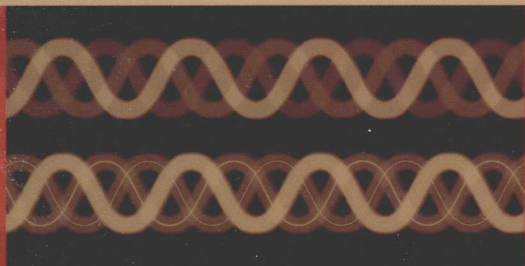




新 能 源 及 高 效 节 能 应 用 技 术 从 书

# 交流伺服驱动 从原理到完全应用



龚仲华 编著



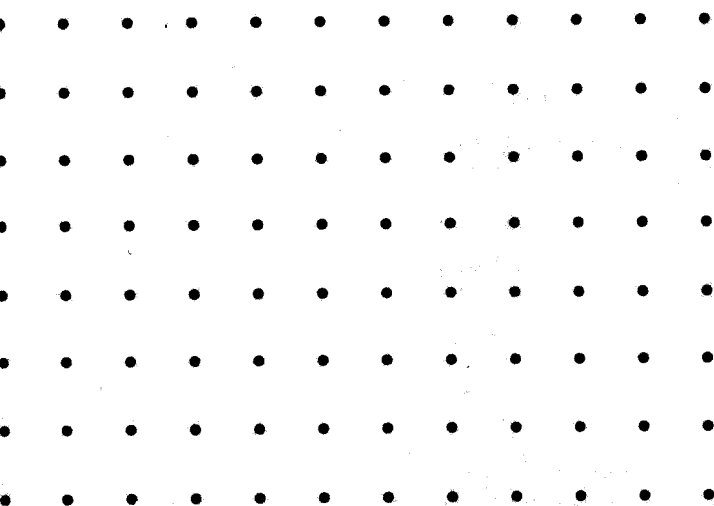
人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



新 能 源 及 高 效 节 能 应 用 技 术 丛 书

# 交流伺服驱动 从原理到完全应用

龚仲华 编著



人 民 邮 电 出 版 社

北 京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

交流伺服驱动从原理到完全应用 / 龚仲华编著. --  
北京: 人民邮电出版社, 2010.1  
(新能源及高效节能应用技术丛书)  
ISBN 978-7-115-21875-9

I. ①交… II. ①龚… III. ①交流—电力传动—伺服  
控制 IV. ①TM921.54

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第216791号

## 内 容 简 介

本书从交流伺服驱动系统设计、使用、维修人员的实际需要出发,在广泛吸收国外先进设计思想、先进标准的基础上,全面介绍了交流调速理论、调速原理与系统组成及工程设计等方面的知识,并对当前市场常用的安川 $\Sigma II/\Sigma V$ 系列、三菱MR-J2S/J3/ES系列与松下MINAS A4/A5系列伺服驱动器的规格、控制系统设计、功能、参数、操作、维修等方面的内容进行了全面、系统、深入、具体的介绍。

全书内容选择先进实用,理论阐述简洁明了,应用技术介绍全面系统,功能说明深入细致,编写深入浅出,理论联系实际,面向工程应用,是迄今交流伺服应用类图书中较为完整、系统的工程设计参考资料与应用技术手册,也是高等学校师生、研究生教学培训的优秀参考书。

### 新能源及高效节能应用技术丛书 交流伺服驱动从原理到完全应用

- ◆ 编 著 龚仲华  
责任编辑 付方明
- ◆ 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>  
三河市潮河印业有限公司印刷
- ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 37.75  
字数: 1 043 千字 2010年1月第1版  
印数: 1—4 000 册 2010年1月河北第1次印刷

ISBN 978-7-115-21875-9

定价: 68.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223  
反盗版热线: (010)67171154

# 前言

交流伺服驱动器是 20 世纪 70 年代初随电力电子技术、PWM 控制技术的发展而出现的一种交流感应电机调速装置。随着科学技术的进步,当代交流伺服驱动器的功能已日臻完善,如何充分利用伺服驱动器的功能来解决工程实际中的各类问题,是交流伺服应用技术人员所必须了解与掌握的知识。

本书是从工程技术人员的实际应用要求出发,系统阐述交流调速原理与理论,全面介绍当代交流伺服驱动器应用技术的综合性书籍,内容包括交流调速的基本理论、调速原理与系统、调速系统的设计、典型伺服驱动器的应用技术等方面。

本书在内容选择上力求做到理论阐述简洁明了、应用技术介绍全面系统、功能说明深入细致,使得读者能够通过本书的学习具备“完全应用”交流伺服驱动器的能力。全书分“交流调速基础”、“安川交流伺服驱动器的应用”、“三菱交流伺服驱动器的应用”、“松下交流伺服驱动器的应用”4 篇共 15 章。

第 1~3 章为“交流调速基础”篇,系统介绍交流调速理论、调速原理与系统组成、交流调速系统的工程设计知识等,供读者了解交流调速的理论知识,为工程选型与设计计算提供参考。

第 4~7 章为“安川交流伺服驱动器的应用”篇,对安川  $\Sigma II/\Sigma V$  系列交流伺服驱动器的电路设计、功能、参数、操作、维修等方面的知识进行了全面、系统、深入、具体的介绍。

第 8~12 章为“三菱交流伺服驱动器的应用”篇,对三菱 MR-J2S/J3/ES 系列交流伺服驱动器的电路设计、功能、参数、操作、维修等方面的知识进行了全面、系统、深入、具体的介绍。

第 13~15 章为“松下交流伺服驱动器的应用”篇,对松下 MINAS A4/A5 系列交流伺服驱动器的电路设计、功能、参数、操作、维修等方面的知识进行了全面、系统、深入、具体的介绍。

本书力求为广大工程技术人员与高等学校师生、研究生等提供一本真正有实用价值的技术参考资料与设计手册。由于全书所涉及的参考资料与内容众多,编写工作量较大,书中的缺点错误在所难免,殷切期望得到广大读者与同行专家的帮助指正。

本书编写过程中参考了安川  $\Sigma II/\Sigma V$  系列、三菱 MR-J2S/J3/ES 系列、松下 MINAS A4/A5 系列交流伺服驱动器的技术资料,并得到了以上公司技术人员的大力支持与帮助,在此一并表示感谢。

作者

# 目 录

## 第 1 篇 交流调速基础

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第 1 章 交流电机控制系统概述      | 3  |
| 1.1 发展概况与分类           | 3  |
| 1.2 变频器与伺服驱动器         | 5  |
| 1.3 交流伺服系统的结构与典型产品    | 9  |
| 1.3.1 伺服系统的结构         | 9  |
| 1.3.2 典型产品简介          | 10 |
| 第 2 章 交流伺服原理与系统       | 14 |
| 2.1 电机控制的基本理论         | 14 |
| 2.1.1 电磁感应定律与电磁力      | 14 |
| 2.1.2 电机运行的力学基础       | 15 |
| 2.2 交流伺服电机的运行原理       | 18 |
| 2.3 交流电的逆变            | 21 |
| 2.3.1 电力电子器件概述        | 21 |
| 2.3.2 整流电路的工作原理       | 25 |
| 2.3.3 逆变电路的基本形式与工作原理  | 28 |
| 2.4 PWM 逆变原理          | 31 |
| 2.4.1 PWM 逆变原理与特点     | 31 |
| 2.4.2 PWM 波形的产生       | 34 |
| 2.5 无刷直流电机伺服驱动系统      | 35 |
| 2.5.1 无刷直流电机调速原理      | 35 |
| 2.5.2 无刷直流电机调速系统      | 37 |
| 2.6 永磁同步电机伺服驱动系统      | 39 |
| 2.6.1 交流永磁同步电机的矢量控制原理 | 39 |
| 2.6.2 交流永磁同步电机控制系统    | 41 |
| 第 3 章 交流伺服系统设计基础      | 44 |
| 3.1 交流调速系统的性能比较       | 44 |

|       |               |    |
|-------|---------------|----|
| 3.1.1 | 交流调速系统的主要技术指标 | 44 |
| 3.1.2 | 交流调速系统的性能比较   | 46 |
| 3.2   | 交流伺服进给系统设计    | 48 |
| 3.2.1 | 伺服电机的基本选择     | 49 |
| 3.2.2 | 进给系统的稳态设计     | 50 |
| 3.2.3 | 伺服进给系统的动态设计   | 55 |
| 3.3   | 驱动器主回路的设计与计算  | 59 |
| 3.3.1 | 驱动器及交流主回路附件选择 | 59 |
| 3.3.2 | 直流主回路附件选择     | 62 |
| 3.4   | 电气柜散热设计       | 66 |
| 3.4.1 | 发热量与散热能力的计算   | 66 |
| 3.4.2 | 热交换器与空调的选择    | 68 |
| 3.5   | 安装与连接设计       | 69 |
| 3.5.1 | 工作条件与安装设计     | 70 |
| 3.5.2 | 连接设计          | 72 |
| 3.5.3 | 干扰及其预防        | 74 |
| 3.5.4 | 接地系统设计        | 75 |
| 3.5.5 | 安装与连接图设计      | 78 |

## 第2篇 安川交流伺服驱动器的应用

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 第4章   | 产品规格与电路设计              | 83  |
| 4.1   | 产品规格与技术性能              | 83  |
| 4.1.1 | $\Sigma II$ 系列驱动器      | 83  |
| 4.1.2 | $\Sigma V$ 系列驱动器       | 88  |
| 4.2   | 硬件组成与选择                | 94  |
| 4.2.1 | 硬件组成                   | 94  |
| 4.2.2 | $\Sigma II$ 系列驱动器与附件选择 | 95  |
| 4.2.3 | $\Sigma V$ 系列驱动器与附件选择  | 97  |
| 4.3   | 电气连接总图                 | 100 |
| 4.3.1 | $\Sigma II$ 系列驱动器连接总图  | 100 |
| 4.3.2 | $\Sigma V$ 系列驱动器连接总图   | 105 |
| 4.4   | 主回路设计                  | 108 |
| 4.4.1 | 输入电源与要求                | 108 |
| 4.4.2 | 主回路设计                  | 110 |
| 4.4.3 | 滤波器的连接                 | 115 |
| 4.5   | 控制回路设计                 | 116 |
| 4.5.1 | 开关量输入/输出连接             | 116 |
| 4.5.2 | 给定与检测回路连接              | 121 |
| 4.5.3 | 全闭环接口电路                | 123 |
| 4.6   | 开关量输入/输出功能及其定义         | 126 |
| 4.6.1 | 开关量输入                  | 127 |
| 4.6.2 | 开关量输出                  | 129 |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 4.7 电路设计实例                     | 132        |
| <b>第5章 驱动器操作与快速调试</b>          | <b>139</b> |
| 5.1 驱动器的基本操作                   | 140        |
| 5.1.1 操作显示单元说明                 | 140        |
| 5.1.2 驱动器的初始检查                 | 142        |
| 5.1.3 点动与回参考点试验                | 145        |
| 5.2 驱动器参数的设定                   | 148        |
| 5.2.1 参数的显示与保护                 | 148        |
| 5.2.2 参数的设定                    | 150        |
| 5.3 速度控制的快速调试                  | 152        |
| 5.3.1 连接要求与调试步骤                | 153        |
| 5.3.2 参数的基本设定与调整               | 153        |
| 5.4 位置控制的快速调试                  | 157        |
| 5.4.1 连接要求与调试步骤                | 157        |
| 5.4.2 位置指令的选择与要求               | 158        |
| 5.4.3 基本参数的设定                  | 162        |
| 5.5 驱动器的在线自动调整                 | 163        |
| 5.5.1 $\Sigma II$ 系列驱动器的在线自动调整 | 163        |
| 5.5.2 $\Sigma V$ 系列驱动器的在线自动调整  | 166        |
| 5.6 绝对编码器的使用                   | 168        |
| 5.6.1 连接要求                     | 168        |
| 5.6.2 数据初始化与设定                 | 170        |
| 5.6.3 绝对位置的输出                  | 172        |
| 5.7 位置全闭环控制                    | 174        |
| 5.7.1 系统结构                     | 174        |
| 5.7.2 参数的设定与调整                 | 176        |
| <b>第6章 功能与参数</b>               | <b>178</b> |
| 6.1 控制方式及切换                    | 178        |
| 6.1.1 驱动器的控制方式                 | 178        |
| 6.1.2 控制方式的切换                  | 182        |
| 6.2 驱动器的停止与制动                  | 183        |
| 6.2.1 正常停止与动态制动                | 183        |
| 6.2.2 安全输入与硬件基极封锁              | 186        |
| 6.2.3 机械制动器及其控制                | 189        |
| 6.3 调节器结构与参数                   | 192        |
| 6.3.1 闭环调节器原理                  | 192        |
| 6.3.2 调节器的基本设定                 | 194        |
| 6.3.3 增益切换控制                   | 196        |
| 6.4 位置调节器的设定                   | 198        |
| 6.4.1 位置调节原理与参数                | 198        |

|            |                          |            |
|------------|--------------------------|------------|
| 6.4.2      | 位置调节器结构                  | 200        |
| 6.5        | 速度调节器的设定                 | 203        |
| 6.5.1      | 速度调节器结构                  | 203        |
| 6.5.2      | 调节器参数及其设定                | 205        |
| 6.6        | 转矩调节器的设定                 | 208        |
| 6.6.1      | 转矩调节器的结构                 | 208        |
| 6.6.2      | 调节器参数及其设定                | 210        |
| 6.7        | 驱动器参数总览                  | 216        |
| <b>第7章</b> | <b>状态监视、辅助调整与维修</b>      | <b>223</b> |
| 7.1        | 驱动器的状态监视                 | 223        |
| 7.1.1      | 操作单元显示                   | 223        |
| 7.1.2      | 模拟量输出监视                  | 225        |
| 7.2        | 驱动器的辅助调整                 | 228        |
| 7.2.1      | 辅助调整功能与参数                | 228        |
| 7.2.2      | 辅助调整的操作                  | 230        |
| 7.2.3      | 共振检测与陷波器设定               | 233        |
| 7.2.4      | 无电机试运行                   | 236        |
| 7.3        | 驱动器报警与处理                 | 237        |
| 7.3.1      | 基本说明                     | 237        |
| 7.3.2      | $\Sigma$ II 系列驱动器故障分析与处理 | 238        |
| 7.3.3      | $\Sigma$ V 系列驱动器故障的分析与处理 | 242        |

## 第3篇 三菱交流伺服驱动器的应用

|            |                            |            |
|------------|----------------------------|------------|
| <b>第8章</b> | <b>MR-J3 系列驱动器的规格与电路设计</b> | <b>251</b> |
| 8.1        | 产品规格与技术性能                  | 251        |
| 8.1.1      | 型号与规格                      | 251        |
| 8.1.2      | 技术特点与性能                    | 253        |
| 8.1.3      | 配套伺服电机                     | 255        |
| 8.2        | 硬件组成与附件选择                  | 257        |
| 8.2.1      | 硬件组成                       | 257        |
| 8.2.2      | 驱动器及附件选择                   | 259        |
| 8.3        | 电气连接总图                     | 260        |
| 8.3.1      | 连接总图                       | 260        |
| 8.3.2      | 连接端与功能                     | 262        |
| 8.3.3      | 伺服电机的连接                    | 265        |
| 8.4        | 主电路设计                      | 268        |
| 8.4.1      | 输入电源与要求                    | 268        |
| 8.4.2      | 主回路设计                      | 270        |
| 8.4.3      | 分离型驱动主回路设计                 | 274        |



|               |                             |            |
|---------------|-----------------------------|------------|
| 8.5           | 控制电路设计                      | 275        |
| 8.5.1         | 开关量输入/输出电路                  | 276        |
| 8.5.2         | 给定输入与位置反馈输出电路               | 277        |
| 8.5.3         | 绝对编码器与连接电路                  | 279        |
| 8.6           | DI/DO 信号功能定义                | 280        |
| 8.6.1         | 开关量输入                       | 280        |
| 8.6.2         | 开关量输出                       | 285        |
| <b>第 9 章</b>  | <b>MR-J3 系列驱动器的功能与参数</b>    | <b>290</b> |
| 9.1           | MR-J3 系列驱动器参数总览             | 290        |
| 9.2           | 常用功能与参数                     | 299        |
| 9.2.1         | 控制方式选择与切换                   | 299        |
| 9.2.2         | 转矩与速度限制                     | 301        |
| 9.2.3         | 加减速与停止控制                    | 303        |
| 9.2.4         | 机械制动器控制                     | 306        |
| 9.2.5         | 模拟量输出监视                     | 308        |
| 9.3           | 调节器结构与参数                    | 309        |
| 9.3.1         | 调节器结构                       | 309        |
| 9.3.2         | 增益的切换控制                     | 312        |
| 9.3.3         | 位置调节器与参数                    | 313        |
| 9.3.4         | 速度调节器与参数                    | 316        |
| 9.3.5         | 转矩调节器与参数                    | 316        |
| 9.4           | 数据通信与网络控制                   | 319        |
| 9.4.1         | 通信与网络接口                     | 319        |
| 9.4.2         | 通信命令与格式                     | 322        |
| 9.4.3         | 驱动器数据的读出                    | 324        |
| 9.4.4         | 数据写入与试运行控制                  | 330        |
| 9.4.5         | 数据通信实例                      | 334        |
| 9.5           | 绝对编码器的数据传送与零点设定             | 339        |
| 9.5.1         | 使用条件与数据传送方式                 | 339        |
| 9.5.2         | 绝对位置的 DI/DO 传送              | 341        |
| 9.5.3         | 绝对零点的设定                     | 346        |
| <b>第 10 章</b> | <b>MR-J3 系列驱动器的操作、调试与维修</b> | <b>348</b> |
| 10.1          | 驱动器的显示与操作                   | 348        |
| 10.1.1        | 电源通断控制与操作单元说明               | 348        |
| 10.1.2        | 驱动器的状态显示                    | 350        |
| 10.1.3        | 参数的显示与设定                    | 354        |
| 10.1.4        | 驱动器的其他操作                    | 356        |
| 10.2          | 驱动器的快速调试                    | 358        |
| 10.2.1        | 位置控制的快速调试                   | 358        |
| 10.2.2        | 速度控制的快速调试                   | 364        |
| 10.3          | 驱动器的调整                      | 367        |

## 交流伺服驱动从原理到完全应用

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 10.3.1 调整模式与功能                   | 367        |
| 10.3.2 在线自动调整步骤                  | 370        |
| 10.3.3 手动调整                      | 372        |
| 10.3.4 自适应调整                     | 375        |
| 10.4 故障与报警的处理                    | 377        |
| 10.4.1 故障及其处理                    | 378        |
| 10.4.2 报警与警示的处理                  | 380        |
| <b>第 11 章 MR-J2S 系列驱动器的使用与维修</b> | <b>387</b> |
| 11.1 产品规格与技术性能                   | 387        |
| 11.1.1 驱动器规格与性能                  | 387        |
| 11.1.2 配套伺服电机                    | 389        |
| 11.2 电气连接与电路设计                   | 394        |
| 11.2.1 驱动器连接                     | 394        |
| 11.2.2 电机与编码器连接                  | 400        |
| 11.2.3 控制电路设计                    | 402        |
| 11.3 功能与参数对照                     | 404        |
| <b>第 12 章 MR-ES 系列驱动器</b>        | <b>411</b> |
| 12.1 产品规格与技术性能                   | 411        |
| 12.2 硬件组成与电路设计                   | 414        |
| 12.2.1 硬件组成                      | 414        |
| 12.2.2 驱动器连接                     | 415        |
| 12.2.3 电机连接                      | 421        |
| 12.2.4 电路设计                      | 423        |
| 12.3 功能与参数对照                     | 425        |

## 第 4 篇 松下交流伺服驱动器的应用

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| <b>第 13 章 MINAS A4 系列驱动器的规格、性能与设计</b> | <b>437</b> |
| 13.1 产品规格与技术性能                        | 437        |
| 13.1.1 驱动器规格与性能                       | 437        |
| 13.1.2 配套伺服电机                         | 440        |
| 13.2 电气连接与电路设计                        | 445        |
| 13.2.1 驱动器连接                          | 445        |
| 13.2.2 电机与编码器连接                       | 451        |
| 13.2.3 电路设计                           | 453        |
| 13.3 输入/输出功能及定义                       | 457        |
| 13.3.1 DI 信号功能与定义                     | 457        |
| 13.3.2 DO 信号功能与定义                     | 460        |
| 13.3.3 AI/AO 信号功能与定义                  | 463        |

|                                                       |            |
|-------------------------------------------------------|------------|
| 13.4 驱动器参数总表 .....                                    | 464        |
| <b>第 14 章 MINAS A4 系列驱动器的操作、调试与维修 .....</b>           | <b>476</b> |
| 14.1 驱动器操作 .....                                      | 476        |
| 14.1.1 操作单元与显示 .....                                  | 476        |
| 14.1.2 输入/输出状态显示 .....                                | 479        |
| 14.1.3 参数的显示与写入 .....                                 | 481        |
| 14.2 驱动器的快速调试 .....                                   | 482        |
| 14.2.1 初始检查与调试 .....                                  | 482        |
| 14.2.2 位置控制的快速调试 .....                                | 485        |
| 14.2.3 速度控制的快速调试 .....                                | 490        |
| 14.3 驱动器的自动调整 .....                                   | 493        |
| 14.3.1 功能与调整方式 .....                                  | 493        |
| 14.3.2 常规自动调整 .....                                   | 495        |
| 14.3.3 实时调整与自适应调整 .....                               | 497        |
| 14.4 驱动器报警与处理 .....                                   | 499        |
| 14.4.1 驱动器报警及处理 .....                                 | 499        |
| 14.4.2 驱动器故障分析与处理 .....                               | 504        |
| <b>第 15 章 MINAS A5 系列驱动器 .....</b>                    | <b>506</b> |
| 15.1 产品规格与技术性能 .....                                  | 506        |
| 15.1.1 驱动器规格与性能 .....                                 | 506        |
| 15.1.2 伺服电机与技术参数 .....                                | 508        |
| 15.2 电气连接与电路设计 .....                                  | 512        |
| 15.3 MINAS A5 系列驱动器参数 .....                           | 515        |
| 15.3.1 参数一览表 .....                                    | 515        |
| 15.3.2 参数说明 .....                                     | 533        |
| 15.4 操作与维修 .....                                      | 537        |
| 15.4.1 操作单元与显示 .....                                  | 537        |
| 15.4.2 MINAS A5 新增操作功能 .....                          | 539        |
| 15.4.3 驱动器报警与处理 .....                                 | 541        |
| <b>附录 1 安川 <math>\Sigma</math> II 系列伺服电机与参数 .....</b> | <b>542</b> |
| <b>附录 2 安川 <math>\Sigma</math> V 系列伺服电机与参数 .....</b>  | <b>552</b> |
| <b>附录 3 三菱 MR-J3 系列伺服电机与参数 .....</b>                  | <b>561</b> |
| <b>附录 4 三菱 J3 系列伺服电机安装尺寸 .....</b>                    | <b>576</b> |
| <b>附录 5 三菱 MR-ES 系列伺服电机技术参数与安装尺寸 .....</b>            | <b>586</b> |

# 第 1 篇

## 交流调速基础

第 1 章 交流电机控制系统概述

第 2 章 交流伺服原理与系统

第 3 章 交流伺服系统设计基础



# 第 1 章

## 交流电机控制系统概述

### 1.1 发展概况与分类

#### 1. 交流电机控制系统的发展概况

交流电机控制系统是以交流电动机为执行元件的速度、转矩或位置控制系统的总称。与直流电机（本书中所述的电机均指电动机）相比，交流电机具有转速高、功率大、结构简单、运行可靠、体积小、价格低等一系列优点，但从控制系统的角度，由于交流电机是一个多变量、非线性对象，其控制技术远比直流电机复杂，因此，在一个很长的时期内，直流电机控制系统始终在电气传动领域占据主导地位。

交流电机控制系统是随晶体管脉宽调制（Pulse Width Modulated, PWM）技术与矢量控制理论发展起来的一种新型控制系统。

20 世纪 70 年代末，随着微电子技术的迅猛发展，MOSFET（半导体场效应晶体管）、IGBT（绝缘栅双极型晶体管）、BJT（双结型晶体管）等电力电子器件被实用化，晶体管 PWM 开始取代传统的晶闸管控制，使得高频、低损耗的变频控制成为了可能。这一技术的进步使得基于传统电机模型与经典控制理论的方波永磁同步电机（也称为无刷直流电机，Brush less DC Motor, BLDCM）交流伺服驱动系统与  $V/f$  控制的变频调速系统被迅速实用化，并陆续出现了实用型的交流伺服与变频器产品，如德国 SIEMENS 公司的 6SC610 系列交流伺服驱动器、日本 FANUC 公司的 S 系列交流伺服驱动器及日本 YASKAWA（安川）、三菱等公司早期的交流伺服与变频器产品等。

这些早期的交流伺服与变频器产品是基于传统的电机模型与控制理论，从交流电机的静态特性出发对交流电机进行的控制，它们较好地解决了交流电机的平滑调速问题，为交流控制系统的快速发展与普及奠定了基础。以上产品由于结构简单、控制容易、生产制造成本低，至今仍然有所应用。

从原理上说，BLDCM 交流伺服驱动器采用的是方波供电，由于感性负载（电机绕组）电流不能突变，存在功率管的不对称通断与高速剩余转矩脉动等问题，严重时可能导致机械谐振。 $V/f$  控制的变频调速则大多采用基于开环磁链控制的变频控制方式，它很难保证电机在低速工作时的额定转矩输出，因而不能用于对动态精度要求高的控制场合。

这一时期，交流感应电机的控制理论与产品研究工作也在同步进行。在 20 世纪 70 年代德国 F.Blaschke 等人提出的“感应电机磁场定向的控制原理”的基础上，美国 P.C.Cushman & A.A.Clark

等申请了“感应电机定子电压的坐标变换控制”专利，从此建立起了全新的交流电机矢量控制理论。这一理论为交流电机控制系统的发展奠定了基础。同时，微处理器技术的迅猛发展，带来了数字控制技术的飞跃，它为矢量控制理论的实现提供了可能。

20 世纪 80 年代初期，矢量控制的交流感应电机产品先后在 SIEMENS(西门子)、YASKAWA(安川)、ROCKWELL 等公司研制成功，采用矢量控制、正弦波 PWM 调制的交流伺服驱动与矢量控制的变频调速系统等高性能的产品被迅速研制成功，并被广泛应用于工业控制的各个领域。

经过 20 多年的发展，交流电机的控制理论与技术已经日臻成熟，各种高精度、高性能的交流电机速度与位置控制系统产品不断涌现，目前已经开始出现在各领域全面取代直流控制的趋势。

2. 交流传动系统与交流伺服系统

根据控制对象，交流电机控制系统主要分为速度控制与位置控制两大类，转矩控制通常只作两类系统的附加功能。

按照传统的习惯，仅需要进行交流电机转速控制的系统称为“交流传动系统”，它广泛用于机械、矿山、冶金、纺织、化工、交通等行业。可以同时进行速度、位置（转角）控制的系统称为“交流伺服系统”，它主要用于数控机床、机器人、航天航空、办公设备等需要进行大范围调速、高精度位置控制与频繁起/制动的场合。

从电机的结构与原理上看，交流传动系统一般以交流感应电机为对象，而交流伺服系统则需要使用专门的交流永磁同步电机。

感应电机速度控制系统的种类很多，它包括最简单的多速电机变级调速、调压调速、串级调速、变频调速等等（见图 1.1.1）。

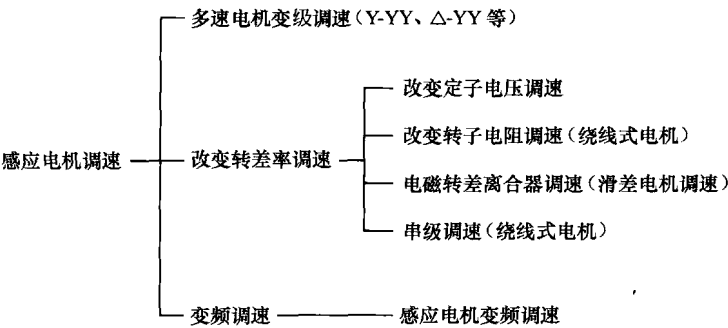


图 1.1.1 感应电机调速系统的种类

总体来说，变级调速只能进行有限级数（2~4 级）的变速，因此，只能用于简单变速的场合或是作为辅助变速措施使用；变转差调速系统的体积较大、成本高，其调速范围、控制精度、经济性等指标相对较低，因此，随着大功率、高性能变频器的出现，感应电机的变速正越来越多地应用变频调速技术。

感应电机的变频调速系统解决了感应电机的平滑变速问题，但是，由于感应电机本身结构的限制，即便是采用矢量控制变频，其调速范围目前也难以超过 1：1 000。因此，在当前阶段，感应电机的变频调速系统还只能用于调速范围相对较小，对动态性能与调速精度要求相对较低的场合。

交流伺服系统的速度调节同样采用的是变频技术，但使用的是中小功率交流永磁同步电机，它可以对电机的位置（转角）、转速、转矩等进行综合控制。交流伺服与感应电机控制相比，其调

速范围更大、调速精度更高、动态特性更好。但是,由于交流伺服系统采用的是永磁同步电机,电机的转子磁场通常无法改变,原则上只能用于机床的进给驱动、起重机等恒转矩调速的场合,很少用于诸如机床主轴、卷取控制等恒功率调速的场合。

交流伺服系统具有与直流伺服系统相媲美的优异性能,而且其可靠性更高、高速性能更好、维修成本更低,产品一经开发就被迅速推广,目前已经在数控机床、工业机器人等高速、高精度控制领域全面取代传统的直流伺服系统。

## 1.2 变频器与伺服驱动器

### 1. 变频器与伺服驱动器

在感应电机速度控制系统中,尽管变频调速所采用的控制方式有“恒电压频率比开环控制(开环  $V/f$  控制)”、“带速度补偿的恒电压频率比闭环控制(闭环  $V/f$  控制)”、“转差频率控制”、“开环磁通矢量控制”、“开环或闭环(电流)矢量控制”等多种,但其本质均是通过改变感应电机的供电频率来达到改变电机转速的目的,因此,用于感应电机变频调速控制的控制装置统称为“变频器”。

在同步电机位置控制系统中,同样有“方波永磁同步电机(也称为无刷直流电机, Brush less DC Motor, BLDCM)控制系统”、“正弦波永磁同步电机(Permanent-Magnet Synchronous Motor, PMSM)控制系统”等。它们虽然同样采用变频控制技术,但其根本目的都是为了实现位置的跟随控制,速度与转矩控制服务于位置控制,因此,用于交流永磁同步电机位置控制的装置统称为“伺服驱动器”,系统所使用的交流永磁同步电机称为“交流伺服电机”。

从控制系统的用途、结构组成与使用性能上,变频器与交流伺服驱动器又可以分为通用型与专用型两类;从控制系统所使用的控制信号形式上,交流电机控制系统可分为模拟控制与数字控制两类。各类产品的特点与区别如下。

### 2. 通用型变频器与交流主轴驱动器

变频器是通过改变交流电机的电压、频率等参数来调节电机转速的装置。对使用者来说,总是希望这些装置能有通用性,即利用同一装置可以对不同电机生产厂家生产的、不同参数的同规格电机进行调速控制。但是,从交流电机调速原理可知,交流电机是一种多变量、强耦合、非线性的控制对象,在控制时首先需要建立电机的数学模型,这一模型必须建立在实际电机的基础上。也就是说,交流控制系统的性能好坏不仅与控制装置本身有关,而且还与电机密切相关。因此,无论采用何种控制方式,要设计出一种能够精确控制多个不同控制对象的通用控制装置是十分困难的,正因为如此,目前市场上提供的变频调速控制器被分为通用型与专用型两大类。

#### (1) 通用型变频器

所谓通用型变频调速控制器就是指人们平时常说的“变频器”,由于变频器所控制的是通用感应电机,设计者无法预知最终控制对象的各种参数,控制系统必须对电机模型进行大量的简化与近似处理,因此,其调速范围一般较小、调速精度也较差。

在矢量控制的变频器上,为了提高电机模型的准确性,可以通过“自动调整(自学习)”等方式由变频器自动对交流电机的主要参数进行简单的测试,以改善控制性能。实践证明,这一功能对于提高变频器的控制性能是十分有效的。

在结构上,中小功率的通用型变频器一般为独立供应的部件(见图 1.2.1)。只要容量选择恰当,它们几乎可以用于所有同规格的感应电机控制,且使用方便、调试简单,这是目前市场上最



为常用的产品。



图 1.2.1 变频器外形图

大功率的变频器常采用模块化的结构，变频器的整流部分与逆变部分相互独立，并以模块化的形式进行组合。模块化的变频器的整流部分（电源模块）可以通用，只要容量足够，一个电源模块可以带多个逆变器模块，此类变频器一般用于冶金、矿山、交通运输等大型机械的传动控制。

### （2）交流主轴驱动器

为了改进变频器的调速性能，建立精确的对象模型，在变频器产品中有一类用于专用感应电机控制的变频器，这类变频器具有价格高、性能好的特点，多用于数控机床主轴的大范围、精确速度控制，因此，常被称为“交流主轴驱动器”。

交流主轴驱动器所配套的感应电机必须由驱动器生产厂家专门设计，并在生产厂经过统一、严格的质量控制与精密的测试、试验，以便在驱动器内部建立精确的数学模型。在此基础上，通过采用闭环矢量控制技术，使得其调速性能大大优于通用型变频器，且可以进行转矩、位置控制。交流主轴驱动器的性能已经接近交流伺服驱动系统，因此，有时又被称为“感应电机伺服驱动器”。

一般而言，交流主轴驱动器多为数控系统生产厂家配套生产，FANUC 公司的 $\alpha$ 系列、SIEMENS 公司的 611U 系列等均为典型的交流主轴驱动器产品。早期的交流主轴驱动器一般采用独立型结构，其外观与变频器类似，但目前已经多数采用模块化的结构，主轴驱动与伺服驱动可以共用电源模块。

## 3. 通用型与专用型伺服驱动器

交流伺服驱动器与变频器的区别在于，它必须能够实现大范围、恒转矩变速，其调速性能要求比交流主轴驱动器更高。因此，无论是通用型还是专用型伺服驱动器，都必须配套采用驱动器生产厂家所设计与提供的专用交流伺服电机（永磁同步电机）。

根据使用场合的不同，交流伺服驱动器可以分为两种基本类型：利用外部输入脉冲给定位置的通用型伺服驱动器与使用专用内部总线控制的专用型伺服驱动器（见图 1.2.2）。

### （1）通用型伺服驱动器

通用型交流伺服驱动器多数采用外部脉冲输入指令来控制伺服电机的位置与速度。此类驱动器通过改变指令脉冲的频率与数量，即可以达到改变运动速度与定位位置的目的。驱动器的脉冲