



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

# 高性能交流传动系统 —— 模型分析与控制

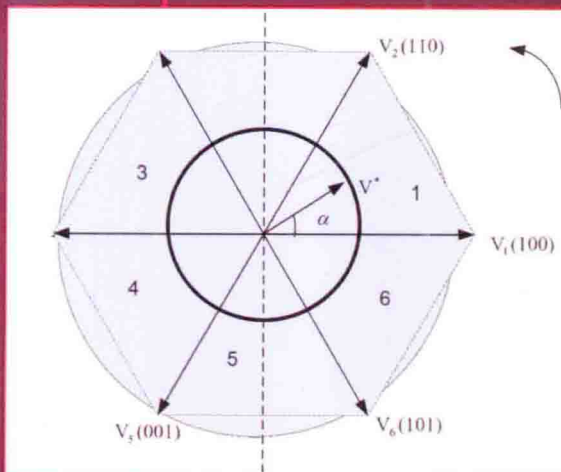
High Performance AC Drives: Modelling Analysis and Control

(印度) Mukhtar Ahmad 著

刘天惠 张巍巍 石宽 柴青 等译



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

# 高性能交流传动系统 ——模型分析与控制

(印度) Mukhtar Ahmad 著

刘天惠 张巍巍 石宽 柴青 陈丽颖 译  
荣麒 董天舒 魏冠男 詹云 韩旭



机械工业出版社

本书以综合的视角解读了高性能交流传动系统。全书共分8章,主要阐述了电气传动系统基本理论、异步电动机及同步电动机模型的建立、异步电动机传动系统的矢量控制、异步电动机的直接转矩控制和无速度传感器控制、永磁电动机的控制、开关磁阻电动机传动系统(SRM)、多相交流传动系统的控制、交流电动机的模糊控制和神经网络控制等。此外,还给出了相应的案例分析。全书各部分内容相互渗透,有机结合,有助于读者正确理解高性能交流传动系统。

本书既可作为大专院校教师、研究生、本科类的教材使用,同时也可以作为工业领域专业研发人员的参考资料。另外,本书针对无速度传感器控制及直接转矩控制方式的内容也可供专注于该领域的研究人员作为参考。

Translation from the English language edition:

“High Performance AC Drives: Modelling Analysis and Control”

by Mukhtar Ahmad.

©Springer-Verlag London Limited 2010.

Springer is a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社独家出版。版权所有,侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字 01-2011-6869 号

## 图书在版编目(CIP)数据

高性能交流传动系统:模型分析与控制/(印)阿哈默德(Ahmad, M.)著;刘天惠等译. —北京:机械工业出版社, 2014.4

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: High performance AC drives: modelling analysis and control

ISBN 978-7-111-46224-8

I. ①高… II. ①阿…②刘… III. ①交流传动系统 IV. ①TM921.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 055453 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:付承桂 责任编辑:江婧婧

版式设计:霍永明 责任校对:胡艳萍

责任印制:刘 岚

北京京丰印刷厂印刷

2014 年 6 月第 1 版·第 1 次印刷

169mm×239mm·10 印张·194 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-46224-8

定价:49.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工微博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

# 译者序

伴随新型电力电子器件以及全数字信号处理器的出现，在工业领域内特别是在对传动系统调速性能要求较高的应用场合中，由调速装置驱动的各类交流电动机得到了越来越广泛的应用。本书作者以此为着眼点，针对各种类型的高性能交流传动系统进行了介绍和分析。

全书内容涵盖广泛，涉及多种电动机类型，包括异步电动机、同步电动机、永磁电动机、开关磁阻电动机以及多相异步电动机等；根据各类电动机的不同特性，介绍了多种建模方式，包括各种电动机的静态模型、动态模型、空间矢量模型以及不同参考坐标系内的各类模型；针对不同系统配置和要求，介绍了多种控制方式，包括压频控制、磁通及转矩控制、矢量控制、无速度传感器控制以及弱磁控制等。此外，本书对于模糊控制以及神经网络控制等电气传动领域内新近引入的概念也都有所涉猎。

由于书中对于各类概念、公式以及算法的介绍详尽且推导清晰，因此可以作为工业自动化和传动专业学生的辅助教材使用。同时，全书内容与工业应用结合紧密，始终以实际需求为出发点提出问题及解决方案，因而同样可以作为工业或科研领域内专业人员的参考资料。

受限于译者本人的专业知识和英语水平，在全书翻译过程中难免出现谬误及疏漏，真诚地希望能够得到广大读者的及时指正。

译者

# 前 言

对于大多数电气传动系统而言,调速性能都是最为重要的系统要求之一。在早期的工业应用中,只有直流电动机在运行中对调速控制的范围和精度有较高的要求,此类传动系统被称为高性能传动系统。传统的交流电动机由于其高耦合度的非线性特性,通过普通控制方式无法实现快速的动态响应。然而,由于近期新型电力电子器件以及数字信号处理器的引入,交流电动机也开始被更多地应用于高性能传动系统中。磁场控制方式及矢量控制方式使传统交流电动机的动态性能得到了根本性的改善。其中,矢量控制方式的出现,使异步或同步电动机的控制方式与分励式直流电动机的控制方式变得相似起来。最近,在人工智能领域方面的新技术也为电气传动系统的性能提升做出了贡献。

本书以综合的视角解读高性能交流传动系统。它既可作为研究生类的教材使用,同时也可作为工业领域专业研发人员的参考资料。另外,本书针对无速度传感器控制及直接转矩控制方式的内容也可供专注于该领域的研究人员作为参考。书内包含了基于 MATLAB/SIMULINK 对电气传动系统进行建模、分析及控制的应用实例。书中列举的若干基本原则使读者对高性能交流传动系统的本质有了更深入的理解。本书将针对无速度传感器控制的交流传动系统给予重点介绍,因为此类系统在具有低造价、高可靠性的同时兼具较好的控制性能。

本书的主要内容分为 8 章进行阐述。第 1 章主要阐述了电气传动系统的基本理论、工业应用的基本要求以及不同负载的动态特性等基础知识。由于异步电动机是传动系统中最为常用的交流电动机,因此在第 2 章中着重讨论异步电动机建模的问题。在该章节中针对不同参考系中异步电动机的动态模型做了分析,同时还讨论了其状态空间模型在仿真运算中的应用。在第 3 章中,基于空间矢量控制方式,分别将异步和同步交流电动机的动态结构转化为相应的分励补偿直流电动机模型并加以分析。第 4 章着重讨论异步电动机的无速度传感器控制方式及直接转矩控制方式。第 5 章介绍了永磁同步电动机及无刷直流电动机的矢量控制以及直接转矩控制。由于上述两类电动机在工业领域中的应用越来越广泛,为此,在文中针对这两种电动机的控制策略分别进行了详尽的论述。

在第 6 章中主要介绍开关磁阻电动机。开关磁阻电动机最早发明于 1850 年,自 1980 年以来在调速驱动的应用领域重新得到了越来越多的应用。开关磁阻电动机具有诸多优点,例如效率高、功率覆盖范围广、适应严酷工况等。本章中针对开关磁阻电动机的运行特点、配置方式、仿真及控制策略等进行了分析,特别针对无速度传感器运行时的控制策略做了介绍。第 7 章对不同应用场合中的多象限运行传

动系统进行了讨论。第 8 章重点介绍高性能传动系统中运用到的模糊逻辑控制及神经网络控制方法。

本书所涉及的理论及实例均为作者本人在印度阿里格尔 AMU 大学及马来西亚 UPM 大学教授研究生课程时所用内容。我本人同时长期致力于高性能以及多象限运行传动系统领域的研究。衷心感谢电工学会主席团及 AMU 大学副校长支持我在教学之余完成此书。同时，衷心感谢我妻子 Maimoona 对我写作的支持与陪伴。

**Mukhtar Ahmad**

于印度阿里格尔

## 机械工业出版社读者需求调查表

亲爱的读者朋友：

您好！为了提升我们图书出版工作的有效性，为您提供更好的图书产品和服务，我们进行此次关于读者需求的调研活动，恳请您在百忙之中予以协助，留下您宝贵的意见与建议！

个人信息

|       |  |       |  |         |  |
|-------|--|-------|--|---------|--|
| 姓 名：  |  | 出生年月： |  | 学 历：    |  |
| 联系电话： |  | 手 机：  |  | E-mail： |  |
| 工作单位： |  |       |  | 职 务：    |  |
| 通讯地址： |  |       |  | 邮 编：    |  |

1. 您感兴趣的科技类图书有哪些？

☐自动化技术 ☐电工技术 ☐电力技术 ☐电子技术 ☐仪器仪表 ☐建筑电气  
☐其他（ ）

以上个大类中您最关心的细分技术（如 PLC）是：（ ）

2. 您关注的图书类型有

☐技术手册 ☐产品手册 ☐基础入门 ☐产品应用 ☐产品设计 ☐维修维护  
☐技能培训 ☐技能技巧 ☐识图读图 ☐技术原理 ☐实操 ☐应用软件  
☐其他（ ）

3. 您最喜欢的图书叙述形式

☐问答型 ☐论述型 ☐实例型 ☐图文对照 ☐图表 ☐其他（ ）

4. 您最喜欢的图书开本

☐口袋本 ☐32 开 ☐B5 ☐16 开 ☐图册 ☐其他（ ）

5. 图书信息获得渠道：

☐图书征订单 ☐图书目录 ☐书店查询 ☐书店广告 ☐网络书店 ☐专业网站  
☐专业杂志 ☐专业报纸 ☐专业会议 ☐朋友介绍 ☐其他（ ）

6. 主要购书途径

☐书店 ☐网络 ☐出版社 ☐单位集中采购 ☐其他（ ）

7. 您认为图书的合理价位是（元/册）：

手册（ ） 图册（ ） 技术应用（ ） 技能培训（ ） 基础入门（ ）  
其他（ ）

8. 每年购书费用

☐100 元以下 ☐101 ~ 200 元 ☐201 ~ 300 元 ☐300 元以上

9. 您是否有本专业的写作计划？

☐否 ☐是（具体情况： ）

非常感谢您对我们的支持，如果您还有什么问题欢迎和我们联系沟通！

地 址：北京市西城区百万庄大街 22 号 机械工业出版社电工电子分社 邮编：100037

联系人：付承桂 联系电话：010-88379764 13581693166 传真：010-68326336

## 机械工业出版社编著图书推荐表

|                                    |  |       |            |         |  |       |  |
|------------------------------------|--|-------|------------|---------|--|-------|--|
| 姓 名:                               |  | 出生年月: |            | 职称/职务:  |  | 专 业:  |  |
| 单 位:                               |  |       |            | E-mail: |  |       |  |
| 通讯地址:                              |  |       |            |         |  | 邮政编码: |  |
| 联系电话:                              |  |       | 研究方向及教学科目: |         |  |       |  |
| 个人简历（毕业院校、专业、从事过的以及正在从事的项目、发表过的论文） |  |       |            |         |  |       |  |
|                                    |  |       |            |         |  |       |  |
| 您近期的写作计划有:                         |  |       |            |         |  |       |  |
|                                    |  |       |            |         |  |       |  |
| 您推荐的国外原版图书有:                       |  |       |            |         |  |       |  |
|                                    |  |       |            |         |  |       |  |
| 您认为目前市场上最缺乏的图书及类型有:                |  |       |            |         |  |       |  |
|                                    |  |       |            |         |  |       |  |

地 址: 北京市西城区百万庄大街 22 号 机械工业出版社 电工电子分社  
 邮 编: 100037 网址: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)  
 联 系 人: 付承桂  
 联系电话: 010-88379764 13581693166 传真: 010-68326336



# 目 录

译者序

前言

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....               | 1  |
| 1.1 电气传动系统简介 .....           | 1  |
| 1.2 电动机 .....                | 1  |
| 1.3 电力电子变流器 .....            | 2  |
| 1.3.1 调速传动系统中的逆变器 .....      | 2  |
| 1.4 控制器 .....                | 3  |
| 1.5 负载 .....                 | 3  |
| 1.5.1 典型负载的转矩-速度曲线 .....     | 3  |
| 1.6 负载的动态特性和稳态特性 .....       | 5  |
| 1.7 多象限运行系统 .....            | 7  |
| 1.8 工作制及电动机额定值 .....         | 7  |
| 1.9 问题 .....                 | 9  |
| 参考文献 .....                   | 10 |
| 第 2 章 异步电动机及同步电动机模型的建立 ..... | 11 |
| 2.1 异步电动机的原理 .....           | 11 |
| 2.2 异步电动机的等效电路 .....         | 12 |
| 2.3 两相异步电动机的动态模型 .....       | 13 |
| 2.3.1 通过变换获得恒定的电感 .....      | 15 |
| 2.3.2 三相电动机的动态模型 .....       | 16 |
| 2.4 参考坐标系的选择 .....           | 18 |
| 2.4.1 任意参考坐标系内的建模 .....      | 18 |
| 2.5 其他参考坐标系内的建模 .....        | 20 |
| 2.5.1 定子参考坐标系模型 .....        | 21 |
| 2.5.2 转子参考坐标系模型 .....        | 21 |
| 2.5.3 同步旋转参考坐标系模型 .....      | 21 |
| 2.6 异步电动机的空间矢量模型 .....       | 22 |
| 2.7 异步电动机的速度控制 .....         | 28 |
| 2.8 状态空间模型 .....             | 28 |

|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| 2.9 同步电动机的建模 .....                              | 31        |
| 2.9.1 非凸极式同步电动机中转矩的产生 .....                     | 31        |
| 2.9.2 凸极式同步电动机 .....                            | 33        |
| 2.10 同步电动机的动态模型 .....                           | 34        |
| 2.11 同步电动机的空间矢量模型 .....                         | 36        |
| 参考文献 .....                                      | 37        |
| <b>第3章 异步电动机传动系统的矢量控制 .....</b>                 | <b>38</b> |
| 3.1 异步电动机的速度控制 .....                            | 38        |
| 3.1.1 压频控制方式 .....                              | 38        |
| 3.1.2 磁通及转矩控制方式 .....                           | 39        |
| 3.2 矢量控制简介 .....                                | 40        |
| 3.3 空间矢量 .....                                  | 41        |
| 3.4 空间矢量在不同参考坐标系间的变换 .....                      | 42        |
| 3.5 矢量控制原理 .....                                | 45        |
| 3.6 直接矢量控制 .....                                | 47        |
| 3.6.1 直接转矩控制中的感应线电压及电流（转子磁通量） .....             | 48        |
| 3.6.2 直接转矩控制中的定子磁通模型 .....                      | 49        |
| 3.6.3 直接转矩控制中的感应电动势及电流 .....                    | 50        |
| 3.7 采用空间矢量模型（VSM）的电压源型逆变器（VSI）的直接<br>矢量控制 ..... | 51        |
| 3.7.1 转矩控制 .....                                | 55        |
| 3.8 间接矢量控制或前馈控制 .....                           | 55        |
| 3.9 案例分析 .....                                  | 60        |
| 参考文献 .....                                      | 61        |
| <b>第4章 异步电动机的直接转矩控制及无传感器控制 .....</b>            | <b>62</b> |
| 4.1 简介 .....                                    | 62        |
| 4.1.1 无传感器控制 .....                              | 62        |
| 4.2 直接转矩控制基础 .....                              | 63        |
| 4.2.1 转矩和磁通控制 .....                             | 63        |
| 4.3 直接转矩控制的控制策略 .....                           | 64        |
| 4.4 基于直接转矩控制方案的开关表 .....                        | 68        |
| 4.4.1 直接自适应控制方案 .....                           | 69        |
| 4.4.2 直接转矩控制的特点 .....                           | 70        |
| 4.5 异步电动机的无传感器控制 .....                          | 70        |
| 参考文献 .....                                      | 77        |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| <b>第5章 永磁电动机的控制</b>          | <b>78</b>  |
| 5.1 简介                       | 78         |
| 5.2 电动机设计                    | 80         |
| 5.3 永磁电动机的模型                 | 81         |
| 5.4 无刷直流电动机的模型               | 82         |
| 5.5 逆变器的驱动模式                 | 85         |
| 5.5.1 120°开关模式               | 86         |
| 5.5.2 电压和电流 PWM 控制模式         | 86         |
| 5.5.3 半波逆变器电流控制              | 86         |
| 5.6 PWM 逆变器的速度控制             | 88         |
| 5.7 永磁同步电动机的矢量控制             | 88         |
| 5.8 控制方式                     | 90         |
| 5.8.1 恒转矩角度控制                | 91         |
| 5.8.2 单位功率因数控制               | 91         |
| 5.8.3 每安培最大转矩控制              | 92         |
| 5.8.4 弱磁控制                   | 93         |
| 5.9 永磁电动机的直接转矩控制             | 93         |
| 5.10 永磁电动机的无传感器控制            | 96         |
| 5.10.1 由测量的电压和电流获得位置         | 96         |
| 5.10.2 由测量的电感变化获得位置          | 97         |
| 5.11 无刷直流电动机的无传感器控制          | 98         |
| 参考文献                         | 100        |
| <b>第6章 开关磁阻电动机传动系统 (SRM)</b> | <b>101</b> |
| 6.1 简介                       | 101        |
| 6.2 结构                       | 101        |
| 6.2.1 线性开关磁阻电动机              | 103        |
| 6.3 基本运行原理                   | 103        |
| 6.4 开关磁阻电动机的设计               | 105        |
| 6.4.1 极数选择                   | 105        |
| 6.4.2 定子及转子极角的选择             | 105        |
| 6.4.3 电动机尺寸的选择               | 107        |
| 6.5 开关磁阻电动机用变换器              | 107        |
| 6.5.1 非对称桥式变换器               | 108        |
| 6.5.2 六开关变换器                 | 109        |
| 6.5.3 可变直流降压型变换器             | 110        |

|            |                                    |            |
|------------|------------------------------------|------------|
| 6.6        | 升降压型变换器 .....                      | 114        |
| 6.7        | 开关磁阻电动机的解析模型 .....                 | 115        |
| 6.8        | 开关磁阻电动机传动系统的控制 .....               | 116        |
| 6.9        | 带有速度/位置传感器的通用开关磁阻电动机驱动系统 .....     | 118        |
| 6.9.1      | 电流调节器的设计 .....                     | 118        |
| 6.9.2      | 转矩控制 .....                         | 119        |
| 6.10       | 开关磁阻电动机传动系统的直接转矩控制 .....           | 119        |
| 6.11       | 开关磁阻电动机传动系统的无传感器控制 .....           | 122        |
| 6.11.1     | 由电感变化得到的位置信息 .....                 | 122        |
| 6.11.2     | 基于带有外部信号输入的电感测量估算方法 .....          | 123        |
|            | 参考文献 .....                         | 124        |
| <b>第7章</b> | <b>多相交流传动系统的控制 .....</b>           | <b>126</b> |
| 7.1        | 简介 .....                           | 126        |
| 7.2        | 五相异步电动机的模型 .....                   | 126        |
| 7.3        | 任意参考坐标系下的电动机模型 .....               | 129        |
| 7.4        | 五相异步电动机的矢量控制 .....                 | 130        |
| 7.5        | 五相逆变器 .....                        | 131        |
| 7.5.1      | 五相电压源型逆变器的空间矢量脉冲宽度调制 (SVPWM) ..... | 133        |
| 7.6        | 五相永磁电机 .....                       | 135        |
|            | 参考文献 .....                         | 136        |
| <b>第8章</b> | <b>交流电动机的模糊控制和神经网络控制 .....</b>     | <b>138</b> |
| 8.1        | 简介 .....                           | 138        |
| 8.2        | 模糊控制的基本原理 .....                    | 139        |
| 8.3        | 模糊控制系统 .....                       | 140        |
| 8.3.1      | 模糊化 .....                          | 140        |
| 8.3.2      | 模糊规则 .....                         | 140        |
| 8.3.3      | 模糊推理机 .....                        | 140        |
| 8.3.4      | 去模糊化方法 .....                       | 141        |
| 8.3.4.1    | 中心区域方法 (COA) .....                 | 141        |
| 8.3.4.2    | 平均最大值方法 .....                      | 141        |
| 8.3.4.3    | 中心最大值法 .....                       | 142        |
| 8.4        | 异步电动机速度的模糊控制器 .....                | 142        |
| 8.4.1      | 模糊集和模糊规则 .....                     | 143        |
| 8.5        | 神经网络控制 .....                       | 144        |
| 8.5.1      | 人工神经元 .....                        | 144        |

## X 高性能交流传动系统——模型分析与控制

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 8.5.2 神经网络 .....       | 145 |
| 8.5.3 前馈神经网络 .....     | 145 |
| 8.5.3.1 神经网络的学习 .....  | 146 |
| 8.5.3.2 反向传播学习算法 ..... | 147 |
| 参考文献 .....             | 148 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 电气传动系统简介

在20世纪80年代之前,国内外绝大多数工业及生产领域应用到的交流电动机均被设计为恒速运行,然而恒速系统用作调速运行时的效率极低。近年来,随着电力电子开关元器件的发展以及微处理器应用成本的降低,使基于频率调制的电气传动系统被越来越广泛地应用在各种宽频调速的场合。在现代工业控制领域,对于调速系统速度、转矩以及位置控制的准确度和连续性要求日益增强,进而要求系统具有更加优异的稳态特性、瞬态响应以及传动效率。工业负载的类型可分为恒转矩型、恒功率型或转矩为速度函数型等。电气传动系统首选电动机作为传动部件,因其具有以下优点:可安装到与负载非常接近的地点;通过电控系统可运行在任意指定的速度下;起动和反转切换的时间都非常短暂。同时,电气传动系统选用的电动机,可覆盖功率由几瓦到数百千瓦的宽广范围。另外,电动机的速度-转矩特性能够依照负载特性的改变而迅速调整。

现代电气传动系统通常由以下四个部分组成:

- (1) 电动机;
- (2) 电力电子变流器;
- (3) 控制器;
- (4) 执行器件(即负载)。

上述各部分将在本章后续章节内分别论述。

## 1.2 电动机

在电气传动系统中,常用的电动机可分为以下几种类型:

- (1) 直流电动机:并励电动机、串励电动机、复励电动机、分励电动机及开关磁阻电动机等;
- (2) 交流电动机:异步电动机、同步电动机、永磁电动机及开关磁阻电动机等;
- (3) 特种电动机:如步进电动机等。

在不同的应用场合选用的电动机类型也不同,主要应考虑如下因素:

- 负载的速度-转矩特性;

- 启动和运行功耗；
- 备品备件及维护人员要求；
- 峰值转矩过载能力；
- 电动机耐热等级。

### 1.3 电力电子变流器

调速传动系统以其更高的效率和性能在工业领域中得到了广泛的应用，而系统所用的电力电子变流器的选型及控制通常由所选传动电动机的类型来决定。

应用于调速传动(ASD)系统的电力电子变流器可以分为以下两大类型：

- (1) 可控整流器：由固定单相/三相供电，提供可控的直流电压输出；
- (2) DC/AC 逆变器：在所需频率上提供可控的交流电压或电流输出，其直流供电来自电池组或二极管整流器。

选择适宜的电力电子变流器(PEC)类型与所选电动机匹配是非常重要的。电力电子变流器电流等级需满足所选电动机稳态及峰值转矩对应的电流大小，同时电压等级需满足电动机端最高电压峰值。由于本书重点论述交流电动机的传动系统，故以下所讨论的变流器类型基本属于 DC/AC 逆变器。

#### 1.3.1 调速传动系统中的逆变器

在多数工业场合中，交流传动系统都被要求在不同的速度下运行。为了达到调速的目的，需要由逆变器提供可变电压及可变频率的电源。综上所述，逆变器可按广义分为两种类型：电压源型逆变器以及电流源型逆变器。

两者相比，电压源型逆变器(VSI)的应用更为普遍。电压源型逆变器的电压控制通常采用脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, 简称 PWM)电路实现。电流源型逆变器(CSI)为电动机端提供经开关波形调制过的电流供电，并通过直流母线上所带的大容量电感保持该电流输出。

##### 1.3.1.1 三相桥式逆变器

图 1-1 所示为三相电压源型桥式逆变器原理图。交流电压经整流器整流后，供给桥式逆变器的直流输入。同时，直流母线输入端并联一个较大的电力电容器，用来缓冲逆变器工作时产生的充电电流冲击，且该电容器容量较大，通常可达  $2000 \sim 10000 \mu\text{F}$ 。一组串联电感被用于限制故障电流，用于驱动异步电动机的逆变器，一般需要采用例如 BJT、

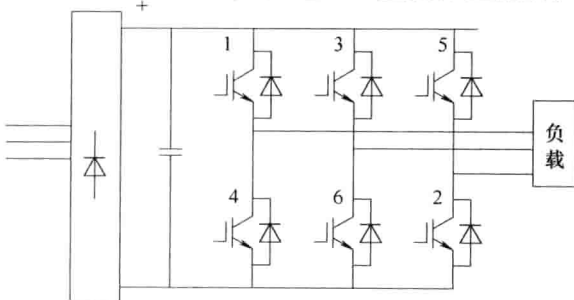


图 1-1 三相桥式逆变器

MOSFET、IGBT 或 GTO 等类型的门极可关断半导体闸流管。如果采用以上类型的器件,则在每相外接控制回路内还需要增加至少一个晶闸管和一个电容器,同时又要增加相应电感用于控制电容器极性切换。因此,类似以上带外部换相的晶闸管较少应用。

现在,除了某些大功率应用场合必须在逆变回路中采用门极可关断(GTO)晶闸管之外,晶体管已经基本取代了半导体闸流管。六阶电压逆变电路的工作原理如图 1-1 所示。由六只晶体管和六只二极管组合输出三相调制电压的电路,可以在  $180^\circ$  导通角或  $120^\circ$  导通角两种模式下运行。由于  $180^\circ$  导通角在各种工作状态下均具有更好的开关利用率,并能够提供更高的输出电压,因此这种方式的应用更为广泛。

在  $180^\circ$  导通角工作时,任意时刻均有三只晶体管处于导通状态。在  $360^\circ$  工作周期内共有六种导通方式,每种导通方式持续  $60^\circ$ 。六只晶体管按其依次导通顺序的编号如下:1-2-3、2-3-4、3-4-5、4-5-6、5-6-1 及 6-1-2。即 1、2、3 号晶体管在第一个  $60^\circ$  角周期内导通,然后是 2、3、4 号晶体管在下一个  $60^\circ$  周期内导通,以此类推。

## 1.4 控制器

通过控制器将电动机特性与负载实际运行进行匹配,现在已针对不同电动机的驱动形式开发出多重控制策略。电气控制器通过控制变流器的电流、电压、磁链及转矩输出达到控制目的。相应传感器将测量到或计算出的电压、电流、磁通量反馈给控制器。传感器输入的信号由电源输入端和变流器输出端取得。控制器输出用于调节改善变流器的工作状态(例如提高功率因数、降低谐波等)。

由运动传感器提供与位置、速度或转矩相关的状态变量反馈。运动控制器输入信号由运动传感器提供,其输出信号用于控制相关速度、位置或转矩输出。电气控制器和运动控制器结合使用,并且通过数字-模拟量输出电路来实现控制目的。当前的趋势是采用微处理器或数字信号处理器(Digital Signal Processor,简称 DSP)作为控制器,尤其是在高性能传动系统中的应用更为广泛。

## 1.5 负载

电气传动系统需要将电动机特性与负载特性很好地匹配方可运行。负载特性可由转矩-速度、转矩-时间、速度-时间或者位置-时间的关系曲线加以描述。

### 1.5.1 典型负载的转矩-速度曲线

大多数工业负载的转矩-速度特性,通常可以归纳为以下四个类型(见图 1-2):



- a) 恒转矩类型；
- b) 转矩与速度成线性比例关系类型；
- c) 转矩与速度二次方成比例关系；
- d) 转矩与速度成反比例关系。

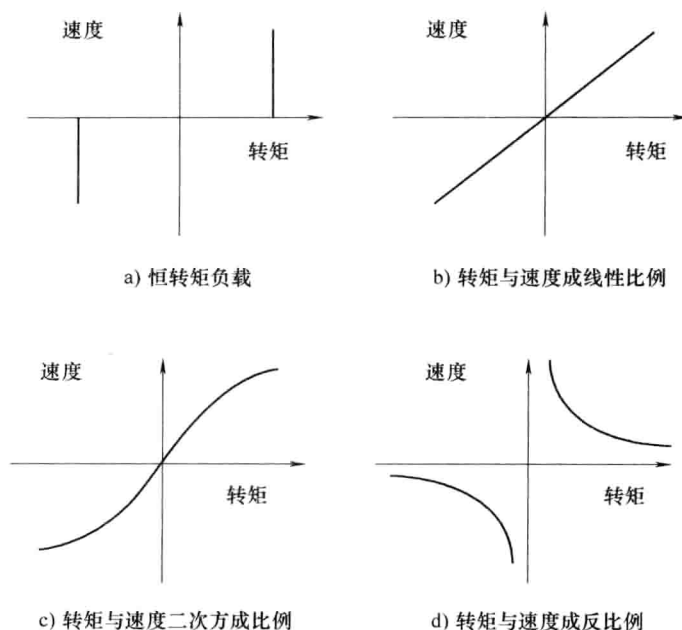


图 1-2<sup>①</sup> 典型负载的转矩-速度特性

负载的转矩-速度特性,从本质上来说取决于负载的具体应用方式。低速起重机、活塞式压缩机、带式输送机等均表现为恒转矩负载特性(即与速度无关)。混料器、搅拌器、带恒负载的分励直流发电机、涡流制动器以及压延机等负载转矩,则表现出与速度成线性比例关系的特性。例如风扇、船用螺旋桨、压缩机等负载转矩则与速度的二次方成正比关系。而类似提升机、卷取机、车床、拉丝机等负载转矩则与速度成反比例关系。上述的大多数负载在起动时,都需要额外的出力用来克服静态摩擦阻力亦或称为粘滞阻力,此时的电动机出力被称为起步转矩。电气传动系统需要将电动机的速度-转矩特性与负载特性匹配方可正常运行。因此,电动机及变流器的选型均应遵循以上原则。同时,电动机对机械负载的匹配,既应考虑正常运行的稳态,同时还需要考虑各种瞬态情况。

① 原书中图 1-2c 有误,此处为译者重新画的新图。——译者注