

# 永磁

陈荣 著

# 同步电机控制系统

- ▷ 高精度定位控制
- ▷ 高性能伺服驱动
- ▷ 宽速度范围调节
- ▷ 优异的动态响应

应用于航空、航天、  
数控机床、加工中心、机器人……



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

盐城工学院学术专著出版基金资助

# 永磁同步电机控制系统

陈荣 著

## 内 容 提 要

本书以永磁同步电机为对象,以永磁同步电机控制系统的构成、原理、控制方法、系统响应性能为主线,借助经典控制理论和现代控制理论相结合,对永磁同步电机控制系统进行了比较全面的理论分析与性能研究。主要内容包括:介绍电机矢量控制和直接转矩控制两种控制策略,探讨永磁同步电机控制系统的控制策略选择;确定永磁同步电机控制系统的电流控制方案;研究永磁同步电机控制系统结构与数学模型,实现控制系统的设计,并进行仿真;通过实验和仿真研究控制系统电流环、速度环、位置环响应及提高其响应性能的措施,探讨负载扰动、负载转动惯量对系统响应的影响及其抑制方法;详细分析永磁同步电机控制系统的启制动过程;实施控制系统对象电机的初始定位;采用现代控制理论实施控制系统调节器的设计、借助于负载观测提高控制系统响应性能;研究基于矢量控制实验平台实现永磁同步电机的参数检测等。

本书适合电气工程专业、自动化专业及相关专业的教学与科研人员、电气工程及其相近专业研究生、从事电气传动设计与运行的科技人员使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

永磁同步电机控制系统 / 陈荣著. —北京: 中国水利水电出版社, 2009

ISBN 978-7-5084-6600-2

I. 永… II. 陈… III. 永磁式电机: 同步电机—控制系统 IV. TM351.012

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 107396 号

策划编辑: 石永峰

责任编辑: 宋俊娥

封面设计: 李 佳

书 名	永磁同步电机控制系统
作 者	陈荣 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京蓝空印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 11.25 印张 270 千字
版 次	2009 年 7 月第 1 版 2009 年 7 月第 1 次印刷
印 数	001—300 册
定 价	25.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换  
版权所有·侵权必究

# 前 言

交流电机控制系统具有如下特点：电机的制造成本低、结构简单、维护成本低、可以实现高压大功率及高速驱动、适宜于恶劣的工作环境、系统成本随着技术的发展而逐步下降、能获得和直流电机控制系统相媲美的控制性能。正因为如此，在电力传动领域，交流电机控制系统受到了行业内的普遍重视，已经形成研究开发、推广应用交流电机控制系统的热潮。

交流永磁同步电机是一种新型的交流电机，因为稀土永磁材料的出现、价格的下降，永磁同步电机逐步走进人们的视线。随着电力电子技术、微型计算机技术、稀土永磁材料和控制理论的飞速发展，永磁同步电机在中低容量的运动控制系统中得到了广泛的应用，尤其是在伺服传动领域，永磁同步电机正在逐步取代直流电机、步进电机而成为伺服驱动的发展方向。然而，由于永磁同步电机控制系统受电机参数变化、外部负载扰动等因素的影响，要获得高性能、宽调速范围的永磁同步电机控制系统，必须采取先进的控制策略与控制手段，使系统具有较强的适应性和较强的抗干扰能力。本书的主要工作就是围绕高性能、宽调速范围永磁同步电机控制系统的研究而展开，主要内容如下：

对永磁同步电机的矢量控制技术和直接转矩控制技术进行系统的分析，通过对两种控制策略的原理及其使用时的控制性能进行比较可以发现，矢量控制技术可以实现电机交直轴之间的解耦，具有转矩控制的线性特性，能够获得比较平稳的输出转矩，达到比较宽的调速范围。

电机的转矩控制最终归结为交直轴电流的控制，本书详细讨论永磁同步电机矢量控制的四种电流控制方法，对这四种电流控制方法的转矩控制特性、转矩输出能力、功率因数特性、电流控制特性等进行分析。

根据自动控制理论，借助于永磁同步电机控制系统的构成与数学模型，按照自动控制系统调节器的工程设计方法，阐述系统三个环节的设计，并对系统进行仿真，分析系统的稳定性；分析系统动态性能和系统调节器参数之间的关系，以及负载变动、对象参数变动对系统各环节的影响及系统控制的应对措施；实现矢量控制时永磁同步电机的初始定位，以保证电机控制系统矢量控制的实现。

详细分析永磁同步电机控制系统电流环的影响因素，及其获得高性能电流响应控制的措施。为抑制因为使用PI调节器所出现的速度响应超调，探讨使用二次型指标最优(LQSF)实现永磁同步电机控制系统速度调节器的设计，针对实际速度阶跃过程中调节器的饱和，采用Bang-Bang控制实现速度调节器饱和期间的速度控制。为简化调节器的设计，使用比例积分调节和速度微分负反馈实现速度环的全状态反馈控制，详细分析速度微分负反馈抑制速度超调的机理。

在负载突变过程中，永磁同步电机控制系统不可避免地出现动态速降(升)和速度静差，为提高速度环的响应性能，提高速度环的特性硬度，探讨使用负载观测器的控制思想，将负载观测器的输出信号引入到电流环输入端，以补偿负载扰动对速度环的影响，从而提高控制系统对负载扰动的鲁棒性。

分析电机控制系统位置环的影响因素，其中负载转动惯量是影响电机控制系统位置跟踪响应速度及产生位置响应超调的主要因素，通过在线检测电机轴联转动惯量借以进行自动修改

调节器参数，可以保证电机控制系统良好的位置跟踪响应。

由于电机控制系统频繁地处于启动、制动过程中，本书全面分析影响电机控制系统启动、制动的各种因素，分析提高电机控制系统启动、制动响应性能的各种措施。

为获得永磁同步电机的参数，本书介绍一种基于转子磁场定向的永磁同步电机参数检测方法，该方法很好地解决了永磁磁场存在对电机参数测试过程的影响，能够测量电机的有关参数，其检测精度满足理论分析与实际工程需要。

在编写本书的过程中，因为要保持永磁同步电机控制系统的完整性，加进了三相永磁无刷直流电机控制系统的内容，包括无刷直流电机工作原理、无刷直流电机数学模型、无刷直流电机的转矩脉动、无刷直流电机的驱动控制、无刷直流电机的无位置检测驱动控制的部分章节，该部分章节的内容主要参考了钱平编著的《伺服系统》（机械工业出版社，2005.2）一书，在此表示衷心感谢。

在本书的写作过程中，研究生张运芳参与并完成部分章节图表的绘制工作，南京工业大学电气工程及其自动化06（1）班董竞宇同学在文本的录入、第九章内容的整理及部分图稿的绘制方面做了大量的工作，在系统的测试与波形的处理过程中，张运芳和董竞宇亦付出了辛勤的劳动，在此表示诚挚的谢意。

由于作者学识所限，在永磁同步电机控制系统方面的观点、方法、结论可能有些偏颇，或许还有部分阐述是错误的，恳请有关专家和各位读者批评指正，作者表示由衷感谢。

作者  
2009年3月

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 交流永磁同步电机控制系统的基本特点	2
1.2.1 永磁同步电机	2
1.2.2 永磁同步电机调速系统与其他电机调速系统的比较	5
1.2.3 控制系统电动机的选择及评价	6
1.2.4 电机控制系统的位置传感器	8
1.2.5 高效率三相逆变电源	12
1.2.6 多功能的微型计算机控制	18
1.2.7 高可靠性设计	19
1.2.8 永磁同步电机调速控制系统的应用	25
1.3 交流永磁同步电机控制系统国内外研究与发展	25
1.3.1 交流电机调速控制系统发展历史	25
1.3.2 交流永磁同步电机调速控制系统国内外研究概况	26
1.3.3 交流永磁同步电机调速系统的最新研究动向	27
第 2 章 永磁同步电机数学模型	30
2.1 引言	30
2.2 永磁同步电机 (PMSM) 的数学模型	30
2.2.1 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 三相坐标系中同步电机数学模型	31
2.2.2 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $o$ 坐标系中同步电机数学模型	32
2.2.3 $d$ 、 $q$ 、 $o$ 同步旋转坐标系中同步电机数学模型	34
2.3 三相永磁无刷直流电机的基本公式和数学模型	36
2.3.1 三相永磁无刷直流电机电枢绕组的反电势	36
2.3.2 三相永磁无刷直流电机的电磁转矩	37
2.3.3 三相永磁无刷直流电机的数学模型	37
2.4 永磁同步电机 (PMSM) 的状态方程	37
第 3 章 永磁同步电机控制策略及电流控制方法	39
3.1 永磁同步电机调速系统控制策略	39
3.1.1 矢量控制技术和直接转矩控制技术原理及控制思想	39
3.1.2 矢量控制技术及直接转矩技术两种控制方案的比较	42
3.2 永磁同步电机的电流控制方法	44
3.2.1 $i_d=0$ 的控制	44
3.2.2 转矩电流比最大控制	45
3.2.3 功率因数等于 1 的控制	46
3.2.4 恒磁链控制	47

3.2.5	四种电流控制方案的特点及电流控制方案的选择与确定	48
3.3	$i_d=0$ 的控制方法实现	49
3.3.1	电压前馈解耦控制	49
3.3.2	电流反馈解耦控制	49
3.4	本章小结	50
<b>第4章</b>	<b>矢量控制永磁同步电机控制系统设计</b>	<b>51</b>
4.1	引言	51
4.2	永磁同步电机控制系统电流环的设计	51
4.2.1	现行电流控制器控制方案简介	52
4.2.2	按斜坡比较电流控制方案的电流控制器设计	53
4.2.3	电压型逆变器的设计与选择	54
4.2.4	电压型逆变器的驱动、保护与信号采样	55
4.2.5	电流环调节器的设计	55
4.3	速度环调节器的设计	58
4.4	位置环调节器的设计	61
4.5	永磁同步电机控制系统的总体设计与布局配合	62
4.6	永磁同步电机控制系统参量检测与处理	63
4.6.1	永磁同步电机电流检测	64
4.6.2	永磁同步电机转子旋转速度、位置检测及初始定位	64
4.7	本章小结	67
<b>第5章</b>	<b>永磁同步电机控制系统的建模与仿真</b>	<b>68</b>
5.1	永磁同步电机调速系统仿真模型的建立	68
5.2	永磁同步电机控制系统的仿真结果及其分析	70
5.2.1	电流环的仿真与分析	70
5.2.2	速度环的仿真与分析	74
5.2.3	位置环的仿真与分析	78
5.3	永磁同步电机控制系统各环节的稳定性分析	80
5.4	本章小结	83
<b>第6章</b>	<b>永磁同步电机控制系统性能分析</b>	<b>84</b>
6.1	永磁同步电机控制系统电流环响应性能	84
6.1.1	影响电流环响应性能的因素及其处理	84
6.1.2	电流环动态响应性能的提高与超调的抑制	87
6.2	永磁同步电机控制系统速度环响应性能研究	91
6.2.1	基于线性二次型最优的永磁同步电机控制系统速度调节器的设计	91
6.2.2	速度微分反馈对电机调速控制系统速度环的作用分析	100
6.2.3	基于负载观测器的电机调速控制系统速度环抗扰性能	103
6.3	永磁同步电机控制系统位置环响应	110
6.3.1	位置调节器是比例调节器情况下的位置响应	110
6.3.2	位置调节器参数实施自动调整情况下的位置响应	114

6.3.3	位置调节器采用前馈控制时的分析	118
6.4	本章小结	119
<b>第7章</b>	<b>永磁同步电机控制系统电机的启动制动过程分析</b>	<b>121</b>
7.1	永磁同步电机控制系统的启动过程分析	121
7.1.1	电机启动时的电流建立阶段 $t_0-t_1$	122
7.1.2	电机启动过程中的线性加速阶段 $t_1-t_2$	123
7.1.3	电机启动过程中的速度调整阶段 $t_2-t_4$	124
7.1.4	电机启动过程的仿真与实验	125
7.1.5	电机启动过程中直流电压的变化	126
7.2	永磁同步电机控制系统的制动过程分析	127
7.2.1	电机制动过程的减流阶段 $t_0-t_1$	128
7.2.2	电机制动过程的反接建流阶段 $t_1-t_2$	130
7.2.3	电机制动过程的回馈发电制动阶段 $t_2-t_3$	130
7.2.4	电机制动过程的速度调整阶段（或者反接制动阶段） $t_3-t_5$	131
7.2.5	制动过程的仿真与实验	132
7.2.6	制动过程中直流电压的变化	133
7.3	本章小结	134
<b>第8章</b>	<b>基于转子磁场定向控制的永磁同步电机参数测量</b>	<b>135</b>
8.1	引言	135
8.2	电机的参数测试原理	135
8.3	电机参数测量的工程实现	136
8.4	测试误差分析	140
8.5	本章小结	141
<b>第9章</b>	<b>三相永磁无刷直流电动机控制系统</b>	<b>142</b>
9.1	无刷直流电动机的组成结构和工作原理	142
9.1.1	无刷直流电动机的结构特点	142
9.1.2	无刷直流电动机的转子位置传感器	143
9.1.3	无刷直流电动机的换向原理	145
9.2	无刷直流电动机的转矩波动	148
9.3	无刷直流电动机的驱动控制	150
9.3.1	开环型无刷直流电动机驱动器	150
9.3.2	速度闭环的无刷直流电动机驱动器	152
9.3.3	速度电流双闭环的无刷直流电动机驱动器	154
9.4	无位置传感器的无刷直流电动机的驱动控制	158
9.4.1	无刷直流电动机转子位置估计方法	158
9.4.2	无位置传感器无刷直流电动机控制系统的构成	159
9.5	无刷直流电动机驱动控制的专用芯片	159
<b>第10章</b>	<b>永磁同步电机控制实例装置系统性能简介</b>	<b>161</b>
10.1	永磁同步电机控制实验系统结构与组成	161



10.2	电机控制系统的实验测试平台	161
10.3	电机控制系统的实验性能测试	161
10.3.1	电流环响应	162
10.3.2	速度环响应	163
10.3.3	位置环响应	165
参考文献		167

# 第 1 章 绪论

## 1.1 引言

自人类发明电机以来，已经经历了一百多年，经过这么多年的发展与完善，电机及其控制技术已经发生了很大的变化。在人类发展和社会进步的历史长河中，电机对社会发展和人民生活水平的提高起到了巨大的推动作用，扮演了重要的角色，并已经成为社会生产生活中不可缺少的重要工具，成为生产生活中重要的动力来源。

20 世纪 70 年代，西德学者 F. Blashke 等人提出的感应电机矢量变换控制技术 (Transvector Control)，开辟了现代交流电机调速控制的新纪元，使得交流电机调速系统在调速范围、调速精度、动态响应等方面发生了质的飞跃，其性能已经超过直流电机调速系统，真正实现了交流电机速度调整的连续、平滑、高效。由于电力电子、微型计算机、传感器和自动控制等与电机控制系统密切相关技术的发展，以矢量控制技术为核心的交流电机调速系统的发展非常迅速，在需要高性能变速传动的场合，交流电机调速系统已经取代直流调速系统，在诸多传动领域获得广泛应用，人们对交流电机矢量控制技术的研究方兴未艾。近十多年来刚刚兴起的交流电机直接转矩控制技术，把人们从繁琐的坐标变换（数学运算）中解脱出来，所构成的电机控制系统直接面对交流电机的磁链和转矩，可以使被控电机获得快速的转矩响应，得到优良的动态性能。尽管目前直接转矩控制技术还面临一些如电机低速运行平稳性及动态冲击大等问题，但随着微型计算机技术及自动控制技术的发展，这些问题会逐步解决。

永磁同步电机具有结构简单、效率高、功率因数高、功率密度高、体积小、转矩电流比高、转动惯量低、易于散热及维护保养等特点，尤其是伴随着电力电子技术、微电子技术、微型计算机技术、传感器技术、稀土永磁材料与电机控制理论的发展，永磁同步电机控制系统的研究和推广应用受到了人们的普遍重视。实际上，人类应用永久磁铁制造电机的历史很久，世界上第一台电机就是永磁电机，但由于早期永磁材料的磁性能很差，导致电机在运行过程中随着负载的变化其特性变化很快，负载越重，特性越差，永磁电机的应用与发展受到限制。近三十年来，由于各种高性能永磁材料的相继出现，特别是 20 世纪 80 年代初，世界上研制成功的性能优良、价格低廉的第三代稀土永磁材料钕铁硼 (Nd-Fe-B)，有力地推动了永磁电机及其控制系统的发展。随着永磁材料价格的下降、材料磁性能的提高，以及新型永磁材料的出现，在中小功率、高精度、高可靠性、宽调速范围的速度、位置控制系统中，永磁同步电机引起了众多研究与开发人员的青睐，其应用领域逐步推广，尤其在航空、航天、数控机床、加工中心、机器人等场合已获得广泛的应用。

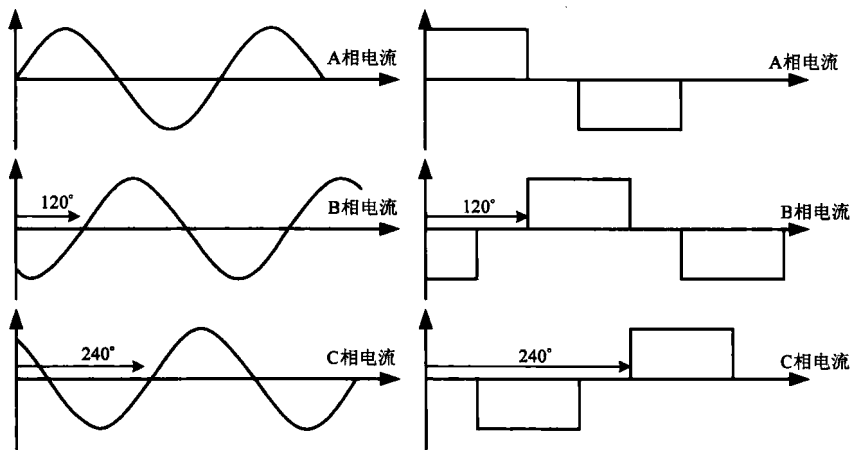
目前，永磁同步电机的应用已不再局限于恒定频率、恒定转速的场合，由永磁同步电机构成的交流调速系统已在中小容量调速、伺服场合得到广泛的应用。其中，永磁同步电机矢量

控制系统能够实现高精度、高动态性能、大范围的调速或定位控制。随着机器人、数控机床等技术的发展,对高性能变速伺服驱动系统的需求正在不断增长。因此,永磁同步电机矢量控制系统具有广阔的发展和前景,对永磁同步电机矢量控制系统的研究已经成为中小容量交流调速和伺服驱动系统的研究重点。当今,永磁同步电机直接转矩控制系统已经在中小功率的变速传动系统中获得应用,其研究与相应产品的开发工作也得到广大科技人员和从事新产品开发的研究机构的普遍重视。伴随着新材料、机电一体化、电力电子、计算机、控制理论等高新技术的快速发展,交流永磁同步电机调速系统正向数字控制或全数字控制的方向发展。用计算机软件控制代替传统的模拟控制,其控制软件的灵活性决定了数字控制系统可以获得模拟控制无法比拟的控制性能,因此,数字控制的交流永磁同步电机调速系统将会在工农业生产和人民生活中开拓更为广泛的应用领域,能够实现高速、高精度、高稳定度、快速响应、高效节能的运动控制。

## 1.2 交流永磁同步电机控制系统的基本特点

### 1.2.1 永磁同步电机

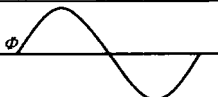
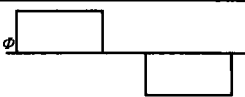
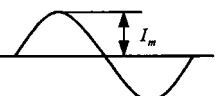
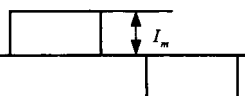
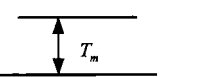

现在广泛使用的永磁同步电机,按照其电枢绕组所流过的电流波形分类,有两种基本形式。一种是方波或梯形波供电的永磁无刷直流电动机(BDCM),另一种是正弦波供电的交流永磁同步电机(PMSM)。永磁无刷直流电动机绕组中流过方波或梯形波电流,具有与传统直流电机相媲美的优良调速控制性能,并且该电机无需机械换向器与电刷,电机和变频器结构及其控制均比较简单,成本较低。正弦波永磁同步电机的定子绕组结构为三相对称正弦波绕组,转子结构为表面贴装式永磁结构或者内嵌式永磁结构。正弦波永磁同步电机定子绕组感应的电势为正弦波,当给电机定子绕组通入三相对称正弦波电流时,电机将产生连续的电磁转矩。这两种电机的理想定子电流波形如图 1.1 所示。特性对比如表 1.1 所示。



(a) 正弦波永磁同步电机定子电流 (b) 方波永磁同步电机定子电流

图 1.1 永磁同步电机定子电流理想波形

表 1.1 正弦波和方波永磁同步电动机对比

对比项目	正弦波永磁同步电动机	方波永磁同步电动机
电动机每相励磁磁通分布		
电动机每相电流波形		
电磁转矩	 $T_m = K\Phi I_m$	 $T_m = K\Phi I_m$
运行特点	(1) 转矩脉动小 (2) 可用相位补偿电流控制器的滞后 (3) 需磁极传感器 (4) 电流控制复杂	(1) 相电流切换时产生转矩波动 (2) 电流控制有延迟使转矩下降 (3) 只需要简单廉价的磁极位置传感器 (4) 电流控制简单

从电机转子结构型式来分，交流永磁同步电机可分为将永磁磁体粘贴在转子表面的表面式永磁同步电机和永磁磁体嵌在转子内部的内永磁同步电机，交流永磁同步电机转子结构型式参见图 1.2。永磁无刷直流电动机的转子结构通常采用表面永磁结构，无凸极效应。

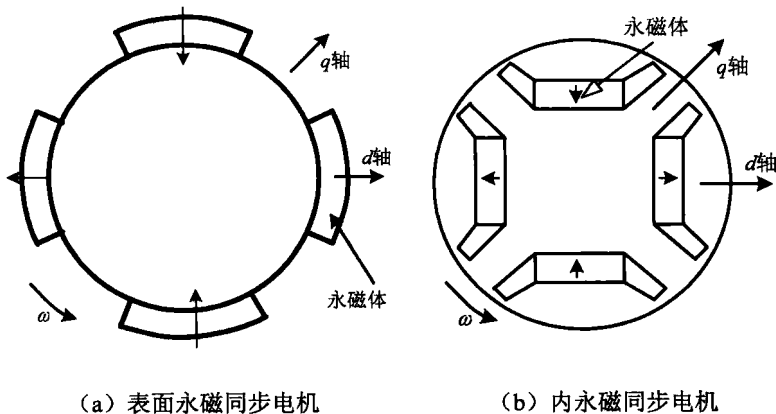


图 1.2 永磁同步电机转子的结构

永磁无刷直流电机中，定子绕组的感应电势为梯形波，为了获得连续的电磁转矩，电机定子绕组一般采取六阶梯形波供电方式，如图 1.3 所示。无刷直流电机的绕组感应电势正比于电机转速，输出力矩正比于电机输入电流，其输出特性与直流电机相似。

正弦波永磁同步电机的定子电流相量、电压相量和空间磁势矢量之间的相互关系可以在同步旋转坐标中表示。在与转子同步旋转的  $d$ 、 $q$  坐标系中，选择  $d$  轴和转子励磁磁场方向相同，超前于  $d$  轴  $90^\circ$ （电角度）为  $q$  轴，根据正弦波永磁同步电机理论分析，永磁同步电机的电磁转矩可以写成：

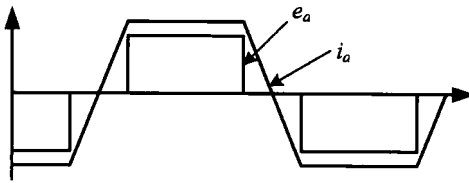


图 1.3 永磁无刷直流电机定子绕组中的感应电势和电流波形

$$T_e = P_n [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (1.1)$$

式中,  $P_n$ ——电机定子绕组的极对数;

$L_d$ 、 $L_q$ ——电机直轴和交轴同步电感;

$\psi_f$ ——永磁磁极产生的与电机定子交链的磁链;

$i_d$ 、 $i_q$ ——在  $dq0$  同步旋转坐标系中定子电流的直轴与交轴分量;

$T_e$ ——电机输出的电磁转矩。

公式 (1.1) 表明, 正弦波永磁同步电机的电磁转矩包括两部分:

(1) 由永磁体励磁磁场与电机定子电流的交轴分量所产生的同步电磁转矩, 这一部分转矩, 由于永磁体励磁磁链恒定, 该转矩正比于电机定子交轴电流分量  $i_q$ 。

(2) 磁阻转矩, 它与电机凸极系数有关, 与电机直轴和交轴电感之差与直轴和交轴电流乘积成正比。

表面永磁同步电机与内永磁同步电机的电磁特性不同, 表面永磁同步电机的直轴与交轴电感相等, 无凸极效应, 自然就不存在磁阻转矩, 只有和交轴电流成正比的同步电磁转矩。其转矩功角特性如图 1.4 所示, 电机最大转矩出现在功角为  $\pi/2$  时, 此时  $i_d=0$ 。内永磁同步电机的直轴上埋有永久磁体, 直轴磁链需要穿过气隙和永久磁铁, 存在很大的磁阻。而交轴上无永磁材料, 交轴磁链只穿过气隙, 磁阻相对较小,  $L_q > L_d$ , 则因内永磁同步电机直轴与交轴电感不相等就存在凸极效应, 产生磁阻转矩。由于磁阻转矩的出现, 使得内永磁同步电机的转矩功角特性与表面永磁同步电机不同, 特性如图 1.5 所示, 电机最大转矩不是出现在功角为  $\pi/2$  时, 即  $i_d=0$  时, 而是出现在功角大于  $\pi/2$  时, 并且该电机最大电磁转矩大于表面永磁同步电机的最大电磁转矩。因此, 内永磁同步电机具有比表面永磁同步电机优良的调速控制特性。在图 1.4 和图 1.5 中, 1 为同步转矩, 2 为磁阻转矩, 3 为合成转矩。

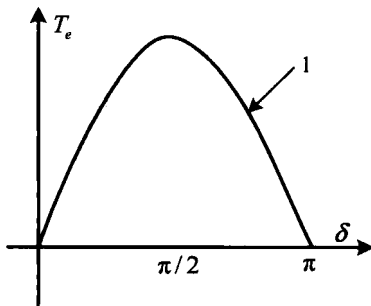


图 1.4 表面式永磁同步电机转矩角特性

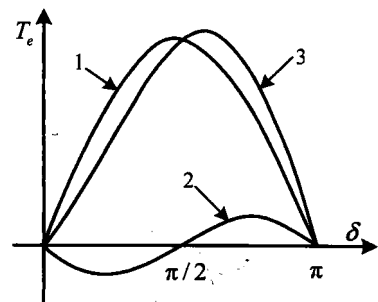


图 1.5 内永磁同步电机转矩角特性

### 1.2.2 永磁同步电机调速系统与其他电机调速系统的比较

永磁同步电动机定子绕组中不需要励磁电流，定子磁场和转子磁场无相对运动，转子中无滑差损耗；与感应电动机相比较，具有如下特点：转子没有损耗，具有更高的效率、电机体积较小、由永磁材料产生气隙磁通，电机功率因素较高，在同样输出功率下，所需整流器和逆变器容量较小，电机具有较小的转动惯量，快速响应能力强、性价比高、低速性能好、调速范围宽。在感应电动机中，转子电流产生磁通（对应于励磁磁通）的大小是变化的，且不和定子产生的磁场正交，和定子磁场的相位关系与电机的负载有关，因此，感应电动机的矢量控制比较复杂。而永磁同步电动机的励磁磁通是由永磁体产生，其大小不变，矢量控制情况下，励磁磁场和电枢电流可以保持着固定的相位关系，因而控制比较简单。

正弦波永磁同步电动机（PMSM）与无刷直流电动机（BDCM）相比较，BDCM 具有控制简单、成本低、检测装置简单等优点。但基于其原理上的固有缺陷，使 BDCM 存在转矩脉动较大、铁心附加损耗大的缺点，限制了由 BDCM 构成的调速系统在高精度、高性能要求的变速驱动场合的应用。PMSM 具有比 BDCM 电动机更为优越的性能，尤其是在低速或直接驱动场合，加之永磁材料技术及控制技术等的飞速发展，PMSM 性价比得到了进一步的提高，使得由 PMSM 作为执行元件构成的交流电机调速系统，逐步成为现代电力传动系统的主流。

以永磁同步电机为核心构成的调速控制系统与异步电机调速系统、无刷直流电机调速系统相比，显示出永磁同步电机调速控制系统独特的优越性，参见表 1.2。

表 1.2 永磁同步电机调速系统与其他电机调速系统的特性比较

项目	永磁同步电机	无刷直流电机	异步电机
电机的成本	高	高	低
电机的效率	高	高	较低
电机的功率因数	高	高	较低
电机的结构紧固	好	较差	好
电机的转矩脉动	小	较大	小
电机的力矩惯量比	较大	大	小
电机的功率密度	较低	高	较高
位置传感器精度要求	高	低	高
电机的调速范围	大	小	大
控制系统的复杂性	较复杂	简单	复杂

永磁同步电动机与直流电动机相比较，具有无机械换向器和电刷、结构简单、体积小、运行可靠、易实现高速运行、调速范围宽、环境适应能力强、易实现正反切换、定子绕组散热容易，不影响传动精度、快速响应性能好、工作电压只受功率开关器件的耐压限制，可以采用较高的电压，容易实现大容量的电力传动控制。

表 1.3 对比了永磁同步电动机、永磁直流电动机、三相异步电动机的主要性能和特征。

永磁同步电动机控制系统是一种闭环控制系统，见图 1.6，将驱动器包含在电机内就可以将永磁同步电机看成是自控同步电机。因此，它彻底克服了步进电动机控制系统所固有的振荡和失步等缺点，提高了电机的转矩电流比。因而，和步进电动机驱动系统相比，永磁同步电动机控制系统具有更高的运行速度，更稳定、更光滑的运行性能及更强的位置控制能力。

表 1.3 电动机主要性能和特性对比

对比项目	永磁直流电动机	永磁同步电动机	三相异步电动机
价格	7.5kW 以下的电机价格是同容量标准异步电动机的 4~6 倍		便宜
功率密度	> 115W/kg	> 133W/kg	100W/kg
转矩/惯量	> $4.2 \times 10^3 \text{rad/s}^2$		< $2 \times 10^3 \text{rad/s}^2$
驱动电流波形	直流	正弦波或方波	正弦波
耐环境性	不好	好	好
是否可以高速旋转	因整流子、电刷限制，速度不可以很高	视转子永久磁铁固定方法的不同而不同	受轴承限制
是否存在退磁现象	存在	存在	不存在
影响寿命的因素	电刷	轴承	轴承
制动	停止时可采用发电制动	停止时可采用发电制动	停止时不可采用发电制动，需要直流励磁后才能进行发电制动
是否需要磁极位置传感器	不需要	需要	不需要
优点	只用电压控制，控制简单，具有高功率密度，小容量系统价廉	体积小，重量轻，大转矩输出，无须维护，高功率密度，控制装置结构较简单	可高速运行，大转矩输出，不需要维护，高速时可恒功率输出，结构坚固，耐环境性强
缺点	因有整流子，高速大转矩不行，需经常维护，整流子端电压不可太高，永久磁铁有退磁问题	控制比直流电动机复杂，电动机与伺服装置——对应，有退磁问题	控制比较复杂，容量小时效率低，停电时需要设法保持制动，有温度特性变化问题

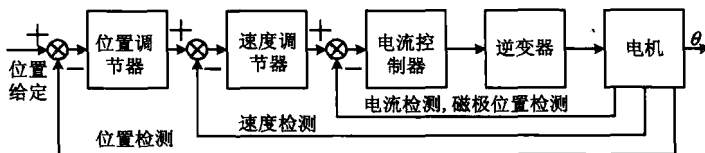


图 1.6 永磁同步电动机控制系统

### 1.2.3 控制系统电动机的选择及评价

针对特定的应用场合，正确、合理地选择电机很关键，参见表 1.3。实际选择和评价系统性能一般考虑以下因素：

#### 1. 价格

选择并确定电力传动控制系统时，电动机本身的价格固然是一个重要的方面，但其控制装置以及整个控制系统的调整、维护工作所占的价格比也需要考虑。

目前，由于现代控制理论和高性能微机、DSP 微处理器的广泛应用，控制装置的价格针对不同电机控制系统已经基本相同，而电机却具有明显的差别。另外，从使用维护的角度来看，

直流电机控制系统在许多场合均不具有竞争性。

## 2. 功率密度

从表 1.3 可以看出, 针对功率密度项目, 永磁同步电机最具有竞争性。功率密度越大, 电机的尺寸、体积越小, 这在许多使用场合是十分重要的因素, 如机器人、空间飞行器的驱动执行机构等。

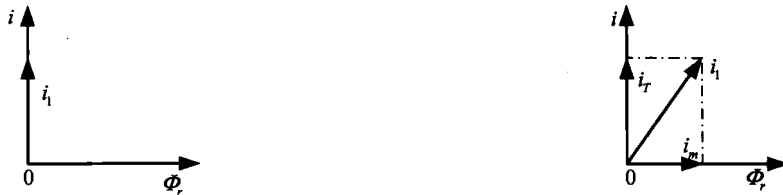
## 3. 转矩/惯量比

转矩/惯量比与功率密度都是用来衡量电机体积和尺寸的主要因素, 转矩/惯量比越大, 将更适合快速运动装置的驱动控制。表 1.3 表明, 永磁直流电动机和永磁同步电动机在这些方面最具有优势。

## 4. 速度控制范围

速度控制范围包括恒转矩速度控制范围和恒功率速度控制范围, 前者主要是在额定转速以下的运行情况, 后者主要是针对在弱磁升速的运行情况。

在额定转速以下做恒磁通运行时, 永磁同步电动机和异步电动机定子电流的控制方法如图 1.7 所示。图中,  $\Phi_r$  为转子磁通矢量,  $i_1$  为定子电流矢量。



(a) 永磁同步电动机定子电流控制法

(b) 异步电动机定子电流控制法

图 1.7 恒磁通运行时定子电流控制

由图可见, 为产生一个确定的电磁转矩, 异步电动机中的定子电流要比永磁同步电动机的定子电流大, 这就意味着异步电动机的定子铜耗要大一些, 特别是电机低速运行尤其明显, 因此, 长期低速运行时, 异步电动机控制系统并不适宜。

但是, 在弱磁升速时, 异步电动机定子电流因磁通分量的减小而减小, 而永磁同步电动机因需要一个负的磁通分量去抵消转子磁通而增加。除此之外, 弱磁升速时, 随着工作频率的增加会带来铁心损耗的增加, 因此, 弱磁升速对永磁同步电动机而言并不有利, 而对异步电动机来说, 弱磁是它拥有的固有特性。

## 5. 损耗和热容量

热容量是选择电机控制系统的重要依据, 其数值的大小可以根据电动机运行过程中的损耗予以估算。这里所说的损耗主要指铁心损耗, 包括磁滞损耗和涡流损耗。磁滞损耗可以近似看成与工作频率和磁通密度平方的乘积成正比; 涡流损耗可以近似看成与频率平方和磁通密度平方的乘积成正比; 而频率又与电机极对数和转子速度的乘积成正比; 弱磁密度与转子速度成反比, 所以极对数的多少就成了影响铁心损耗的重要因素。

一般情况下, 伺服驱动系统应用的永磁同步电动机的极对数往往比异步电动机的极对数多, 这是为了获得最大的功率密度和最小的铜耗, 因此, 在同样的转子速度情况下, 永磁同步电动机的工作频率高, 故铁心损耗也大。铁心损耗的增大, 将导致电机温度的升高, 而过高的



电机温度将使电机的永久磁铁退磁。

#### 6. 转矩/单位电流

转矩/单位电流表示每安培电流产生的最大转矩值，该比值越大，说明电动机的性能越好。

#### 7. 制动

制动性能的好坏对电机控制系统而言是一个至关重要的问题，永磁同步电动机由于使用永久磁铁励磁，故即使是在断电情况下也可以进行发电制动，因而制动很容易。但是异步电动机没有这种能力，需要配备专门的制动控制装置，这就带来整个控制装置的价格上升问题。

#### 8. 齿槽效应和脉动转矩

永磁同步电动机因使用永久磁铁励磁定子又有齿槽，因而这种电机可能存在齿槽效应转矩。齿槽效应转矩的存在将影响电机实施位置控制时的定位精度。异步电动机因使用斜槽，齿槽效应转矩得到了有效的抑制。

脉动转矩是定子电流的时间谐波和转子基波磁通相互作用所产生的，因此，无论是永磁同步电动机还是异步电动机，都存在脉动转矩。脉动转矩的存在将使电动机的运行变得不平稳。

#### 9. 位置传感器

永磁直流电动机、异步电动机作为位置控制时，只需要增量式位置传感器，若永磁同步电动机实施位置控制时，需要带绝对位置信息的位置传感器，否则无法确定电动机启动前的位置信息。若使用增量式位置传感器构成永磁同步电动机控制系统，需要采用诸如初始位置估算、初始位置估计等控制算法，以获得电机转子的初始位置，以实现永磁同步电动机控制系统的位置控制。

#### 10. 参数灵敏度

所谓参数灵敏度是指电动机参数随工作温度、磁通大小、电机工作频率的变化而改变的程度。

对永磁同步电动机而言，当温度升高时，可能会导致电机励磁磁通的损失，甚至会造成永久性失磁。实验表明，温度每升高 100℃，铁淦氧体磁铁的磁通损失为额定磁通的 19%，钕钴磁铁的磁通损失为 3%~6%，钕硼磁铁的磁通损失为 9%~14%。这就意味着，随着温度的升高，产生同样的电磁转矩所需的定子电流要增大，转矩/单位安培电流值下降，定子铜耗增加，峰值转矩下降。

但是，对于异步电动机控制系统而言，随着温度的升高，电机转子电阻增加，电机定子电流减小。此外，电机转子电阻增加后会引引起控制系统控制参数失调，从而导致磁通和转矩的瞬态响应出现振荡，磁通、电流及转矩稳态值偏移给定值。

综合以上分析，针对使用场合的不同，使用条件的变化，应当选择并使用与之相适应的电机控制系统。而现代交流永磁同步电动机有许多优于直流电动机的性能，其高性能主要体现在高功率密度、高转矩/惯量比、高响应速度以及维护量小等方面。

### 1.2.4 电机控制系统的位置传感器

电机控制系统在实现位置控制时，需要为系统配置位置传感器，那么位置传感器的性能将直接影响电机控制系统的位置控制性能。随着计算机技术的迅速发展，现代电机控制系统已经从原来的模拟控制转向数字控制，系统的控制精度越来越高。与之相适应，位置传感器逐步向数字化、高分辨率、高抗干扰性能及在断电情况下可以保存位置信息的方向发展。