

永磁发电机机理、 设计及应用

YONGCI FADIANJI JILI SHEJI JI YINGYONG

苏绍禹 高红霞 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书在理论和实践的基础上,给出了永磁体的磁极面积和两磁极面之间的距离与永磁体磁感应强度之间的数学关系,进而给出永磁发电机磁极的径向布置和切向布置时气隙磁密和磁路计算。同时也给出了定子槽数、每极每相槽数与永磁发电机起动力矩的关系及起动力矩的计算方法。本书深入浅出地讲述了永磁发电机的温升、冷却、效率的理论和实际计算方法及永磁发电机主要零部件材料的选择及其刚度、强度理论和计算。此外,还给出了永磁体的种类、性能及其应用,供读者参考。本书在第十章给出了永磁发电机设计程序并列举了60极900kW和18极1kW永磁发电机设计计算的全过程以飨读者。

本书可供永磁发电机制造企业,永磁发电机设计、使用、维护及风电场的工程技术人员、技师等阅读,也可作为高等院校电机设计及相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

永磁发电机机理、设计及应用/苏绍禹,高红霞著. —北京:
机械工业出版社,2012.1
ISBN 978-7-111-36993-6

I. ①永… II. ①苏…②高… III. ①永磁发电机
IV. ①TM313

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第280108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:牛新国 责任编辑:牛新国

版式设计:霍永明 责任校对:刘秀丽

封面设计:路恩中 责任印制:杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2012年4月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·11.5印张·2插页·292千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-36993-6

定价:49.80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

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面防伪标均为盗版

前 言

1973年，作者第一次接触到500W 24V微型风力发电机。这些从前联邦德国进口的微型风力发电机是我国无偿为内蒙古牧民的蒙古包照明和收音机提供电力的。这些微型风力发电机用的发电机是励磁交流发电机，经过一段时间运行，由于换向器的电刷磨损及磨下来的炭粉造成换向器铜头短路而使发电机不能正常运行，要将风力发电机塔架放倒，拆下发电机进行维修，十分不便。

作者从那时起，就开始研究没有换向器，没有励磁系统的永磁发电机及永磁体。对各类及不同形状的永磁体磁面和两极面之间的距离与永磁体磁感应强度的关系及永磁体串、并联气隙磁密大小的研究，进而给出了永磁发电机永磁体磁极径向布置和切向布置的气隙磁密的计算公式。同时制造永磁发电机样机、对样品、样机进行实测及研究，归纳总结出一些规律性的数学计算方法。并对永磁发电机每极每相槽数、定子绕组形式对永磁发电机起动力矩影响的研究，通过对样机的实测，以验证每极每相槽数对起动力矩影响的计算公式和对永磁发电机起动力矩规律的研究。

作者根据自己研究的理论及实践经验，先后做了10极800W，8极11kW，30极10kW，36极80kW等样机，在台架上试验证明，永磁发电机与同容量同极数或相近容量的常规励磁发电机相比，效率高2%~8%，温升低2~10℃，噪声小2~10dB，重量轻40%以上，功率因数高0.02~0.05。台架试验和检测结果证明这些理论、计算公式及经验数据是正确的。1998年作者的“高效永磁交流发电机”获得国家专利。

人对磁性的发现很早。早在战国末期，我国就已经有“慈石召铁”（即磁石吸铁的意思）的说法。在西汉时期中国发明了指南针。尔后是奥斯特把磁和电联系在一起，才有了发电机和电动机。永磁发电机诞生很早，但发展很慢，这主要是永磁体的磁综合性能还不够高。

20世纪80年代之后，世界各国都在开发无污染、可再生的清洁能源—风能，利用风能发电及20世纪80年代之后磁综合性能不断提高的永磁体不断问世，才使永磁发电机得到快速发展。

由于永磁发电机没有励磁系统，其结构简单，节能，效率高，重量轻，温升低，噪声小，功率因数高以及可以做到多极低转速，特别适合风电机组用发电机，进入21世纪，永磁发电机为风电机组所广泛采用，得到了快速发展。

现在，百kW级、MW级永磁发电机被广泛地应用在风电机组上，永磁发电机有了展示其优异特点的市场。

现在，永磁体的磁感应强度还不够高，市场上最好的商品永磁体的磁感应强度也只有0.5T左右。随着永磁发电机被广泛使用，必将催生磁综合性能更好的永磁体问世。当永磁体磁极的磁感应强度达到0.7T、0.8T甚至达到1.0T之时，就是永磁发电机取代励磁发电机之日。这是科学技术发展的必然，犹如内燃机取代蒸汽机一样的必然和不可

逆转。

为了给永磁发电机设计、制造、使用、维护的工程技术人员及技师及风电场使用永磁发电机的工程技术人员和高等院校电机设计及相关专业提供永磁发电机的机理、设计及运用方面的理论和实践经验，作者写了《永磁发电机机理、设计及应用》一书，并在本书第十章给出了 60 极 900kW 等设计举例。

由于作者学识有限，难免有错，敬请读者批评指正，作者不胜感谢！

苏绍禹

主要符号

- A ——永磁发电机线负荷, 单位为 A/cm
 A ——电流单位, 安培
 A_j ——永磁发电机发热系数, 单位为 $A/cm \cdot A/mm^2$
 a ——绕组并联支路数
 a_m ——永磁体磁极短边长, 单位为 mm
 B_m ——永磁体磁极表面的磁感应强度, 单位为 T
 B_g ——永磁发电机气隙磁通密度, 简称气隙磁密, 单位为 T
 B_j ——永磁发电机定子轭磁密, 单位为 T
 B_t ——永磁发电机定子齿磁密, 单位为 T
 B_r ——永磁体剩磁, 单位为 T
 b ——永磁发电机机壳壁厚, 单位为 m 或 cm 或 mm
 b_0 ——定子槽口宽, 单位为 m 或 mm
 b_1 ——定子内径 D_{il} 的定子槽宽, 单位为 m 或 mm
 b_p ——极弧长度, 单位为 m 或 mm
 b_m ——永磁体磁极长边长度, 单位为 mm
 c ——物体比热, 单位为 $J/kg \cdot ^\circ C$
 c ——空气比热, 在 $1atm$ ($101.325kPa$) 下, $50^\circ C$ 时, $c = 1.1J/m^3 \cdot ^\circ C$
 c ——永磁发电机利用系数
 D ——转子轴外径, 单位为 m 或 mm
 D_1 ——定子外径, 单位为 m 或 mm
 D_{il} ——定子内径, 单位为 m 或 mm
 D_2 ——转子外径, 单位为 m 或 mm
 D_0 ——机壳中性层直径, 单位为 m 或 mm
 d ——转子轴内径, 单位为 m 或 mm
 d ——轴承滚子中心直径, 单位为 m 或 mm
 E ——相电势, 单位为 V
 E ——弹性模量, 单位为 N/m^2
 e_0 ——转子总成偏心距, 单位为 m 或 mm
 F ——力, 单位为 N
 F ——滚动轴承载荷, 单位为 N
 f ——电流频率, 单位为 Hz
 F_m ——永磁体磁极吸引力, 单位为 N
 F_T ——永磁体磁极吸引力在圆周上的切向力, 单位为 N
 G ——重量, 单位为 kg
 G ——剪切弹性模量, 单位为 N/m^2
 G_{Fe} ——定子铁心量, 单位为 kg

- G_{Fej} ——定子轭重, 单位为 kg
 G_{Fet} ——定子齿重, 单位为 kg
 g_{Fe} ——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, 亨利
 Hz ——频率单位, 赫兹
 h_j ——定子轭高, 单位为 m 或 mm
 h_1 ——定子槽深, 单位为 m 或 mm
 h_m ——永磁体两极面的距离, 单位为 m 或 mm
 I_N ——永磁发电机电流, 单位为 A
 J_a ——电流密度, 单位为 A/mm^2
 J_p ——形体的极惯性矩, 单位为 m^4 或 mm^4
 J_z ——截面对中性轴 Z 轴的惯性矩, 单位为 m^4 或 mm^4
 K ——安全系数; 过载能力
 K ——永磁发电机发热部件和空气流经冷却风道带走热量的不均匀系数
 K_2 ——材料不均匀系数
 K_1 ——应力集中系数
 K_d ——绕组分布系数
 K_p ——绕组短距系数
 K_{dp} ——绕组基波系数
 K_m ——永磁体端面系数
 K_{Nm} ——气隙磁场波形系数
 K_0 ——流体流经发热体带走热量的效率系数
 K_a ——定子轭铁心铁损经验系数
 K'_a ——定子齿铁心铁损经验系数
 L ——机壳长度; 转子轴安装转子铁心的长度, 单位为 m 或 mm
 L ——螺线管自感系数
 l_{ef} ——铁心有效长度, 铁心计算长度, 单位为 m 或 mm
 l ——螺线管长度, 单位为 m 或 mm
 M_M ——驱动转矩, 单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$
 M_T ——永磁发电机起动力矩, 单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$
 T_M ——永磁发电机的扭矩, 单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$
 M_w ——轴的弯矩, 单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$
 m ——永磁发电机相数
 N ——永磁发电机每相串联导体数
 N_s ——每槽导体数
 n ——永磁发电机的磁极完全对准定子槽的磁极数
 n_N ——永磁发电机的额定转速, 单位为 r/min
 p ——重量, 单位为 kg

- P_N ——永磁发电机的额定功率, 单位为 kW
 P_{Cu} ——永磁发电机定子绕组铜损耗, 单位为 kW
 P_{Fe} ——永磁发电机定子铁损耗, 单位为 kW
 P_{rej} ——定子轭铁损耗, 单位为 kW
 P_{Fet} ——定子齿铁损耗, 单位为 kW
 p_{haj} ——定子轭铁损系数, 单位为 W/kg
 p_{het} ——定子齿铁损系数, 单位为 W/kg
 P_f ——永磁发电机轴承机械损耗, 单位为 W/kg
 p ——永磁发电机的极对数
 ΣP ——永磁发电机各种损耗之和, 单位为 kW
 Q ——热流量; 热量, 单位为 W 或 J
 Q ——剪力, 单位为 N
 Q ——冷却空气流量, 单位为 m^3/s
 q ——每极每相槽数
 R ——电阻, 单位为欧姆 Ω
 R_{75} ——绕组在 $75^\circ C$ 时电阻, 单位为 Ω
 R_0 ——永磁发电机机壳中性半径, 单位为 m 或 mm
 S ——面积, 单位为 m^2 或 mm^2
 S^* ——截面对中性轴的静矩, 单位为 m^3 或 mm^3
 S_m ——永磁体磁极面积, 单位为 mm^2
 S_δ ——气隙面积, 单位为 m^2 或 mm^2
 S_f ——槽满率
 T ——温度, 单位为 $^\circ C$ 或 K
 ΔT ——温差, 单位为 $^\circ C$ 或 K
 t ——定子齿距, 单位为 m 或 mm
 t ——机壳壁厚, 单位为 m 或 mm
 t_1 ——定子齿宽, 单位为 m 或 mm
 U_N ——永磁发电机额定功率, 单位为 kW
 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
 y ——绕组节距
 Z ——定子槽数
 α ——角度, 单位为 ($^\circ$)
 α'_p ——永磁发电机极弧系数
 β ——角度, 单位为 ($^\circ$)

β ——绕组节距比, $\beta = y/mq$

β ——转子附加磁拉力经验系数

γ ——流体重度, 单位为 kg/m^3

δ ——永磁发电机气隙长度, 单位为 m 或 mm

ε ——辐射黑度

θ ——扭转角, 单位为 ($^\circ$)

$[\theta]$ ——许用扭转角, 单位为 ($^\circ$)

λ ——传热系数, 单位为 $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

λ ——永磁发电机尺寸比, ($\lambda = L_{\text{ef}}/I$)

μ ——流体动粘度或称粘度系数

μ_0 ——真空绝对磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$

σ ——拉应力, 单位为 N/mm^2

$\sigma_{0.2}$ ——材料线应变 $\varepsilon_s = 0.2\%$ 时的应力, 单位为 N/mm^2

$[\sigma]$ ——材料的许用应力, 单位为 N/mm^2

σ ——漏磁系数

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

$[\tau_m]$ ——许用扭转应力, 单位为 N/mm^2

τ ——流力的粘滞力, 单位为 N/m^3

ϕ ——永磁发电机每极磁通, 单位为 Wb

目 录

前言	
主要符号	
第一章 绪论	1
第一节 磁与永磁体的发展历史	1
第二节 永磁体的磁能	2
第三节 国内外永磁发电机现状	3
第四节 永磁发电机的未来	4
第二章 永磁体的应用	6
第一节 永磁体在发电机、电动机 方面的应用	6
第二节 永磁体在磁力方面的应用	13
第三节 永磁体在磁感应、磁场方 面的应用	16
第三章 永磁体的种类及性能	18
第一节 关于磁与磁性能的几个 概念	18
第二节 永磁体的特殊性能	21
第三节 永磁体的种类及其主要磁 性能	25
第四章 永磁体的磁路及永磁发电机的 磁路计算	33
第一节 永磁体及磁导体的选择	33
第二节 永磁体的磁路	35
第三节 永磁体的特性曲线及工作点	40
第四节 永磁体在永磁发电机中的 布置	42
第五节 永磁发电机电弧系数、气隙系数 及气隙轴向长度的计算	44
第六节 永磁发电机永磁体磁极的 气隙磁密	47
第七节 永磁发电机的定子齿、定子 轭磁密	51
第五章 永磁发电机的额定数据、功率和 主要尺寸的确定	53
第一节 永磁发电机的技术条件和 额定数据	53
第二节 初步确定永磁发电机的主 要尺寸	55
第三节 永磁发电机定子槽形和永磁体 磁极的设计	58
第四节 永磁发电机的主要参数	60
第五节 永磁发电机的功率	62
第六章 永磁发电机的定子槽数、绕组 及起动力矩	67
第一节 永磁发电机定子槽数的 选择	67
第二节 永磁发电机绕组形式的 选择	70
第三节 永磁发电机的起动力矩	73
第七章 永磁发电机的效率	78
第一节 永磁发电机运行时的铜损耗	78
第二节 永磁发电机的铁损耗	81
第三节 机械损耗	85
第四节 永磁发电机效率	86
第八章 永磁发电机的温升与冷却	90
第一节 热传递的基本原理	91
第二节 永磁发电机的温升曲线分布	99
第三节 永磁发电机的最高温升	101
第四节 永磁发电机的冷却	103
第九章 永磁发电机结构设计及强度、 刚度计算和平衡	110
第一节 永磁发电机的结构形式和 安装形式	110
第二节 永磁发电机的结构设计	112
第三节 永磁发电机主要零部件的刚度、 强度的计算	116
第四节 永磁发电机转子的平衡	128
第十章 永磁发电机设计程序及设计 举例	131
第一节 永磁发电机设计程序	131
第二节 永磁发电机设计举例1（三相、 60极、900kW）	133

第一章 绪 论

第一节 磁与永磁体的发展历史

人类对于磁的发现,可追溯到公元前。我国在战国末期就“慈石召铁”(即磁石吸铁的意思)的说法。我国四大发明之一的指南针就是 11 世纪我国科学家沈括发明的。指南针的发明为航海导航、陆地辨别方向起到了极其重要的作用。沈括不仅发明了指南针,他还是世界上第一位发现并测量地球磁偏角的科学家。我国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。我国是世界上最早发现和使用磁性和永磁体的国家。

在 19 世纪之前,磁和电是彼此完全独立发展的两门学科。直到 1820 年奥斯特(Oersted)首先发现电流流经导线时,导线周围存在磁场。同时也发现在磁场内的导线当有电流通过导线时,导线受到了磁场力的作用而移动。奥斯特还发现导线通过电流时其周围的磁场改变罗盘指针的指向。奥斯特是第一位将磁和电联系起来的科学家。

电磁学这门学科经历了许多科学家一百多年的研究、发现才发展起来的。法拉第(Faraday)做出了重大贡献。法拉第是第一位发现将永磁体在线圈中移动时,线圈会产生电流及永磁体在线圈中当线圈有电流通过时永磁体会移动的科学家。后人利用这一机理发明了发电机和电动机。

有了发电机就有了电。电改变了世界,改变了世界各国人民的生产、生活方式。可以说,有了电,世界发生了革命性的变化。有了电,就发明了电灯,人们不再点蜡烛和煤油灯照明;有了电,又发明了电话、电报、无线电、雷达、电视……实现了人类梦寐以求的远距离通信、交流信息及控制;发明了电动机,人们用电通过电动机拖动机床、碾米、磨面等机械,大大地提高了劳动生产率,促进了生产力的发展和社会进步。

尔后,麦克斯韦(T. C. Maxwell)归纳总结了电磁学规律,他的重大贡献是麦克斯韦方程。麦克斯韦方程被广泛应用在电磁领域里。比如应用在大型磁器件、光电仪器、电动机、回旋加速器、电子计算机、无线电、雷达、电子显微镜、电子望远镜等领域。高性能的永磁体被广泛地应用行波管、磁控管、钛泵、质子加速器、阴极溅射、航天航空的电机及仪表等领域中。

自 1900 年发现并制成了钨钢永磁体之后,随着科学的发展、技术的进步,永磁体在很多领域得到广泛的应用,其需求量不断增加。人们对永磁体的综合性能的要求在不断地提高,促进了高性能的永磁体不断问世。

20 世纪 60 年代之后先后发明了高剩磁铝镍钴(AlNiCo)、铁铬钴(FeCrCo)、航天航空用的铂钴(PtCo)永磁体及钡铁氧体($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$)、锶铁氧体($\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$)等永磁体相继问世。20 世纪 80 年代后又有磁综合性能更好的稀土钴(RCO_5)(R_2Co_{17})永磁体问世。尔后又有了磁综合性能比稀土钴更好的钕铁硼(NdFeB)永磁体投放市场。这些磁综合性能很好的永磁体被广泛地应用于汽车、拖拉机、微小型风力发电机的永磁发电机上及汽车、电力

机车、航天航空仪表中。甚至电冰箱的门上用的磁性橡胶密封、儿童玩具的直流电动机、各种拎、背包的开关等等都用上了永磁体。

利用永磁体对外做功不消耗自身能量的特性，发明了磁选机，将球磨机磨成细粉的精铁粉与石粉用磁选机中的永磁体将精铁粉从中分离出来。粮食和食品加工中的去铁，化学产品生产中某些催化作用都用上了永磁体。永磁体还能阻碍某些化学反应。永磁体又可以做磁悬浮轴承；永磁体还可以做磁性联轴器；还可以做永磁吊，用以吊运钢、铁等。永磁体被广泛地应用在工业、农业、医疗、航天航空、造船、汽车、发电机、电动机等各个领域。

在 20 世纪 70 年代，世界发生了石油危机，能源短缺，而煤炭、石油类、化石类不可再生能源储量有限，不可能无限地开采。于是人们开始开发无污染可再生的清洁能源——风能，利用风能发电可以替代火电节省煤炭、石油，以减少燃烧化石类燃料对地球环境的破坏和对地球大气的污染。由于风力发电机的快速发展又促进了永磁发电机的发展。永磁发电机需求量的不断增加又拉动了永磁体的发展。

20 世纪 80 年代之后，随着科学的发展，技术的进步，风力发电机技术日趋成熟，风电机组已商品化生产。同时，风电成本也不断下降，对永磁发电机的需求也进一步增加。

永磁发电机效率高、重量轻、结构简单、便于维护、温升高、噪声小，尤其是可以做到多极低转速，非常适合风电机组用发电机。其可以大大降低风电机组的增速比，从而大幅度降低了风电机组的制造成本，为风电机组制造商所青睐。进入 21 世纪，出现了以风轮轴直接驱动多极永磁发电机（亦称直驱式风电机组）的尝试。风电机组使用永磁发电机使其制造成本和用户的使用成本进一步下降，从而大大地降低风电成本。

进入 21 世纪，世界风电装机容量每年以 30% 以上的增容速度发展着，风电机组的快速发展促进了永磁发电机的发展，进而也会促进更好的磁综合性能的永磁体的研制和开发。

第二节 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。”比如现在用所谓的最大磁能积 $(HB)_{\max}$ 来描绘永磁体的磁能是欠妥的。这实在是因为到目前为止我们尚无法制造出 1m^3 体积的永磁体，但却以 1m^3 的永磁体的磁能积来衡量永磁体的磁能，只能是用小体积永磁体所具有的磁能积推出来的，这不符合永磁体的性质。

笔者对永磁体及永磁发电机进行了 30 余年的研究，理论和实践证明，永磁体的磁能在一定范围内是关于永磁体磁面积及两磁极极面之间的距离的函数，不是永磁体体积的函数。当两极面之间的距离增加到一定值之后，再增加两极面之间的距离，则两极面上的磁感应强度不再增加。也就是说，永磁体的磁能不是体积函数，把永磁体的磁能作为永磁体体积的函数是欠妥的。

永磁体的磁场可以作为某些能量转换的媒体，在能量转换过程中，永磁体不损失自己所拥有的磁能。

永磁体对外做功不消耗其本身的磁能，在某种意义上说，永磁体的磁能不遵守能量守恒。

现举例来说明。

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强度进行测量，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) 永磁吊在吊运 1500 次之后，永磁体磁极表面的磁感应强度并未因其吊运 1500 次做功而减少，说明永磁体对外做功不损失其自身的磁能。

2) 永磁吊吊运 1500 次做功为

$$\begin{aligned} W &= 1500 \times (0.02 \times 1000 - 5) \times 9.80065\text{J/kg} \cdot \text{m} \\ &= 220.515\text{kJ} \end{aligned}$$

3) 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 永磁体的体积为

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

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

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

5) N48 永磁体标定的 $(HB)_{\max} = 390\text{kJ/m}^3$ ，而 N48 永磁体 20 块吊运 1500 次做功 220.515kJ，标定值是 20 块 N48 永磁吊吊运 1500 次做功的倍数 K_2

$$K_2 = 390\text{kJ} \div 220.515\text{kJ} = 1.769 \text{ 倍}$$

6) 永磁吊吊运 1500 次所做功是 N48 永磁体标定的 $(HB)_{\max} = 390\text{kJ/m}^3$ 的倍数为 K_3

$$\begin{aligned} K_3 &= 220.515 \times 1666.67 \div 390 \\ &= 942.37 \text{ 倍} \end{aligned}$$

7) 由 20 块 N48 永磁体组成的永磁吊尚可使用几千次，甚至几万次进行吊运钢板做功。这个实例的结论如下：

1) 永磁体的磁能用 $(BH)_{\max}/\text{kJ/m}^3$ 来标定是欠妥的。

2) 永磁体对外做功不消耗自身的磁能，在某种意义上说，永磁体的磁能不遵守能量守恒。

第三节 国内外永磁发电机现状

永磁发电机就是将机械能通过永磁体的磁能转换成电能的设备。永磁体的磁能是机械能转换成电能的媒体，在能量转换过程中，永磁体自身的磁能不会减少。

永磁发电机诞生得很早，但实际应用永磁发电机却是在 20 世纪 30 年代。永磁发电机主要用在手摇电话机中，它给电话振铃供电；军队战时野外手摇永磁发电机为收发报机供电；自行车后轮拖动的永磁发电机为自行车夜间照明供电及摩托车的磁电机为点火线圈供电，等等。

20 世纪 50 年代之后，拖拉机用永磁发电机发电照明；也有汽车用永磁发电机发电为汽车蓄电池充电等。

20 世纪 70 年代，世界发生了石油危机，很多工业发达国家开始开发风能资源，利用风

能发电。当时,虽然风力发电机的功率不大,但进行了用无污染、可再生的清洁能源——风能转化成电能的尝试。这些风电机组绝大多数都采用永磁发电机。例如美国的 Winco 公司生产的 200W 风电机组就是采用 12V 200W 的永磁发电机;美国 Berger Wind Power 公司生产的 1.0kW 的风电机组采用的是 115V 1.0kW 的永磁发电机,该公司生产的 6.0kW 风电机也是永磁发电机,永磁发电机电压 115V、功率 6.0kW。

我国 20 世纪 80 年代之后生产的微、小型风力发电机也广泛地采用了永磁发电机。如 FD1.6—50 微型风力发电机采用了 12V 50W 的永磁发电机;FD5.6—1000 小型风力发电机是采用 24/48 1000W 永磁发电机等。

再如法国 Aerowatt 的 0.2kW、0.35kW、1.125kW、4.1kW 微小型风力发电也是采用永磁发电机。

这些永磁发电机的特点是功率大部分在 10kW 以内,电压在 115V 以下,电压较低,大部分为 12~48V,很少有超过 220V 的。

笔者经 30 余年对永磁体和永磁发电机的研究和试验,在 1997 年研制成功了 8 极三相 380V 功率 11kW 的永磁发电机。在试验台上经过 72h 全负荷连续运行及对各种参数的检测,结果表明:与常规同容量的励磁发电机相比:效率高 2%~8%;温升高 2~10°C;噪声低 2~10dB;重量轻 40%~60%。并于 1998 年获国家专利(专利号为 ZL98211145.2)。尔后,笔者用自己的专利技术成功地设计和制造了 36 极三相 380V 的 80kW、100kW 等永磁发电机。也设计了 500kW、1000kW、1500kW 及双层 60 极 3000kW 永磁发电机,如图 1-3 (见书前彩色插页)所示。

进入 21 世纪,很多风电机组制造商都积极采用多极低转速的永磁发电机作为风电机组用发电机,甚至采用多极永磁发电机由风轮直接驱动的直驱式风电机组。如德国的 E—33 型直驱式风电机组 330kW 永磁发电机,E—40 型直驱式风电机组用 500kW 永磁发电机,以及 E—48 型直驱式风电机组用 800kW 永磁发电机。荷兰的 Lagerway 750kW 永磁发电机的直驱式风电机组。如美国的 Liberty 2.5MW 风电机组采用 4 台 660kW 永磁发电机并联输出 2.5MW 功率。

我国的大中功率的永磁发电机发展很快,进入 21 世纪,先后有新疆的 1.2MW 永磁发电机的直驱式风电机组,上海的 2kW、5kW、20kW、50kW、1MW、2MW 永磁发电机的风电机组,湖南的 2MW 永磁发电机组等先后问世。直驱式永磁发电机组如图 1-1 (见书前彩色插页)所示。

世界上许多国家都在不断地开发各种功率和不同极数的永磁发电机以满足风电每年以 30% 以上的增容速度的快速发展对永磁发电机的需求。不仅风电机组需求永磁发电机,而且诸如海流发电、涌浪发电也都需要永磁发电机,如图 1-2 (见书前彩色插页)所示。

第四节 永磁发电机的未来

进入 21 世纪,永磁发电机之所以为风电机组制造商所重视,并被广泛地采用,就在于永磁发电机不仅具有效率高、重量轻、温升高、噪声小、节能、结构简单、维护容易,更主要的是永磁发电机可以做到多极低转速,特别适合风力发电机。

大型风电机组的叶轮转速通常都在 15~25r/min,而常规励磁发电机又难以做到多极低

转速,因而风电机组增速器的增速比一般都在 $i=1:(50 \sim 120)$ 。大增速比的增速器不仅造价高而且寿命短,维护费用高,这又使用户的使用成本高,进而导致风电机组的风电成本高。

在风电机组上使用的常规励磁发电机做不到多极低转速,而永磁发电机可以做到。永磁发电机可以做到 60 极、72 极,甚至 84 极,这样,可以使风电机组的增速器的增速比大幅度降低到 $i=1:(5 \sim 7.5)$ 。增速比的大幅度降低,不仅大幅度地降低了增速器的造价及大大地提高了增速器的使用寿命,使增速器的寿命比常规励磁发电机的增速器的寿命提高 10 倍以上,达到 20 年以上,而且会大大降低增速器的维护费用,使用户的使用成本下降,进而使风电成本降低,这正是风电机组制造商及风电机组用户所希望的。

进入 21 世纪,用永磁发电机的风电机组的风电并网是由微机控制大功率 IGBT 模块来完成。IGBT 模块将变频的交流电变成直流电,并将直流电逆变成与电网频率相同且同步的交流电并在逆变中保持并网电压不变的情况下变换电流来实现并网功率的调整,从而使永磁发电机的风电机组的风电实现安全、可靠并网。

电是人类赖以生存和生产的不可缺少的能源,然而电能并不是第一能源,它是由火电、水电、核电等构成的。火电是以煤炭、石油等化石类能源经燃烧转化的。化石类能源燃烧时放出大量的 CO_2 和 SO_2 ,对地球环境和大气造成危害,同时,化石类能源储量有限,不可能无限地开采。全世界水利资源有限,再度开发水电也是有限的。而核能是以放射性核燃料为能源转化为电能的,核能是一种既不可再生又有污染甚至会造成重大核灾难的能源。而风能和太阳能才真正是可再生无污染的清洁能源。

为了保护人类共同的家园——地球,世界正在进入节能减排、发展绿色经济时代,很多国家都在开发利用无污染、可再生的清洁能源——风能和太阳能,利用风能和太阳能发电。风电和太阳能发电发展迅速,其中风电每年以 30% 以上的增容速度发展着,成为诸能源中发展最快的能源。按照《风力 12: 关于 2020 年风电达到世界电力总量的 12% 的蓝图》及现在风电发展现状来看,风电已不再是可有可无的补充能源,风电已成为具有极大商业价值和巨大潜力的主要能源之一。

风电的快速发展对永磁发电机的需求与日俱增,永磁发电机的市场需求的潜力巨大,笔者相信,正在运行的安装着励磁发电机的风电机组也会逐渐采用永磁发电机。

永磁发电机目前仅能做到 3MW,还达不到 30MW、60MW,更达不到 600MW,主要原因在于永磁体磁极的磁感应强度还不够高。目前,我国最好的商用永磁体稀土钕铁硼的磁感应强度也只有 0.5T 左右。随着永磁发电机的大量应用,会拉动磁综合性能更好地永磁体的研制和开发。当磁综合性能更好的永磁体的磁感应强度能达到 0.7T、0.8T 甚至能达到 1.0T 之时,那将是永磁发电机取代励磁发电机之日。这是科学技术发展的必然,这犹如内燃机取代蒸汽机一样不可逆转。到那时,永磁发电机的体积会更小,重量会更轻,会更节省材料。到那时,永磁发电机不仅可以达到 3MW,还可以达到 30MW、60MW、600MW,甚至更大的功率。到那时,永磁发电机不仅适用于风电机组、海流发电机组、浪涌发电机组,还会适用于水电、火电及其他发电设备用发电机。

第二章 永磁体的应用

自从 1900 年人们发现钨钢被磁化后成为永磁体之后的 100 多年里，人们不断地研发出新的永磁体。尤其 20 世纪中期之后，几乎每隔 3~5 年就会有磁综合性能更好的、新的永磁体问世。永磁体之所以如此之快地发展，就在于永磁体对外做功不消耗其自身磁能、无噪声、无污染、效率高、节能、寿命长、可靠性高、使用方便、不需另行管理等优点。因此，永磁体在发电机、电动机、医疗器械、仪表、仪器、传感器、选矿、自动控制、激光、电子、家电、航空、航天、儿童玩具等诸多领域得到广泛的应用。

第一节 永磁体在发电机、电动机方面的应用

永磁体被广泛地应用在各种发电机、电动机中，因为永磁发电机、永磁电动机都具有其独特的优点：结构简单、体积小、重量轻、温升低、噪声小、效率高、节能、寿命长、运行可靠、便于管理、维护方便容易。

永磁体在发电机、电动机中使用，基本上有两种方式：一种是永磁体径向布置，称径向式，亦称面极式；另一种是永磁体切向布置，称切向式，亦称隐极式。径向式是永磁体的磁极直接面对气隙；切向式是永磁体平行于转子径向的布置，两块永磁体的同性磁通过磁导体组成的磁极面向气隙。永磁体的径向式布置属于永磁体串联使用，而切向式布置属于永磁体并联使用。

1. 永磁体在永磁发电机中的应用

(1) 小型永磁发电机中爪极式永磁发电机

常用小型永磁发电机为爪极式永磁发电机。爪极式永磁发电机功率较小，多用在汽车、拖拉机发电经整流后给蓄电池充电供点火线圈点火或照明及汽车的自动控制用电。爪极式永磁发电机转子结构如图 2-1 所示，永磁体做成管状，轴向充磁，通过非磁性材料固定在转子轴上或直接固定在非磁性材料的转子轴上，永磁体磁极分别固定在磁导率很高的带有爪极的法兰盘上，爪极在转子圆周上形成 N—S—N—S…相间的磁极。当转子被转动时，在定子绕组中便产生了交流电，经整流后给汽车、拖拉机的蓄电池充电。

爪极式永磁发电机的特点是只用一个管状轴向磁化的永磁体，永磁体数量少且形状简单，通过磁导率很高的带有爪极的法兰盘将磁性传导到极爪上，形成 N—S—N—S…相间的转子磁极。爪极式转子的爪极数愈多，即爪极的磁极累计面积愈大，则爪极磁极表面的磁感应强度愈小，爪极永磁发电机功率愈小。最合理的爪极数是爪极的极面积之和和永磁体的环形极面积相等，这时爪极极面的磁感应强度与永磁体环形磁极极面的磁感应强度相等，爪极式永磁发电机功率较大。

在爪极式永磁发电机中，永磁体为轴向布置。

(2) 中、大功率永磁发电机

由于风能是无污染可再生的清洁能源，自 20 世纪 80 年代之后，利用风能发电发展十分

迅速，风电每年以 30% 以上的增容速度发展着。由于永磁发电机效率高、重量轻、温升高、噪声小、可靠性高、结构简单、维修方便，又可做成多极低转速，非常适合于风电机组用发电机。中、大型永磁发电机多用在风电机组上。

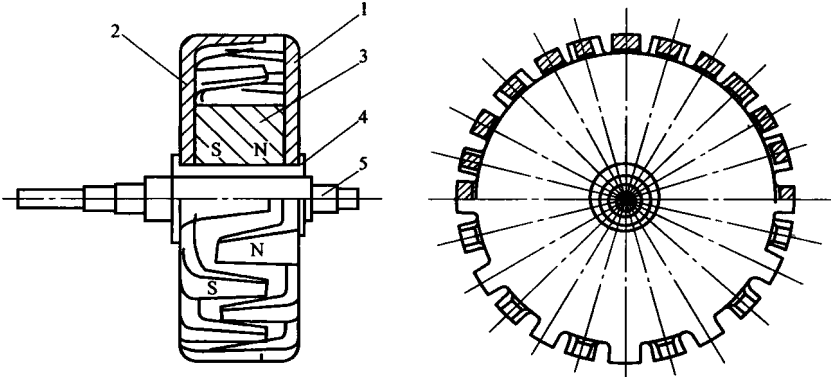


图 2-1 爪极式永磁发电机转子结构
1—N 极爪极法兰盘 2—S 极爪极法兰盘 3—轴向磁化的永磁体
4—非磁性材料 5—转子轴

中、大型永磁发电机的永磁体磁极排列基本上有两种形式，一种是径向排列，另一种是切向排列，前者亦称面极式，后者亦称隐极式。这两种永磁体磁极一般都布置在转子上，绕组布置在定子上。当转子转动时，由定子绕组输出交流电。只有永磁直流发电机将永磁体磁极布置在定子上。

1) 图 2-2a 所示为永磁发电机的永磁体磁极径向排列的结构图。永磁体磁极径向排列是永磁体极面直接作为转子磁极的极面，永磁体极面直接面对气隙，漏磁小，且易于实现对永磁体冷却。永磁体磁极径向排列属于永磁体串联，在转子为磁导率很高的材料时，串联永磁体的磁极表面的磁感应强度比单个永磁体极面的磁感应强度大一些，一般情况下大 5% ~ 10%。

永磁发电机的永磁体磁极的径向排列常常用在中、大型永磁发电机上。

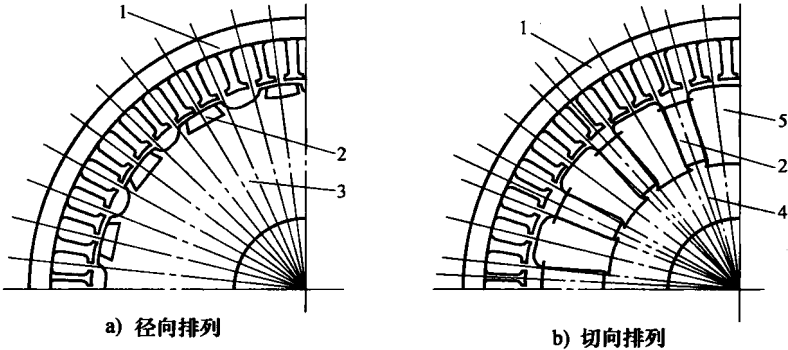


图 2-2 永磁发电机的永磁体磁极径向排列与切向排列
1—定子 2—永磁体 3—转子 4—非磁性材料 5—磁极

2) 图 2-2b 所示为永磁发电机的永磁体磁极切向排列结构图。永磁体磁极切向排列是永磁体磁极并联，可以充分利用永磁体两个磁极的磁通。永磁体磁极切向排列是两个永磁体的

相同磁极通过磁导率很高的材料组成一个共同的磁极，这个共同的磁极的磁面的磁感应强度比单个永磁体磁极表面的磁感应强度大得多，但不会达到永磁体极面磁感应强度的 2 倍，在有很好的非磁性材料阻碍 N 极、S 极磁通短路及两个同性磁极的极面积与极靴极面积相等的情况下，只能比单个永磁体磁极表面的磁感应强度大 20% ~ 40%，这主要是由于漏磁太大。

永磁体磁极的切向布置，由于永磁体埋在转子的铁心中，因此不易对永磁体实现有效的冷却。切向排列的永磁体安装困难，必须有专用工具。永磁体磁极的切向排列适用于中、小型永磁发电机。

永磁体磁极的切向排列的永磁发电机结构复杂，且必须有非磁性材料对永磁体的 N 极、S 极进行有效的隔磁，因此，大型永磁发电机很少采用这种结构形式。

径向排列永磁体磁极的永磁发电机结构简单，易于实现对永磁体的有效冷却，容易实现 60 极、72 极、84 极等多极低转速，深受风电机组制造商的青睐。笔者采用自己的专利技术，用外径 327mm、内径 230mm 的定子做成了 30 极 3kW、5kW、7.5kW、10kW 的永磁体磁极径向布置的永磁发电机；利用外径 590mm、内径 445mm 的定子做成了 36 极 40kW、60kW、80kW 的永磁体磁极径向布置的永磁发电机及用外径 1430mm、内径 1250mm 的定子设计成 60 极双层 850kW 和用外径 1730mm、内径 1590mm 的定子设计成 60 极双层 2MW 的永磁体磁极径向布置的永磁发电机。

(3) 永磁体磁极轴向排列的盘式永磁发电机

永磁体磁极最合理、最科学、成本最低的布置是永磁体两个磁面同时利用。盘式永磁发电机就是永磁体两个极面同时利用的发电机。盘式永磁发电机的结构如图 2-3 所示。转子由非磁性材料制成，永磁体多块按轴向布置镶在转子上。定子由磁导率很高的材料组成且绕组分布在定子槽内。定子和转子可以是多层结构，永磁体的两个极面同时利用，由于定子绕组多层都是相同的，绕组可以串联，也可以并联。绕组也可以做成印制电路。盘式永磁发电机永磁体磁极两面利用，科学合理，结构简单，永磁体充分利用，整机重量轻，效率高，节省材料，可以实现径向强迫风冷，永磁体能得到有效冷却，使发电机运行可靠。

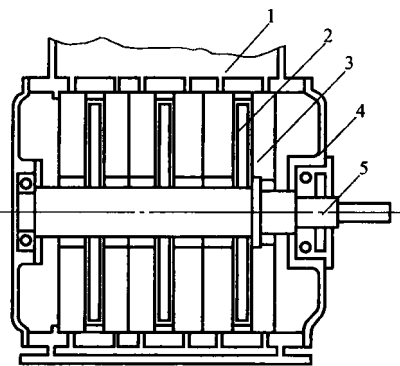


图 2-3 永磁体轴向排列的盘式
永磁发电机结构

1—冷却风道 2—转子（镶永磁体）
3—定子及绕组 4—机壳 5—主轴

(4) 永磁直流发电机

永磁直流发电机的永磁体磁极往往径向布置在定子上，而转子有绕组并设有换向铜头及电刷。当转子转动时由换向铜头及电刷将电流都变换到同一方向——输出直流电。这种发电机目前很少生产，因为这种永磁发电机结构复杂，故障率也高，不如永磁交流发电机输出交流经整流变成直流方便、可靠。

(5) 磁电机

磁电机也是一种永磁发电机，常用在摩托车点火线圈供电及为蓄电池充电。

(6) 其他永磁发电机

比如手摇应急永磁发电机；商店门前的脚踏永磁发电机等等。