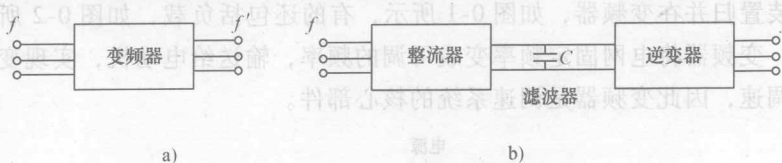


图 0-3 变频器分类

a) 交-交变频器 b) 交-直-交变频器

交直交变频器所用电力电子器件较少, 调速范围宽, 既可往上调速, 也可往下调速 (以电网频率为基准), 通过采用各种闭环控制, 其调速精度可以与直流调速比美, 因此应用范围很广, 大、中、小型调速传动系统均能适应。

交-直-交变频器按所用滤波元件不同又分为两种: 一种采用大电容, 使直流电源相当于电压源, 称为电压源型, 简称电压型; 另一种用大电感, 使直流电源相当于电流源, 称为电流源型, 简称电流型。

电压型交-直-交变频器还可按输出电压波形分为阶梯波（或方波）变频器和 PWM 变频器，阶梯波变频器输出电压谐波很大，限制了它的应用范围，而 PWM 变频器输出谐波很小，应用很广，是发展的主要方向。

变频器所用的电力电子器件分为不控的，如二极管；半控的，如晶闸管（不能自行关断）；全控的，如门极关断（GTO）晶闸管、大功率晶体管（能自关断）等。功率器件是变频器实现变频的关键器件。

四、变频调速的发展过程

从 20 世纪 70 年代开发和生产变频器到今天，变频调速技术经历了不断创新换代的发展；变频器的功能从简易到全面，调速精度从一般到赶上直流调速，应用范围从低压到高压，从很窄到宽广，取得了长足的进步，逐渐成为调速领域中的主要技术，并有一统天下之势。这个发展历程可从下列几个方面来描述：

1. 变频器采用的电力电子器件

电力电子器件是决定变频器性能的关键，早期是晶闸管（SCR），由于它是半控器件，需要换相回路，后来被全控器件所取代。全控型器件有大功率晶体管（GTR）、门极关断（GTO）晶闸管、大功率 MOS 场效应晶体管（MOSFET）和绝缘栅双极型晶体管（IGBT）等，可以自行关断，提高功效；还能使变频器各种性能得到不断提高和完善。近年来 IGBT 已经模块化、智能化，制成了智能功率模块（IPM），大大地保证变频器的可靠性和缩小变频器的体积。

2. 输出波形的调制策略

早期阶梯波变频器输出的电压电流波形含有丰富的谐波，造成谐波损耗和转矩脉动，限制了它的应用范围。后来采用了调制的方法，将波形调制为等幅等宽或不等宽的脉冲列，抑制了谐波分量。特别是按正弦规律变化的调制效果最好，叫做正弦波脉宽调制（SPWM）。近年来开发出来的电压空间矢量脉宽调制（SVPWM）已投入使用，效果很好，使变频器性能又多了一个保证。

3. 系统的控制技术

变频调速系统调节转速、转矩的精度和动稳态性能是要靠系统的控制技术来保证的；早期所用开环恒压恒频 U_1/f_1 控制效果有限，后来采用转差频率控制有了改善。20 世纪 90 年代以后采用矢量控制效果显著完善，近年来采用直接转矩控制，又多了一种控制手段，这些控制使调速性能直追直流调速。当前正尝试用智能控制，已初见成效。

4. 线路结构

整个变频装置是由元器件和线路连接而成的，20 世纪 90 年代以前，线路基本上是由模拟电路分立元器件组成的，只有少量数字电路和集成块。以后由大规模集成块组成的数字电路逐渐增多，20 世纪末就全面数字化；整流器、逆变器、SPWM 波形形成、矢量控制等，都集成为一块，甚至集成为一体，因此装置体积减小，可靠性大大提高。值得注意的是有些模块已经智能化。

5. 计算机的使用

20 世纪 90 年代以后，计算机进入了变频器的结构和运行领域，提供多种功能：①取代一部分模块的功能，如 SPWM 波形的生成，矢量控制的实时计算等；②实现各种保护并且智能化，如自监控、自诊断；③进行运行控制，如开机停机、加减速、正反转、制动等。总之，计算机配合模块及其他电气设备，进行协调、控制、通信、执行变频调速系统各项功能，成为系统的神经中枢，目前正向网络化发展。

6. 变频器主电路拓扑结构

应用最广的交-直-交变频器的主电路拓扑结构是逆变器为六拍三相桥，一直保持了多年，20 世纪 90 年代以后开发成功多电平电路和功率单元串联（多重化）电路，改进了性能，扩大了适应面，如制作高压变频器及大功率变频器。整流器原来是单一的半控和不控整流，90 年代后发展为双 SPWM，不仅便于作四象限运行，还能改善网侧的波形和功率因数。此外，还有软开关变频器对传统的硬开关变频器的挑战。

五、变频调速技术的主要内容

变频调速技术就是完成变频调速系统调速传动任务的技术。它的