永磁同步电动机变频调速系统及其控制

YONGCI TONGBU DIANDONGJI
BIANPIN TIAOSU XITONG JIQI KONGZHI

袁登科 徐延东 李秀涛 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

永磁同步电动机变频调速系统及其控制

袁登科　徐延东　李秀涛　编著

机 械 工 业 出 版 社

本书内容分为基础篇、控制篇、应用篇和进阶篇。从数学模型、仿真建模和应用实例三个层面，从简单实用的角度，较为全面地介绍了永磁同步电动机变频调速系统的主要构成部分的工作原理和控制技术。

本书主要介绍了永磁同步电动机的结构与基本工作原理、数学模型、仿真模型以及有限元建模分析；电压型逆变器的工作原理、仿真建模与PWM控制技术；永磁同步电动机的工作特性及其在正弦交流电压源、电压型逆变器供电下的工作特性；用于电机控制的常见数字微控制器及PWM算法实例；永磁同步电动机的磁场定向矢量控制技术和直接转矩控制技术；永磁同步电动机变频调速系统实例；无位置传感器以及智能控制技术在永磁同步电动机调速系统中的应用；附录提供了部分MATLAB仿真模型、部分源代码、与电机调速系统相关的一些标准目录。

本书适合高等院校电气工程及其自动化专业高年级本科生、电力电子与电力传动方向研究生作为教材，也可供从事电动汽车等交流电机调速的科技人员阅读。

图书在版编目（CIP）数据

永磁同步电动机变频调速系统及其控制/袁登科等编著. —北京：机械工业出版社，2015.4（2016.8重印）
ISBN 978-7-111-50228-9

Ⅰ.①永… Ⅱ.①袁… Ⅲ.①同步电动机-变频调速-研究 Ⅳ.①TM341

中国版本图书馆CIP数据核字（2015）第100572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：林春泉 责任编辑：林春泉
封面设计：路恩中 责任校对：胡艳萍 陈秀丽
责任印制：刘 岚
北京京丰印刷厂印刷
2016年8月第1版·第2次印刷
184mm×260mm·27.25印张·655千字
标准书号：ISBN 978-7-111-50228-9
定价：79.00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
服务咨询热线：010-88379833	机 工 官 网：www.cmpbook.com
读者购书热线：010-88379649	机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
	教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版	金 书 网：www.golden-book.com

前　言

电机调速系统的作用是通过各类电动机将电能转换成机械能，为机械负载提供原动力。电机调速系统应用非常广泛，无论在电动汽车、城市地铁、干线铁路等交通工具中，还是在冶金、纺织等工业生产线上，甚至在空调、冰箱等家用电器里，电机调速系统都发挥着不可替代的作用。

交流电机调速系统采用交流电动机提供负载所需原动力，它是电机学、交流电机调速理论、自动控制理论、电力电子技术、微电子技术等学科的有机结合与交叉应用。自 20 世纪 70 年代以来，随着上述学科日渐成熟，加之交流电机在体积、重量、维修、可靠性、效率等方面优于直流电机，目前电机调速系统已经从直流电机调速系统转为交流电机调速系统，并处于从传统电机向新型电机过渡阶段。

近些年来，随着永磁材料性能的不断提升和成本的降低，采用永磁材料的各类电机（特别是永磁同步电动机）已经在广受瞩目的电动汽车中得到了较多的应用，并且在新能源风能开发与利用、铁道与城市轨道交通等领域崭露头角。由于在体积、重量、效率等方面有较大优势，永磁同步电动机的应用将会更加普及。

为顺应永磁同步电动机应用发展趋势以及便于读者理解，本书围绕永磁同步电动机变频调速系统及其控制技术，从数学模型、仿真分析和应用实例三个层面，力争做到将理论分析与简单实用、仿真运用、调速应用相结合，从构成调速系统的各基本单元入手编写了四篇内容。

第 1 章绪论，简要介绍了电机的分类、应用场合与研究方法。

第 2 ~ 5 章是基础篇。其中第 2 章介绍了永磁同步电动机的结构及其基本工作原理；第 3 章推导了永磁同步电动机的动态数学模型并对其进行简化；第 4 章以 MATLAB/SIMULINK 为仿真平台介绍了永磁同步电动机的仿真建模；第 5 章介绍了 JMAG 有限元分析软件在永磁同步电动机电磁分析与仿真建模中的应用。

第 6 ~ 11 章是控制篇。第 6 章分析了永磁同步电动机的基本工作特性；第 7 章分析了在理想正弦交流电压源供电情况下永磁同步电动机的工作特性；第 8 章分析了两电平电压型逆变器的结构与工作原理；第 9 章讲解了电压型逆变器的 PWM 控制技术；第 10 章分析了在电压型逆变器供电情况下，永磁同步电动机调速系统的一些特殊问题；第 11 章介绍了目前用于调速系统电机控制的数字微控制器。

第 12 ~ 14 章是应用篇。第 12 章阐述了永磁同步电动机的矢量控制变频调速系统；第 13 章分析了永磁同步电动机的直接转矩控制变频调速系统；第 14 章举例介绍了永磁同步电动机调速系统在电动汽车与城市轨道交通轻轨列车中的应用。

第 15 ~ 16 章是进阶篇。第 15 章介绍了几种典型的永磁同步电动机无位置传感器控制技术；第 16 章介绍了几种常见智能控制技术在永磁同步电动机变频调速系统中的应用。

书后的附录提供了 SIMULINK 仿真模型、TMS320LF2407 DSP 中 SVPWM 算例汇编程序、基于 MATLAB/SIMULINK 模型文件的 DSP 程序开发实例、与电机及电机调速系统相关的各

类标准目录等内容，供读者参考。

结合目前社会对人才多方面素质需求的现状，编者特地找到一些充满正能量的文字附在每章小结处，与读者共享。

本书由袁登科、徐延东、李秀涛编著，陶生桂教授进行审定。徐延东编写了第 14 章，李秀涛编写了第 11 章，袁登科编写了其余各章节并负责全书的统稿。

感谢上海电驱动有限公司高级工程师张舟云、艾迪捷信息科技（上海）有限公司高级工程师姚海兰、罗姆半导体（上海）有限公司周劲先生、三菱电机机电（上海）有限公司龚熙国先生等，他们为本书内容的编写提出了宝贵的意见。

在本书的编写工作中，得到了同济大学电信学院的陈最、寿利宾、胡展敏、武凯迪、高喆、康婷、薛梦觉、宋力、魏天力、杨守建等同学的热心帮助，在此表示衷心感谢。

众多读者就《交流永磁电机变频调速系统》一书的内容与作者进行过交流，提出了许多宝贵意见，在此也一并表示衷心的感谢！

非常感谢机械工业出版社的林春泉编审及其同事们，他们为本书的出版提供了大力支持与帮助。

作者对家人及同事所给予的支持与关怀表示深深的感谢。

本书适合高等院校电气工程及其自动化专业高年级本科生、电力电子与电力传动方向研究生以及从事交流电机调速领域的科技人员参考使用。

由于学识、经验和水平有限，书中难免出现不当之处，敬请广大读者批评指正，并给予谅解。电子邮箱：YWZDK@163.COM。作者博客：http://ywzdk.blog.163.com，本书在机械工业出版社的网址是：http://www.cmpbook.com/stackroom.php？id=40719

作者

缩略语及变量符号

AC：交流

ACR：自动电流调节器

ANN：人工神经元网络

ASR：自动速度调节器

BLDCM：无刷直流电动机

CDTC：传统直接转矩控制

CHBPWM：电流滞环脉冲宽度调制

DC：直流

DSP：数字信号处理器

DTC：直接转矩控制

FC：模糊控制

FOC：磁场定向控制

GTO：门极关断晶闸管

IDTC：改进型直接转矩控制

IGBT：绝缘栅双极型晶体管

IPM：内嵌式永磁电动机

MOSFET：金属氧化物半导体场效应晶体管

MTPA：最大转矩/电流

PI：比例积分

PMSM：永磁同步电动机

PWM：脉冲宽度调制

SPWM：正弦脉冲宽度调制

SVPWM：空间矢量脉冲宽度调制

VSI：电压型逆变器

VVVF：变压变频

i_1：定子电流矢量

i_d：定子电流 d 轴分量

i_q：定子电流 q 轴分量

i_{1m}：定子电流矢量幅值

I_{lim}：电流最大值

L_m：定子绕组互感最大值

L_s：定子绕组自感最大值

L_d：定子绕组 d 轴电感

L_q：定子绕组 q 轴电感

n_p：电机极对数

R_1：定子一相电阻

ρ：电机的凸极率

T_e：电机电磁转矩

T_l：电机的负载转矩

U_d：直流电压

U_{lim}：电压最大值

u_1：定子电压矢量

u_{1m}：定子电压矢量幅值

u_d：定子电压 d 轴分量

u_q：定子电压 q 轴分量

ψ_f：转子永磁体匝链到定子绕组的磁链

ψ_d：定子磁链 d 轴分量

ψ_q：定子磁链 q 轴分量

θ：转子电角位置

θ_m：转子机械角位置

ω：转子电角速度

R_{rion}：电机铁耗电阻

目　录

前言

缩略语及变量符号

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　电动机类型 …… 1

1.2　电动机应用概述 …… 3

1.3　电动机控制策略 …… 3

1.4　电动机调速系统的构成及其研究方法 …… 7

小结 …… 9

练习题 …… 9

第 2 章　PMSM 结构与基本工作原理 … 10

2.1　PMSM 结构 …… 10

2.1.1　定子 …… 10

2.1.2　转子 …… 11

2.2　旋转变压器 …… 13

2.2.1　工作原理 …… 15

2.2.2　解码电路 …… 16

2.3　PMSM 加工流程 …… 18

2.4　PMSM 基本工作原理 …… 18

2.4.1　定子绕组与永磁转子的作用力 …… 18

2.4.2　定子绕组与凸极转子的作用力 …… 19

2.4.3　电动机的基本控制模式 …… 20

小结 …… 20

练习题 …… 20

第 3 章　PMSM 动态数学模型 …… 21

3.1　PMSM 的物理模型 …… 21

3.2　三相静止坐标系的 PMSM 动态数学模型 …… 22

3.2.1　定子电压方程 …… 22

3.2.2　定子磁链方程 …… 23

3.2.3　电动机转矩方程 …… 27

3.2.4　运动方程 …… 29

3.2.5　基于 MATLAB 的转矩公式分析 …… 29

3.3　坐标变换 …… 31

3.4　dq 转子坐标系的 PMSM 动态数学模型 …… 33

3.4.1　dq 坐标系 PMSM 动态数学模型推导 …… 33

3.4.2　基于 MATLAB 的 PMSM 数学模型化简 …… 34

3.4.3　PMSM 等效电路图 …… 36

3.5　电动机矢量图 …… 37

小结 …… 39

练习题 …… 39

第 4 章　PMSM 的 MATLAB 仿真建模 …… 40

4.1　MATLAB/SIMULINK 简介 …… 40

4.2　基于分立模块的 PMSM 仿真建模 …… 43

4.3　基于 S-Function 的 PMSM 仿真建模 …… 52

4.4　基于 SimPowerSystems 的 PMSM 仿真建模 …… 55

4.5　仿真对比分析 …… 60

4.5.1　正弦电压供电 PMSM 直接起动的仿真波形对比 …… 60

4.5.2　不同仿真模型仿真效率比较 …… 63

4.5.3　不同变换矩阵系数的影响 …… 64

小结 …… 68

练习题 …… 68

第 5 章　PMSM 的 JMAG 有限元分析模型 …… 69

5.1　JMAG 的功能与特点 …… 69

5.2　有限元分析的主要步骤与分析功能简介 …… 73

小结 …… 80

练习题 …… 81

第 6 章　PMSM 稳态工作特性 …… 82

6.1　电流极限圆 …… 82

6.2　电压特性 …… 82

6.2.1　电压极限椭圆 …… 82

6.2.2　电压控制下的电动机电流 …… 84

6.3　转矩特性 …… 85
6.3.1　转矩与电流幅值及相角的关系 …… 85
6.3.2　转矩与 i_d 和 i_q 的关系 …… 90
6.3.3　恒转矩曲线 …… 91
6.3.4　最大转矩/电流曲线 …… 91
6.3.5　电压限制下的电动机转矩 …… 93
6.4　机械特性 …… 97
6.5　功率因数 …… 99
6.6　电动机参数变化对电动机的影响 …… 101
小结 …… 103
练习题 …… 104
第 7 章　理想正弦交流电压源供电环境下 PMSM 的工作特性 …… 105
7.1　恒定电压、恒定频率的正弦交流电压源供电环境下 PMSM 的工作特性 …… 105
7.1.1　PMSM 稳态工作特性分析 …… 105
7.1.2　PMSM 起动过程分析 …… 108
7.1.3　PMSM 运行稳定性分析 …… 112
7.2　额定频率以下变频正弦交流电源供电环境下 PMSM 的工作特性 …… 126
7.2.1　恒定频率下的 PMSM 工作特性 …… 127
7.2.2　不同频率下的 PMSM 工作特性 …… 137
7.3　额定频率以上变频正弦交流电源供电环境下 PMSM 的工作特性 …… 138
小结 …… 140
练习题 …… 140
第 8 章　三相电压型逆变器的构成与工作原理 …… 141
8.1　三相电压型逆变器的构成 …… 141
8.1.1　功率二极管 …… 143
8.1.2　绝缘栅双极型晶体管 …… 148
8.1.3　金属氧化物半导体场效应晶体管 …… 152
8.1.4　功率母排 …… 155
8.1.5　吸收电路 …… 156
8.1.6　电容器 …… 157
8.1.7　电压电流检测电路 …… 162
8.1.8　典型驱动模块 …… 165
8.2　三相电压型逆变器工作方式 …… 168
8.2.1　能量传递的三种方式 …… 169
8.2.2　三相电压型逆变器的两种导通模式 …… 169
8.2.3　输出相电压特点 …… 169
8.3　三相电压型逆变器 MATLAB 仿真建模 …… 170
8.3.1　基于 SIMULINK 分立模块的逆变器建模 …… 171
8.3.2　基于 SimPower Systems 库的逆变器模型 …… 172
8.3.3　基于 Simscape 库的逆变器物理建模 …… 174
小结 …… 176
练习题 …… 177
第 9 章　电压型逆变器控制技术 …… 178
9.1　方波运行模式及仿真建模 …… 178
9.1.1　方波运行模式 …… 178
9.1.2　方波运行模式的电压型逆变器仿真建模 …… 180
9.2　SPWM 技术及仿真建模 …… 182
9.2.1　SPWM 技术原理分析 …… 182
9.2.2　载波比与调制比 …… 182
9.2.3　输出电压基波幅值特点 …… 183
9.2.4　仿真建模 …… 184
9.3　SVPWM 技术及仿真建模 …… 189
9.3.1　两电平电压型逆变器电压空间矢量 …… 189
9.3.2　SVPWM 线性组合算法 …… 190
9.3.3　SVPWM 几何特征 …… 192
9.3.4　SVPWM 技术特点 …… 192
9.3.5　SVPWM 算法的仿真建模 …… 194
9.4　CHBPWM 技术及仿真建模 …… 207
9.4.1　CHBPWM 技术原理 …… 207
9.4.2　CHBPWM 技术特点 …… 208
9.4.3　CHBPWM 仿真建模分析 …… 209
小结 …… 214
练习题 …… 214
第 10 章　电压型逆变器供电变压变频调速系统的特殊问题 …… 215
10.1　主电路结构 …… 215

10.2 整流电路 …… 215
10.2.1 PWM 整流器结构 …… 216
10.2.2 电压型 PWM 整流器工作原理 …… 216
10.2.3 VSR 的控制方式 …… 218
10.3 VSI 输入侧滤波器 …… 219
10.4 VSI 输入侧电流谐波 …… 220
10.4.1 VSI 直流输入侧电流谐波的来源 …… 220
10.4.2 *LC* 滤波器对输入侧谐波电流的抑制作用 …… 222
10.4.3 方波工况下输入侧电流的仿真分析 …… 224
10.5 VSI 输出滤波 …… 225
10.6 EMI 滤波器 …… 228
10.6.1 EMC 与 EMI 简介 …… 228
10.6.2 VSI 逆变器中的 EMI …… 235
10.7 VSI 的输出限制 …… 238
10.8 VSI 的工作效率 …… 239
小结 …… 239
练习题 …… 240
第 11 章 电机控制用数字微控制器 …… 241
11.1 概述 …… 241
11.2 TMS320F24x …… 243
11.2.1 TMS320F24x 性能特点 …… 243
11.2.2 SVPWM 算法实现 …… 245
11.3 TMS320F2812 …… 254
11.3.1 性能特点 …… 254
11.3.2 基于 SIMULINK 的 DSP 中 SVPWM 程序开发 …… 257
11.4 其他几种典型的 DSP 芯片 …… 261
小结 …… 266
练习题 …… 266
第 12 章 PMSM 的矢量控制变频调速系统 …… 267
12.1 PMSM 转子磁场定向矢量控制技术概念 …… 267
12.2 典型的转子磁场定向 FOC 控制 PMSM 变频调速系统 …… 268
12.2.1 dq 坐标系电流闭环 PI 调节的 FOC 控制系统 …… 268
12.2.2 三相静止坐标系定子电流滞环控制 FOC 控制系统 …… 274
12.2.3 转矩控制的 FOC 控制系统 …… 274
12.2.4 电压解耦型 FOC 控制系统 …… 276
12.2.5 含逆变器直流电压闭环的 FOC 控制系统 …… 277
12.3 PMSM 矢量控制变频调速系统建模与仿真分析 …… 278
12.3.1 FOC 控制变频调速系统仿真建模 …… 278
12.3.2 FOC 控制变频调速系统仿真结果与分析 …… 285
小结 …… 292
练习题 …… 293
第 13 章 PMSM 的直接转矩控制变频调速系统 …… 294
13.1 直接转矩控制技术原理 …… 294
13.1.1 定子磁链控制原理 …… 295
13.1.2 电动机转矩控制原理 …… 299
13.1.3 PMSM 转矩增量分析 …… 299
13.1.4 两种磁链轨迹控制方案 …… 301
13.1.5 定子磁链观测器 …… 303
13.2 传统直接转矩控制中 PMSM 转矩脉动分析 …… 303
13.3 PMSM 直接转矩控制变频调速系统性能改善方案 …… 306
13.3.1 基于扩充电压矢量表的改进方案 …… 306
13.3.2 基于调节电压空间矢量占空比的改进方案 …… 307
13.4 PMSM 直接转矩控制变频调速系统仿真建模与分析 …… 311
13.5 DTC 与 FOC 的对比 …… 321
小结 …… 322
练习题 …… 323
第 14 章 PMSM 变频调速系统应用实例 …… 324
14.1 PMSM 在国内电动汽车中的应用 …… 325
14.1.1 国内的燃料电池电动汽车 …… 325
14.1.2 PMSM 电动机及控制器性能指标 …… 326
14.1.3 电动汽车控制系统实例分析 …… 328

14.2　PMSM 变频调速系统在城市轨道交通中的应用 …… 339
14.2.1　列车概况 …… 339
14.2.2　牵引电气系统 …… 341
小结 …… 342
练习题 …… 343
第 15 章　PMSM 无位置传感器控制技术 …… 344
15.1　电动机模型直接计算法 …… 344
15.2　模型参考自适应法 …… 346
15.3　扩展卡尔曼滤波器 …… 354
15.4　无位置传感器控制芯片 IRMCK20X …… 359
小结 …… 360
练习题 …… 361
第 16 章　智能控制技术在 PMSM 变频调速系统中的应用 …… 362
16.1　模糊控制技术 …… 363
16.2　神经网络控制技术 …… 372
16.3　专家系统控制技术 …… 375
小结 …… 377
练习题 …… 377
附录 …… 378
附录 A：两相静止坐标系中 PMSM 数学模型 …… 378
附录 B：SIMULINK 分立模块搭建出 PMSM 仿真模型 …… 378
附录 C：S-Function 实现 PMSM 仿真建模的程序 …… 380
附录 D：采用类似 SPWM 方式实现 SVPWM 的仿真模型 …… 383
附录 E：命令文件 …… 385
附录 F：中断向量文件 …… 386
附录 G：硬件法实现 SVPWM 算法的程序代码 …… 389
附录 H：基于 MATLAB/SIMULINK 的 DSP 程序开发 …… 398
附录 I：SIMULINK 模块使用注意事项与常见问题调试 …… 412
附录 J：国内外电动机调速系统相关标准的标准号及名称 …… 418
参考文献 …… 423

第1章　绪　　论

本章对电动机的类型、应用特点、控制策略进行简要介绍，并对电动机变频调速系统常用的研究方法进行简介。

1.1　电动机类型

电动机是一个集电、磁、机械、力、热等能量于一体的复杂物理实体，电动机的研究是一个多物理域内的研究工作。本书从控制与应用的角度入手，主要对电动机的变频调速相关内容进行阐述。

从组成材料上来说，电动机包含导磁材料（如构成磁路的硅钢片）、导电材料（主要是铜、铝等材料）、绝缘材料（如直流电动机换向片之间的云母、漆包线的外层漆、线圈与铁心之间放置的环氧）等。

从运动形式上来说，有静止式的电动机——变压器，还有运动式的电动机，后者又可以分为旋转运动与直线运动的电动机。

从结构上来说，电动机包含有定子与转子两大部分。有的电动机定子在外侧，转子在内侧；而有的电动机则正相反。有的电动机定、转子只有一套，而有的电动机定子或者转子则有两套。

电动机种类繁多，分类方法也是多种多样。大部分情况下可以按照电动机工作时所需的是直流电还是交流电分为直流电动机与交流电动机，如图 1-1 所示。

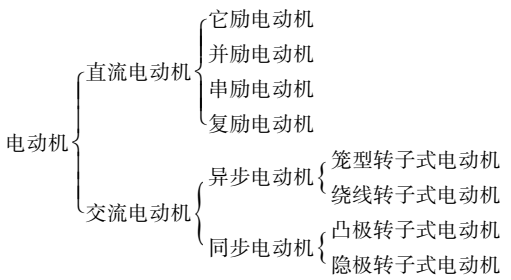


图 1-1　电动机分类图

直流电动机根据励磁绕组与电枢绕组连接方式的不同可分为：他励直流电动机、并励直流电动机、串励直流电动机以及采用两套励磁绕组的复励直流电动机。电动机的励磁源可以是电励磁，也可以是永磁体励磁，近年来出现了两者的混合励磁。

交流电动机大体上可以分为交流异步电动机与交流同步电动机。前者负载运行时，电动机转子速度与定子绕组产生的旋转磁场的速度不相等，又称为感应电动机，有笼型转子式交流异步电动机与绕线转子式交流异步电动机之分。两者的不同之处在于转子的结构，后者通过改变转子回路参数可以获得较好的起动与调速特性。交流同步电动机稳定运行时，转子速度始终与气隙旋转磁场速度保持同步。交流同步电动机按转子结构的不同可分为凸极式与隐极式电动机，按照励磁方式的不同则可以分为电励磁、永磁式同步电动机和近年来出现的混合励磁型同步电动机。

随着现代电子技术的发展出现了一些结构与传统电动机结构大不相同的新型电动机，如步进电动机（Stepper Motor）、开关磁阻电动机（Switched Reluctance Motor，SRM）等。这些

电动机在工作时必须配以相应的电子装置从而构成电子式的电动机，例如配备有位置传感器以及电子换向器的无刷直流电动机（Brushless Direct Current Motor，BLDCM）。从内部运行规律来说，BLDCM 属于交流同步电动机。

永磁同步电动机（Permanent Magnet Synchronous Motor，PMSM）出现于 20 世纪 50 年代。永磁同步电动机的运行原理与普通电励磁同步电动机相同，但它以永磁体励磁替代励磁绕组励磁，使电动机结构更为简单，降低了加工和装配费用，同时还省去容易出现问题的集电环和电刷，提高了电动机运行的可靠性。由于无需励磁电流，没有励磁损耗，提高了电动机的工作效率。早期的研究主要是围绕固定频率供电的永磁同步电动机，特别是稳态特性和直接起动性能的研究。在工频电源供电条件下，永磁同步电动机无自起动能力，一般通过在转子上安装阻尼绕组，依靠其产生的异步转矩，将电动机起动并加速到接近同步转速，然后由永磁体产生的磁阻转矩和同步转矩将 PMSM 牵入同步。随着电力电子技术和微型计算机的发展，20 世纪 70 年代，永磁同步电动机开始应用于交流变频调速系统。逆变器供电的永磁同步电动机与直接起动的电动机基本相同，但一般不加阻尼绕组。PMSM 的典型结构如图 1-2 所示，主要部件是定子铁心、定子线圈、永磁体、转子铁心和轴等。

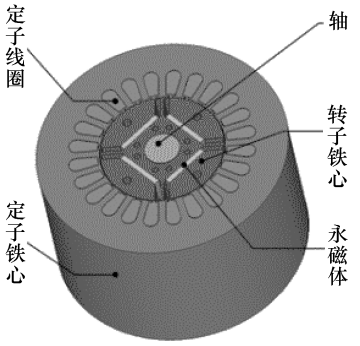


图 1-2　永磁同步电动机结构示意图

依靠连续的转子位置信息，控制好定子绕组的正弦波电流，PMSM 理论上可获得平稳转矩。随着永磁材料性能的不断提高和完善，以及电力电子器件的进一步发展和改进，加上永磁电动机研究和开发经验的逐步成熟，目前永磁同步电动机正向大功率（超高速、大转矩）、高性能化、微型化和智能化方向发展。

表 1-1 给出了不同类型电动机的特点。

表 1-1　不同类型电动机的特点比较

比较项目 \ 电动机类型		直流电动机	异步电动机	开关磁阻电动机	永磁电动机	
					无刷直流电动机	永磁同步电动机
起动性能		○	○	○	○	◎
额定运行点峰值效率		△	○	○	◎	◎
恒功率速度范围	理想	无穷	无穷	2～3	1～2	无穷
	典型	1.5～3	2～3			3～4
	最优	4	4			>7.5
高效率运行区（>85%）占整个运行区 50% 以上		×	○	○	○	◎
重量功率密度（kW/kg）		×	○	○	◎	◎
转矩波动	低速	○	○	△	○	◎
	高速	○	◎	△	○	◎
电动机可靠性		×	◎	◎	○	○
NVH（振动噪声舒适性）		△	◎	△	○	◎

1.2　电动机应用概述

不同类型电动机的运行特性不同，因而它们分别适用于不同的应用场合。

在 20 世纪 70 年代以前，由于交流电动机调速系统复杂，调速性能又无法与直流电动机调速系统相比，因而一直存在这样的格局：直流电动机在电气牵引、生产加工等调速领域内占据霸主地位；交流电动机通常用于基本上无需调速的场合中，例如各种风机、水力发电等。但是交流电动机自身优点众多：结构简单，重量轻，体积小，基本无需维护，单机的速度与功率都可以做得很大，所以当交流电动机现代控制理论、电力电子技术、微型处理器及微型控制器技术发展起来后，从 20 世纪后期开始便出现了电气传动交流化的浪潮。目前交流电气传动已经占有统治地位。

以电动客车为例，它对调速性能有较高的要求。早期的电动客车采用直流传动系统。当交流电动机矢量控制系统发展起来后，采用磁场定向矢量控制技术的交流异步电动机调速系统具有了良好的调速性能，加上电动机本身的优点，因而迅速在电动客车上取得了应用。而目前永磁同步电动机有更高的效率、更大的功率体积比，所以采用高性能控制技术的永磁同步电动机在电动客车上的应用成为了近年来的研究热点之一。

图 1-3 给出了某台 PMSM 及逆变器系统的效率 MAP 图，可以看出，在较大的区域内，电动机传动系统都可以保持较高的工作效率。

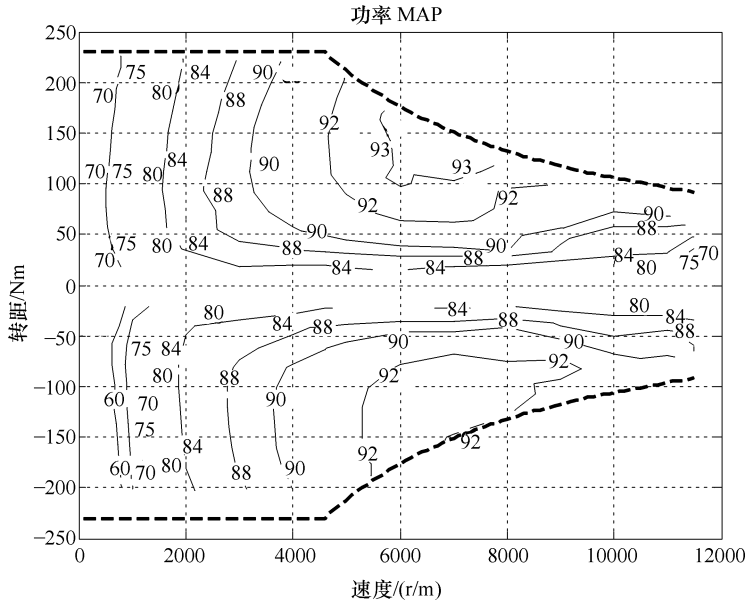


图 1-3　PMSM 效率 MAP 图

1.3　电动机控制策略

直流电动机的控制方法较简单且成熟，其中调节电枢回路电阻最为简单，但是它属于有

级调速，并且耗能较多。后来发展到调节电枢电压调速，电动机的调速性能好，属无级调速，但是需要较为复杂与昂贵的调压装置，其中可以采用的调压装置有旋转变流机组、晶闸管相控整流系统、直流 PWM 斩波系统等；当电动机运行在额定电压且需要进一步提高速度就需要采用削弱主磁场的方式进行弱磁调速。

交流异步电动机的调速方法众多，大体上可以根据转差功率的不同分为转差功率消耗型、转差功率回馈型和转差功率不变型三类。早期通常采用第一类方法，例如调节定子电压调速（利用调压装置或者Y/△调速）、调节定子回路或者转子回路电阻、电感等参数调速等。这种方法中电动机的输出功率是通过调节转差功率来实现的，效率较低，现在大部分场合都不采用了。但是在调速要求较低的场合有时会采用晶闸管实现调压（或调功）调速，可以避免起动时产生较大的电流冲击，相应的产品称为电子式软起动器；同时根据机械负载的不同进行简单的电压调节，可以起到提高运行效率的作用。转差功率回馈型交流调速系统主要是串级调速，通过将部分转差功率进行反馈，回送到电网从而可以提高系统效率。而转差功率不变型调速系统主要是变极调速（有级）与变频调速（无级），此时转差功率基本不变，随着输出功率的变化，系统从电网吸收的有功功率也随之变化，始终保持较高的运行效率，并且调速性能也最好。

交流同步电动机稳态运行时不存在转差，因而只能通过改变主磁场的运行速度来进行调速——改变电动机磁极数目（有级）或者改变定子频率（无级变频调速）。

交流电动机变频调速已经广泛应用于各种场合，本书中永磁同步电动机速度的控制就是围绕变频调速展开的。

电动机运行的基本问题（电与磁之间的相互作用）在电动机的控制过程中必须得到很好的处理。由于铁磁性导磁材料存在磁饱和现象，所以希望电动机的磁路工作点处于轻度饱和状态，以便充分利用导磁材料。这样在较大磁场的基础上，相同的电流流过导体就可以有更大的作用力产生。这种控制方法是通过定子电压（U）与定子频率（f）之比（即压频比、伏赫比）保持恒定来实现的，如图 1-4 所示，在较低频率范围内，随着定子频率的增加，定子电压随之成比例上升。

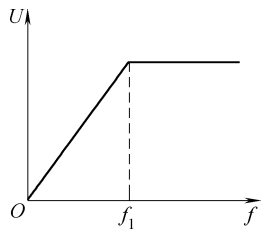


图 1-4　交流电动机变频调速电压与频率关系

而当定子频率上升到一定程度（如图 1-4 中 f_1）时，定子电压由于绝缘或者受到供电电源的限制不能继续上升，那么压频比就不能保持恒定了。在定子电压恒定的情况下，定子频率继续上升，磁场逐渐减小，电动机的转速仍可以进一步增加——这就是弱磁升速（与直流电动机相类似）。

进行变频调速的交流电气调速系统可以采用开环控制也可以采用闭环控制。同步电动机在开环控制状态下较易产生失步，从而导致系统的不稳定。这一点可以在后面第 7 章中正弦波供电永磁同步电动机起动过程的仿真中得到验证。为提高系统的稳定性，同步电动机通常采用图 1-5 的自控式变频控制技术——利用转子位置传感器获取转子位置信号，经过运算得到电动机转子的电角位置以及电角速度，然后根据运行指令的要求（电动机转矩、磁链、电流等），由控制系统通过主电路对电动机的位置、速度和电流等实施闭环控制。

从运行特性上来说，PMSM 与传统电励磁同步电动机没有太多区别，只不过传统电励磁同步电动机可以通过励磁电流的调节使电动机工作在过励磁与欠励磁的状态，从而可以改变

电动机与外界的无功功率交换，用以调节功率因数，同时可以进行弱磁升速的控制；而永磁同步电动机气隙磁场的调节只能通过定子电流中通入额外的去磁电流以抵消转子永磁体在气隙中产生的磁场从而进行弱磁升速。

早期的PMSM主要是表面贴装式结构，见图1-6a。这样，由于永磁体的磁导率与空气相差不大，所以电动机d、q轴磁路是对称的（有$L_d = L_q$），此时电动机相当于传统电励磁同步电动机中的隐极同步电动机。控制中根据转子位置确定定子电流矢量的相位（电流超前转子90°电角度），定子电流幅值i_{1m}根据转矩命令的大小确定，见下式：

$$i_{1m} = T_e / (1.5 n_p \psi_f)$$

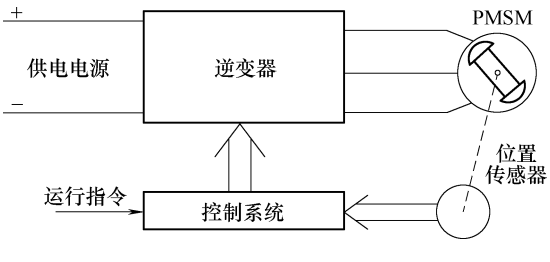


图1-5 永磁同步电动机自控式变频调速系统框图

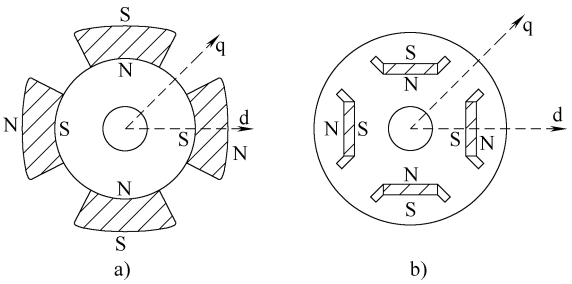


图1-6 表面式与内置式PMSM转子结构

研究发现，如果转子永磁体采用内置式的结构，那么磁路将呈现出不对称，如图1-6b所示，从而等效于传统电励磁同步电动机中的凸极同步电动机。不过此时有$L_d < L_q$，这与传统电励磁同步电动机刚好相反。在电动机控制过程中，如果通入沿d轴的负向励磁电流（即弱磁电流）时，一方面可以进行弱磁升速，另一方面又可以增加一个磁阻转矩分量，提高功率密度。随着弱磁控制技术研究的不断深入，该类型电动机在电动汽车等需要大功率输出的场合中得到了越来越广泛的应用。另外，近年来又出现磁体分段式转子结构，不同部分的转子呈现出不同的特性，以便使电动机的整体性能得到进一步提升。

BLDCM在运行特性上与传统同步电动机有较大区别。从发展历程上来说，在BLDCM出现之前首先出现的是无换向器电动机，可以说它是BLDCM的雏形。无换向器电动机转子励磁产生的依然是正弦分布的磁场，见图1-8a，而定子绕组采用电流源逆变器供电，通过循环切换逆变器主开关向定子绕组中通以正负半周各自导通120°电角度、三相互差120°的直流电流如图1-7b所示。这种情况下，电动机可以产生有效的平均转矩；但是由于反电动势为正弦波如图1-7a所示，而定子电流为直流，所以存在着较大的转矩脉动，如图1-7f中三相的合成转矩。

各种围绕减小转矩脉动的研究展开之后，出现了气隙磁场为梯形波（类似于直流电动机的主磁场）的同步电动机——BLDCM，如图1-8b所示的梯形波气隙磁场可以通过优化永磁体形状产生。

从理论上说，传统三相同步电动机转子产生的气隙主磁场是正弦波，定子电枢绕组中通入的是三相正弦电流，从而电动机可以产生恒定的电磁转矩，图1-9a～1.9e分别是PMSM电动机的A相反电动势与A相电流、A相电磁转矩、B相电磁转矩、C相电磁转矩以及总电磁转矩。如果电动机旋转时电枢绕组切割的主磁场是恒定的，并且电枢绕组通入的又是恒定

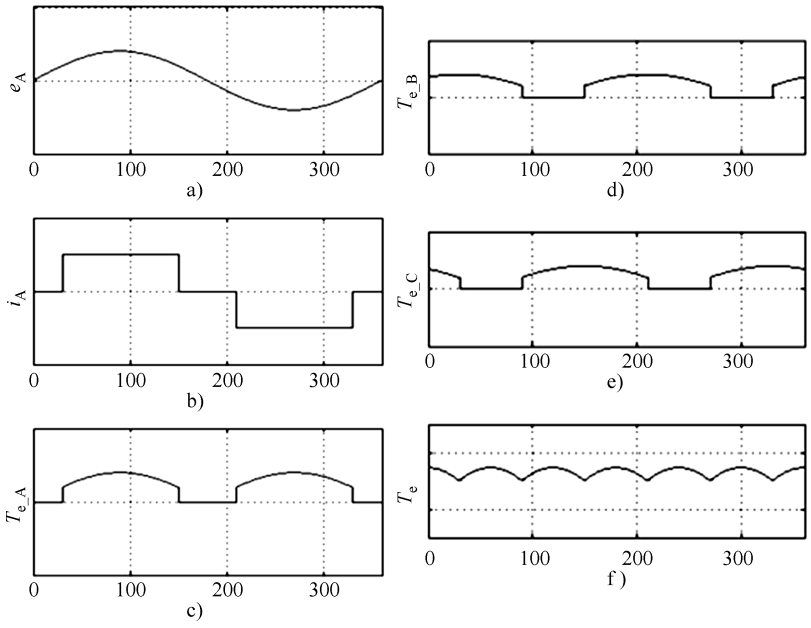


图 1-7　无换向器电动机的电压、电流、转矩波形示意图

的直流电流，那么电动机也可以产生恒定的电磁转矩，图 1-9f ~ 1. 9j 分别是 BLDCM 电动机 A 相反电动势与 A 相电流、A 相电磁转矩、B 相电磁转矩、C 相电磁转矩以及总电磁转矩，图 1-9 的横坐标都是转子电角度。

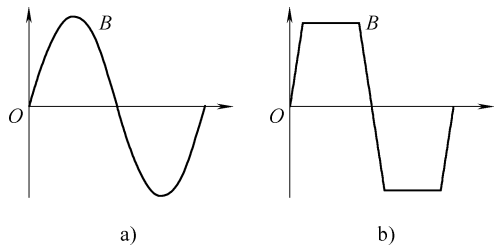


图 1-8　正弦波气隙磁场与方波气隙磁场波形示意图

直流电动机的电气调速系统大体上有三种：转速开环调速系统、转速单闭环调速系统和转速、电流双闭环调速系统，见表 1-2。为了使交流电气调速系统具有类似他励直流电动机转速与电流双闭环系统的良好调速性能，那就不得不研究高性能的控制技术——磁场定向矢量控制技术(Field Orientation Vector Control，FOC)和直接转矩控制技术(Direct Torque Control，DTC)。

交流电动机的控制性能在 FOC 控制技术问世以后才得到了质的飞跃。FOC 控制提倡的是励磁电流与转矩电流的解耦控制，从而使磁场控制与转矩控制得到兼顾，克服了交流电动机自身耦合的不足。直接转矩控制技术也是基于磁场与转矩分别独立控制的思想，但采用的是比较巧妙的技术——具有继电器特性的砰砰控制和电压矢量查询表。

交流电动机是一个非线性、强耦合、高阶、多变量的复杂对象，实际运行工况非常复杂，诸多电动机参数都会发生着一定程度的变化（受到温度的影响，电阻会发生变化；受到磁场饱和的影响，定子、转子电感会发生变化；如果使用永磁体励磁，那么温度也会影响磁钢的特性与励磁的强弱），从而影响着交流电动机的实际控制性能。随着自动控制技术的发展，参数辨识技术、自适应控制技术、基于神经网络和模糊控制等先进的控制算法逐步融入到电动机控制技术中，以提高调速系统的快速性、稳定性和鲁棒性。