

# 高磁场 永磁式电动机 及其驱动系统

符 曦 编著

机械工业出版社

711.251  
F 87

# 高磁场永磁式电动机 及其驱动系统

符 曦 编著



机械工业出版社

本书在介绍高磁场永磁式电动机的高磁场永磁材料、转子结构和等效电路分析的基础上，侧重阐述不同类型的高磁场永磁式同步电动机和直流电动机驱动系统，包括开环调速驱动系统、闭环调速驱动系统、交流伺服驱动系统、无刷直流电动机驱动系统和最优控制驱动系统等，突出不同类型驱动系统的控制思想新颖性以及应用技术的可行性和指导性。

本书可作为高等院校电机类和自动化类专业的师生选读教材或参考用书，也可供从事自动化学科领域工作的科技人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

高磁场永磁式电动机及其驱动系统/符曦编著. —北京:机械工业出版社, 1997. 5

ISBN 7-111-05641-8

I. 高… II. 符… III. 永磁式电机-驱动机构  
N. TM351.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 09425 号

出版人: 马九荣 (北京市百万庄南街 1 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 孙流芳 王冠宇 版式设计: 霍永明 责任校对: 张 力

封面设计: 姚 毅 责任印制: 王国光

三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1997 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

850mm×1168mm<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·7.25 印张·185 千字

0 001—4 000 册

定价: 15.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

## 前 言

高磁场永磁式电动机具有体积小、重量轻、惯性低、响应快、高转矩/惯量比和高速率/重量比、高效率和高起动转矩、高功率因数，以及省电和运行可靠等明显特点。所以，自80年代开始，各国学者和研究人员都纷纷致力于高磁场永磁材料、永磁式电动机及其驱动系统的理论和应用研究，取得了卓有成效的研究和开发成果。目前，包括微特电机、中小型电动机和大型发电机在内的各类电机都可以采用高磁场永磁式转子电机。例如，它可适用于汽车、仪表、钟表、计算机外围设备、航空设备、音响设备、视频设备的各种步进电机、同步电机、伺服电机、力矩电机、音圈电机、空心杯电机、宽调速励磁电机以及用以取代异步电动机的线起动永磁式同步电动机和由变频器供电的永磁式同步电动机等。近年来，特别是“八五”期间，我国不少专业研究单位和工矿企业在调整产品结构、提高产品质量、加速技术开发和全面实现产品国产化的主导思想基础上，大力开展了高磁场永磁式电动机及其驱动系统的实用性的应用研究，取得了相应的开发性成果。然而，就整体研究水平和有关技术难点方面的突破性的研究，我国目前还仅处于起步的“方兴未艾”阶段，有待于进一步的认识、深化和发展。

本书的主要内容包括两个方面：一是比较全面地介绍了普通同步电动机的基本结构、工作原理和运行特性以及高磁场永磁式同步电动机和直流电动机的高磁场永磁材料、转子结构和等效电路分析，目的是突出高磁场永磁式同步电动机和直流电动机结构的特殊性以及运行的高效性和可靠性；二是侧重介绍了不同类型的高磁场永磁式同步电动机和直流电动机驱动系统，包括开环调速驱动系统、闭环调速驱动系统、交流伺服驱动系统、无刷直流

电动机驱动系统和最优控制驱动系统等，目的是突出不同类型驱动系统控制思想的新颖性以及应用技术的可行性和指导性。

本书作者受英国著名学者、电机驱动及控制专家、英国利物浦大学 K. J. Binns 教授邀请，经国家教委技术培训交流处派遣，作为高级访问学者、客座研究员到英国利物浦大学电气工程及电子学系 (Department of Electrical Engineering and Electronics, The University of Liverpool) 就有关技术专题进行合作研究和学术交流活动，参与了“高磁场永磁式同步电动机闭环调速驱动系统”课题研究工作，取得了阶段性的研究成果，为本书的编写积累了丰富的素材和资料。在此，特向指导和参加课题研究工作以及提供有关技术资料的 K. J. Binns 教授、D. W. Shimmin 先生和 K. M. Al-Aubidy 先生深表谢意。

本书由华南理工大学电子与信息学院自动控制系博士生导师毛宗源教授主审，在审阅中提出了许多宝贵意见，特此表示感谢。另外，在本书的选题、编写、审稿、评价和出版过程中，《电气自动化新技术丛书》编辑委员会喻士林教授级高级工程师、广东工业大学冯焱生教授、黄慧民教授以及广东工业大学电气工程及自动化系老师和研究生等给予了许多支持和帮助，在此一并致以衷心的感谢。

本书可作为高等院校电机类和自动化类专业的高年级学生、研究生和教师的选读教材或参考用书，也可供从事自动化学科领域工作的科研人员和技术人员参考。

由于水平所限，书中缺点或谬误和欠妥之处在所难免，诚恳地希望广大读者批评指正。

作者

1996年10月

# 主要符号表

## 一 参数和物理量符号

$B$	磁感应强度	$f_s$	定子频率
$B_f$	粘滞摩擦系数	$f_{sw}$	开关频率
$Br$	剩磁(剩余磁感应强度)	$f^*$	指令频率
$B H_c$	磁感应矫顽力	$F$	磁拉力
$(BH)_{max}$	最大磁能积	$F_a$	旋转电枢磁动势
$C$	电容;电动机每极每相导体数	$F_{ad}$	电枢磁动势直轴(d轴)分量
$D$	永磁材料密度	$F_{aq}$	电枢磁动势交轴(q轴)分量
$D_2$	电动机转子直径	$F_f$	励磁磁动势
$e(t)$	电动机相绕组感应电动势 (瞬时值)	$F_r$	磁拉力径向分量
$e_a(t)$	a相绕组感应电动势(瞬时值)	$F_t$	磁拉力切向分量
$e_b(t)$	b相绕组感应电动势(瞬时值)	$GD^2$	飞轮力矩
$e_c(t)$	c相绕组感应电动势(瞬时值)	$H$	磁场强度
$E_a$	电枢反应电动势	$H_c$	矫顽力
$E_{ad}$	直轴(d轴)电枢反应电动势	$i$	电动机定子电流(瞬时值)
$E_{aq}$	交轴(q轴)电枢反应电动势	$i_a$	a相定子电流(瞬时值)
$E_0$	励磁电动势(空载电动势); 反电动势	$i_b$	b相定子电流(瞬时值)
$E_m$	电动机相电动势幅值	$i_c$	c相定子电流(瞬时值)
$E_\sigma$	漏电动势	$i_d$	直轴(d轴)定子电流 (瞬时值)
$f$	频率	$i_q$	交轴(q轴)定子电流 (瞬时值)
$f_i$	输入频率	$i_{dc}$	逆变器直流环节电流
$f_N$	额定频率	$I$	电枢电流
$f_0$	输出频率;基准频率	$I_a$	电动机定子电流(有效值)

$I_d$	直轴(d轴)定子电流 (有效值); 电枢电流直轴(d轴)分量	$M$	平均互感
$I_q$	交轴(q轴)定子电流 (有效值); 电枢电流交轴(q轴)分量	$mH_c$	内禀矫顽力
$I_p$	有功(p轴)定子电流 (有效值)	$M_i$	输入系数
$I_r$	无功(r轴)定子电流(有效值)	$n$	电动机转速
$I_f$	励磁电流	$n_t$	实时转速
$I_N$	额定电流	$n_0$	给定转速
$J$	转动惯量	$n_s$	同步转速
$K$	磁阻调制深度	$N$	电动机绕组总有效导体数
$K_1$	比例系数	$N_i$	采样次数
$K_a$	电枢电路增益	$p$	微分算子
$K_b$	转矩脉动系数	$p_h$	比磁滞损耗
$K_c$	比例系数	$p_n$	电动机极对数
$K_e$	电动势常数;电磁常数	$p_{Cu}$	电动机铜耗
$K_i$	PI调节器积分时间常数	$p_{Fe}$	电动机铁耗
$K_p$	PI调节器比例常数	$p_{fw}$	电动机机械损耗
$K_r$	转矩常数	$P_1$	输入功率
$K_{sp}$	逆变器增益	$P_2$	输出功率
$K(f_0)$	反馈增益	$P_g$	电动机每相气隙功率
$L$	电动机有效长度;电感	$P_M$	电磁功率
$L_d$	直轴(d轴)电枢电感	$P'_M$	电磁功率基本分量
$L_q$	交轴(q轴)电枢电感	$P''_M$	电磁功率附加分量
$L_s$	电枢电感	$P_N$	额定功率
$L_{aa}$	a相绕组自感	$R$	电阻
$L_{ab}$	a相绕组与b相绕组互感	$R_a$	a相绕组电阻
$L_{ac}$	a相绕组与c相绕组互感	$R_c$	铁心损耗电阻
$L_{eq}$	等效电感	$R_i$	电动机输入电阻
$m$	电动机相数	$R_s$	定子绕组电阻
		$T$	转矩;周期
		$T_2$	输出转矩
		$T_a$	电路时间常数
		$T_c$	居里温度
		$T_E$	发电机制动转矩

$T_h$	磁滞转矩	$X_q$	交轴(q轴)同步电抗
$T_L$	负载转矩	$X_s$	同步电抗
$T_M$	电磁转矩	$X_{sd}$	直轴(d轴)电枢反应电抗
$T'_M$	电磁转矩基本分量	$X_{sq}$	交轴(q轴)电枢反应电抗
$T''_M$	电磁转矩附加分量	$X_{d0}$	对应基准频率 $f_0$ 的直轴同步电抗
$T_n$	$n$ 次谐波电磁转矩	$X_{q0}$	对应基准频率 $f_0$ 的交轴同步电抗
$T_N$	额定转矩	$X_o$	定子绕组漏电抗
$T_s$	采样时间	$Z$	阻抗
$T_{AV}$	平均转矩	$Z_{aa}$	a相绕组自感阻抗
$T_{sp}$	逆变器时间常数	$Z_{bb}$	b相绕组自感阻抗
$T_{ub}$	异步附加转矩	$Z_{cc}$	c相绕组自感阻抗
$T_{uf}$	异步起动转矩	$Z_{ab}$	a相绕组与b相绕组互感阻抗
$U$	电源电压;电动机定子电压	$Z_{ac}$	a相绕组与c相绕组互感阻抗
$U_a$	电动机定子a相端电压	$Z_{abc}$	a、b、c三相绕组互感阻抗
$U_d$	直轴(d轴)定子电压	$\alpha$	阻尼系数;电角度
$U_q$	交轴(q轴)定子电压	$\alpha(Br)$	剩余磁感应强度温度系数
$U_f$	励磁电压	$\alpha(MHC)$	内禀矫顽力温度系数
$U_N$	额定电压	$\beta$	电流反馈系数
$U_0$	气隙电压	$\gamma$	内功率因数角
$U_s$	电枢电压	$\delta$	负载角
$U_t$	供电电压	$\delta_i$	转矩角
$U_{ds}$	直轴(d轴)电枢电压	$\delta_0$	稳态工作点时负载角
$U_{qs}$	交轴(q轴)电枢电压	$\epsilon$	励磁度;加权系数
$U_{td}$	直轴(d轴)供电电压	$\eta$	效率
$U_{tq}$	交轴(q轴)供电电压	$\theta$	功率角;磁滞角
$U_{BUS}$	直流母线电压	$\theta_m$	转子机械角度
$U_{CES}$	晶体管集电极-发射极电压	$\theta_r$	转子位置角度
$V_h$	磁滞合金体积	$\lambda$	比值
$W$	电动机每相绕组串联匝数	$\mu_{rec}$	回复磁导率
$X$	电抗		
$X_s$	电枢反应电抗		
$X_d$	直轴(d轴)同步电抗		



$\rho_m$	占空比	$\Psi_d$	直轴(d轴)磁链
$\varphi$	功率因数角	$\Psi_q$	交轴(q轴)磁链
$\varphi_i$	电流相位角	$\Psi_f$	励磁磁链
$\varphi_U$	电压相位角	$\omega_e$	电动机角频率;励磁频率
$\Phi$	相角;每极磁通	$\omega_m$	转子机械角速度
$\Phi_a$	电枢磁通	$\omega_o$	电动机稳态点角频率
$\Phi_o$	励磁磁通	$\omega_r$	转子角速度
$\Phi_o$	漏磁通	$\omega_s$	电源频率;电动机同步角速度
$\Phi_{ad}$	直轴(d轴)电枢磁通	$\omega_{m0}$	对应基准频率 $f_o$ 的转子机械角速度
$\Phi_{aq}$	交轴(q轴)电枢磁通		
$\Psi$	磁链		
$\Psi_a$	a相绕组磁链		

## 二 元件与装置符号

ACR	电流调节器	M	电动机
ASR	速度调节器	MOSFET	功率场效应晶体管
AE	编码器	PMSM	永磁式同步电动机
BS	速度检测器	PS	转子位置检测器
C	电容	PWM	脉冲宽度调制
CCI	电流控制逆变器	R	电阻
CPU	中央处理器	RAM	随机存取存储器
DR	驱动电路	SAN	开关辅助网络
DSP	数字信号处理器	SP	速度处理器
EPROM	可擦洗只读存储器	SPWM	正弦脉冲宽度调制
GTO	可关断晶闸管	TSL	晶体管触发电选择
GTR	大功率晶体管		逻辑器
ID	电流检测器	VTH	晶闸管
IGBT	绝缘栅双极性晶体管	A/D	模/数转换器
IPF	电流分时反馈器	D/A	数/模转换器
IPM	智能功率开关模块	f/U	频率/电压变换器
LEM	传感元件	d, q/a, b, c	坐标变换器

注: 书中的黑体字母表示矢量(例如,  $U$ 、 $I$ 、 $E$ 、 $\Phi$ ...); 字母上加点表示相量(例如,  $\dot{U}$ 、 $\dot{I}$ 、 $\dot{E}$ 、 $\dot{\Phi}$ ...).

# 目 录

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
<b>第 2 章 普通同步电动机</b> .....	6
2.1 普通同步电动机的基本结构及工作原理 .....	6
2.2 同步电动机的电动势平衡方程式及相量图 .....	8
2.3 同步电动机的运行特性 .....	11
2.3.1 功角特性 .....	12
2.3.2 V 形曲线 .....	15
2.3.3 转速特性及起动 .....	17
2.4 小功率同步电动机 .....	18
2.4.1 小功率磁阻式同步电动机 .....	18
2.4.2 小功率永磁式同步电动机 .....	24
2.4.3 小功率磁滞式同步电动机 .....	29
<b>第 3 章 高磁场永磁式同步电动机</b> .....	37
3.1 高磁场永磁材料 .....	37
3.1.1 通用高磁性材料的磁性和物理性能 .....	38
3.1.2 钕铁硼磁性材料的基本特性 .....	39
3.1.3 钕铁硼磁性材料行业标准 .....	43
3.2 永磁式同步电动机的转子结构 .....	49
3.3 永磁式同步电动机的等效电路 .....	60
<b>第 4 章 高磁场永磁式同步电动机开环调速驱动系统</b> .....	66
4.1 高磁场永磁式同步电动机开环调速驱动系统 .....	66
4.1.1 系统的组成和特点 .....	66
4.1.2 驱动系统的数学模型 .....	68
4.1.3 驱动系统的稳态运行点 .....	72
4.1.4 驱动系统的稳定性 .....	77
4.2 高磁场永磁式同步电动机变频运行时的参数及性能 .....	83
4.2.1 两轴电机理论 .....	83

4.2.2	电动机参数测定 .....	85
4.2.3	电动机性能及相互关系 .....	89
<b>第5章 高磁场永磁式同步电动机闭环调速驱动系统 .....</b>		<b>98</b>
5.1	自调整永磁式同步电动机闭环调速驱动系统 .....	98
5.1.1	系统的组成和特点 .....	98
5.1.2	电动机转子位置检测 .....	101
5.2	最佳效率永磁式同步电动机闭环调速驱动系统 .....	116
5.2.1	系统的组成和特点 .....	116
5.2.2	系统的稳定性 .....	119
5.2.3	系统性能曲线 .....	123
5.3	永磁式同步电动机高功率因数变频调速驱动系统 .....	128
5.3.1	调速原理 .....	128
5.3.2	调速系统的实现 .....	131
5.3.3	几点结论 .....	133
<b>第6章 高磁场永磁式同步电动机交流伺服驱动系统 .....</b>		<b>134</b>
6.1	高性能永磁式同步电动机交流伺服驱动系统 .....	135
6.1.1	弱磁控制 .....	135
6.1.2	高速电流响应控制 .....	137
6.1.3	交流伺服驱动系统 .....	140
6.2	全数字化永磁式同步电动机交流伺服驱动系统 .....	142
6.2.1	系统的组成和特点 .....	142
6.2.2	系统的数学模型 .....	145
6.2.3	电压矢量的选择 .....	147
6.3	数控机床进给的永磁式同步电动机交流伺服驱动系统 .....	153
6.3.1	系统的组成和特点 .....	153
6.3.2	系统的数学模型 .....	156
6.3.3	系统的工业运行 .....	158
6.4	采用智能功率开关模块 (IPM) 的永磁式交流伺服电动机驱动器 .....	159
6.4.1	智能功率开关模块 (IPM) .....	159
6.4.2	交流伺服电动机功率驱动器 .....	161
<b>第7章 高磁场永磁式无刷直流电动机驱动系统 .....</b>		<b>165</b>
7.1	高磁场永磁式无刷直流方波电动机双闭环调速驱动系统 .....	166

7.1.1	电动势和转矩的分析	166
7.1.2	系统的组成和特点	173
7.1.3	系统性能和特性曲线	175
7.2	钕铁硼永磁式直流无刷电动机驱动系统	177
7.2.1	系统的组成和特点	177
7.2.2	系统性能曲线	179
7.3	一种新颖的无刷电动机控制方法	181
7.3.1	控制原理	181
7.3.2	控制软件	185
7.3.3	试验曲线及结论	187
<b>第8章 高磁场永磁式同步电动机最优控制驱动系统</b>		<b>188</b>
8.1	高磁场永磁式同步电动机最优模型跟踪控制位置驱动系统	188
8.1.1	系统的组成和特点	188
8.1.2	驱动系统的最优模型跟踪控制	190
8.1.3	驱动系统的微机控制	194
8.1.4	试验曲线及结果	194
8.2	高磁场永磁式无刷直流电动机最优控制驱动系统	202
8.2.1	系统的组成和特点	202
8.2.2	驱动系统的综合	205
8.2.3	驱动系统的数字仿真	208
<b>参考文献</b>		<b>216</b>

## 第1章 概 述

由于高磁场永磁式同步电动机 (High Field Permanent-Magnet Synchronous Motor) 具有体积小、惯性低、效率和功率因数高 (功率因数  $\cos\varphi=1$  或接近于 1) 等明显特点, 所以在 70 年代末期和 80 年代初期已引起了从事电机及驱动系统技术的学者和研究人员的注意和重视。英国学者 Merrill 最早提出了称之为“Permasyn”的永磁式交流电机的设计方案, 德国西门子 (Siemens) 公司研制成功了“Buried Magnet”转子。从 1979 年开始, 英国著名学者、利物浦大学 K. J. Binns 教授长期致力于高磁场永磁式同步电动机及其驱动系统的理论研究和技术开发工作, 先后发表了有关高磁场永磁式电动机结构、工作原理、性能分析、参数估算以及驱动系统的稳定性分析和新型的转子位置检测装置等内容多篇高水平的学术论文<sup>[1]~[5][7]~[9][19][20]</sup>, 对进一步推动本研究领域的理论及应用发展有极大的作用和影响。此外, 英国曼彻斯特大学 B. J. Chalmers 教授对高磁场永磁式同步电动机变频运行时参数及性能的分析<sup>[15][16]</sup>, 波兰学者 P. M. Petczewski 对永磁式同步电动机最优模型跟踪控制位置驱动系统的研究<sup>[36]~[38]</sup>, 以及意大利学者 Alfio Consoli 对永磁式同步电动机等效电路的剖析<sup>[11][12]</sup>均各有特点, 具有新颖性和独到之处。

高磁场永磁式同步电动机的发展与高磁能积的永磁材料工业的进步和发展密切相关。关于高磁场永磁式电动机的永磁材料, 英国南安普顿大学博士研究生 T. M. Wong 进行了十分细致的各种永磁材料磁性和物理性能的分析研究工作<sup>[10]</sup>。目前, 高磁场永磁式电动机所采用的永磁磁性材料包括有 AlNiCo (铝、镍、钴铁磁性合金), Ceramic (陶瓷), Rare Earth (含钐或钕聚合键稀土磁性材料), Ferrites (铁氧体磁性材料), NdFeB (钕铁硼合金), Bari-

um (钷) 或 Strontium (锶) 等铁磁性材料。1983 年问世的钕铁硼永磁材料, 由于其磁特性和物理特性优异 (最大磁能积  $(BH)_{\max}$  的理论值高达  $509\text{kJ}/\text{m}^3$ , 饱和磁感应强度为  $1.63\text{T}$ , 剩余磁感应强度比钐钴永磁材料高  $30\%$ ), 成本低廉且材料来源有保证, 因此, 各主要工业发达国家对其研究和应用开发非常重视, 并预测有可能在相当大程度上取代某些永磁材料。到 90 年代初期, 钕铁硼永磁材料已占据磁铁市场的  $50\%$ 。日本住友特殊金属公司在开发烧结 NdFeB 永磁材料领域获得专利, 并开发出具有代表性的  $\text{NeO}_{\max}$  系列产品。美国通用汽车 (GM) 公司在开发快淬 NdFeB 永磁材料领域中获得专利, 并开发出具有优异稳定磁性能的 MQ 系列产品。另外, 为了解决 NdFeB 永磁材料在比较高的工作温度下有效使用的技术难题, 设在美国的日本日立金属和电工研究所, 对提高 NdFeB 永磁材料的居里温度和矫顽力, 减小温度系数和不可逆损失进行了大量的和卓有成效的研究, 研究出具有代表性的新型 NdFeB 永磁材料, 其剩余磁感应强度  $B_r$  为  $1.04\text{T}$ , 磁感应矫顽力  $B_H C$  为  $796\text{kA}/\text{m}$ , 内禀矫顽力  $M_H C$  为  $2157\text{kA}/\text{m}$ , 最大磁能积  $(BH)_{\max}$  为  $209\text{kJ}/\text{m}^3$ , 在温度  $260^\circ\text{C}$  下的不可逆损失小于  $5\%$ <sup>[56]</sup>。

NdFeB 永磁材料在电机中得到了广泛的应用。美国通用汽车 (GM) 公司研制成功的汽车用新型曲柄电动机, 对原有的普通型电动机进行重新设计, 其外壳壳壁较薄, 从普通型的  $8\text{mm}$  减至钕铁硼型的  $2\text{mm}$ , 电磁线圈节省  $40\%$ , 电动机的体积和重量均减半。另外, 这种新型的钕铁硼曲柄电动机还设置了一套行星齿轮减速装置, 使电动机转速降至  $50\sim 100\text{r}/\text{min}$ , 可满足汽车发动机的运行需要。美国电气指示器公司 (Electrical Indicator Co) 与潘恩工程制造公司 (Penn Co) 研制成功的钕铁硼无齿电动机在某些方面优于普通型无刷电动机。这种无齿电动机的直径为  $4.375\text{in}$  ( $111.1\text{mm}$ ), 长度为  $9.75\text{in}$  ( $247.7\text{mm}$ ), 电动机功率为  $3\text{hp}$  ( $2.24\text{kW}$ ), 空载转速为  $4000\text{r}/\text{min}$ , 铜耗和铁耗均低, 电动机低速时不会发生齿槽效应。英国科尔西夫电动机公司 (Coercive Motor Co) 研制成功的新系列钕铁硼无刷直流电动机, 与普通的稀土

钕钴电动机相比,突出了性能/价格比的优点。为了克服钕铁硼磁体在高温运行时容易被烧坏的缺点,该公司还应用了专门研制的计算机系统,以使电动机投入的运行条件最优化,即根据所提供的20多个有关变量,通过计算机软件以产生电动机转速、功率、效率、电流与转矩的关系曲线。据统计,使用特制计算机系统优化,可使评定新设计所花的时间从原来的几个星期减少到现在的8h左右。日本富士电化学公司研制和开发出系列化的钕铁硼步进电动机,包括有SMB-35、SMB-40、SMC-42、SMB-48和SMR-25等多种型号产品〔型号中的数字表示电动机直径(mm)〕,这多种型号的钕铁硼步进电动机中的每一种的体积都比普通型步进电动机的体积小,但其输出功率和其它性能指标却比普通型步进电动机高得多。另外,日本的Tamagawa Seiki公司还研制成功了钕铁硼永磁式电动机和TBL无刷钕铁硼永磁电动机。根据技术新动态与新发展对产品的要求,美国通用汽车(GM)公司研制成功的用于太阳能电池赛车的钕铁硼电动机(该太阳能赛车在1987年澳大利亚的“世界太阳能车”大赛中荣获冠军),功率为1.5kW,重量为3.7kg,其功率比同尺寸普通型电动机大30%~40%,效率高达92%。美国Thermedics公司与波士顿儿童医院合作研制成功的供心脏泵使用的钕铁硼永磁直流电动机,构成了帮助心脏衰弱病人输送血液的心室辅助系统。系统中的QT-3406-A型钕铁硼永磁直流电动机没有框架(无外壳)、轴承或转轴,可以植入人体内部,以取代原有心脏辅助系统中的气动装置。QT-3406-A型钕铁硼永磁直流电动机体积很小,它由一个波绕定子与一个用粘合在轂环组件上的22块钕铁硼永磁磁体制成的转子组成。轂环组件是一个钢轂环,用电子束焊接到一个钛轂上。电动血液泵的搏动模拟成心脏的跳动,可确保心室辅助系统以同步反脉冲方式工作<sup>[57]</sup>。

目前,高磁场永磁式同步电动机驱动系统主要应用于两个方面:其一为交流同步驱动系统,适应于正弦变频、变压或由电流型逆变器供电的交流电动机调速场合。由于这类系统中的永磁式

同步电动机力求维持与供电频率同步，故系统不需要进行速度反馈或位置反馈控制，但在电动机高转矩时容易“失步”。对于开环调速驱动系统，必须十分注意和认真研究系统开环运行时的稳态性能，以确保高磁场永磁式同步电动机开环调速驱动系统运行的稳定性<sup>[14][15]</sup>。其二为自调整永磁式同步电动机闭环调速驱动系统或永磁式无刷直流电动机驱动系统和位置随动系统，这类系统往往需要电动机转子速度反馈和（或）电动机转子位置反馈，即系统构成闭环反馈控制，可消除“失步”的危险。对于闭环反馈驱动系统，必须十分注意和认真研究反馈信号检测的可靠性和准确性，以确保高磁场永磁式同步电动机闭环驱动系统良好的动、静态性能指标<sup>[19]~[22]</sup>。目前，高磁场永磁式同步电动机应用于高性能变频调速系统<sup>[15][45][47]</sup>、交流伺服驱动系统<sup>[25][28][49]</sup>、无刷直流电动机驱动系统<sup>[32][35][52]</sup>和最优控制驱动系统<sup>[36]~[38]</sup>都获得了相当满意的运行效果。

由于我国占有世界蕴藏量 80% 以上的钕资源，所以在开发高磁场永磁材料（特别是钕铁硼永磁材料）方面具有得天独厚的有利条件。目前，我国的钕铁硼永磁材料特性水平达到世界的先进水平。中国科学院物理研究所、中国科学院上海冶金研究所、机械部桂林电器科学研究所、西安微电机研究所、沈阳金属研究所、北京钢铁研究总院、上海钢铁研究所、包头稀土研究院、北京有色金属研究院、西北有色金属研究院、北京大学、西安交通大学、西北工业大学等一大批研究单位和高等院校积极参加了高磁场永磁材料的应用开发研究工作，取得了丰硕的研究成果。1962 年筹建的全国第一家微特电机专业研究所——电子部第二十一研究所，经过 30 多年从仿制到自行设计、创新开拓的历史发展过程，在永磁式微特电机的产品开发及新型永磁材料的推广应用方面进行了很多工作，开发新品种 1500 余项，科研成果 346 项，其中获得国家部级及上海市重大科研成果奖 113 项<sup>[55]</sup>。例如，1965 年研制成功了永磁式直流无刷稳速电动机，应用于我国第一颗人造卫星及卫星回收装置的磁记录仪中。1968 年研制成功了用于广播级



四磁头录像机磁鼓的无刷永磁电动机，并随后开发出无刷直流力矩电动机、直线测速发电机、低速同步电动机、反应式步进电动机、有限转角力矩电机和有限转角测速发电机等一大批新品种。1978年以后，微特电机的开发体现出技术水平的提高及技术难度的突破。例如，开发了当时国内最小机座号 $\phi 80\text{mm}$ 、 $\phi 45\text{mm}$ 直流力矩测速机机组、星载红外地平仪用的高性能低速同步电动机、共磁路直流力矩测速机及其实用的补偿线路、 $\phi 20\text{mm}$ 带齿轮减速器的永磁直流伺服电动机和伺服测速机组等。

近些年来，我国不少专业研究单位和工矿企业大力开展了高磁场永磁材料、电动机及其驱动系统的实用性的理论及应用研究工作，先后开发出片状无刷直流电动机、交流永磁伺服电动机、线绕杯形电枢电动机、线绕盘式电枢电动机、线起动永磁同步电动机、变频器供电的同步电动机及其驱动系统，得到了广泛的应用。例如，115厂研制成功的纺织专用“FTY-1200三相永磁同步电动机”于1991年在天津石化公司通过国家部级技术鉴定。该电动机用于POY涤纶长丝卷绕，与变频电源配套工作，可在规定范围内平滑连续调速。该电动机结构新颖、工艺先进，解决了从日本进口的同类型电动机存在的转动扫膛和绕组端部烧坏的技术难点。又例如，包头市电机厂研制成功的高效节能“ZYN系列钕铁硼永磁直流电动机”于1992年通过技术鉴定并进行批量投产。该电动机体积小、重量轻、效率高、温升低和过载能力强。与Z4系列电动机相比，该电动机可节电6%，省铜30%，省硅钢片10%，填补了我国小型直流电动机的空白，可替代同类的进口产品。

可以预料，随着高磁场永磁材料价格和电动机转子制造价格降低，以及驱动系统的理论研究和实践应用的不断完善和提高，高磁场永磁式同步电动机及其驱动系统将会得到进一步的发展及应用，在某些方面或一定程度上有可能逐步取代现有的普通绕线转子电动机及其驱动系统。