

王群京 著

# 稀土钕铁硼永磁同步电动机 设计理论及计算机仿真

1.02

中国科学技术大学出版社

993491

# 稀土钕铁硼永磁同步电动机的设计理论及计算机仿真

王群京 著

中国科学技术大学出版社

1997·合肥

稀土钕铁硼永磁同步电动机的  
设计理论及计算机仿真

王群京 著

\*

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号, 230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

\*

开本: 850×1168/32 印张: 6.25 字数: 186 千

1997 年 12 月第 1 版 1997 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1—1000 册

ISBN 7-312-01007-5/TM·10 定价: 10.00 元

## 序

稀土钕铁硼(NdFeB)永磁电动机的研究是近年来电机领域受到广泛重视的方面,因为稀土NdFeB永磁材料具有的优良特性:极高的磁能积、较高的矫顽力,使得应用永磁材料制造的永磁电动机也具有效率高、体积小、功率因数好、控制方式简单等优点,可广泛用于电气传动、工业控制等领域。

永磁电机的设计一直未能有较成熟的设计公式,主要是由于永磁体的引入使电机的磁场与电励磁电机有很大的不同,传统的交流电机设计理论不能满足永磁电机设计的需要。因此,在对永磁材料特性有较清晰认识的前提下,需要对永磁电机进行数学建模以及电机动态下的仿真研究。本书正是基于这种目的,在传统交流电机设计理论的基础上,结合稀土永磁材料的特性,给出了永磁同步电动机的等效磁路法设计程序;同时,为了更进一步准确地设计永磁电机,还给出了精度较高的有限元法和等效磁网络法的设计方法,并结合实际样机的测试结果进行了验证和对比。

作者感谢中国科学技术大学李川奇教授对本书的帮助与指导。

王群京

1997年10月

EA006/12/00

# 前 言

本书对采用稀土永磁钕铁硼(NdFeB)材料的同步电动机进行了建模分析和设计理论的研究。在一般电励磁交流电机设计方法的基础上,根据永磁材料的特性及外磁路的特点,研究了永磁同步电动机的磁路等效分析法,对于由于引入永磁体而使得电机磁路变得比较复杂的永磁电机设计问题进行了研究、探讨。通过引入有限元分析,进一步提高了稀土永磁电机的参数计算精度,从而较准确地得到了永磁同步电动机的稳态性能及起动性能的模式。在考虑实用性和准确性的情况下,又采用等效磁网络法研究了样机的性能、特性,并综合分析了等效磁路法、有限元法、等效磁网络法对于样机设计的结果。在此基础上,建立了基于 $d, q, 0$ 坐标系统的永磁同步电动机的数学模型,对电机起动时的转矩、定子电流、转速等物理量随时间的变化趋势进行了计算机仿真;探讨了计及交叉饱和及交叉耦合时对永磁同步电动机设计程序及仿真结果的影响。对于所研究的永磁同步电动机的分析结果,结合样机实测进行了验证,具有良好的一致性,为稀土永磁同步电动机的深入研究和进一步开发奠定了一定的基础。

永磁同步电动机与传统异步电机相比,定子结构基本相同,转子结构由于利用永磁体产生的励磁代替了电绕组励磁,而且随着永磁体放置形式的不同,等效磁路的形式和计算公式也各有千秋,问题的核心在于永磁体的模拟。本书结合传统交流电机的经典设计理论和设计方法,提出了永磁同步电动机中永磁体的数学模拟方法,在提出利用“电路—磁路耦合分析法”的基础上,利用磁场的有限元分析,提出了“场—路”结合法设计永磁同步电动机的思路,对于精确设计永磁同步电机具有一定的借鉴意义。

一般的永磁同步电机的分析、设计中,极少考虑电机直、交轴的相互耦合影响,而仅仅单独分析各自的参数以及由于饱和现象的存在对电机参数产生的影响. 本书以电机中永磁体材料的退磁曲线为基础,对永磁体的数学模拟进行了较完整、系统的分析,提出了以磁链为状态变量的状态空间模型,编制了计及  $d, q$  轴相互耦合关系的永磁同步电动机仿真计算程序,系统给出了磁路模型、程序框图,并利用仿真程序得到了电机起动过程的各物理量的变化曲线. 结合实际样机的制作,利用一种新的测试永磁同步电动机电磁参数的方法,即“静态直流衰减法”,对设计的样机进行了参数测试方面的研究,得出了一些有益的结论.

王群京

1997年10月

## 内 容 简 介

本书对采用稀土永磁钕铁硼材料的同步电动机进行了设计理论及数学建模方面的分析、研究。在一般交流电动机设计方法的基础上,根据钕铁硼材料的特性及外磁路的特点,研究了“等效磁路法”、“有限元分析法”及精度和实用性较好的“等效磁网络法”对分析该种电动机的应用,并结合样机制做和实测进行了设计结果的对比。在此基础上建立了考虑  $d, q$  轴间相互影响的以 PARK 变换为基础的永磁同步电动机的动态仿真模型,对电机起动时各物理量的变化进行了计算机仿真;对电机电磁参数的测试也做了一定的探讨和分析。

本书可供大专院校电气工程专业的本科生、研究生及有关工程技术人员阅读参考。

# 目 次

序 .....	( I )
前言 .....	( II )
绪论 .....	( 1 )
0.1 研究的目的和意义 .....	( 1 )
0.2 国内外发展概况 .....	( 3 )
0.3 NdFeB 永磁同步电动机的结构特点及与异步电动机 的性能比较 .....	( 5 )
0.4 驱动用稀土永磁同步电动机存在的问题 .....	( 8 )
0.5 本书研究的主要内容 .....	( 9 )
参考文献 .....	( 10 )
<b>第 1 章 钕铁硼永磁同步电动机的稳态设计和分析 .....</b>	<b>( 13 )</b>
1.1 引言 .....	( 13 )
1.2 永磁体“磁铁工作图”的基本概念 .....	( 14 )
1.3 NdFeB 永磁同步电动机稳态参数的计算及设计分析 .....	( 21 )
1.4 NdFeB 永磁同步电动机的稳态参数有限元求解 .....	( 40 )
1.5 等效磁网络方法 .....	( 59 )
1.6 本章小结 .....	( 63 )
参考文献 .....	( 63 )
<b>第 2 章 钕铁硼永磁同步电动机系统状态方程分析及仿真         研究 .....</b>	<b>( 65 )</b>



---

2.1	引言	(65)
2.2	基于 PARK 方程的永磁同步电动机模型及仿真	(65)
2.3	基于磁路—电路耦合的数学模型	(80)
2.4	“场—路结合”的数学模型	(97)
2.5	本章小结	(99)
	参考文献	(100)
<b>第3章</b>	<b>永磁同步电动机的参数测试</b>	<b>(103)</b>
3.1	引言	(103)
3.2	测量、分析的基础	(103)
3.3	参数测试及结果	(109)
	参考文献	(112)
<b>附录1</b>	<b>二维恒定磁场有限元自动剖分程序</b>	<b>(114)</b>
<b>附录2</b>	<b>二维有限元磁场计算程序</b>	<b>(159)</b>
<b>附录3</b>	<b>永磁同步电动机起动仿真程序</b>	<b>(181)</b>
<b>附录4</b>	<b>采用对 <math>\sigma(V \times B)</math> 项进行处理的 PMSM 瞬态场的有限元分析</b>	<b>(187)</b>

# 绪 论

## 0.1 研究的目的是和意义

世界上第一台电机是由 Barlow 于 1831 年发明的. 但是, 由于当时采用的天然磁铁磁性能太差, 电机的磁能积不足而很快被电励磁电机所取代. 到本世纪 20 年代, 美国 GE 公司利用铁氧体磁钢研制出一批微型永磁同步电动机, 但功率很小. 到了六七十年代, 第一代和第二代稀土钐钴永磁材料  $\text{SmCo}_5$ ,  $\text{SmCo}_{17}$  相继问世, 其优异的磁性能使得永磁电机的发展呈现出新的、繁荣的生机. 但是, 钐、钴均为稀有金属, 价格昂贵, 给实际广泛的应用带来了困难. 1983 年, 日本住友特殊金属公司、美国通用汽车公司分别研制成功稀土钕铁硼 ( $\text{NdFeB}$ ) 永磁材料, 国际上称为第三代稀土永磁材料.  $\text{NdFeB}$  磁钢磁能积高, 性能优越, 而且原材料丰富, 价格较便宜, 尤其我国是稀土大国, 总储量占世界的 80%, 因此, 研制、开发  $\text{NdFeB}$  永磁电机更具有得天独厚的条件. 从 1984 年起, 各工业发达国家竞相研制高性能永磁电机. 日本住友公司和美国通用公司分别批量制造用于计算机外存储器的音圈电机及  $\text{NdFeB}$  永磁汽车起动机; 德国西门子公司经十多年努力, 采用多种结构, 研制成功用于化纤工业的高速永磁电动机和用于交流调速系统的 IUA3 系列永磁同步电动机. 与传统异步电机相比, 稀土  $\text{NdFeB}$  永磁同步电动机的优点在于:

(1) 明显的节电效果. 效率表示电机运行时有功功率的利用率; 而功率因数则表示电动机运行时的无功功率的利用率. 效率与功率因数的乘积综合反应了电动机在能量转换过程中的电能利用

的有效性,是衡量电动机能力水平高低的重要指标.永磁同步电动机用永磁体取代电励磁,且无励磁损耗;在同步运行时,转子绕组中无感应电流,就没有铜耗,由于定、转子同步,转子铁芯中也没有铁耗.因此,永磁同步电机的效率较电励磁同步电机和异步电机为高,而且不需要从电网吸取滞后的励磁电流,从而大大节约了无功,极大地提高了电机的功率因数.

(2) 稀土永磁 NdFeB 磁钢具有很高的磁能积,它的剩余磁感应强度  $B_r$ 、矫顽力  $H_c$  都较大,用较少的永磁磁钢就能产生足够的电机磁能积,因此电机体积、尺寸可以大为减小,成为高效率、高密度电机.

(3) 对于采用 NdFeB 的永磁同步电动机,转子上不需要电励磁装置,大大简化了转子结构,提高了电机运行的稳定性.

正因为 NdFeB 永磁材料具有如此优异的性能,因此它的问世被认为是稀土永磁材料研究的一次重大突破,是继计算机、数值计算、电力电子技术之后对电机学科的又一次冲击.一些著名学者认为,“第三代稀土永磁材料的问世必将引起电机领域的一场革命.”

稀土永磁电机的研究正引起国内外专家、学者的关注,但是,由于转子中引入了永磁体,使得电机的励磁特性发生了很大的变化,也给这种电机的分析、设计、研究提出了新的问题和课题.首先,稀土永磁电机的原理有别于传统交流电机,常规的设计理论和设计方法就需要补充、完善.换句话说,永磁电机的数学模型如何建立?由于电机本身的非线性,加之永磁体的工作点与饱和之间的相关性,产生了如何合理计及饱和对电机参数的影响的问题,而且又因为永磁体的放入,电机直、交轴的交叉影响又使得电机工作点发生偏移,这些影响最终将反映在电机的参数变化上.第二,由于永磁电机结构和励磁的特殊性,它的电磁参数的测取是正确分析、研究永磁电机的基础,因此,需要对常规电励磁电机测试方法进行修改和补充,以达到较精确测量永磁电机参数的目的.第三,永磁电机的起动过程是比较复杂的,由于转子上始终有发电制动转矩

存在,形成了起动过程中的阻转矩,合适的计算机数值仿真是解决此类问题的较佳途径.而采用随转子一起旋转的 $d, q, 0$ 坐标系统是非常适合同步电机数学模型的建立的.第四,80年代以来,随着电力电子技术的飞速发展,交流调速已经到了可以与直流调速相媲美的程度,并大有后来居上的趋势,而交流变频调速又是当前交流电机调速的主要发展方向.虽然永磁同步电动机具有以下优点:(1)电机转速与电源频率间始终保持准确的同步关系,控制电源频率就能控制电机的转速;(2)永磁同步电机具有较硬的机械特性,对于因负载变化而引起的电机转矩的扰动具有较强的承受能力;(3)由于永磁电动机转子上有永久磁铁作为励磁,电机可以在很低的转速下保持同步运行,调速范围宽;(4)一定范围内的开环调速,比交流异步电动机的闭环调速更具优越性.但永磁同步电动机及其调速系统也存在着电压、电流、磁通、转矩的“脉动”或“振荡”现象,都是亟需研究的问题.

## 0.2 国内外发展概况

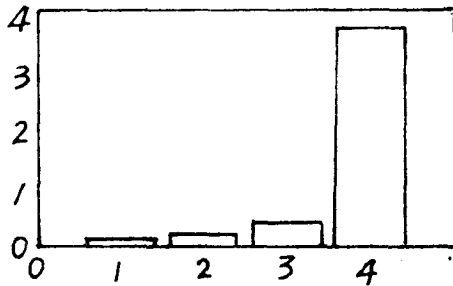
80年代前后,对应用NdFeB材料制造永磁同步电动机的研究发展很快.对于固定频率下永磁同步电动机的运行特性、自起动性能的研究<sup>[1-4]</sup>,有较多的文章.但也多局限于电机稳态特性的分析,沿用的办法与传统交流电机的分析方法相近.80年代期间,国际上发表了大量的论文,研究永磁同步电动机的数学模型、稳态特性、动态特性<sup>[5-10]</sup>.1986年,Tomy Sebastian发表了一篇永磁同步电动机(PMSM)建模的文章<sup>[11]</sup>.1987年,Tomy Sebastian又发表了一篇关于永磁同步电动机调速系统的动态建模的文章<sup>[12]</sup>,从理论上系统分析了永磁同步电动机利用PARK模型的随转子一起旋转的 $d, q, 0$ 系统,但仍将 $d, q$ 轴等效绕组作为两个无耦合、参数恒定的独立部分来处理.随着电力电子技术的发展,人们的注意力愈来愈集中于所谓的IPM(Interior Permanent Magnet Syn-

chronous Machine) 电机及其驱动系统. 实际上, 无论是何种结构的 PMSM, 若采用常规的  $d, q, 0$  系统的参数模型来计算、设计电机, 其结果与样机和实测值均有较大的误差. 对这一问题的看法, 除去工艺方面的因素之外, 就是对稀土永磁电机的数学建模尚欠准确, 对于 PMSM 中的非线性, 尤其是  $d, q$  轴间的交叉饱和、交叉耦合对电机参数的影响考虑不够. B. Sneyers 等最早提出了在分析 PMSM 数学模型时, 考虑到由电机电枢电流交轴分量引起的交叉耦合问题<sup>[13]</sup>, 其后也有一些文章出现<sup>[14-16]</sup>. 另一方面, 对于可自起动的 PMSM 的研究中, 电机转矩中复杂的成分以及对电机牵入同步和顺利起动的影响的研究, 也还需要进一步的探讨. 这方面, F. Parasiliti 等采用了有限元(FEM)法研究 PMSM 的模型, 同时计及交叉饱和、交叉耦合的影响修正电机模型, 被认为是较为理想的分析方法<sup>[17]</sup>. 而 F. M. Abedal-Kader 等采用非线性系统时域分析法研究 PMSM<sup>[18,19]</sup>. 从目前永磁电机的研究情况来看, 根据永磁电机的本身特性, 利用 CAD 技术和计算机数值仿真技术, 进一步对 PMSM 的数学模型、运行特性、电磁参数、起动性能进行研究, 对于 PMSM 的设计、理论分析和实际产品的推广都是十分有意义的和必要的. 这方面的工作有许多人在做, 也提出了一些有意义的、有关设计方面的见地<sup>[20,21]</sup>. 现代永磁电机的特点是高节能、大功率密度、转子奇异结构、由永磁而产生的新的变量. 这样的情况, 对于采用各种分析手段和技术(如电路、磁路、网络及场分析等)提供了方便, 其研究内容和前景应该是十分广阔的.

由于 PMSM 在性质上毕竟不同于常规电励磁电机, 因此, 准确地测试永磁电机的电磁参数就显得非常重要, 因为这是计算电机运行性能的关键. 国际上, 专题性的有关 PMSM 测试方面的文章并不是特别多, 需要理论结合实际, 找出一些比较理想的测试手段和测试方法. 仿照电励磁同步电动机的直流衰减法测试永磁电机的电磁参数是国际上比较好的方法.

国内从 80 年代起, 也加快了利用 NdFeB 永磁材料研制电机

的步伐,基本上是在学习、借鉴国外的先进知识和先进技术的基础上,通过摸索和样机制造、实验,得到一些宝贵的经验,并在永磁电机的理论分析、设计、制造、实验等方面取得了可喜的进展。如清华大学、西北工业大学、沈阳工业大学等单位,都是较早开展永磁电机研究的<sup>[22-24]</sup>。合肥工业大学从“七五”、“八五”到“九五”也开展了NdFeB永磁同步电动机的研究,取得了一些成绩<sup>[25-30]</sup>。我国是稀土大国,总储量占全世界的85%以上,如图0-1所示。



1-澳洲 2-欧洲 3-北美 4-中国

图0-1 稀土矿藏量

### 0.3 NdFeB 永磁同步电动机的结构特点及与异步电动机的性能比较

永磁同步电动机的定子结构与电励磁同步电机及交流异步电机没有什么不同,但是转子中由于引入了永磁体,其放置的形式就可以具有多样性。作为驱动用永磁同步电动机,永磁体的安放一般分为径向磁路式、切向磁路式、并联磁路式、聚磁磁路式四种,见图0-2。

上面四种结构中,径向式结构极间漏磁较少,因此电机转轴可以采用导磁轴,不需要特制隔磁套,工艺上也较简单;切向式结构

的转子每极磁通由两块磁钢截面共同提供,能得到较多的磁通,但

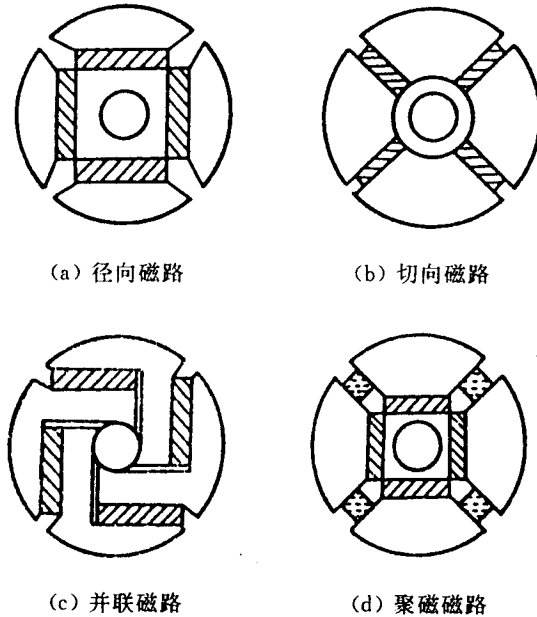


图 0—2 永磁同步电动机转子的常见结构

是转子轴必须采用非导磁材料,或采用普通电机轴而外加隔磁套(由非导磁材料制造),该结构转子为分片式,加工较复杂,工艺上要求高,但是电机可以得到较高的气隙磁密;并联式结构兼有切向式结构的特点,同时还可以有效利用转子空间;聚磁式结构包括主极和副极,主极径向磁化,提供绝大部分气隙磁通,副极部分切向磁化,提供少部分气隙磁通,还可以减小主极间的漏磁。作为可自起动的永磁同步电动机,转子上还必须要有鼠笼绕组,作为电机的起动绕组和阻尼绕组。图 0—3 为一台装配好的永磁同步电动机的转子(15kW 四极切向结构)。

前已述及,永磁同步电动机由于其表观指标(效率与功率因数的乘积)比传统异步电动机高出许多,而成为高节能电机。二者相

比,异步电动机效率、功率因数都较低,而永磁同步电动机由于转

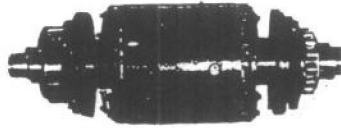


图 0-3 一台 15kW PMSM 的转子

子无励磁损耗,效率明显提高;永磁同步电动机气隙一般可以取得大一些,因此电机过载能力较强;由于永磁体磁性能好,电机的体积可以减小,功率密度增大,电机温升有所降低.表 1-1 为所研制成功的 FOYT53-6 型 NdFeB 永磁同步电动机与同容量异步电动机的性能比较.

表 0-1 FOYT53-6 永磁同步电动机、异步电动机性能比较

	容量 (W)	电流 (A)	功率因数	效率	起动电流 (A)	起动转矩 (倍数)	最大转矩 (倍数)
永磁型	800	1.40	0.94	0.91	7.2	2.8	4.3
异步型	800	1.88	0.77	0.84	13.16	2.2	2.3

从表中可见,这台 800W 的永磁电动机比同容量异步电动机效率提高了 7%,功率因数提高了 17%.而且从理论上讲,永磁同步电动机的功率因数可达 1.

NdFeB 永磁材料的最大磁能积,据有关报道,理论上可达  $525.4\text{kJ/m}^3$ ,目前实验室记录也达  $415.5\text{kJ/m}^3$ .这样高的磁能积,可以大大提高电机气隙磁密,从而减小电机的尺寸,减少电机的铜、铁用量.另外,从电机调速的角度看,永磁同步电机转子磁场与定子磁场同步,转速与电源频率之间有严格的对应关系,且永磁同步电机具有较硬的机械特性,在一定范围内实现“开环”调速比笼



型异步电动机更优异;而且由于永磁电机效率、功率因数都较高,也提高了整个系统的效率.除了驱动用永磁电机之外,专门用作控制用途的 IPM 电动机(如交流伺服、直流无刷、步进电机等)则由于体积小、重量轻、惯量小、易控制,更具有异步电动机无可比拟的优越性.

#### 0.4 驱动用稀土永磁同步电动机存在的问题

永磁同步电动机具有较高的磁能积,从而可以做到比异步电动机体积小、重量轻,而且由于机械特性较硬,做驱动用途的驱动用永磁同步电动机的研究一直受到人们的关注,其设计理论、数学模型及电机运行特性、动态特性的探讨和分析也远没有穷尽.与传统异步电机相比,永磁电机由于引入了永磁体,电机内磁场的分布与性质都发生了很大的变化,这种变化的结果是使人们从新的思路去建立永磁电机的等效数学模型,以正确分析由于永磁体的出现而使电机参数、性能、动态特性发生的、可能是交互影响的变化.比之异步电动机,显然永磁电动机中出现的所谓“非线性”、“奇异性”、“复杂性”要大得多,具体为:

(1) 电机中除了电励磁部分产生的饱和等现象之外,永磁励磁部分也同样会产生.显然电机气隙合成磁势是各分量的叠加,传统的计及饱和的方法遇到了挑战.

(2) 不同于电励磁电机,永磁体的引入使电机中磁场的分布起了较大的变化,而永磁体对外磁路的等效磁势事实上不是一成不变的,换句话说,永磁体的工作点是在随不同运行情况的变化而发生变化的.选用合适的模拟、计算模型是能否正确等效电机分析模型的关键,也是设计成功与否的核心.

(3) 传统的  $d, q$  模型是分析同步电机的较好方法,对永磁电机来说,如何在 PARK 变换本身是一种线性变换的前提下,充分计及  $d, q$  轴的交叉饱和、交叉耦合现象,提出新的状态变量、系统