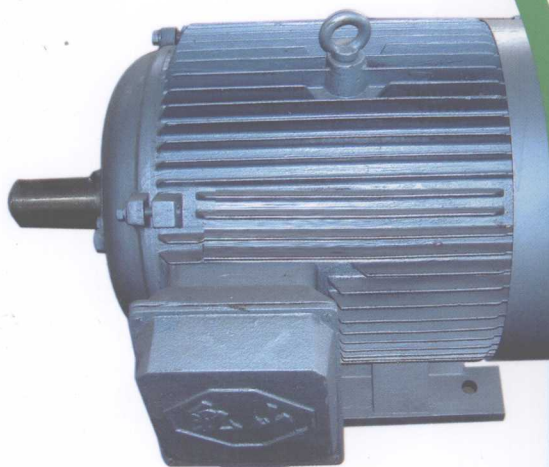


异步起动 永磁同步 电动机

——理论、 设计与测试

王秀和 杨玉波 朱常青 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

异步起动永磁同步电动机 ——理论、设计与测试

王秀和 杨玉波 朱常青 编著



机械工业出版社

本书内容主要涵盖异步起动永磁同步电动机的工作原理、磁路结构、磁路计算、电磁关系、性能计算、电磁设计和测试等，全书力求贯彻理论与实际相结合的原则，既阐明其基本原理和基本理论，又给出性能分析与设计的具体方法，并反映其新技术和实际动态。

本书既可供从事永磁电机研究、设计、生产和使用的科研人员、工程技术人员、科技管理人员使用，也可作为高等学校的研究生教材，以及继续教育方面的教科书。

图书在版编目 (CIP) 数据

异步起动永磁同步电动机——理论、设计与测试/王秀和，杨玉波，朱常青编著. —北京：机械工业出版社，2009.7

ISBN 978-7-111-27340-0

I. 异… II. ①王…②杨…③朱… III. 永磁式电机：同步电动机

IV. TM351

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 086219 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：付承柱 责任校对：张晓蓉

封面设计：马精明 责任印制：洪汉军

三河市宏达印刷有限公司印刷

2009 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·14.25 印张·260 千字

001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-27340-0

定价：33.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：(010) 68326294

购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：(010) 88379764

封面无防伪标均为盗版

前 言

异步起动永磁同步电动机具有功率密度高、效率高、功率因数高和经济运行范围宽的特点，在高效节能场合的应用日益广泛。在电磁结构、工作原理和实际应用等方面，异步起动永磁同步电动机比三相感应电动机要复杂得多。作者在先前出版的《永磁电机》一书中涉及了异步起动永磁同步电动机，但由于受章节限制，主要介绍了其原理和电磁关系，而电磁计算和设计方面的内容很少。鉴于异步起动永磁同步电动机的应用日益广泛，有必要对其性能分析方法、电磁设计方法和测试方法等进行深入阐述，为从事该类电动机研究、设计和制造的技术人员提供一本系统、实用的参考书，因此编写了本书。

全书共分七章，第一章介绍了异步起动永磁同步电动机的基本结构、特点和应用场合；第二章阐述了异步起动永磁同步电动机的磁路结构、等效磁路、磁路计算和漏磁系数计算方法；第三章分析了异步起动永磁同步电动机的工作原理和电磁关系，包括磁场分析、相量图、功角特性、运行特性、仿真分析、牵入同步过程与牵入同步判据等；第四章介绍了异步起动永磁同步电动机的分析计算方法，包括参数计算、损耗计算、工作特性计算、起动性能计算等，并给出了提高其性能的方法，研究了使用条件对其性能的影响；第五章阐述了异步起动永磁同步电动机的电磁设计方法；第六章给出了异步起动永磁同步电动机的电磁计算程序和计算实例；第七章介绍了异步起动永磁同步电动机的参数和性能测试方法。

本书由王秀和、杨玉波和朱常青共同编写，全书由王秀和负责定稿。

在本书的编写过程中，参考了有关文献，在此对本书所参考的期刊、书籍和标准等内容的作者表示由衷的感谢，同时感谢山东大学电机电器研究所各位同事所给予的支持和帮助。

由于作者水平有限，书中难免存在错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

作者

2009年3月

目 录

前言

| | |
|---------------------------------------|----|
| 第一章 概论 | 1 |
| 第一节 异步起动永磁同步电动机概论 | 1 |
| 一、高效电动机的发展 | 1 |
| 二、异步起动永磁同步电动机 | 4 |
| 三、异步起动永磁同步电动机研究与开发的意义 | 5 |
| 第二节 异步起动永磁同步电动机的结构 | 6 |
| 一、定子 | 6 |
| 二、转子 | 7 |
| 第三节 异步起动永磁同步电动机的特点和应用 | 8 |
| 一、特点 | 8 |
| 二、应用场合 | 9 |
| 第四节 异步起动永磁同步电动机的额定值和技术要求 | 10 |
| 一、额定值 | 10 |
| 二、技术要求 | 11 |
| | |
| 第二章 异步起动永磁同步电动机的磁路结构与计算 | 14 |
| 第一节 磁场的基本概念与定理 | 14 |
| 一、磁场的基本概念 | 14 |
| 二、安培环路定律 | 14 |
| 三、磁路和磁路的欧姆定律 | 15 |
| 第二节 钕铁硼永磁材料及其特性 | 16 |
| 一、永磁材料的发展 | 16 |
| 二、永磁材料的特性曲线与性能参数 | 18 |
| 三、钕铁硼永磁材料的性能特点 | 21 |
| 第三节 异步起动永磁同步电动机的转子磁路结构 | 24 |
| 一、并联式磁路结构 | 24 |
| 二、串联式磁路结构 | 25 |
| 三、混合式磁路结构 | 26 |
| 四、隔磁措施 | 26 |
| 第四节 异步起动永磁同步电动机的等效磁路 | 27 |
| 一、永磁体的等效磁路 | 28 |
| 二、外磁路的等效磁路 | 29 |

| | |
|--|-----------|
| 三、永磁同步电动机的等效磁路 | 30 |
| 第五节 异步起动永磁同步电动机的主磁路计算 | 30 |
| 一、气隙磁压降的计算 | 31 |
| 二、定子齿部磁压降的计算 | 34 |
| 三、定子轭部磁压降的计算 | 35 |
| 四、转子齿部和轭部磁压降的计算 | 35 |
| 第六节 永磁体工作点的图解法 | 44 |
| 第七节 永磁体工作点的解析法 | 46 |
| 一、磁路计算中基值的选取 | 46 |
| 二、标么值的计算 | 46 |
| 三、基于标么值的磁路解析计算 | 48 |
| 第八节 空载漏磁系数及其计算 | 49 |
| 一、空载漏磁系数 | 49 |
| 二、空载漏磁系数的解析计算 | 50 |
| 第三章 异步起动永磁同步电动机的工作原理与电磁关系 | 56 |
| 第一节 异步起动永磁同步电动机的工作原理 | 56 |
| 一、旋转磁场的产生 | 56 |
| 二、起动与运行 | 57 |
| 第二节 异步起动永磁同步电动机的磁场分析 | 57 |
| 一、空载磁场 | 58 |
| 二、电枢反应磁场 | 60 |
| 第三节 永磁同步电动机的电压方程和相量图 | 64 |
| 一、基于双反应理论的电枢反应磁场分析 | 64 |
| 二、感应电动势 | 67 |
| 三、电压方程 | 68 |
| 四、相量图 | 68 |
| 第四节 永磁同步电动机的功率方程、转矩方程和功角特性 | 70 |
| 一、功率方程 | 70 |
| 二、电磁功率与功角特性 | 71 |
| 第五节 永磁同步电动机的运行特性 | 73 |
| 一、工作特性 | 73 |
| 二、V形曲线 | 74 |
| 第六节 起动过程的仿真与不对称运行分析 | 77 |
| 一、异步起动永磁同步电动机的仿真模型 | 77 |
| 二、不对称电压供电时的仿真研究 | 82 |
| 第七节 起动过程的转矩分析 | 86 |
| 一、基于状态方程的起动过程分析 | 87 |

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| 二、基于磁场的起动过程转矩分析 | 88 |
| 第八节 永磁同步电动机的牵入同步过程与牵入同步判据 | 91 |
| 一、牵入同步过程分析 | 91 |
| 二、牵入同步判据 | 94 |
| 第四章 异步起动永磁同步电动机的性能分析与计算 | 96 |
| 第一节 绕组参数的计算 | 96 |
| 一、电阻的计算 | 96 |
| 二、电抗的计算 | 100 |
| 第二节 损耗与效率计算 | 108 |
| 一、铁耗 | 109 |
| 二、电枢绕组铜耗 | 111 |
| 三、杂散损耗 | 112 |
| 四、机械损耗 | 112 |
| 五、效率 | 114 |
| 第三节 工作特性的计算 | 114 |
| 第四节 关于转矩参数的分析 | 115 |
| 一、最小转矩 | 115 |
| 二、起动转矩 | 118 |
| 三、牵入转矩 | 120 |
| 四、失步转矩 | 122 |
| 第五节 起动性能的计算 | 123 |
| 一、起动时的漏磁路饱和效应及其对漏抗的影响 | 123 |
| 二、起动时转子导条的集肤效应及其对漏抗的影响 | 125 |
| 三、起动性能的计算 | 129 |
| 第六节 提高永磁同步电动机性能的方法 | 130 |
| 一、提高功率因数的方法 | 130 |
| 二、提高效率、扩大经济运行范围的方法 | 131 |
| 第七节 使用条件对永磁同步电动机性能的影响 | 132 |
| 一、对起动性能的影响 | 132 |
| 二、对空载性能的影响 | 135 |
| 三、对额定负载性能的影响 | 136 |
| 四、对失步转矩的影响 | 137 |
| 五、小结 | 137 |
| 第八节 永磁体性能分散性对永磁同步电动机性能的影响 | 138 |
| 一、对起动性能的影响 | 139 |
| 二、对空载性能的影响 | 139 |
| 三、对额定负载性能的影响 | 139 |

| | |
|--|------------|
| 四、对失步转矩的影响 | 140 |
| 五、小结 | 140 |
| 第五章 异步起动永磁同步电动机的电磁设计 | 142 |
| 第一节 永磁同步电动机主要尺寸的确定 | 142 |
| 一、主要尺寸关系式 | 142 |
| 二、电磁负荷的选择 | 143 |
| 三、主要尺寸比的选择 | 144 |
| 四、主要尺寸的一般确定方法 | 145 |
| 五、工程实际中的主要尺寸确定方法 | 146 |
| 六、气隙长度的确定 | 146 |
| 第二节 定子铁心的设计 | 147 |
| 一、定子槽数的确定 | 147 |
| 二、槽形的选择 | 148 |
| 三、槽形尺寸的确定 | 149 |
| 第三节 定子绕组的设计 | 150 |
| 一、绕组的种类及其适用场合 | 150 |
| 二、线圈节距的选择 | 154 |
| 三、线圈匝数的确定 | 155 |
| 四、线规的确定 | 155 |
| 第四节 转子绕组与转子铁心的设计 | 156 |
| 一、定转子槽配合 | 156 |
| 二、转子槽形尺寸与转子绕组设计 | 158 |
| 第五节 永磁体的设计 | 159 |
| 一、永磁体充磁方向长度 | 159 |
| 二、每极永磁体的总宽度 | 161 |
| 第六章 异步起动永磁同步电动机的计算程序与计算算例 | 162 |
| 一、额定数据和技术要求 | 162 |
| 二、主要尺寸 | 163 |
| 三、永磁体计算 | 163 |
| 四、定、转子冲片 | 164 |
| 五、绕组计算 | 168 |
| 六、磁路计算 | 170 |
| 七、参数计算 | 175 |
| 八、工作特性计算 | 179 |
| 九、起动性能计算 | 184 |

| | |
|------------------------------------|-----|
| 第七章 异步起动永磁同步电动机的测试 | 189 |
| 第一节 永磁同步电动机空载性能的测试 | 189 |
| 一、空载电动势的测量 | 189 |
| 二、空载电流和空载损耗的测量 | 189 |
| 第二节 永磁同步电动机的参数测量 | 190 |
| 一、稳态参数测量的直接负载法 | 190 |
| 二、稳态参数测量的简化负载法 | 193 |
| 三、稳态参数测量的电压积分法 | 194 |
| 四、稳态和瞬态参数测量的直流衰减法 | 196 |
| 第三节 永磁同步电动机工作特性的测试 | 197 |
| 第四节 永磁同步电动机转矩-转速曲线的测量 | 198 |
| 一、基于单片机的智能化转矩-转速测试系统 | 198 |
| 二、基于虚拟仪器的转矩-转速测试系统 | 200 |
| 三、转矩-转速特性曲线和转矩值的测试 | 201 |
| 四、永磁同步电动机牵入同步能力的测试 | 202 |
| 五、失步转矩的测试 | 203 |
| 附录 | 204 |
| 附录 A 漆包圆铜（铝）线规格表 | 204 |
| 附录 B 导磁材料磁化曲线和损耗曲线图表 | 205 |
| 参考文献 | 219 |

第一章 概 论

第一节 异步起动永磁同步电动机概论

一、高效电动机的发展

在工农业生产和日常生活中，三相感应电动机得到了广泛采用。三相感应电动机的主要特点是：①结构简单、制造方便、价格低廉、运行可靠；②转速与电源频率之间没有严格的固定关系，转速随负载变化，但变化范围不大；③从电网吸收滞后的无功功率，功率因数总是滞后的；④效率和功率因数随负载变化大，轻载时，效率和功率因数低，经济运行范围不宽。

在 1960 ~ 1975 年期间，世界上主要国家在设计电动机时，优先考虑降低成本，在满足性能要求的前提下，使有效材料用量最少，效率保持在能满足电动机温升要求的水平上。20 世纪 70 年代出现了两次世界性能源危机，使发达国家认识到节约能源的重要性。美国在 20 世纪 80 年代制定了高效电机能效标准，能够达到该标准的电机即为高效电机，用户购买这种高效电机时可得到补贴，补贴数额为每马力 10 ~ 20 美元，正好是高效电机与普通电机的差价。这一政策促进了高效电机的生产和推广，到 1990 年，在美国销售的中小型电机中，已有 20% ~ 30% 达到了该能效标准的要求。

进入 20 世纪 90 年代，环境问题又成为困扰世界经济可持续发展的问题，现代工业的发展依赖于大量的能源消耗，所带来的环境污染降低了人们的生活品质，继续以加大能源消耗为代价发展经济是不可取的，但简单地限制能源的使用量也不现实。解决这一问题的唯一途径是提高能源利用率。美国国会于 1992 年 10 月 24 日通过了《能源政策法案》（即 EPACT），规定：1997 年 10 月 24 日后只允许生产高效电动机，2002 年 10 月 10 日后生产更高效电动机，2007 年 10 月后生产技术上达到极限、经济上可行的最高效率电动机。欧洲的 CEMEP-EU 协议、加拿大的能源法 EEACT、墨西哥的 NOM-016-ENER-2003 标准、澳大利亚的 MEPS 计划等，都对电动机的效率水平进行了严格规定。我国在这方面起步较晚，目前正在制订相当于美国超高效率水平的电动机能效标准，并准备在

“十一五”期间逐步实施。

尽管高效电机的制造成本增加，价格有较大幅度提高，但对于长期运行的场合，高效电机能为用户节约更多的电费，且电机发热少、寿命长，使电机在寿命周期内的总成本下降。为此，发达国家的电机生产厂商纷纷推出自己的高效电机。

加入 WTO 后，我国电机制造行业面临着国际社会的巨大竞争和挑战。从国际和国内发展趋势来看，开发高效电机是非常有必要的，这也是我国电机产品赶超国际先进水平和推进行业技术进步的需要。目前我国各类电动机的总容量约为 4.2 亿 kW，用电量约占全国用电总量的 60%，80% 以上电机产品的效率比国外先进水平低 2% ~ 3%，具有很大的节能潜力。国家发改委在《节能中长期专项规划》中将电机系统节能工程列为十大节能重点工程之一，要重点推广高效节能电动机产品，使运行效率提高 2%，年节电 200 亿 kW · h。我国已于 2002 年初颁布了电动机能效标准，并于 2002 年 8 月 1 日起正式实施。目前国内主要有 Y 和 Y2 两个低压感应电动机系列在生产和使用。Y 系列是 20 世纪 80 年代初全国统一设计的产品。20 世纪 90 年代，为了进一步提高低压三相感应电动机在国际市场上的竞争力，更好地满足国内外用户的需要，组织开发了 Y2 系列三相感应电动机。在设计 Y2 系列的同时，还设计了 Y2-E 系列，可用于负载率较高和运行时间较长的场合。

表 1-1 列出了我国 Y 系列、Y2 系列、Y2-E 系列，德国西门子公司 1LA 系列，德国 ABB 公司 QU 系列等产品的效率平均值，以及欧洲 CEMEP-EU 协议所规定的 eff_1 、 eff_2 最低指标平均值和美国 EPACT 指标的平均值，包括 2 极和 4 极、功率为 1.1 ~ 90kW 的产品^[1]。此外，表中还列出了美国全国电气制造商协会 (NEMA) E 设计和 NEMA 超高效率电动机 (NEMA Premium) 的效率指标平均值，其中 IEEE841—2000 为美国石油化工行业重负载下电动机标准的效率平均值。从表中数据可见，Y 系列、1LA 系列、QU 系列产品均达到欧盟 eff_2 最低指标平均值的要求，但仍低于欧盟高效率 eff_1 最低指标和美国 EPACT 指标 2 ~ 3 个百分点，比 NEMA Premium 低 4 个多百分点，而 Y2 系列电动机的效率更低。

由于缺乏相应的法规，我国高效电动机的产量和市场容量都较小，1998 年的高效电动机主要是出口美国的符合 NEMA 标准的电动机，产量比例还不到 2%。1999 年高效电动机市场占有率为 2%，2000 年为 4.7%，2001 年也只有 6.5%，其中 70% 以上出口，用于中国市场的高效电动机产品很少。因此，我国在高效感应电动机的开发和应用方面远落后于国际先进水平。表 1-2 和表

1-3 为美国超高效率电动机的效率标准, 表 1-4 为目前我国电动机的能效限定值^[2]。

表 1-1 国产感应电动机与国外同类系列产品的平均效率对比

| 系列 | Y | Y2 | Y2-E | 西门子 | ABB | 欧盟 eff2 | 欧盟 eff1 | 美国 EPACT | 美国 NEMA Premium | 美国 NEMA E | 美国 IEEE 841—2000 |
|-------|------|------|------|------|------|------------|------------|-------------|--------------------|--------------|---------------------|
| 效率(%) | 87.3 | 86.3 | 87.9 | 86.5 | 87.3 | 86.4 | 89.1 | 90.3 | 91.7 | 92.2 | 91.1 |

表 1-2 超高效率电动机的效率标准 (电压 600V 及以下, 散嵌绕组)

| 功率/hp | 开启防滴式电动机 | | | 全封闭扇冷式电动机 | | |
|-------|----------|------|------|-----------|------|------|
| | 6 极 | 4 极 | 2 极 | 6 极 | 4 极 | 2 极 |
| 1 | 82.5 | 85.5 | 77.0 | 82.5 | 85.5 | 77.0 |
| 1.5 | 86.5 | 86.5 | 84.0 | 87.5 | 86.5 | 84.0 |
| 2 | 87.5 | 86.5 | 85.5 | 88.5 | 86.5 | 85.5 |
| 3 | 88.5 | 89.5 | 85.5 | 89.5 | 89.5 | 86.5 |
| 5 | 89.5 | 89.5 | 86.5 | 89.5 | 89.5 | 88.5 |
| 7.5 | 90.2 | 91.0 | 88.5 | 91.0 | 91.7 | 89.5 |
| 10 | 91.7 | 91.7 | 89.5 | 91.0 | 91.7 | 90.2 |
| 15 | 91.7 | 93.0 | 90.2 | 91.7 | 92.4 | 91.0 |
| 20 | 92.4 | 93.0 | 91.0 | 91.7 | 93.0 | 91.0 |
| 25 | 93.0 | 93.6 | 91.7 | 93.0 | 93.6 | 91.7 |
| 30 | 93.6 | 94.1 | 91.7 | 93.0 | 93.6 | 91.7 |
| 40 | 94.1 | 94.1 | 92.4 | 94.1 | 94.1 | 92.4 |
| 50 | 94.1 | 94.5 | 93.0 | 94.1 | 94.5 | 93.0 |
| 60 | 94.5 | 95.0 | 93.6 | 94.5 | 95.0 | 93.6 |
| 75 | 94.5 | 95.0 | 93.6 | 94.5 | 95.4 | 93.6 |
| 100 | 95.0 | 95.4 | 93.6 | 95.0 | 95.4 | 94.1 |
| 125 | 95.0 | 95.4 | 94.1 | 95.0 | 95.4 | 95.0 |
| 150 | 95.4 | 95.8 | 94.1 | 95.8 | 95.8 | 95.0 |
| 200 | 95.4 | 95.8 | 95.0 | 95.8 | 96.2 | 95.4 |
| 250 | 95.4 | 95.8 | 95.0 | 95.8 | 96.2 | 95.8 |
| 300 | 95.4 | 95.8 | 95.4 | 95.8 | 96.2 | 95.8 |
| 350 | 95.4 | 95.8 | 95.4 | 95.8 | 96.2 | 95.8 |
| 400 | 95.8 | 95.8 | 95.8 | 95.8 | 96.2 | 95.8 |
| 450 | 96.2 | 96.2 | 95.8 | 95.8 | 96.2 | 95.8 |
| 500 | 96.2 | 96.2 | 95.8 | 95.8 | 96.2 | 95.8 |

表 1-3 超高效率电动机的效率标准 (电压 5kV 及以下, 成型绕组)

| 功率/hp | 开启防滴式电动机 | | | 全封闭扇冷式电动机 | | |
|-------|----------|------|------|-----------|------|------|
| | 6 极 | 4 极 | 2 极 | 6 极 | 4 极 | 2 极 |
| 250 | 95.0 | 95.0 | 94.5 | 95.0 | 95.0 | 95.0 |
| 300 | 95.0 | 95.0 | 94.5 | 95.0 | 95.0 | 95.0 |
| 350 | 95.0 | 95.0 | 94.5 | 95.0 | 95.0 | 95.0 |
| 400 | 95.0 | 95.0 | 94.5 | 95.0 | 95.0 | 95.0 |
| 450 | 95.0 | 95.0 | 94.5 | 95.0 | 95.0 | 95.0 |
| 500 | 95.0 | 95.0 | 94.5 | 95.0 | 95.0 | 95.0 |



表 1-4 我国电动机能效限定值 (GB 18613—2002)

| 功率/kW | 效率(%) | | | 功率/kW | 效率(%) | | |
|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|
| | 2极 | 4极 | 6极 | | 2极 | 4极 | 6极 |
| 0.55 | — | 71.0 | 65.0 | 30 | 91.4 | 91.4 | 91.5 |
| 0.75 | 75.0 | 73.0 | 69.0 | 37 | 92.0 | 92.0 | 92.0 |
| 1.1 | 76.2 | 76.2 | 72.0 | 45 | 92.5 | 92.5 | 92.5 |
| 1.5 | 78.5 | 78.5 | 76.0 | 55 | 93.0 | 93.0 | 92.8 |
| 2.2 | 81.0 | 81.0 | 79.0 | 75 | 93.6 | 93.6 | 93.5 |
| 3 | 82.6 | 82.6 | 81.0 | 90 | 93.9 | 93.9 | 93.8 |
| 4 | 84.2 | 84.2 | 82.0 | 110 | 94.0 | 94.5 | 94.0 |
| 5.5 | 85.7 | 85.7 | 84.0 | 132 | 94.5 | 94.8 | 94.2 |
| 7.5 | 87.0 | 87.0 | 86.0 | 160 | 94.6 | 94.9 | 94.5 |
| 11 | 88.4 | 88.4 | 87.5 | 200 | 94.8 | 94.9 | 94.5 |
| 15 | 89.4 | 89.4 | 89.0 | 250 | 95.2 | 95.2 | 94.5 |
| 18.5 | 90.0 | 90.0 | 90.0 | 315 | 95.4 | 95.2 | — |
| 22 | 90.5 | 90.5 | 90.0 | | | | |

二、异步起动永磁同步电动机

简单地讲,异步起动永磁同步电动机就是在三相感应电动机的转子铁心内放置永磁体,依靠笼型转子绕组产生的异步转矩实现起动。正常运行时,由转子永磁磁极与定子绕组产生的旋转磁场相互作用,产生恒定转矩,电动机的转速为同步转速,此时转子笼型绕组不再起作用。与三相感应电动机相比,异步起动永磁同步电动机的突出优点是高效率、高功率因数和宽的经济运行范围。

在国外,由于稀土永磁的价格较高,高效电动机的开发主要围绕感应电动机进行,采取的措施是用高性能材料、多用材料(约比普通电动机多20%~30%)和提高加工工艺。由于国产材料的性能、工艺水平与国外相比都有较大差距,短期内感应电动机的效率难以达到国际先进水平。

我国是稀土大国,稀土资源丰富,稀土永磁产量居世界首位,且国内售价较低(约200~300元/kg),利用钕铁硼永磁材料开发高效永磁同步电动机,其效率可超过美国最高效率电动机的效率水平。以15kW、4极电动机为例,永磁同步电动机的效率高达93.5%~94%,Y系列感应电动机为88.5%,美国高效电动机为89.5%,最高效率电动机为93%,且永磁同步电动机的效率随负载变化较小,功率因数高,极具竞争力和应用前景。

三、异步起动永磁同步电动机研究与开发的意义

异步起动永磁同步电动机具有高效节能的特点，其研究与开发具有以下重要意义：

(1) 节约能源，缓解能源紧张局面

当前世界面临的首要问题是能源问题。2000 年全球一次能源的总消耗量折合为 91 亿吨标准油，预计 2010 年达到 116 亿吨标准油。原油的价格不断上涨，节约能源迫在眉睫。

电能是比较昂贵的能源，节电是节能的重要内容之一。电机是国民经济各行业广泛使用的电气设备，使用量大，运行时间长，是节能的重点。我国电动机保有量达 4 亿 kW 以上，所使用的电能占总发电量的 60% 以上，其中风机、泵的配套电动机占总量的 55%，年使用电能占总发电量的 40%。目前风机、泵用电动机的电能利用率较低，实际运行效率不到 50%，系统运行效率不到 30%，每年浪费电能大约 200 亿 kW·h。稀土永磁电动机的平均节电率高达 10%，某些专用电动机的节电率高达 15%~20%，具有显著的节能效果。

我国 2007 年实际发电量为 32559 亿 kW·h，假设 50% 的电能被电动机使用且电动机效率平均提高 2%，则每年可节约 325.6 亿 kW·h 的电能，相当于三个 1000MW 发电厂的年发电量，节能效果非常明显。在发达国家，预计通过高效节能电动机和高效的电动机控制可以节能 20%，非常可观。

(2) 保障国家经济安全

预计 2050 年我国的能源自我供给量为 3~3.7Gt 标准煤，而需求量则超过 10Gt，能源严重短缺，对进口能源依赖很大，将制约我国经济的发展，直接关系到我国的经济安全。我国的能源利用率低，每万美元 GDP 需消耗标准煤 18.5t，而美国为 4.8t、英国为 3t、德国为 2.7t、日本为 2.3t。因此开发高效节能的永磁电动机，提高能源的利用率，具有重要意义。

(3) 保护环境

我国的电能以火电为主。火力发电过程中产生的 CO₂ 等气体是造成地球温室效应的主要原因，给气候和环境带来很大影响。永磁电动机可以节约电能，相应地减少了火力发电产生的温室效应气体和环境污染。

(4) 占有国际市场

电动机效率是一项非贸易性壁垒，发达国家制定了严格的电动机效率标准，我国电动机的效率较低，对电动机产品以及所配套机电产品出口的影响正

日益凸现，要提高产品的竞争力、占据国际市场，必须大力发展高效节能电动机。

第二节 异步起动永磁同步电动机的结构

图 1-1 为一台异步起动永磁同步电动机的外形，图 1-2 为其结构示意图。与其它种类的旋转电机一样，异步起动永磁同步电动机主要由静止的定子和转动的转子两大部分组成，定、转子之间有一个很小的空气隙。

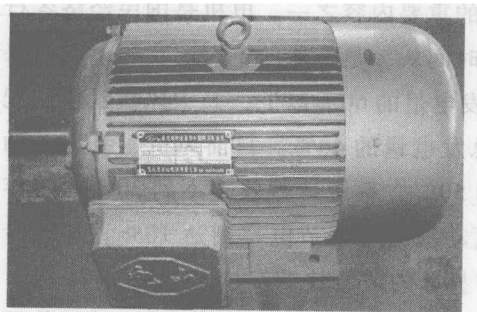


图 1-1 异步起动永磁同步电动机的外形

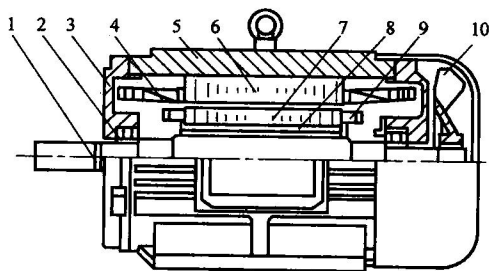


图 1-2 异步起动永磁同步电动机的结构示意图

- 1—转轴 2—轴承 3—端盖 4—定子绕组
5—机座 6—定子铁心 7—转子铁心
8—永磁体 9—笼型绕组 10—风扇

一、定子

异步起动永磁同步电动机的定子如图 1-3 所示，由定子铁心、定子绕组和机座等三部分组成。机座主要用以支撑定子铁心和固定端盖，因此要有足够的机械强度和刚度。小型异步起动永磁同步电动机的机座一般采用铸铁制成。

定子铁心是主磁路的一部分，为减小磁场在定子铁心中产生的损耗，铁心由 0.5mm 厚的硅钢片叠压而成，在定子铁心内圆上有均匀分布的槽，用来嵌放定子绕组。定子槽形通常采用图 1-4 所示的半闭口槽，其中梨形槽的槽利用率高、冲模寿命长、槽绝缘的弯曲程度较小而不易损伤，故应用广泛。

定子绕组是电机的电路部分，通常由铜线绕制而成，三相绕组对称地放置在定子槽内，绕组分单层绕组和双层绕组两种，绕组与铁心之间有槽绝缘，双层绕组的上下两层导体之间有层间绝缘。三相定子绕组可接成星形接法或三角形接

法，为减小杂散损耗，通常采用星形接法和双层短距绕组（功率小的电动机采用单层绕组）。

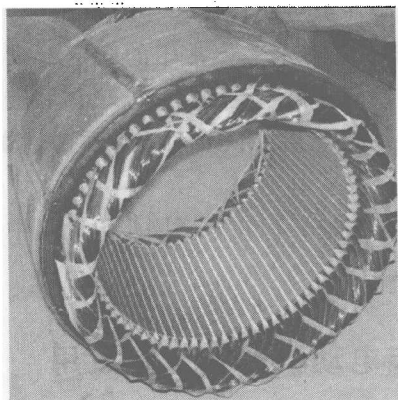


图 1-3 异步起动永磁同步电动机的定子

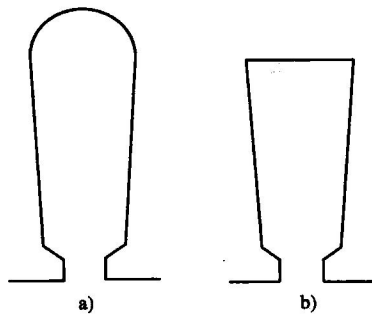


图 1-4 定子槽形

a) 梨形槽 b) 梯形槽

二、转子

异步起动永磁同步电动机的转子如图 1-5 所示，由转子铁心、转子绕组和轴等组成。

转子铁心是电机磁路的一部分，由厚 0.5mm 的硅钢片叠成。转子铁心固定在转轴上，呈圆柱形，在铁心外圆冲有均匀分布的槽（通常采用半闭口槽）。转子绕组是电路的一部分，一般为笼型。图 1-6 为某一电动机的转子冲片。

根据加工工艺的不同，笼型转子分为焊接式和铸铝式两种。焊接式转子绕组的加工过程是：在每槽内放置铜导条，在转子铁心两端各放置一个端环，铜导条的两端分别焊接在端环上。为节省铜材，转子绕组的材料通常采用铝，采用离心

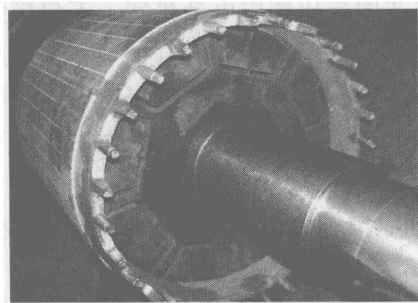


图 1-5 转子

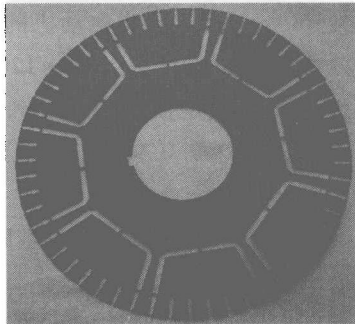


图 1-6 转子冲片

铸铝或压力铸铝工艺，将熔化的铝注入转子槽内，导条、端环和风扇在同一工序中铸出，称为铸铝式转子。铸铝式转子具有结构简单、制造方便的特点，应用非常广泛。永磁铸铝转子的加工过程如下：铁心冲剪→铁心叠压→套假轴→转子铸铝→套轴→转子加工→将永磁体从铁心端部放入。永磁体常用的固定方式有两种：一是在永磁体上涂树脂，然后插入转子铁心，树脂凝固后将永磁体和转子铁心固定在一起；二是先将永磁体插入转子铁心，然后在铁心两端加非磁性端环，端环固定在转子铁心上。

需要注意的是，感应电动机中常采用转子斜槽，但在永磁同步电动机中，由于受永磁体放置的限制，通常采用定子斜槽。

第三节 异步起动永磁同步电动机的特点和应用

一、特点

与三相感应电动机相比，异步起动永磁同步电动机具有以下特点：

- 转速恒定，为同步转速；
- 功率因数高。通过合理设计，可以使其工作在滞后功率因数、单位功率因数和超前功率因数；
- 体积小、重量轻。采取合适的磁极结构，可以提高气隙磁通密度（以下简称磁密）、减小电动机体积；
- 效率高。正常运行时转子无绕组损耗，高功率因数使得定子电流较小，定子绕组损耗较小，因而永磁同步电动机的效率比感应电动机高，这在小功率电动机中体现得尤为明显；
- 具有宽的经济运行范围。感应电动机的经济运行范围一般为额定负载的60%~100%。永磁同步电动机的经济运行范围远比感应电动机宽，不仅额定负载时效率较高，而且在25%~120%额定负载的范围内都有较高的效率，而感应电动机在35%额定负载附近效率迅速下降。永磁同步电动机在25%额定负载时功率因数仍可达到0.9以上，而感应电动机从额定负载时的0.85左右迅速下降到0.5以下；
- 成本较高。目前小型永磁同步电动机通常采用高性能的钕铁硼永磁材料，制造成本较高；
- 可靠性较低。钕铁硼永磁材料在高温环境下易退磁，使电动机可靠性变差。随着耐高温钕铁硼永磁材料的出现，这种状况已有很大改善，只要设计和使