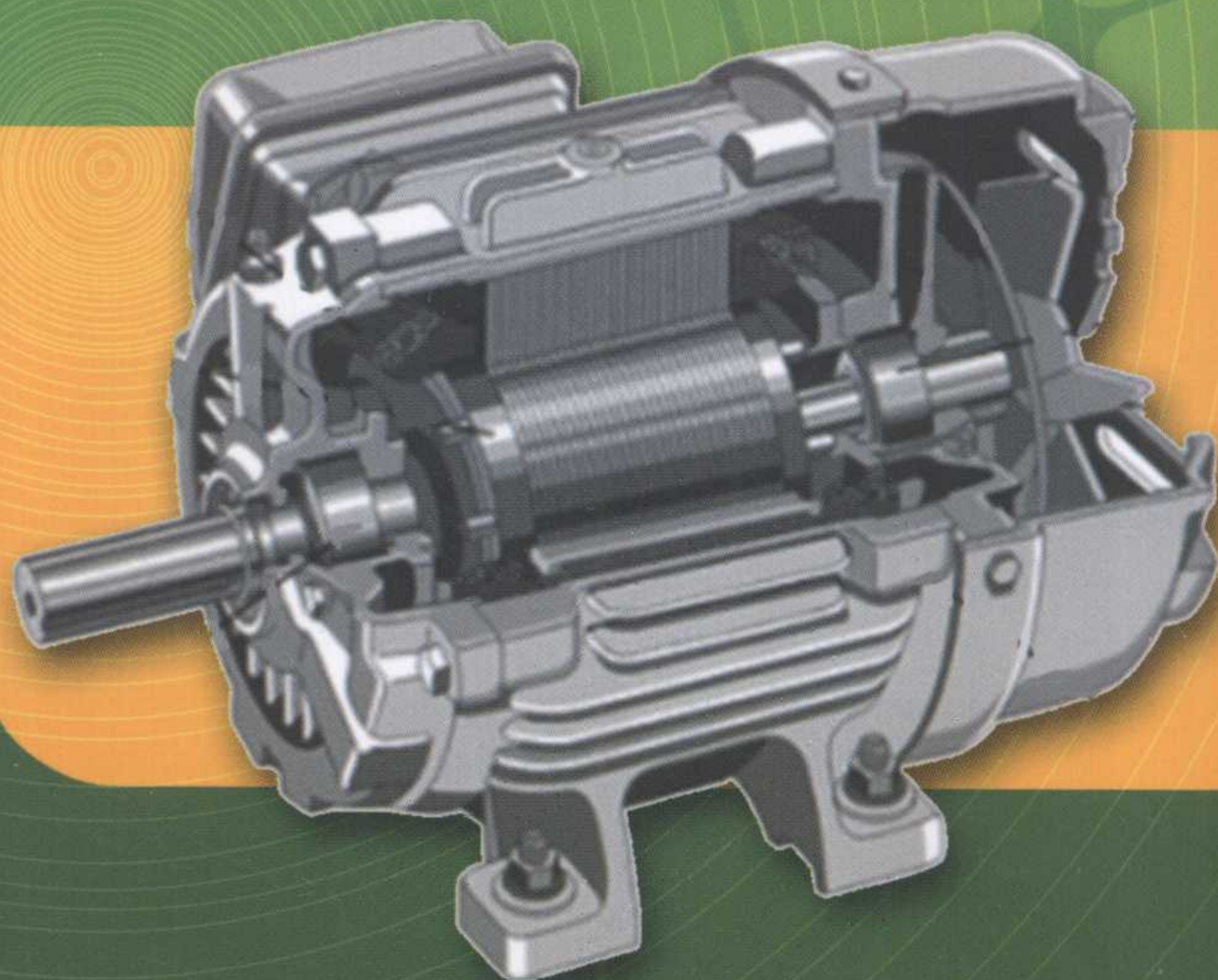


智能制造与装备制造业转型升级丛书
MADE IN CHINA

永磁电动机机理、 设计及应用

YONGCI DIANDONGJI JILI SHEJI JI YINGYONG

苏绍禹 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

智能制造与装备制造业转型升级丛书

永磁电动机机理、 设计及应用

苏绍禹 著



机械工业出版社

永磁体磁极对外做功不消耗其自身的磁能,因而被广泛应用在永磁发电机和永磁电动机中做定子或转子磁极。永磁发电机和永磁电动机与常规电励磁发电机和电动机相比,具有结构简单、体积小、重量轻、效率高、温升高、噪声小、维护方便等特点,从而被广泛地应用在航天、航空、汽车、舰船、工业自动化、医疗器械、家电等诸多领域。

本书在理论和实践的基础上,给出永磁体磁极极面及两极面之间的距离与永磁体磁感应强度之间的数学关系,进而给出永磁电动机的永磁体磁极径向布置和切向布置时的气隙磁密和磁路计算的数学表达式。同时也给出永磁体磁极的轴向拼接和径向并联、径向串联的特点及磁密计算。

本书分别给出了永磁靴式直流电动机,永磁有刷、无刷有槽直流电动机,永磁有刷、无刷盘式直流电动机,永磁交流电动机等的结构、转动机理、主要参数、主要尺寸设计及计算和损耗、功率及效率等。此外,本书也给出了永磁电动机输入功率的效率,提出了永磁电动机输出功率与输入功率的比值,进一步证明在某种意义上说永磁体磁能不遵守能量守恒。并给出永磁电动机与常规电励磁电动机在相同功率的前提下,永磁电动机比常规电励磁电动机节能10%~20%的举例。

本书以永磁体磁极特性理论为基础,以实践经验为参考,给出永磁无刷靴式直流电动机的设计举例和永磁交流电动机的设计举例。

本书可供永磁电动机设计、研究和永磁电机制造企业用作学习资料,也可作为高等院校电机设计及制造专业教学参考书或教材。

图书在版编目(CIP)数据

永磁电动机机理、设计及应用/苏绍禹著. —北京:机械工业出版社, 2016.8

(智能制造与装备制造业转型升级丛书)

ISBN 978-7-111-53933-9

I. ①永… II. ①苏… III. ①永磁电动机—原理②永磁电动机—设计 IV. ①TM351

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第120228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:江婧婧 责任编辑:翟天睿

责任校对:张薇 封面设计:路恩中

责任印制:李洋

三河市国英印务有限公司印刷

2016年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17印张·2插页·418千字

0 001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-53933-9

定价:69.80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:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

创新，就是抛开旧的，创造新的。创造新的，就是提出新方法、建立新理论、做出新成就、制造新产品。

创新是发展的动力，没有创新，社会就不会发展。

创新就是解决矛盾。旧的矛盾解决了，新的矛盾又产生了，再解决新矛盾……事物在不断出现矛盾、解决矛盾中得到发展。

在科学技术领域中，创新是科学技术发展的动力，没有创新，科学技术就不能发展。

改革开放以来，人民生活不断地得到改善和提高。一些经济条件较好的农民开始发明创造。中央电视台第十套节目中有一个栏目是“我爱发明”，从中可以看到普普通通的农民，他们不辞辛劳，为了实现自己的发明梦想，坚持几年，甚至十几年，孜孜不倦地追求、制造、试验，他们终于梦想成真。如“老沈”的喷洒农药的4旋翼直升机，它比人工喷洒农药的效率提高了几十倍，且农药比人工喷洒得更均匀。这架直升机易于操作，且操作灵活，可在农田的任何空地起飞和降落。再如竹笋去皮机、松子开口机、小麦收割机的卸粮机等。这些发明创造使劳动效率提高几倍、十几倍，甚至几十倍。这就是创新。

人类有记载的文明史已经有几千年，人类社会就是在不断创新中得到发展的。前人提出的假说、理论，后人给予证明、完善、发展和应用。科学技术的发展就是后人站在前人肩膀上的创新。

永磁体磁极对外做功不消耗其自身磁能。人们利用永磁体磁极的这一特性，制造了永磁发电机和永磁电动机。永磁发电机和永磁电动机与同功率电励磁的发电机和电动机相比，体积小、重量轻、效率高、温升小、噪声小、节能10%~20%。永磁电动机的外径达到了5mm，这是电励磁电动机无法达到的。这就是创新。

永磁电动机被广泛地应用在航天、航空、舰船、汽车、电动汽车、电动自行车、工业自动控制、医药及医疗器械、家电等领域。

作者的《永磁发电机机理、设计及应用》一书出版后，受到很多读者的欢迎。应机械工业出版社的江婧婧编辑之邀，根据读者的需求，又写了本书。本书中包括永磁体磁极的基本理论，永磁电动机永磁体磁极的径向、切向布置，以及永磁体磁极的轴向拼接，径向并联、串联的气隙磁密的计算和磁路计算。本书给出了永磁有刷、无刷靴式直流电动机，永磁有刷、无刷有槽直流电动机，永磁有刷、无刷盘式直流电动机及永磁交流电动机等的转动机理、主要参数的设计计算等。由于永磁电动机有别于传统电励磁电动机的机理，作者将其自1973年至现在40余年对永磁体和永磁电动机研究的理论和实践所得到的成果奉献给读者。

作者在书中几次提到“永磁体对外做功不消耗其自身磁能，在某种意义上说，永磁体



磁能不遵守能量守恒”，这是指永磁体磁能在外动力作用下对外做功而不消耗其自身磁能。对于永磁发电机，外动力使镶嵌永磁体磁极的转子转动，在定子绕组中输出电能；对于永磁电动机，当定子绕组通电时，励磁就会使镶嵌永磁体磁极的转子转动。对外输出转矩的过程中，永磁体对外做功不消耗其自身磁能，并且与电励磁发电机和电动机相比节能 10% ~ 20%，节省下来的能量是永磁体磁能在外动力作用下贡献的，这已被作者的实验和样机所证明。

永磁体的磁能是保守能，当外动力停止时，永磁体磁能也停止做功，永磁体磁能不会在外动力停止时自动对外做功。因此，不能凭想象利用“永磁体对外做功不消耗其自身磁能，在某种意义上说，永磁体磁能不遵守能量守恒”去创造永磁磁能永动机。

由于作者水平有限，可能在本书中有这样或那样的错误，欢迎读者批评指正，作者不胜感谢。

在此向机械工业出版社的江婧婧编辑及出版社给予作者的支持表示衷心的感谢。

在此，也再次向《永磁发电机机理、设计及应用》的读者表示衷心的感谢。

作者

2016 年 3 月 16 日于长春

主要符号

A ——永磁电动机线负荷, 单位为 A/cm

A ——电流单位, 安培

A_j ——发热系数, 单位为 $A/cm \cdot A/mm^2$

a ——绕组并联支路数

a ——绕组通电支路对数

a'_p ——极弧系数

a_m ——永磁体磁极短边长, 单位为 m 或 mm

B_m ——永磁体磁极的磁感应强度, 单位为 $J^\ominus$

B_δ ——气隙磁密, 单位为 T

B_t ——定子齿或转子齿磁密, 单位为 T

B_j ——定子轭或转子轭磁密, 单位为 T

B_r ——永磁体剩磁, 单位为 T

b_a ——槽口宽, 单位为 mm

b_p ——极弧长度, 单位为 m 或 mm

b_m ——永磁体矩形极面的长边长, 单位为 m 或 mm

b_1 ——定子内径 D_{i1} 的定子槽弧长, 单位为 m 或 mm

c ——永磁电动机的利用系数

C_m ——直流电动机系数, $C_m = \frac{PN}{2\pi a}$

C_e ——直流电动机系数, $C_e = \frac{PN}{60a}$

D ——转子轴轴径, 单位为 m 或 mm

D_{i2} ——定子外径, 单位为 m 或 mm

D_{i1} ——定子内径, 单位为 m 或 mm

D_2 ——转子外径, 单位为 m 或 mm

d ——转子轴为空心轴时的轴内径, 单位为 m 或 mm

d ——轴承的滚动中心直径, 单位为 m 或 mm

d ——导线直径, 单位为 mm

⊖ 在实际工作中, 有时也采用 Gs (高斯) 作为单位, Gs 为非法定计量单位, $1Gs = 10^{-4}T$, 后同。



- E ——相电势, 单位为 V
 E ——反电动势, 单位为 V
 E ——弹性模量, 单位为 N/m^2
 e_o ——转子偏心距, 单位为 m 或 mm
 F ——力, 单位为 N
 F ——轴承载荷, 单位为 N
 F_m ——永磁体磁极的磁引力, 单位为 N
 F_T ——永磁体磁极在圆周上的分力, 即切向力, 单位为 N
 f ——频率, 单位为 Hz
 f ——轴挠度, 单位为 $^\circ/\text{m}$
 G ——重量, 单位为 kg
 G ——剪切弹性模量, 单位为 N/m^2
 G_{Fe} ——定子铁心重, 单位为 kg
 G_{Fet} ——定子齿重, 单位为 kg
 G_{Fej} ——定子轭重, 单位为 kg
 g ——钢的比重, 单位为 kg/cm^3 或 kg/m^3
 g ——重力加速度, 单位为 m/s^2
 H ——电感, 单位为 (亨利)
 Hz ——频率单位, 赫兹
 h ——定子槽深, 单位为 m 或 mm
 h_j ——定子轭高, 单位为 m 或 mm
 h_o ——槽口高, 单位为 m 或 mm
 h_m ——永磁体磁极两极面之间的距离, 单位为 m 或 mm
 I ——电流, 单位为 A
 I_N ——额定电流, 单位为 A
 J_a ——电流密度, 单位为 A/mm^2
 J_p ——转子轴的极惯性矩, 单位为 m^4 或 mm^4
 K ——安全系数
 K_j ——应力集中系数
 K_b ——材料不均匀系数
 K_d ——定子轭铁损经验系数
 K'_d ——定子齿铁损经验系数
 K_{dp} ——基波绕组系数
 K_p ——绕组短距系数
 K_d ——绕组分布系数
 K_n ——永磁体端面系数



- K_{Nm} ——气隙磁场波形系数
 L_{ef} ——定子有效长度, 单位为 m 或 mm
 L_a ——转子铁心长度, 单位为 m 或 mm
 L_t ——定子铁心实际长度, 单位为 m 或 mm
 M_n ——电动机转矩, 单位为 $N \cdot m$ 或 $N \cdot mm$
 M_T ——永磁电动机起动力矩, 单位为 $N \cdot m$ 或 $N \cdot mm$
 M_W ——轴的弯矩, 单位为 $N \cdot m$ 或 $N \cdot mm$
 m ——相数
 N ——定子绕组每相串联导体数
 N ——永磁直流电动机转子绕组总导体数
 n_N ——永磁电动机的额定转速, 单位为 r/min
 P ——载荷, 单位为 kg 或 N
 P_N ——永磁电动机的额定功率, 单位为 W 或 kW
 P_{Cu} ——永磁电动机的铜损耗, 单位为 W 或 kW
 P_{Fe} ——永磁电动机的铁损耗, 单位为 W 或 kW
 P_{Fet} ——永磁电动机定子齿的铁损耗, 单位为 W 或 kW
 P_{Fej} ——永磁电动机定子轭铁损耗, 单位为 W 或 kW
 P_f ——机械损耗, 单位为 W 或 kW
 P_W ——风冷损耗, 单位为 W 或 kW
 P_{fW} ——机械和风冷损耗, 单位为 W 或 kW
 p ——永磁电动机的极对数
 ΣP ——永磁电动机损耗之和, 单位为 W 或 kW
 Q ——剪力, 单位为 N
 q ——每极每相槽数
 q_v ——风冷流量, 单位为 m^3/s
 R ——电阻, 单位为 Ω
 R_{20} ——铜导体在 $20^\circ C$ 时直流电阻, 单位为 Ω/km
 R_{75} ——铜导体在 $75^\circ C$ 时的直流电阻, 单位为 Ω/km
 S ——面积, 单位为 m^2 或 mm^2
 S_m ——永磁体磁极面积, 单位为 m^2 或 mm^2
 S_δ ——气隙面积, 单位为 m^2 或 mm^2
 S_f ——槽满率, 单位为 %
 S_t ——定子齿面积, 单位为 m^2 或 mm^2
 S_j ——定子轭面积, 单位为 m^2 或 mm^2
 t ——定子齿距, 单位为 m 或 mm
 t_1 ——定子齿宽, 单位为 m 或 mm



- U_N ——永磁电动机的额定电压, 单位为 V
 V ——体积, 单位为 m^3 或 mm^3
 V ——电压单位, 伏特
 v ——速度、线速度, 单位为 m/s
 W ——磁能, 单位为 W 或 J
 W_n ——抗扭截面模量, 单位为 m^3 或 mm^3
 W_w ——抗弯截面模量, 单位为 m^3 或 mm^3
 W ——功率单位, 瓦特
 y ——绕组节距
 z ——定子或转子槽数
 α ——角度, 单位为 $(^\circ)$
 β ——角度, 单位为 $(^\circ)$
 β ——绕组节距比, $\beta = y/mg$
 β ——转子单边磁拉力系数, $\beta = 0.3 \sim 0.5$
 δ ——气隙长度, 单位为 m 或 mm
 θ ——扭转角, 单位为 $(^\circ)$
 $[\theta]/m$ ——许用扭转角, 单位为 $^\circ/m$
 λ ——永磁电动机的尺寸比, $\lambda = L_{ef}/\tau$
 μ_0 ——真空绝对磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$
 σ ——拉应力, 单位为 N/mm^2
 σ_w ——弯曲应力, 单位为 N/mm^2
 $\sigma_{0.2}$ ——钢材线应变 $\varepsilon_s = 0.2\%$ 时应力, 单位为 N/mm^2
 $[\sigma]$ ——钢材的许用应力, 单位为 N/mm^2
 τ_n ——转的扭转应力, 单位为 N/mm^2
 τ ——剪应力, 单位为 N/mm^2
 τ ——极距, 单位为 m 或 mm
 $[\tau]$ ——许用剪应力, 单位为 N/mm^2
 $[\tau_n]$ ——许用扭转应力, 单位为 N/mm^2
 Φ ——每极磁通, 单位为 Wb
 η ——效率
 η_N ——额定效率
 σ ——漏磁系数
 ω ——角速度, 单位为 rad/s
 ρ ——物质密度, 电阻率

目 录

前言

主要符号

第一章 绪论..... 1

第一节 永磁体的发展历史与永磁电机 1

第二节 磁性机理 2

第三节 永磁体的磁能 3

第四节 永磁电动机的特点及其未来 4

第二章 永磁体的特殊性能、种类及其一般性能..... 6

第一节 永磁体的磁和磁性能的概念 6

第二节 永磁体的特殊性能 9

第三节 永磁体的种类及其一般性能 14

第三章 永磁电动机中永磁体磁极的布置及其磁密 21

第一节 永磁电动机的种类、结构特点及用途 21

第二节 永磁体的特性曲线及其工作点..... 23

第三节 永磁体的气隙磁密 26

第四节 永磁电动机中永磁体磁极的布置及其特点和气隙磁密 29

第五节 永磁电动机的定子齿、定子轭的磁密 35

第四章 永磁靴式直流电动机 39

第一节 永磁有刷靴式直流电动机的结构、起动、换向及反转 39

第二节 永磁有刷靴式直流电动机转动机理 42

第三节 永磁有刷靴式直流电动机的反电动势及反电动势对永磁体的充、去磁和电磁转矩 45

第四节 永磁有刷靴式直流电动机的功率和效率 48

第五节 永磁无刷靴式直流电动机的结构、起动、换向及反转 54

第六节 永磁无刷靴式直流电动机转动机理 56

第七节 永磁无刷靴式直流电动机的电流换向方式 59

第八节 永磁无刷靴式直流电动机的反电动势、转矩及转子永磁体磁极的充、去磁 62

第九节 永磁无刷靴式直流电动机的功率和效率 65

第十节 永磁靴式直流电动机的主要参数和主要尺寸 68

第十一节 永磁靴式直流电动机永磁体磁极及极靴绕组的设计 74

第五章 永磁有刷有槽直流电动机 78

第一节 永磁有刷有槽直流电动机的结构、起动、反转和转动机理 78

第二节 永磁有刷有槽直流电动机的反电动势和转矩、转速和调速 81

第三节 永磁有刷有槽直流电动机的功率和效率 84

第四节 永磁有刷有槽直流电动机与同功率电励磁直流电动机的比较 87

第五节 永磁有刷有槽直流电动机的额定数据、主要参数..... 89

第六节 永磁有刷有槽直流电动机主要尺寸的确定 93

第七节 永磁有刷有槽直流电动机的绕组

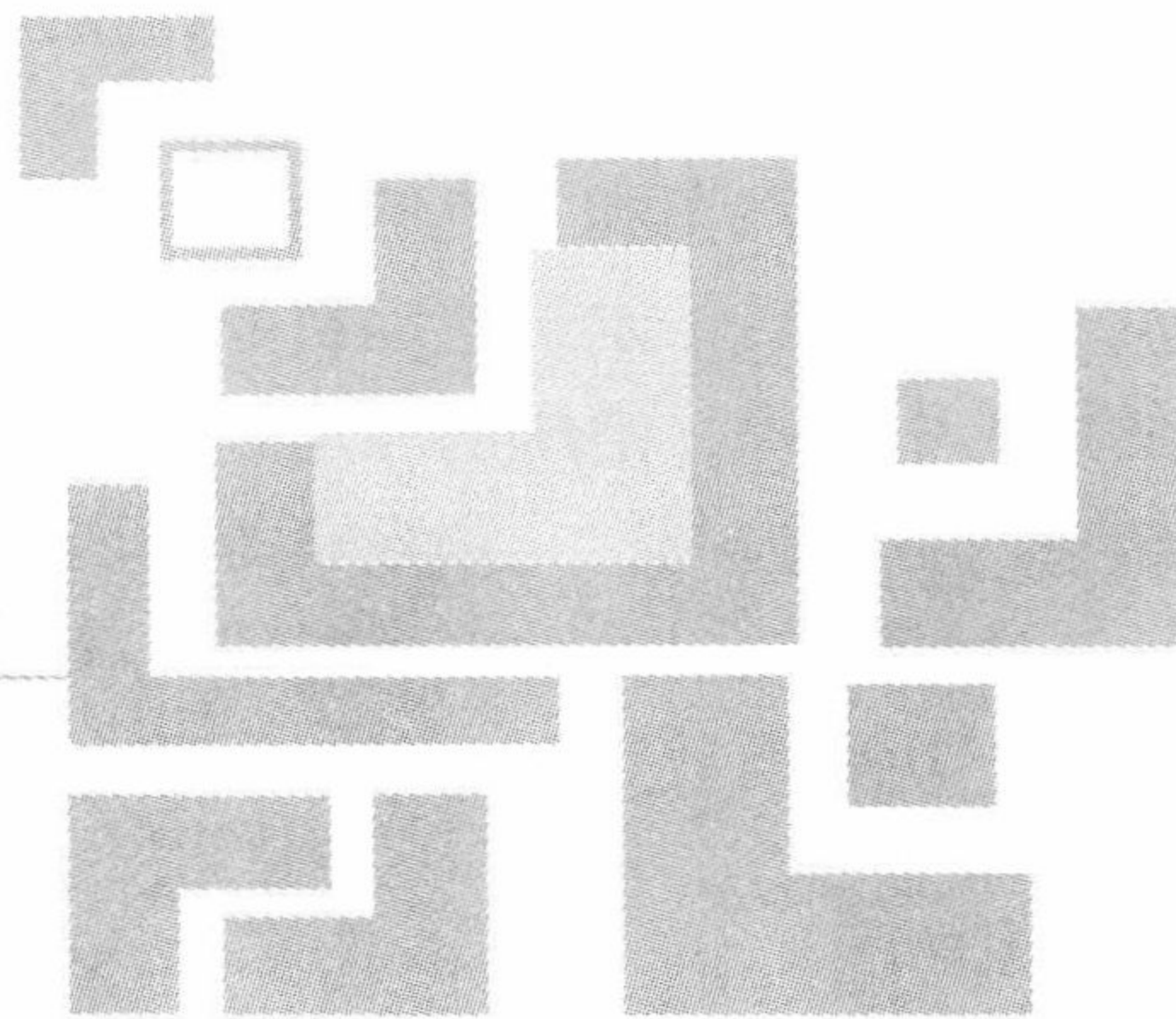


设计	95	第六节 永磁有刷盘式直流电动机的转子绕组	161
第八节 永磁有刷有槽直流电动机的转子槽及其参数和磁路计算	102	第七节 永磁有刷盘式直流电动机换向器的设计	165
第九节 永磁有刷有槽直流电动机定子永磁体磁极的设计	105	第八节 永磁无刷盘式直流电动机的结构、起动、反转和调速	167
第十节 永磁有刷有槽直流电动机换向器的设计	110	第九节 永磁无刷盘式直流电动机的转动机理、反电动势及转矩	170
第六章 永磁无刷有槽直流电动机	114	第十节 永磁无刷盘式直流电动机的额定数据及主要参数	173
第一节 永磁无刷有槽直流电动机的结构及转动机理	114	第十一节 永磁无刷盘式直流电动机主要尺寸的确定	176
第二节 永磁无刷有槽直流电动机的定子槽、起动和转速	119	第十二节 永磁无刷盘式直流电动机的定子绕组	180
第三节 永磁无刷有槽直流电动机的反电动势和电磁转矩	122	第十三节 永磁无刷盘式直流电动机的功率、效率和节能	182
第四节 永磁无刷有槽直流电动机的相数、极数及绕组	124	第八章 永磁交流电动机	185
第五节 永磁无刷有槽直流电动机的位置传感器及其安装位置	129	第一节 永磁交流电动机的结构和转动机理	185
第六节 永磁无刷有槽直流电动机的主要参数及尺寸	132	第二节 永磁交流电动机的额定数据和主要参数	190
第七节 永磁无刷有槽直流电动机的定子槽尺寸、槽满率及磁路计算	136	第三节 主要尺寸及定子槽设计	193
第八节 永磁无刷有槽直流电动机的功率及效率	139	第四节 永磁交流电动机的绕组设计及绕组相关参数	199
第九节 永磁无刷有槽直流电动机的现状及未来发展	143	第五节 永磁交流电动机的磁路计算及起动转矩	204
第七章 永磁盘式直流电动机	145	第六节 永磁交流电动机的损耗、功率和效率及转矩	209
第一节 永磁有刷盘式直流电动机的结构、起动和反转	145	第七节 永磁交流电动机的未来	215
第二节 永磁有刷盘式直流电动机的转动机理、转矩、反电动势、转速和调速	147	第九章 永磁电动机转子轴的设计、计算及转子的平衡	217
第三节 永磁有刷盘式直流电动机的功率、效率及节能	150	第一节 永磁电动机转子轴最危险轴径的确定	217
第四节 永磁有刷盘式直流电动机的额定数据、主要指标及主要参数	152	第二节 转子轴的强度校核	220
第五节 永磁有刷盘式直流电动机主要尺寸的确定	156	第三节 转子轴的挠度和永磁电动机的临界转速	224
		第四节 永磁电动机转子的平衡	228
		第十章 设计举例	230



设计举例 1 设计计算机驱动冷却风扇的永磁 无刷两极四靴直流电动机 ...	230
设计举例 2 三相 18 极 11kW 永磁交流电动机 设计	234
附录	248
附录 A 厚绝缘聚酯漆包扁铜线参数	248

附录 B 磁导体硅钢片的主要性能 (国产 硅钢片)	249
附录 C 部分导磁材料的磁化曲线及铁损曲 线表	253
参考文献	260



第一章

绪 论

第一节 永磁体的发展历史与永磁电机

关于磁石吸铁的记载,最早可追溯到春秋时期(公元前 770—前 476 年),管仲所著《管子》中,对静磁现象做了描述;战国末期,秦相吕不韦所著《吕氏春秋》中,已有“慈石召铁”(即铁石吸铁的意思)的说法;西汉时期,刘安所著《淮南子》中,更有磁石“引针”、“召铁”现象的生动记载;同一时期,中国利用磁石制成了世界上最早的指南针,当时称作“司南”;到了公元 11 世纪的宋朝,沈括在《梦溪笔谈》中,记录了指南针“常微偏东,不全南也”的科学现象,即地磁偏角的存在。我国医药学家李时珍在他的《本草纲目》中把磁石作为治疗某些疾病的良药。

1900 年,出现第一个人造钨钢永磁体,它揭开了人造永磁体的序幕。

20 世纪 30 年代之后先后研发出铝镍钴 (AlNiCo)、铁铬钴 (FeCrCo)、铂钴 (PtCo)、铁氧体 ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) 等,20 世纪 60 年代之后又研发出稀土钴 (RCo_5 、 R_2Co_{17}),80 年代又研发出磁综合更好的钕铁硼永磁体。这些磁综合性能很好的永磁体的问世为永磁电机的发展奠定了基础、提供了条件,使永磁电机得到了快速发展。

1973 年,世界发生了石油危机、能源短缺,世界很多国家开始开发无污染可再生的能源——风能,利用风能发电可以节省煤炭、石油等化石类能源,又能减少燃烧煤炭、石油类化石类能源所放出的 CO_2 、 SO_2 对地球环境的破坏和污染。由于永磁体对外做功不消耗其自身磁能,用永磁体磁极作发电机的转子磁极,使永磁发电机的体积小、重量轻、效率高、温升小、噪声小、结构简单,又能做到多极低转速,特别适合风力发电机用发电机。永磁发电机由于风力发电而得到快速发展,现在永磁发电机的功率已达到 MW 级,效率达到 95%,功率因数达到 0.9。

由于永磁体对外做功不消耗其自身的磁能,永磁体被广泛地用做电动机的转子或定子磁极,从而使永磁电动机的体积小、重量轻、效率高、温升高、功率因数高,因此,永磁电动机得到了长足的发展。

永磁电动机被广泛地应用在航天、航空、舰船、汽车、电动汽车、电动自行车、工业自动控制、无人机、机器人、家电、医疗器械、儿童玩具等诸多领域。如 20 世纪 50~60 年代的收录机中,驱动磁带的是永磁有刷直流电动机;进入 21 世纪,永磁无刷直流电动机被广泛地应用在数码照相机和数码摄像机及计算机的冷却风扇的驱动上;轿车座位的调整、玻璃



窗的升降，汽车和飞机的空调，电动自行车采用了外转子式永磁电动机驱动后轮转动；电动汽车采用外转子永磁电动机驱动；工业自动化中的自动控制、机器人的各种动作、PLC 控制的加工中心等，潜艇的驱动、舰船自动控制，飞船太阳电池板的跟踪调整，无人机的升降、转弯的自动控制，儿童玩具等的所有电动机都采用了永磁电动机。

永磁电动机的功率由零点几 W 到几百 kW，现在已达到 MW 级以上。其效率达到 95% 以上，功率因数达 0.9 以上，节电 10% ~ 20%。

第二节 磁性机理

1820 年，奥斯特发现放在载流导体周围的磁针会受到力的作用而偏转。同年，安培又发现磁体附近的载流导体或线圈会受到力的作用而移动。之后，法拉第又发现永磁体在线圈中移动时，线圈会产生电流。当线圈通以电流时，在线圈中的永磁体会移动。后人根据法拉第的发现发明并制造出了发电机和电动机。有了发电机和电动机，改变了人们的生产和生活方式，使世界发生了革命性的变化。

磁生电，电生磁，电和磁被联系到一起了。

磁性机理是什么？

1822 年，安培提出了有关物质磁性本质的假说，他认为一切磁现象的根源是电流。磁性物质的分子中，存在着回路电流，称作分子电流。分子电流相当于基元磁体，物质的磁性就取决于物质中分子电流对外界的磁效应的总和。安培的假说与现代对物质磁性的理解是相当符合的。

笔者曾于 1980 ~ 1990 年多次多地对大地表面的大地电流进行测量，验证了地球的南北极是由地球由西向东的电流形成的。现列出 1980 年在四个地方测量的地球电流的数据，见表 1-1。

表 1-1 1980 年在四个地方测量的地球电流数据

实测大地 电流时间	实测大地电流的地点	实测大地东西 方向电流/ μA	实测大地南 北方向电流/ μA
1980 年 6 月 25 日	内蒙古巴林左旗兴隆地大队兴隆地小队	6 ~ 8	1 ~ 3
1980 年 6 月 29 日	内蒙古林东镇八一大队古城小队	5 ~ 8	1 ~ 2
1980 年 7 月 20 日	北京市永定门外	8 ~ 10	1 ~ 3
1980 年 9 月 8 日	吉林省公主岭市大榆树大队第 10 小队	6 ~ 8	1 ~ 3

以上的实测大地东西方向电流是南北方向电流的 3 ~ 6 倍，东西方向的电流形成了地球的南、北磁极。

笔者用安培的关于物质磁性本质假说解释抗磁质、顺磁质、铁磁质和永磁体。

1. 抗磁质

物质在很强的均匀外磁场作用下，物质内分子或晶粒内的电子只有极少部分离开原来的运动轨道，在物质内形成电流环路，电流所形成的磁场与外磁场方向相同。当撤去外磁场后，这些电子立即回到分子或晶粒内原来的运动轨道上运动，物质没有磁性。这就是抗磁质。

2. 顺磁质

物质在很强的均匀外磁场作用下，物质内分子或晶粒内有相当多的电子离开原来的运动



轨道在物质内形成电流环路，电流所形成的磁场方向与外磁场方向相同，电流所形成的磁场强度接近外磁场强度。当撤去外磁场后，这些形成环流的电子立即回到分子或晶粒中原来的轨道上运动，物质的磁性消失。这种物质就是顺磁质。它们是磁的良导体。

3. 铁磁质和永磁体

物质在很强的均匀外磁场作用下，物质内分子或晶粒内有相当多的电子离开原来的运动轨道在物质内形成电流环路，环路电流所形成的磁场方向与外磁场方向相同，环路电流所形成的磁场强度接近外磁场强度。当撤去外磁场后，这些形成环流的电子陆续回到分子和晶粒中原来的轨道上运动，物质的磁性逐渐消失。这种物质就是铁磁质。

当撤去外磁场后，这些形成环流的电子只有少数回到分子或晶粒中原来的轨道上运动，大部分电子仍然保持环流状态，物质具有了磁性，即剩磁，这种铁磁质就成了永磁体。

永磁体内必须存在电子环流，否则就不是永磁体。永磁体内的电子环流只有被加热到居里点以上，或在高频长时间的振动下，或在反向强磁场的作用下，形成环流电子才会回到分子或晶粒中它们原来的运动轨道上运动，电子环流没有了，永磁体的磁场就会消失。

物质在外磁场的作用下，不论物质是抗磁质、顺磁质还是铁磁质和永磁体，其内部只是电子运动的轨道发生了变化，而物质的分子或晶体没有变，因此，物质的结构、分子量、比重、硬度、强度等物质性质没有变化。

第三节 永磁体的磁能

对于永磁体本质的认识，笔者认为“欲知松高洁，待到雪化时”。现在用所谓的最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 来描绘永磁体的磁能是欠妥的。这是因为，其一是到目前为止尚不能造出 1m^3 的永磁体，只能是用小块永磁体所具有的磁能积推导出来，这不符合永磁体的性质；其二是永磁体的磁感应强度并不是永磁体体积的函数，也就是说，永磁体的磁能积不是永磁体体积的函数，但却用 $(BH)_{\max}$ (kJ/m^3) 来表示是欠妥的。作者自 1973 年至今对永磁体及永磁电机进行了 30 余年的研究及实验，理论和实践证明，永磁体的磁感应强度在一定范围内是永磁体磁极面积与两极面之间距离的函数。当两极面积确定之后，增加两极面之间的距离，当增加到一定数值后，永磁体的磁感应强度不再增加，也就是说，永磁体的磁能积不是永磁体的体积函数。

永磁体对外做功不消耗其自身的磁能，在某种意义上说，永磁体的磁能不遵守能量守恒。现举例验证。

例证 1

某轿车自扇风冷并励爪式三相交流发电机，在 $3000\text{r}/\text{min}$ 时经三相桥式整流输出直流 14V ，电流 86A ，转子励磁电压 $\text{DC}12\text{V}$ ，励磁电流 5A 。作者将其改为永磁发电机，在 $3000\text{r}/\text{min}$ 时经三相桥式整流输出 14VDC ，电流 86A ，实验时用电阻作负载，经 72h 连续运转发出电能为

$$1204\text{W} \times 72 = 86.688\text{kWh}$$

拆开发电机测永磁体的磁感应强度 $B_m = 0.52\text{T}$ ，与未发电前的磁感应强度相同。

这个实验证明：

1) 永磁发电机的转子永磁体磁极取代原来的电励磁爪式转子对外做功发电



86.688kWh, 其自身的磁能并未减少, 证明永磁体对外做功不消耗其自身磁能。

2) 永磁发电机的转子永磁体磁极取代原来的电励磁爪式转子, 其取代的电励磁功率为 $P_f = I_f U_f = 5 \times 12 = 60\text{W}$ 。进行 72h 带负载运行节电 4.32kWh, 而转子永磁体磁极并未因做功 4.32kWh 而减少其磁感应强度, 这证明永磁体磁极 72h 对外做功未消耗其自身磁能。

3) 结论: 永磁体对外做功不消耗其自身磁能, 在某种意义上说, 永磁体磁能不遵守能量守恒, 永磁发电机实现了节能。

例证 2

用极面积 $a_m \times b_m = 30\text{mm} \times 50\text{mm}$, 两极面之间距离 $h_m = 20\text{mm}$ 的 N48 永磁体 20 块组成的永磁吊, 一次吊起距永磁体极面 20mm 的 1000kg 的钢板。每次用非磁性材料 $5\text{kg} \cdot \text{m}$ 的功卸下 1000kg 钢板。当永磁吊进行 1500 次吊运后, 对永磁体表面的磁感应进行测量, 其测量值与吊运 1500 次之前相同, 其平均值都是 $B_m = 0.51\text{T}$ 。

1) 永磁吊吊运 1500 次做功为

$$\begin{aligned} W &= 1500 \times (0.02 \times 1000 - 5) \times 9.8\text{J/kg} \cdot \text{m} \\ &= 220.5\text{kJ} \end{aligned}$$

2) 20 块极面为 $a_m \times b_m = 30\text{mm} \times 50\text{mm}$, 两极面之间的距离为 20mm 的 N48 永磁体体积为

$$\begin{aligned} V &= 20 \times 0.03 \times 0.05 \times 0.02 \\ &= 6 \times 10^{-4}\text{m}^3 \end{aligned}$$

3) N48 永磁体标定的 $(BH)_{\max} = 390\text{kJ/m}^3$, 其 1m^3 的体积是 20 块 N48 永磁体体积的倍数为

$$\begin{aligned} k &= 1\text{m}^3 \div 6 \times 10^{-4}\text{m}^3 \\ &\approx 1666.67 \text{ 倍} \end{aligned}$$

4) 永磁吊吊运 1500 次所做功是 N48 永磁体标定的 $(BH)_{\max} = 390\text{kJ/m}^3$ 的倍数 k_1 为

$$\begin{aligned} k_1 &= 220.5 \times 1666.67 \div 390 \\ &= 942.3 \text{ 倍} \end{aligned}$$

5) 结论: ①永磁体对外做功不消耗其自身磁能, 在某种意义上说, 永磁体磁能不遵守能量守恒, 永磁吊实现了节能; ②永磁体的磁能不是永磁体体积的函数, 永磁体的磁能积用 $(BH)_{\max}$ (kJ/m^3) 来描述是欠妥的。

第四节 永磁电动机的特点及其未来

由于永磁电动机具有重量轻、体积小、效率高、温升高、噪声小、结构简单、便于管理、节能、调速范围大等特点, 被广泛地应用在航天、航空、舰船、汽车、电动汽车、电动自行车、工业生产的自动控制、无人机、机器人、医疗器械、家电、直流电动工具、儿童玩具等诸多领域。

1. 永磁电动机的特点

(1) 永磁电动机体积小、重量轻

永磁电动机不论是有刷还是无刷, 都是以永磁体磁极取代定子电励磁磁极, 或是以永磁体磁极取代转子电励磁磁极, 因此会使永磁电动机的体积减小。由于去掉了电励磁绕组, 因此重量比电励磁的轻, 永磁电动机的重量可以达到同容量电励磁电动机重量的 20% ~ 50%。



如玩具遥控直升机驱动尾桨的永磁电动机的直径只有 5mm，长度只有 8mm。再如大型飞机副翼调整的驱动永磁电动机功率为 10.5kW，其重量只有 7.5kg，是同容量交流异步电动机重量的 1/10。

(2) 永磁电动机效率高、节电

永磁体对外做功不损失其自身磁能，因此永磁电动机效率高且节能。

我国已研制出 100kW ~ MW 级永磁电动机，效率在 95% 以上，功率因数达 0.9 以上。所有的永磁电动机，不论是有刷还是无刷的，节能都达到 10% ~ 20%。

(3) 永磁电动机调速范围大

永磁无刷电动机的调速是靠调整逆变器输出矩形波或正弦波电流频率来实现的，其调速范围非常宽，甚至可以达到 1:10000。

(4) 温升高、噪声小、结构简单、便于维护

由于永磁电动机用永磁体磁极，或取代定子励磁绕组所形成的磁极，或取代转子电励磁绕组所形成的磁极，因而没有电励磁绕组的铜损耗所形成的热量，因此，永磁电动机的温升要比电励磁的电动机温升高，同时噪声也小。由于永磁电动机用永磁体磁极取代定子电励磁绕组磁极或取代转子电励磁绕组磁极，省去了绕组，因此，结构简单，特别是永磁无刷永磁电动机结构更为简单，结构简单了，维护就更加容易。

(5) 永磁交流同步电动机的特点

永磁交流同步电动机是电动机的永磁体转子磁极，定子绕组由三相交流电直接供电的同步电动机，其效率可达 95%，功率因数达 0.9 以上，节电 10% ~ 20%。

永磁交流同步电动机也可以通过逆变器调整电流频率来调速。

2. 永磁电动机的未来

永磁电动机可分为有刷和无刷两类，无刷永磁电动机又分为有位置传感器和无位置传感器两种。

永磁电动机又分为永磁有槽电动机、永磁靴式电动机、永磁盘式电动机、永磁罩极式电动机、永磁交流电动机等。

永磁电动机的供电电源，除永磁交流同步电动机直接由三相交流电供电外，大部分为直流供电。直流供电有由蓄电池供电的，也有由三相交流电经整流变成直流电供电的，还有由三相交流电经整流变成直流再经逆变器逆变成矩形波或正弦波交流电供电的。

人们利用永磁体对外做功不消耗其自身磁能这一特性，制造出各种各样适合不同工况的永磁电动机。这些永磁电动机的共同特点是体积小、重量轻、效率高、功率因数高、节能、温升高、噪声小、结构简单、维护方便，调速范围宽等。因此，永磁电动机被广泛地应用在航天、航空、舰船、汽车、电动汽车、电动自行车、工业自动控制、机器人、无人机、医疗器械、家电、儿童玩具等诸多领域。永磁电动机的功率从零点几瓦到 MW 级。可以说，永磁电动机应用之广，用量之大，型号、品种之繁多，是其他任何电动机所不及的。

永磁发电机和永磁电动机的广泛应用，势必促进磁综合性能更好的永磁体的开发。现在市场上最好的永磁体的磁感应强度也只有 0.5T 左右，当磁综合性能更好的永磁体磁感应强度达到 0.6T、0.7T 或更高时，永磁电动机的体积会更小，重量会更轻，效率会更高，温升会更低，功率因数会更高，也会更节能。

永磁电动机的未来前景广阔，前途光明。