

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

第2版



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



永磁发电机机理、 设计及应用

第2版

苏绍禹 高红霞 著



机械工业出版社

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的计算。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.—2版.—北京:机械工业出版社,2015.2

ISBN 978-7-111-48593-3

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(2014)第267511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:江婧婧

版式设计:霍永明 责任校对:张薇

封面设计:路恩中 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2015年1月第2版·第1次印刷

184mm×260mm·12印张·3插页·278千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-48593-3

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 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

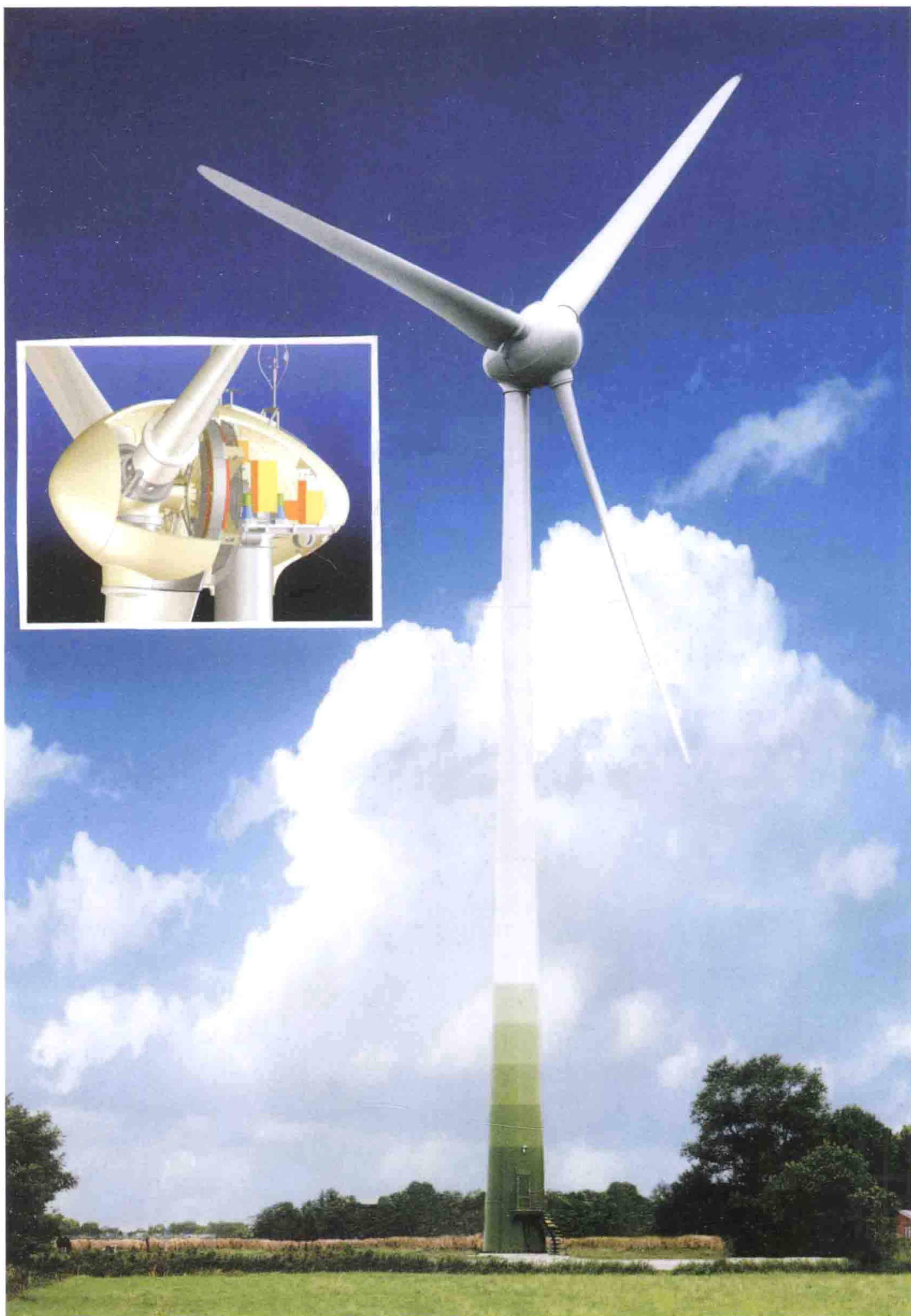


图 1-1 德国 E48 用多极永磁发电机的大型直驱式风电机组

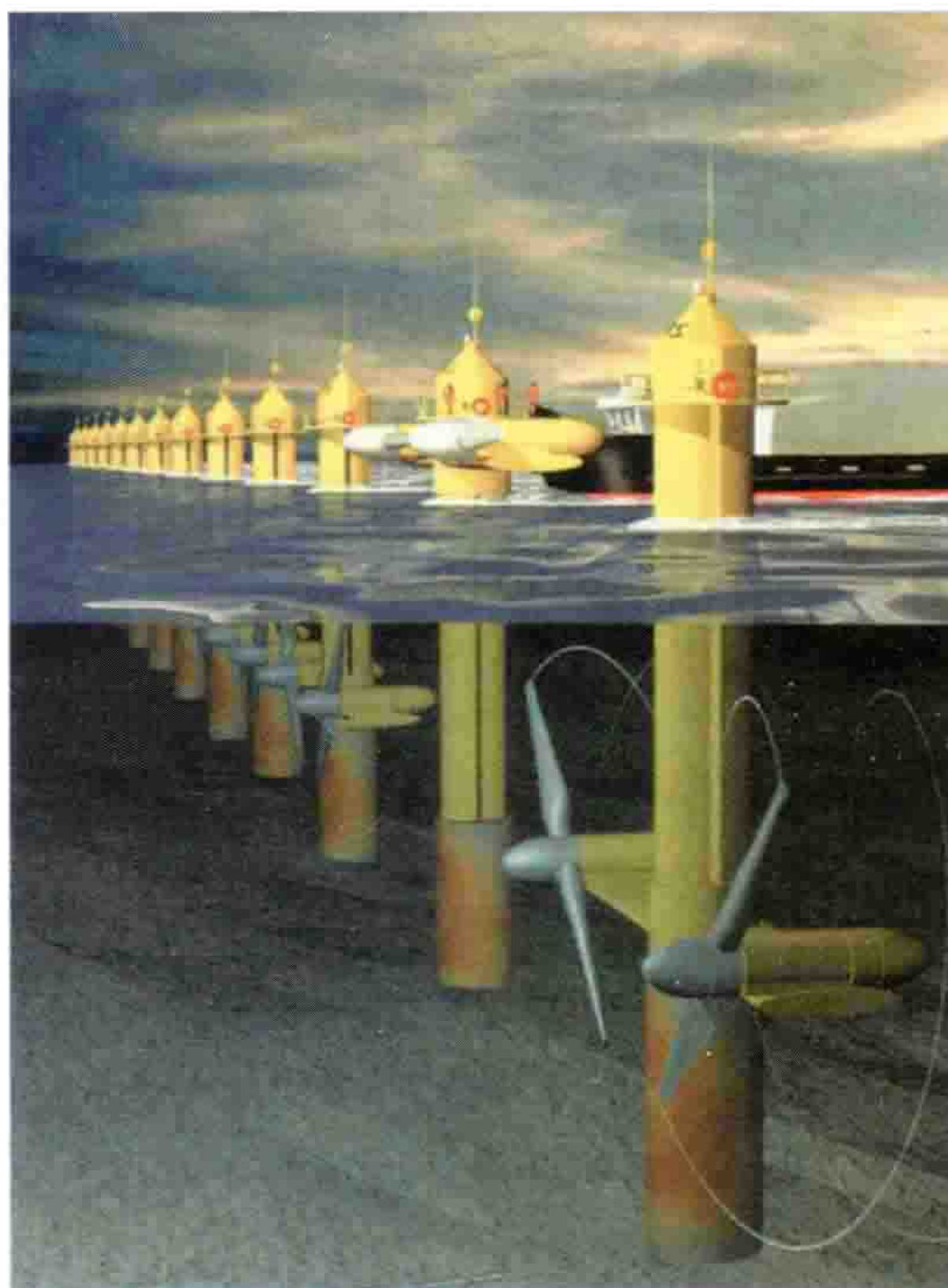


图 1-2 海流、涌浪发电站

海流、涌浪发电是拥有海岸线国家开发的可再生无污染的清洁能源，使用的是永磁发电机。永磁发电机无转向要求，正转反转都发电。

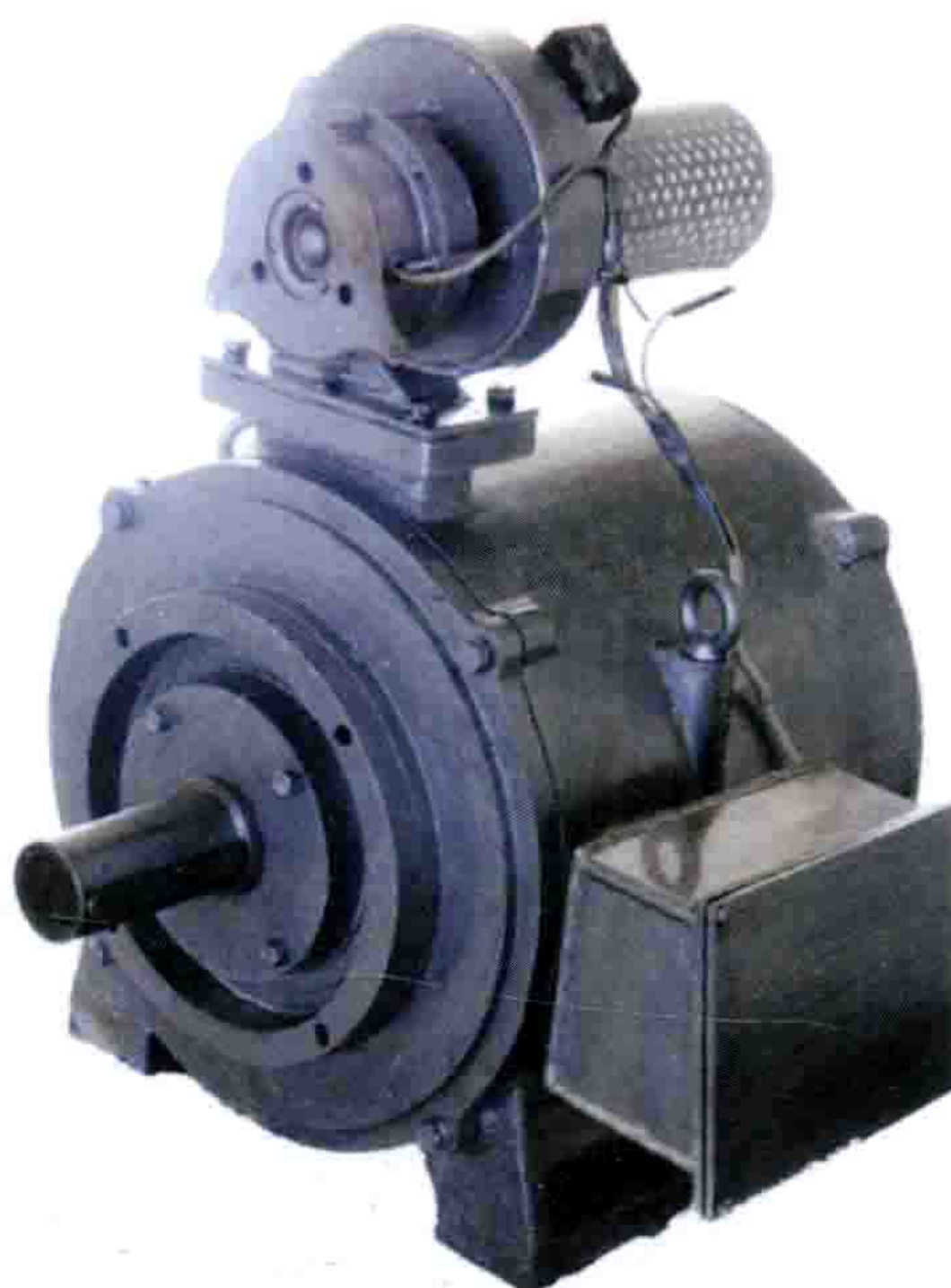


图 1-3 作者利用自己的专利“高效永磁发电机”技术做的 GYFD220-30/7.5 样机

功率 $P_N = 7.5\text{kW}$ 相数 $m = 3$ 电压 $U_N = 380\text{V}$ 极数 $2p = 30$ 同步转速: $n_N = 200\text{r/min}$ 定子内径 $D_{i1} = 230\text{mm}$
定子外径 $D_1 = 327\text{mm}$ 功率因数:阻性 $\cos\varphi = 1$ 感性 $\cos\varphi = 0.87$ 效率 $\eta = 96\%$ 冷却方式:强迫风冷

第2版前言

《永磁发电机机理、设计及应用》一书自2012年4月由机械工业出版社出版发行之后，受到很多永磁发电机的研究者、设计者、爱好者和制造商的喜爱。很多读者来电咨询，甚至有的永磁发电机爱好者、研究者及设计者在进行“永磁体不遵守能量守恒”的实验和理论的证明。也有很多热心读者对本书的错误提出了诚恳的批评和建议，作者对此表示衷心的感谢。

本书第1次印刷的册数已售罄，作者应机械工业出版社电工电子分社的牛新国社长和江婧婧编辑之邀，对《永磁发电机机理、设计及应用》一书进行了修订。除对第1次印刷中的错误进行改正之外，又与时俱进地增加了部分内容，以飨读者。

磁性和磁体对很多人来说并不陌生，但对磁的本性及磁的实质的研究仍未完成。磁场是像电场一样的空间场，经典理论所谓的磁力线是什么？它是否是一种物质？如果是一种物质，它来自电子还是来自何方？它是如何吸引顺磁质和铁磁质的？同性磁极为何相互排斥？而异性磁极又为何互相吸引？为什么没有绝对隔磁物质？为什么不能把磁极分开？为什么N极先于S极出现？磁，这个神秘的东西，要了解它的本质仍需时日。作者愿与永磁发电机的爱好者、设计者一起共同努力，去探讨磁的本质，去揭开磁的神秘面纱。

永磁发电机由于效率高、温升高、功率因数高、重量轻、噪声低、结构简单、便于管理、维护方便等优点深受风力发电机组制造商的青睐。风力发电机组越来越多地采用永磁发电机。

对于永磁发电机的设计，作者采用从理论到实践的阐述方式，宗旨是具有可操作性。这次修订又给出了一些新思路和新方法，并经实践证明是可行的。

在永磁发电机的设计上，作者认为应该遵循创新再加创造的精神。什么是创新？创新就是抛开旧的，创造新的。什么是创造？创造就是想出新方法，建立新理论，做出新的发明成果或新的东西。

由于作者水平有限，修订后的《永磁发电机机理、设计及应用（第2版）》也在所难免会出现这样或那样的错误，敬请读者批评指正，作者不胜感谢！

作者对于机械工业出版社电工电子分社的牛新国社长和江婧婧编辑给予的支持和帮助表示衷心的感谢。

苏绍禹

2014年8月

第1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的影响进行了研究，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%，温升高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，温升高，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、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

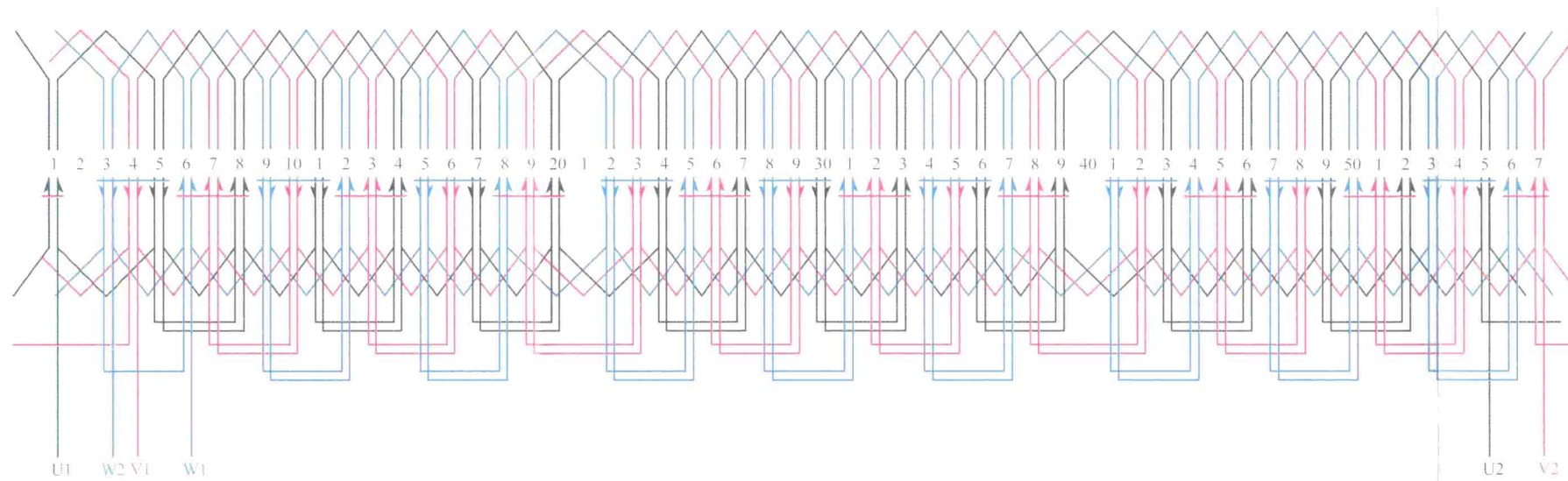
主 要 符 号

- 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_δ ——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_{i1} 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_{i1} ——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} ——定子铁心重量, 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'_α ——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 ——质量, 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_{Fej} ——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 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$
 λ ——永磁发电机尺寸比, ($\lambda = L_{\text{ef}}/\tau$)
 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



槽数 $z = 57$

每极每相槽数 $q = 1 \frac{1}{18}$

极数 $2p = 18$

同步转速 $n_N = 333 \text{ r/min}$

同步频率 $f_N = 50 \text{ Hz}$

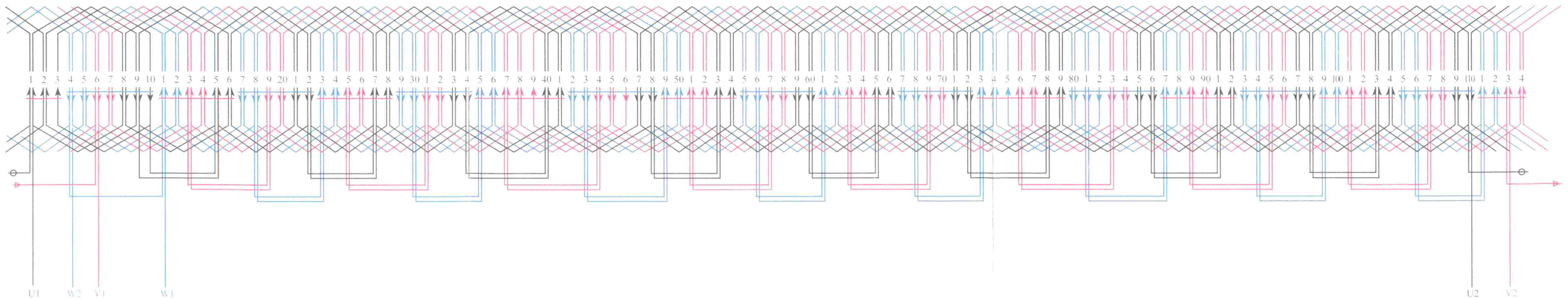
相数 $m = 3$

绕组形式：同相双层链式

并联支路数 $a = 1$

接线方式：头-头、尾-尾

a)

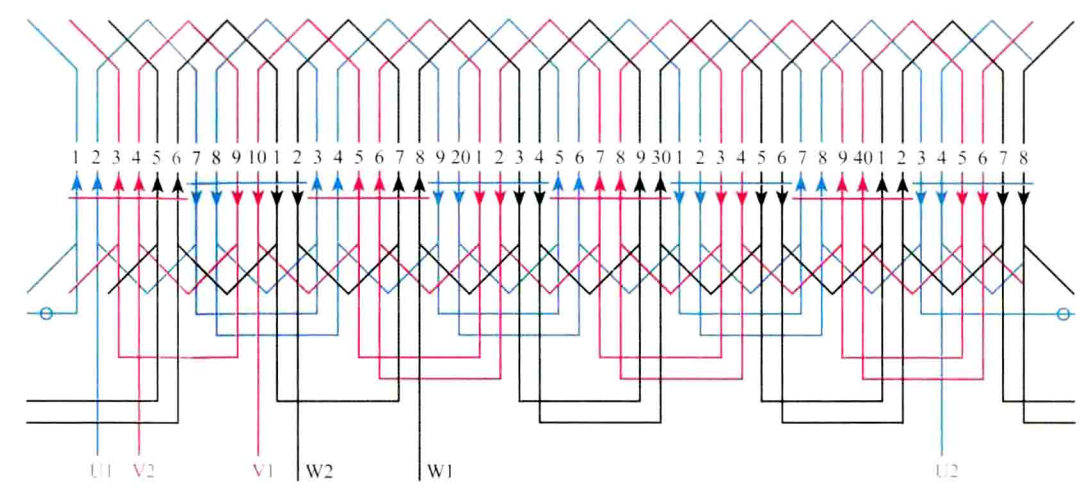


b)

齿数 $z = 114$ ；极数 $2p = 18$ ；每极每相槽数 $q = 2 \frac{2}{18}$ ；相数 $m = 3$ ；并联支路 $a = 1$

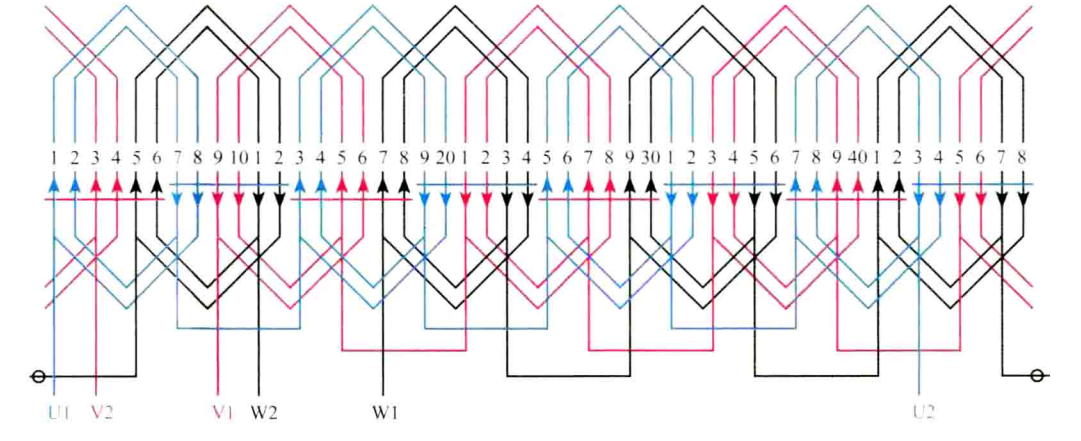
同相双层链式，绕组端部扭转换位。接线形式：头-头、尾-尾

图 6-5 永磁发电机 18 极 $q = 1 \frac{1}{18}$ 和 $q = 2 \frac{2}{18}$ 绕组布线图



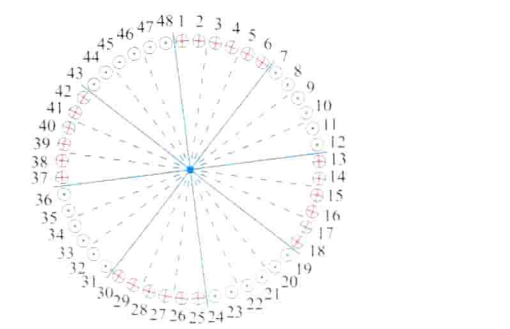
8 极 48 槽 $q=2$ 单层链式绕组、头-头、尾-尾接、并联支路 $a=1$

a) 单层链式绕组



8 极 48 槽 $q=2$ 单层同心式绕组、头-尾接、并联支路 $a=1$

b) 单层同心式绕组



8 极 48 槽 $q=2$ 单层链式绕组与单层同心式绕组只不过绕组形式不同，但它们的效果一样。它们的相带一样

c) 单层链式绕组与单层同心式绕组相带

图 6-4 单层链式绕组、单层同心式绕组及其相带

目 录

第2版前言

第1版前言

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 14

第三节 永磁体在磁感应、磁场方 面的应用 17

第三章 永磁体的种类及性能 19

第一节 关于磁与磁性能的几个 概念 19

第二节 永磁体的特殊性能 22

第三节 永磁体的种类及其主要磁 性能 26

第四章 永磁体的磁路及永磁发电机的 磁路计算 34

第一节 永磁体及磁导体的选择 34

第二节 永磁体的磁路 36

第三节 永磁体的特性曲线及工作点 41

第四节 永磁体在永磁发电机中的 布置 43

第五节 永磁发电机极弧系数、气隙系数 及气隙轴向长度的计算 45

第六节 永磁发电机永磁体磁极的 气隙磁密 48

第七节 永磁发电机的定子齿、定子 轭磁密 52

第五章 永磁发电机的额定数据、功率和 主要尺寸的确定 54

第一节 永磁发电机的技术条件和

额定数据 54

第二节 初步确定永磁发电机的主 要尺寸 56

第三节 永磁发电机定子槽形和永磁体 磁极的设计 59

第四节 永磁发电机的主要参数 61

第五节 永磁发电机的功率 63

第六章 永磁发电机的定子槽数、绕组 及起动力矩 68

第一节 永磁发电机定子槽数的 选择 68

第二节 永磁发电机绕组形式的 选择 71

第三节 永磁发电机的起动力矩 74

第七章 永磁发电机的效率 79

第一节 永磁发电机运行时的铜损耗 79

第二节 永磁发电机的铁损耗 82

第三节 机械损耗 86

第四节 永磁发电机效率 87

第八章 永磁发电机的温升与冷却 91

第一节 热传递的基本原理 92

第二节 永磁发电机的温升曲线分布 100

第三节 永磁发电机的最高温升 102

第四节 永磁发电机的冷却 104

第九章 永磁发电机结构设计及强度、 刚度计算和平衡 111

第一节 永磁发电机的结构形式和 安装形式 111

第二节 永磁发电机的结构设计 113

第三节 永磁发电机主要零部件的刚度、 强度的计算 117

第四节 永磁发电机转子的平衡 129

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	第一节 永磁发电机的特点及其与常规励磁发电机的比较	162
第三节 永磁发电机设计举例 2 (三相、18 极、1000W)	148	第二节 永磁发电机的应用及其未来发展	164
第十一章 永磁发电机在风力发电机组中的应用	157	附录	166
第一节 永磁发电机在并网风力发电机组中的应用	157	附录 A 厚绝缘聚酯漆包扁铜线	166
第二节 永磁发电机在垂直轴和离网水平轴风力发电机组中的应用	159	附录 B 磁导体硅钢片的主要性能 (国产硅钢片)	167
第三节 风力发电机组用永磁发电机的防雷	160	附录 C 部分导磁材料的磁化曲线及铁损曲线表	171
第十二章 永磁发电机的未来	162	参考文献	178

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。我国在战国末期就有“慈石召铁”（即磁石吸铁）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。指南针的发明对航海导航、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。同时也发现当有电流通过磁场内的导线时，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在行波管、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