



装备科技译著出版基金

Design of Rotating Electrical Machines

旋转电机设计

[芬兰] 尤哈·皮罗内 (Juha Pyrönen)

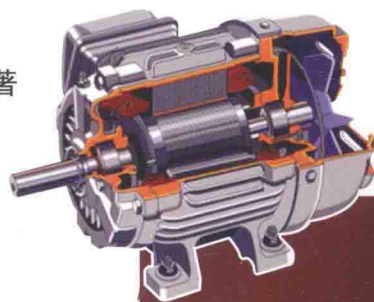
[芬兰] 塔帕尼·约基宁 (Tapani Jokinen)

[斯洛伐克] 瓦莱里雅·拉玻沃兹卡 (Valéria Hrabovcová)

著

贾好来 陈 燕 潘 伟 于焰均 贾 晨 译

全 力 朱孝勇 齐伶俐 审



国防工业出版社
National Defense Industry Press

WILEY



装备科技译著出版基金

Design of Rotating Electrical Machines

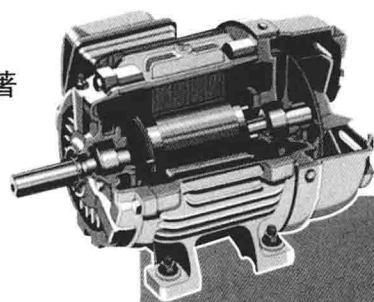
旋转电机设计

[芬兰] 尤哈·皮罗内 (Juha Pyrönen)

[芬兰] 塔帕尼·约基宁 (Tapani Jokinen)

[斯洛伐克] 瓦莱里雅·拉玻沃兹卡 (Valéria Hrabovcová)

著



贾好来 陈 燕 潘 伟 于焰均 贾 晨 译

全 力 朱孝勇 吝伶艳 审

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2012-100 号

图书在版编目(CIP)数据

旋转电机设计/(芬)皮罗内,(芬)约基宁,(斯洛伐)
拉玻沃兹卡著;贾好来等译. —北京:国防工业出版社,
2016.6

书名原文:Design of Rotating Electrical
Machines

ISBN 978-7-118-10120-1

I. ①旋… II. ①皮… ②约… ③拉… ④贾…
III. ①电机—设计 IV. ①TM302

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 115217 号

Translation from the English Language edition:
Design of Rotating Electrical Machines by Juha Pyrhönen,
Tapani Jokinen and Valéria Hrabovcová
ISBN 978-0-470-695166
© 2008 John Wiley & Sons Limited

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with National Defence Industry Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
三河市鼎鑫印务有限公司印刷
新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 25½ 字数 590 千字
2016 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 65.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

译者序

随着对节能减排的要求越来越高,各行各业急需效率高、结构合理、价格适中的各种新型电机和特种电机,尤其是和具体负载相结合的特种电机。因此,近年来世界范围内掀起了开发新型电机和节能电机的热潮。对于电机专业人才的需求大幅度增加,广大电机设计技术人员急需既包含电机基础理论,又反映电机最新发展成果的电机设计论著。

由 Wiley 出版社出版的英文版教材 *Design of Rotating Electrical Machines* 是由国外知名专家学者编写的符合当前电机行业发展状况的优秀教材。

本书是芬兰拉帕拉塔理工大学电气工程系教授尤哈·皮罗内(Juha Pyrhönen)、芬兰赫尔辛基理工大学电气工程系退休名誉教授塔帕尼·约基宁(Tapani Jokinen)、斯洛伐克日利纳大学电力电机工程系教授瓦莱里雅·拉玻沃兹卡(Valéria Hrabovcová)合作编写,最初用芬兰语编写,后经芬兰拉帕拉塔理工大学教授 Hanna Niemelä 译成英文,向全世界发行,并多次重印,受到电机界的好评。本书系统阐述了电机设计的基本理论和基本方法,对绕组设计、磁路计算、电机的基本尺寸确定、绝缘、散热等问题做了详细论述,同时也把新型结构电机融入教材之中,如多极少槽绕组,单相、两相绕组,高效率、大交/直轴电感比的永磁同步电机结构,是电机专业本科生、研究生和专业技术人员学习电机设计理论和方法难得的好教材。因此,国防工业出版社组织相关高校教师翻译了本书,以方便国内高校接触到国外先进的教学理念,促进国内教学和科研向世界一流水平迈进。

本书英文原书近 500 页,阐述详细、条理清晰、内容浅显易懂。但要将其翻译成准确、流畅的中文,则具有相当大的挑战性。对于中、英文表述上的差异,译者尽可能在中文读者不发生误解的情况下,尊重原文的表述方法。例如,对于分布在槽内的绕组,中文习惯于“分布绕组”表达,而原文用“slot winding”,为尊重原文,译者将其翻译为“槽绕组”,读者也不会发生误解;有时,词典上找不到的词组,则根据本身的含义将其译成对应的中文,如,“current linkage”,从字面上看,应该是匝链的电流,本书将其翻译成“磁动势”,既简明也不会误解。

类似地,原书中的 permeance factor,字面上的意思为“导磁系数”,而中文书籍通常将这参数称为“比磁导”(见西安交通大学陈世坤主编《电机设计》(第 2 版)P48)为方便读者,译者将其译为“比磁导”。

描述集肤效应导致导体高度减小时,原书用“reduced conductor height”中文习惯称之为“导

体相对高度”(见西安交通大学陈世坤主编《电机设计》(第2版)P66),同样,译者沿用中文习惯表达方法。

对于时间相量、空间矢量概念,原书中一律用“phasor”一词,译者统一将其译成“相量”,相信读者不会误解。

在本书翻译过程中,译者直接根据原书的勘误表对原书进行了修正;另外,对原书中的笔误也做了注解说明。

另外,对于个别概念,原书的定义和国内不同,如在原书中,对电机饱和系数定义为 $(F_{t1} + F_{t2})/F_{\delta}$,为小于1的数,而国内的定义为 $(F_{\delta} + F_{t1} + F_{t2})/F_{\delta}$,请读者注意。

为方便读者进一步学习,原书附有两个电机设计实例,有兴趣的读者可登陆 http://www.wiley.com/go/pyrhonen_rotating 下载相关资料。

本书由贾好来副教授策划、统稿和校对,并翻译了第1章、第2章,陈燕博士翻译了第3章、第4章、第5章,潘伟博士翻译了第6章、第7章,于焰均博士翻译了第9章,贾晨翻译了第8章、附录、符号表。

全书由全力教授、朱孝勇教授、吝伶艳教授审阅。三位教授详细地审阅了全书,并提出了宝贵意见,在此致以衷心的感谢。

在本书翻译过程中,得到了江苏科技大学刘维亭教授,太原理工大学宋建成教授、韩肖清教授、王淑红教授,江苏大学刘国海教授、赵德安教授、廖志凌教授、黄永红教授、孙宇新副教授、吉敬华副教授(博导)、莫付江副教授,姜晋文副教授,天津大学陈益广教授,德国霍费尔电驱动系统有限公司高海龙博士(Dr Hailong Gao, Hofer eds GmbH, Germany)等同事和朋友的大力支持,在此表示深切谢意。

本书得到2011年度第二批中国人民解放军总装备部装备科技译著出版基金、江苏省高等学校优势学科的资助,在此表示衷心的感谢。

最后,感谢国防工业出版社的友好合作!

翻译专业性非常强的论著,不仅要求有深厚的专业基础和英文基础,还要求高水平的中文写作能力,找到相对应的中文表达方法,精确表达原著内涵,译者虽竭尽所能,但恐仍有不妥之处,还请读者和专家批评指正。

2015年5月

译者

前言

几乎所有的电能都是由旋转电机产生的,只有极少数电能不是旋转电机生产的,但即使在这样的场合,也还有辅助旋转电动机在工作。在分布能源系统,新型电机永磁电机扮演着重要角色。

全世界生产的电能约一半被电动机消耗了,且越来越多的应用场合需要精确控制电动机。电力传动控制系统使大量的生产过程具有最佳控制特性:电机的转矩可被精确控制,电力电子和机电能量转换的效率很高。使用电力传动控制系统最重要的原因,是可以节约大量能源。未来,电力传动在汽车牵引和其他机器设备中扮演重要角色,因为对于大规模能量转换,电机可以显著减小机电设备体积。若驱动系统效率低下,将加重环境负担。环保要求是电气工程师设计新型、高效率电力传动系统的好理由。

芬兰是电机和电力传动的传统强国。拉帕拉塔理工大学和赫尔辛基理工大学认为,深入讲授电机运行原理和电机设计知识是必要的。本书的目的是向电气工程专业学生提供适度的电机运行原理和电机设计的基础知识和基本技能。然而,由于篇幅的限制,本书不可能包含所有电机设计知识。它可以作为初级电机设计人员的手册。每章附有参考文献,以方便读者溯源。本书作者之一,研究、设计电机数十年的芬兰塔帕尼·约基宁教授,在相关内容中融进了芬兰的电机设计风格;另一位作者,来自传统工业强国斯洛伐克的瓦莱里雅·拉玻沃兹卡教授撰写了电机设计概述。

真诚感谢为本书提供了各种材料的下列人员:Jorma Haataja 博士(LUT),Tanja Hedberg 博士(ITT Water and Wasterwater AB),Jari Jäppinen 先生(ABB),Hanne Jussila 女士(LUT),Panu Kurronen 博士(The Switch Oy),Janne Nerg 博士(LUT),Markku Niemelä 博士(ABB),Asko Parvainen 博士(AXCO Motors Oy),Marko Rilla 先生(LUT),Pia Salminen 博士(LUT),Ville Sihvo 先生以及其他众多的同事。Hanna Niemelä 博士对本书的出版给予了非常大的帮助,特此致谢。

尤哈·皮罗内
塔帕尼·约基宁
瓦莱里雅·拉玻沃兹卡

关于作者

Juha Pyrhönen 是芬兰拉帕拉塔理工大学电气工程系教授,从事电机及其控制的研究与开发,在永磁同步电机和高速感应电机设计和控制领域特别活跃。有多个研究和工业开发项目经历,出版著作多部,多项发明专利。

Tapani Jokinen 是芬兰赫尔辛基理工大学电气工程系退休名誉教授,他的主要研究兴趣是在交流电机领域创造性解决问题和电机产品开发。Tapani Jokinen 教授作为电机设计专家和 Oy Strömberg Ab 公司开展合作,并担任多家公司顾问,是芬兰高速技术有限公司和尼欧联磁性材料有限公司董事会成员,芬兰最高法院专利局委员。他的研究项目包括超导开发,用于船舶推进的大功率永磁电机,高速电机,磁轴承,求解电机的有限元分析工具。

Valéria Hrabovcová 是斯洛伐克 Žilina 大学电力电机工程系电机专业教授,她的研究领域覆盖了所有类型电机,包括电子换向电机。有多个电气工程项目的研究和开发经历,出版多部电气工程著作,参与多个国际教学项目以及众多教学法研究。

缩略语和符号表

A	线电流密度 (A/m)
$\mathbf{A}$	矢量磁位 ($V \cdot s/m$)
A	105℃ 温度等级
AC	交流电流
AM	异步电机
A1 - A2	直流电机电枢绕组
a	无换向器电机每相绕组并联支路数, 有换向器绕组半个电枢绕组的并联支路数, 扩散率
$\mathbf{B}$	磁通密度矢量 ($V \cdot s/m^2$), (T)
B_r	剩余磁通密度 (T)
B_{sat}	饱和磁通密度 (T)
B	130℃ 温度等级
B1 - B2	直流电机换向极绕组
b	宽度 (m)
b_{0c}	导体宽度 (m)
b_c	导体宽度 (m)
b_d	齿宽 (m)
b_{dr}	转子齿宽 (m)
b_{ds}	定子齿宽 (m)
b_r	转子槽宽 (m)
b_s	定子槽宽 (m)
b_v	通风槽宽度 (m)

b_0	槽口宽度(m)
C	电容(F),电机常数,积分常数
C	>180℃的温度等级
$C1 - C2$	直流电机补偿绕组
C_f	摩擦因数
c	比热容量[J/(kg · K)], 单位长度电容, 系数, 除数, 常数
c_p	恒压空气下的比热容量
c_{th}	热容量
CTI	相比起痕指数
c_V	比体积热容量[kJ/(K · m ³)]
D	电通密度(C/m ²), 直径(m)
DC	直流电流
D_r	转子外径(m)
D_{ri}	转子内径(m)
D_s	定子内径(m)
D_{se}	定子外径(m)
$D1 - D2$	直流电机串励绕组
d	厚度(m)
d_t	极靴边缘厚度(m)
E	电动势(emf)(V), 有效值, 电场强度标量(V/m), 弹性(杨氏)模量(Pa)
E	电场强度矢量(V/m)

E	120℃ 温度等级
E1 - E2	直流电机并励绕组
e	电动势瞬时值(V), $e(t)$
e	自然对数的底
F	力(N), 标量
$\boldsymbol{F}$	力(N), 矢量
F	155℃ 温度等级
FEA	有限元分析
F_g	几何系数
F_m	磁动势, $\oint \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{l}(\text{A}), (\text{mmf})$
F1 - F2	直流电机他励绕组, 或同步电机励磁绕组
f	频率(Hz), 穆迪摩擦因数
g	系数, 常数, 单位长度热导
G	电导
G_{th}	热导
H	磁场强度(A/m)
H_c, H_{cB}	和磁密有关的矫顽力(A/m)
H_{cJ}	和磁化有关的矫顽力(A/m)
H	180℃ 温度等级, 氢
h	高度(m)
h_{0c}	单根导体高度(m)
h_c	导体高度(m)
h_d	齿高(m)
h_p	子导体高度(m)
h_{p2}	极身高度(m)
h_s	定子槽高(m)

h_{yr}	转子轭高(m)
h_{ys}	定子轭高(m)
I	电流(A), 有效值, 电刷流过的电流, 面积的二次矩, 面积的转动惯量(m^4)
IM	感应电机
I_{ns}	反向旋转电流(负序分量)(A)
I_o	上层导体电流(A)
I_s	导体电流
I_u	下层导体电流, 槽电流, 槽电流总和(A)
IC	电机等级
IEC	国际电工委员会
Im	虚部
i	电流瞬时值(A)
J	转动惯量($kg \cdot m^2$), 电流密度(A/m^2), 磁极化强度
J	雅可比矩阵
J_{ext}	负载转动惯量($kg \cdot m^2$)
J_M	电机转动惯量($kg \cdot m^2$)
J_{sat}	饱和极化强度($V \cdot s/m^2$)
J_s	面电流矢量(A/m)
j	不同层的每极每相槽数的差
j	虚单元
K	变比,
X	

	常数,
	换向片数量
K_L	电感比
k	连接系数(耦合系数),
	修正系数,
	安全系数,
	层的序数
k_C	卡特系数
k_{Cu}	铜的空间系数
k_{Fe}	铁的空间系数
k_d	分布系数
k_E	和电机相关的常数
$k_{Fe,n}$	修正系数
k_k	短路比
k_L	电感集肤效应系数
k_p	节距系数
k_{pw}	由于线圈边移位而引起的节距系数
k_R	电阻集肤效应系数
k_{sat}	饱和系数
k_{sq}	扭斜系数
k_{th}	热传递系数[W/(m ² · K)]
k_v	线圈边在槽内移位而引起的节距系数
k_w	绕组系数
k_σ	安全系数
L	自感(H)
L	特性长度,特性面,管道长度(m)
LC	电感—电容
L_d	齿顶漏感(H)
L_k	短路电感(H)

L_m	励磁电感(H)
L_{md}	m 相同步电机直轴励磁电感(H)
L_{mn}	互感(H)
L_{pd}	单相主电感(H)
L_u	槽电感(H)
L'	瞬态电感(H)
L''	次瞬态电感(H)
$L1, L2, L3$	电网三相标志
l	长度(m), 闭合线, 距离, 单位长度电感, 电感标么值, 电极之间的间隙
$\boldsymbol{l}$	和积分路径共线的单位矢量
l'	有效铁芯长度(m)
l_{ew}	绕组端部平均导体长度(m)
l_p	管道的湿周(m)
l_{pu}	电感标么值
l_w	线圈端部长度(m)
M	互感(H), 励磁(A/m)
M_{sat}	饱和励磁(A/m)
m	相数, 质量(kg)
m_0	常数
N	绕组匝数, 串联匝数
N_{fl}	单极线圈串联匝数
Nu	努塞尔数
N_{u1}	槽内线圈边导条数
N_k	补偿绕组匝数

N_p	一对极匝数
N_v	每线圈边导体数
N	非驱动端
$\mathbf{N}$	整数组
$\mathbf{N}_{\text{even}}$	偶整数组
$\mathbf{N}_{\text{odd}}$	奇整数组
$\mathbf{n}$	曲面法向单位矢量
n	旋转速度(旋转频率)(1/s), 谐波阶次(sub), 临界旋转速度阶次, 整数, 指数
n_U	磁通管截面顺序号
n_v	通风槽数量
n_Φ	磁通管数量
P	功率,损耗(W)
P_{in}	输入功率(W)
PAM	极幅调制
PMSM	永磁同步电机
PWM	脉冲宽度调制
P_1, P_{ad}, P	附加损耗(W)
Pr	普朗特数
P_ρ	摩擦损耗(W)
p	极对数, 阶次, 单位铁芯长度损耗
p_{Al}	铝含量
p^*	基绕组极对数
pd	局部放电

Q	电荷(C), 槽数, 无功功率(VA)
Q_{av}	线圈组槽数平均值
Q_o	自由槽数
Q'	电压相量图径向矢量个数
Q^*	基绕组槽数
Q_{th}	热量
q	每极每相槽数, 瞬时电荷, $q(t)$ (C)
q_k	单个相带内槽数
q_m	质量流(kg/s)
q_{th}	热流密度(W/m ²)
R	电阻(Ω), 气体常数,8.314 472[J/(K·mol)], 热阻, 无功部分
R_{bar}	导条电阻(Ω)
RM	磁阻电机
RMS	有效值
R_m	磁阻[A/(V·s)=1/H]
R_{th}	热阻(K/W)
Re	实部
Re	雷诺数
Re_{crit}	临界雷诺数
RR	富树脂层(浸渍法)
r	半径(m),单位长度热阻
$\boldsymbol{r}$	径向矢量
S1-S8	工作制类型

S	视在功率(VA),截面积
SM	同步电机
SR	开关磁阻
SyRM	同步磁阻电机
S_c	导体横截面积(m^2)
S_p	极面积(m^2)
S_r	面向气隙的转子面积(m^2)
S	坡印廷矢量(W/m^2), 面单位矢量
s	转差率, 用弧长表示的扭斜程度
T	转矩($\text{N} \cdot \text{m}$), 热力学温度(K), 周期(s)
Ta	泰勒数
Ta_m	修正的泰勒数
T_b	牵出转矩,临界转矩($\text{N} \cdot \text{m}$)
t_c	换向周期(s)
TEFC	全封闭风冷
T_J	机械时间常数(s)
T_{mec}	机械转矩($\text{N} \cdot \text{m}$)
T_u	最小启动转矩($\text{N} \cdot \text{m}$)
T_v	反抗性转矩($\text{N} \cdot \text{m}$)
T_1	堵转转矩($\text{N} \cdot \text{m}$)
t	时间(s), 单个半径上的相量数, 最大公约数, 绝缘寿命
t	切向单位矢量

t_c	换向周期(s)
t_r	上升时间(s)
t^*	基绕组电压相量图的层数
U	电压(V),有效值
U	相的表示
U_m	磁压降(A)
U_{sj}	冲击电压峰值(V)
U_v	线圈电压(V)
U1	U 相绕组接线首端
U2	U 相绕组接线末端
u	电压瞬时值 $u(t)$ (V), 每层线圈边个数
u_{bl}	氧化层阻塞电压(V)
u_c	换向电压(V)
u_m	管道内平均流动速度(m/s)
V	体积(m^3), 电位
V	相的表示
V_m	标量磁位(A)
VPI	真空压力浸渍
V1	V 相绕组接线首端
V2	V 相绕组接线末端
v	速度(m/s)
ν	矢量
W	能量(J), 线圈节距(宽度)(m)
W	相的表示