



国际电气工程先进技术译丛

ISTE WILEY

特种电机

Non-conventional Electrical Machines

阿布德莱扎克·莱佐克 (Abderrezak Rezzoug)

[法]

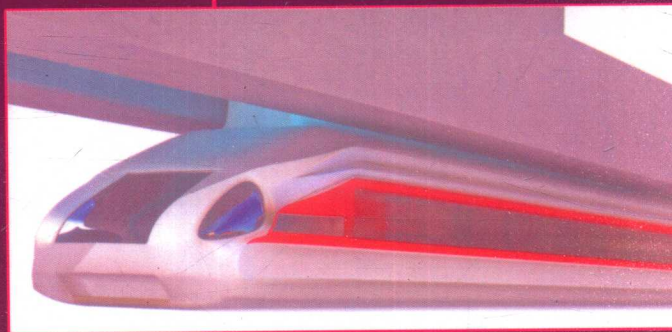
莫哈迈德·艾尔哈迪·扎依姆 (Mohammed El-Hadi Zaïm)

著

谢卫 汤天浩 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

特种电机

[法] 阿布德莱扎克·莱佐克 (Abderrezak Rezzoug)
莫哈迈德·艾尔哈迪·扎依姆 (Mohammed El - Hadi Zaïm) 著
谢 卫 汤天浩 译



机械工业出版社

Copyright © ISTE Ltd 2012

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < Non - conventional Electrical Machines >, ISBN: 978-1-84821-300-5, by Abderrezak Rezzoug, Mohammed El - Hadi Zaïm. Published by ISTE Ltd - John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2014-0609 号

图书在版编目(CIP)数据

非传统电机(法)莱伊克(Rezzoug, A)等著; 谢卫, 汤天浩译. -北京: 机械工业出版社, 2015. 8
国际电气工程先进技术译丛
书名原文: Non-conventional Electrical Machines
ISBN 978-7-111-51286-8

I. ①特… II. ①莱… ②谢… ③汤… III. ①电机 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 196010 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: 罗莉 责任编辑: 罗莉

版式设计: 赵颖喆 责任校对: 佟瑞鑫

封面设计: 马精明 责任印制: 李洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 10 印张 · 191 千字

0001-2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-51286-8

定价: 59.00 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

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

本书所介绍的特种电机并非传统意义的旋转变压器、自整角机和步进电动机等控制电机，而是按照功能区分的低速电机和高速电机，以及按照材料区分的超导电机。这些内容均是当今新技术和新材料在电机领域的生动体现。本书共分为四章，第1章介绍电机基本理论和材料特性；第2章介绍低速齿耦合电机，第3章介绍直驱式高速电机，第4章介绍超导励磁电机。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化等专业高年级学生和电气工程学科研究生的教学参考书，也可供有关科技人员参考。

译者序

一般电机学介绍的直流电机、异步电机（又称感应电机）和同步电机统称为普通电机。在生产实际和日常生活中还广泛使用着各种特殊结构和特殊用途的电机，特别是随着新技术的迅猛发展和新材料、新元件的不断涌现，新型特种电机的研究和应用正处在快速发展之中。本书所介绍的特种电机并非传统意义的旋转变压器、自整角机和步进电动机等控制电机，而是按照功能区分的低速电机和高速电机，以及按照材料区分的超导电机，这些内容均是当今新技术和新材料在电机领域应用的生动体现。

本书作者 Abderrezak Rezzoug 是法国南锡亨利·庞加莱大学的教授，超导电机是其主要研究领域。在亨利·庞加莱大学的资助下，他创建并领导着“超导团队”，在国际期刊上发表学术论文 70 多篇，是超导电机研究领域的著名专家。作者 Mohammed El - Hadi Zaïm 是法国南特大学和南特中央理工大学电气工程系的教授，其主要研究领域是特种电机的设计与开发，尤其是永磁电机、高速电机和低速电机的研究，出版电机方面的专著 5 部。

本书共分为四章，第 1 章介绍电机基本理论和材料特性，其后三章分别介绍三种特种电机，即低速齿耦合电机、高速电机和超导电机。本书的翻译工作主要由上海海事大学谢卫教授和汤天浩教授完成，留法博士陈昊协助校对译稿。翻译时对原书中一些笔误和印刷错误作了校正，个别极短的段落进行了合并，一些过长的图表文字说明放到了正文段落之中。为简洁起见，书中未加说明。

译者所在的科研团队从事特种电机研究多年，对国内外特种电机的发展动态非常关注，也一直有将国外的高水平研究成果及时引入国内的愿望。感谢机械工业出版社给了译者一次翻译国外高水平著作的机会，使我们在进行该项翻译工作的同时，对新型特种电机有了更加深刻的认识。也希望我们的工作能给国内的同行带来方便，共同促进我国电机行业的发展。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化等专业高年级学生和电气工程学科研究生的教学参考书，也可供有关科技人员参考。由于译者学识和能力有限，书中翻译难免存在疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

译者

原书前言

电机世界正处于不断发展之中，应用领域日新月异。

电机的传统供电方式是连接于恒定电压的电网，现如今几乎都是由静态终端变换器来供电，在电压平均值保持不变或变化很小的情况下，其电压都以极快的速度在变化。

在讨论包括控制系统的绝大多数情况下，可以明确地把电机作为机电转换链中的一个部件，而事实上对于每一类新的应用，电机也必须按此来检验。这种检验可以按照以下几个方面来进行：电机自身的功能，可以完成的运动，机电转换链中每个部件的必要安全性，体积的限制，重量的减少，可以达到的最高速度和/或最高加速度。

为了满足越来越多的技术要求，电机的结构已经有所发展，这首先要感谢相关组成材料的进步，这包括磁性材料（铁粉、永磁体、超导体）和绝缘或导电材料（超导线材）。

计算工具、软件和材料等从另外一个方面促进了电机设计的进步，这里所指的工具有用于各种场的计算（磁场、电场、温度场、力和应力场等），还有三维模拟工具和优化工具。

如果需要更精确地考虑几何形态（包括齿谐波、机械故障），磁的非线性（磁饱和效应与磁滞效应），或电气特性（超导体的 $E(J)$ 定律），所采用的电机模型就必须不断改进，以往所取得的经验就显得十分重要而无可替代。

尽管如此，工具的进步和模型的细化使得我们能够完成天量的仿真工作，从而在样机设计和成品阶段取得显著的经济效益。

本书的目的是解决一个本身就很难定义的问题，这就是什么是特种电机。

特种电机的工作原理完全就是基于一个磁场与一个电流的相互作用（如同大多数电机一样），或者基于场对场的相互作用（例如磁发射器）。另一类电动机的运动起因于材料自身的变化（例如压电材料、形状材料、记忆材料和磁致伸缩材料）。这第二类特种电机已经比较普遍了，尤其是压电电动机，在电磁转换方面已经形成特定的系列，所以不在本书的讨论范围。

在电机范畴内，特种电机的定义可以有多种形式，这并不是最困难的。我们可以尝试从以下几个方面来定义：

电机自身的运行形式（旋转运行、直线运行、交替运动等）；

要求的自由度（一个轴方向的旋转或运动，双轴方向的运动组合，多轴运

动，球形运动等)；

要求的速度（高速、低速）；

安装的线圈数和磁场的分布；

磁路的几何形状（即整个电机的结构：圆柱形、扁平形、中空形、锥形、凸极或隐极形、磁铁的位置、齿槽结构）；

所使用的材料（永磁材料、超导材料、非铁磁材料等）；

动态特性（机电响应时间、动态阻抗等）；

电源传输的电压或电流波形（电压的波形与幅值、电流的品质等）。

对于任何特定的应用，上述几个方面可以结合起来考虑，以完成原型电机的设计。

本书各章的选题都是充分地自主地讨论一种电机，这样作者所写的每一章都可以方便地独立阅读。本书开篇介绍电机中的电工材料，以及一些基本理论和计算方法，其后在第2~4章分析所研究的电机。

本书介绍以下类型的电机：

低速电机，驱动负载时可免去或简化使整个系统效率降低的机械齿轮。这种电机可以与液压系统直接竞争。液压系统虽然效果很好，但需要为压力下的液体流动提供坚固且厚重的通道，而且维护工作量大；

直驱式高速电机，这种系统的旋转速度一般超过1万转每分钟。高速电机在一些重要领域大有可为，如高速机械加工，电气压缩或扩充，以及压实度和重量起主要作用的系统；

超导励磁电机，可产生很强的磁场以实现无铁心电枢。超导体的第二个特性是，当超导体内部产生感应电流时，超导体既可作为一个磁屏，也可作为一个永磁体，利用这个特点可以在原型电机的设计上取得突破。

为满足特定需求或研究兴趣，人们每天都在研发一些电磁转换装置。本书如同一扇打开的窗户，展示了一些电机，它们将会不断地占有更多的市场。

目 录

译者序

原书前言

第 1 章 电机的理论工具与材料	1
1.1 理论工具	1
1.1.1 电磁学与旋转电机	1
1.1.2 旋转电机的机械学	5
1.1.3 旋转电机中的热交换	6
1.2 材料	9
1.2.1 绝缘体	9
1.2.2 导体	12
1.2.3 磁性材料	13
1.3 参考文献	19
第 2 章 低速齿耦合电机	22
2.1 引言	22
2.2 定位问题与可行性限制概述	23
2.2.1 定义	23
2.2.2 电机的质量或体积性能	23
2.2.3 机电转换频率的影响	24
2.2.4 电磁力密度	27
2.2.5 质量转矩密度的限制	31
2.2.6 与齿轮减速电机的比较	32
2.3 齿部绕组电机与齿极电机	33
2.3.1 齿部绕组 VRM	33
2.3.2 齿极 VRM	35
2.3.3 励磁齿极电机	38
2.4 分布绕组电机与微调效应电机	45
2.4.1 变磁阻电机	45
2.4.2 永磁微调电机	56
2.5 参考文献	61

第3章 高速电机	66
3.1 高速旋转运行的益处	66
3.2 高速电机的标准与条件	68
3.2.1 机械性能	68
3.2.2 铁磁损耗	70
3.2.3 气动损耗	73
3.2.4 轴承引导系统	74
3.2.5 结果与性能极限	76
3.3 电机类型	79
3.3.1 感应电机	79
3.3.2 同步电机	80
3.3.3 双凸极变磁阻电机 (DSVRM)	86
3.4 应用实例	86
3.4.1 高速切削加工 (HSM)	87
3.4.2 极速泵压	90
3.4.3 动能存储	91
3.5 高速电机优化方法	96
3.5.1 建模	96
3.5.2 优化	99
3.5.3 体积功率密度最大化的结论	105
3.6 参考文献	105
第4章 超导电机	111
4.1 引言	111
4.2 电工技术中的超导材料	111
4.2.1 超导特性	111
4.2.2 临界量	112
4.3 用于电机的超导材料	116
4.3.1 LTS 超导体	117
4.3.2 HTS 超导体	118
4.4 超导体的自励损耗	123
4.4.1 损耗原因与比恩模型	123
4.4.2 损耗评估	123
4.5 低温环境	125
4.5.1 低温时材料的机械特性	125
4.5.2 低温液体	127

VIII 特种电机

4.5.3 低温获取	128
4.5.4 低温保持器	133
4.5.5 真空技术	134
4.6 超导电机	135
4.6.1 超导励磁同步电机	136
4.6.2 单极电动机	139
4.6.3 超导屏蔽电动机	141
4.6.4 隔磁电动机	143
4.6.5 磁滞电动机	143
4.6.6 冷磁体电动机	144
4.7 参考文献	145

第 1 章 电机的理论工具与材料

第 1 章介绍电机建模的一些工具，其中包括电磁计算、机械计算和温升计算，这些都对电机设计有重要影响。本章第 1 节阐述与旋转电机设计相关的主要概念，第 2 节介绍在电机制造中所使用的不同材料。

1.1 理论工具

1.1.1 电磁学与旋转电机

这里没有必要详述电机电磁计算的所有方法，但需要回顾一下电磁计算的一些步骤和方法。

磁通密度 B [T]、磁场强度 H [A/m] 和磁极化强度 J [T] 有如下关系：

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 \vec{H} + \vec{J} \quad (1.1)$$

式中， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m 为真空磁导率， \vec{M} [A/m] 为磁化强度， $\vec{J} = \mu_0 \vec{M}$ 为磁极化强度。

如果介质是均匀、各向同性和线性的，可以写出：

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (1.2)$$

式中， μ_r 是相对磁导率，其值为实数，范围从 1 或接近 1（电机气隙或永磁体）到数千（铁磁材料）。

实际上，铁磁介质是非线性的，其磁导率 μ 随磁场（磁饱和效应与磁滞效应）而变化。更严重的是，电机中所用的铁磁材料是各向异性（晶粒取向）的，如此磁导率 μ 成为一种张量。

根据磁通守恒原理 $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$ 以及式 (1.2) 所示的定律可知，在具有铁磁磁路的电机中，相比于气隙磁场强度 H_{air} ，铁心磁场强度 H_{iron} 可以忽略不计（至少在下面的第一个实例中可以这样考虑）。

由于电工技术应用中的频率较低，可以从下面两个关系式之一推导出磁场强度 H ：

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \vec{J} \cdot d\vec{s} \quad (\text{安培定律}) \quad (1.3)$$

2 特种电机

式 (1.3) 右边的积分可以通过开口表面边界所包含的线电流总和来计算；或者按照以下关系式：

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \iiint_{\tau} \frac{\vec{J} \wedge \vec{r}}{r^3} d\tau \quad (\text{毕奥 - 萨瓦特定律}) \quad (1.4)$$

在一根导线的情况下，该式可以简化为

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \int_l \frac{Id\vec{l} \wedge \vec{r}}{r^3} dl \quad (1.5)$$

磁通密度 \vec{B} 和磁场强度 \vec{H} 可以由磁位来求取。矢量磁位、标量磁位或复合磁位的引入，使得我们可以减小问题的维数，或者利用霍普金森类比法以缩小典型电路的研究范围。为此，我们引入标量磁位，如 $\vec{H} = -\vec{\nabla}v^*$ ，并且根据类比法，将磁通管联想成电流管，其基本阻值 $r_k = \frac{\delta l_k}{\mu_k \delta s_k}$ ，磁导 $p_k = \frac{1}{r_k}$ ，这样就可以形成一个类似于电网络的由磁阻或磁导组成的网络（见图 1.1）。

根据所确定的整个空间的 \vec{B} 和 \vec{H} ，我们可以计算电磁能量，由电磁能量的变化可以进一步计算机械量（力和转矩）。对于正确设计的旋转电机（没有外部漏磁），其电磁系统可以认为是一个外界局限于电机铁磁材料部分的孤立系统，也就是说，局限在电机外半径的范围之内，此时考虑的是二维问题。在这种情况下，对于外半径处， $\vec{B} = B \vec{e}_\theta$ （或 $\vec{A} = A \vec{e}_z$ ， A 是一任意的常数，为简便计通常取为零）。

另外一个简化计算的方法是，认为铁磁材料部分的磁场强度 H 等于零，这样研究的范围就减小到“气隙 + 槽”的边界。如果已知每个介质的 (\vec{B}_i, \vec{H}_i) 组合，就可以计算磁能了。在线性情况下，可以写出：

$$W_e = \frac{1}{2} \sum_i \iiint_{\tau_i} \vec{H}_i \vec{B}_i d\tau \quad (1.6)$$

电磁转矩或电磁力可以通过对可移动部分的机械自由度或形变度相关变量的求导来获取。在本书中，只考虑旋转角度的问题，如图 1.2 所示。如果已知围绕旋转部分的路径上每个点的 (B_r, H_θ) 组合，就能简单地通过沿该路径的积分计算出电磁转矩。在一个圆柱形电机中，最简单的形状就是位于气隙的半径为 R 的圆（图 1.3）。单位长度的电磁转矩可表示为

$$\gamma = R^2 \int_{2\pi} H_\theta(R, \theta) B_r(R, \theta) d\theta \quad (1.7)$$

当 $R = R_s$ 时可获得特定的形状，这时 $H_\theta(R_s, \theta) = K_s(\theta)$ ， $K_s(\theta)$ 是等效于槽中电流实际分布的表面电流密度（见图 1.4）。

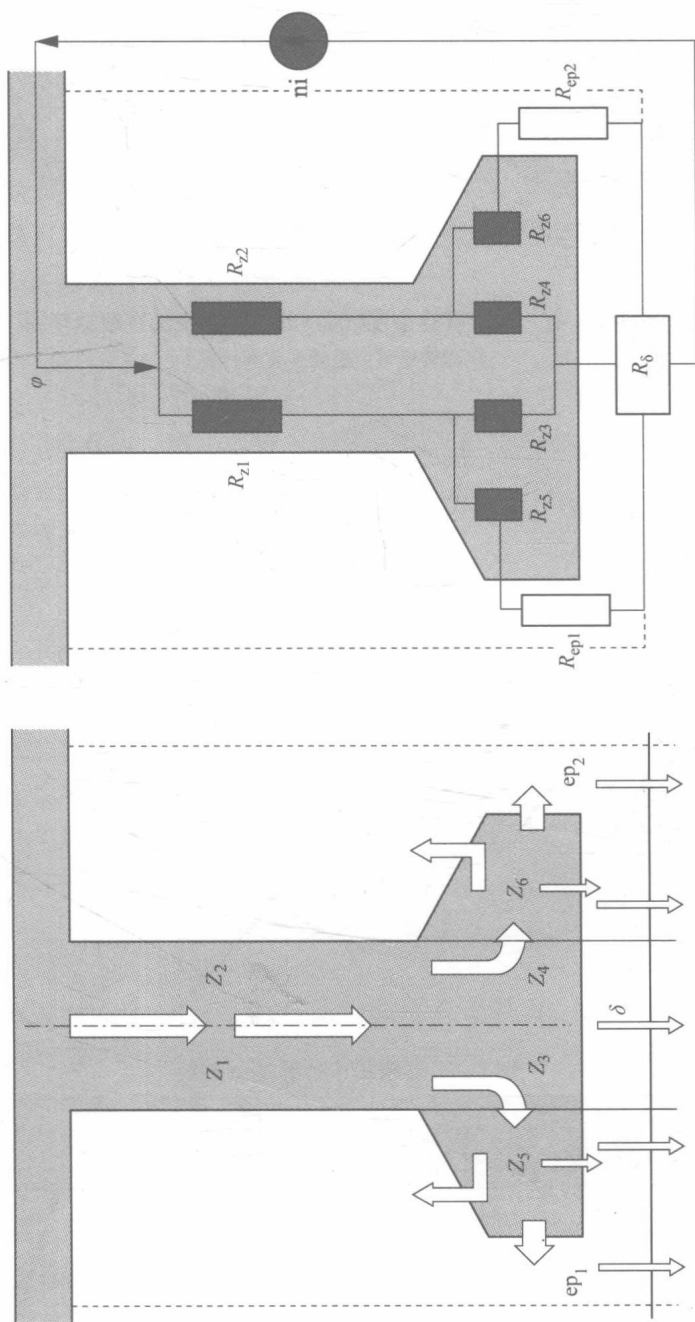


图 1.1 磁通流向示意及其等效电路
(阴影区域表示饱和和磁阻, 白色区域表示不饱和和磁阻)

4 特种电机

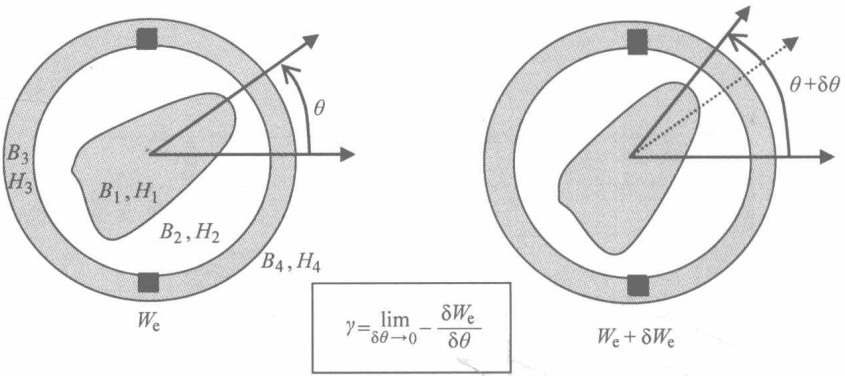


图 1.2 有一个旋转自由度 (θ) 的电磁系统的一般原理图
(电磁转矩可由磁能变化率计算)

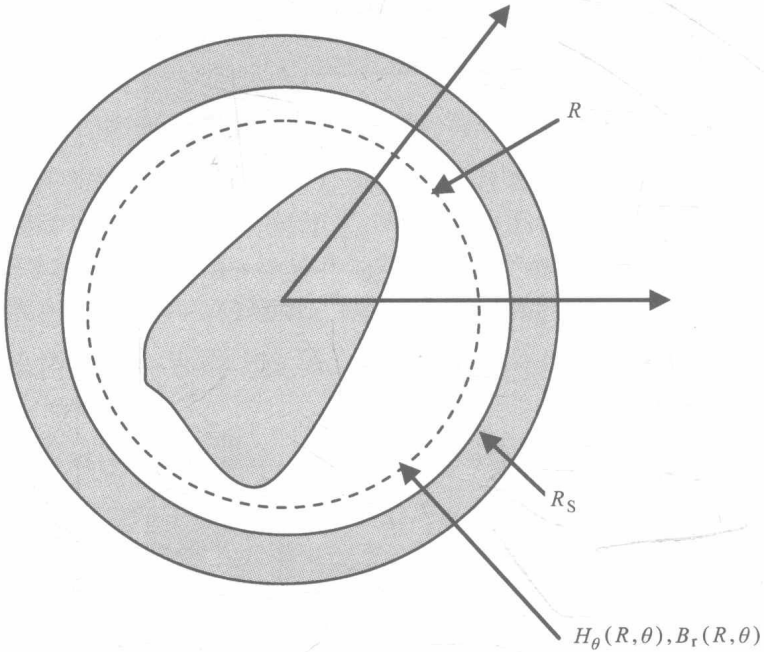


图 1.3 虚线用于计算电磁转矩

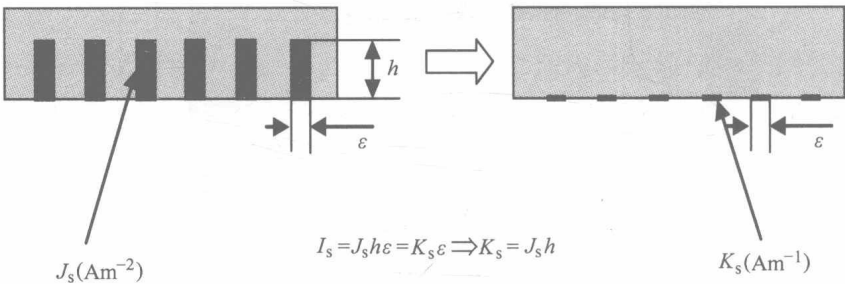


图 1.4 求取等效表面电流密度的示意图

这种方法使得我们可以简化计算,尤其对于气隙均匀的电机,但前提是要考虑 B 和 H 特性的许多约束。我们可以快速地确定预设计方案,并明确优化设计工具中需要的重要参数。

第二种研究电机的方法是基于集总电路模型。为了使用这种方法,必须辨识矩阵模型中的参数。通常,这种研究方法的主要步骤是:首先给电路编码 (n 阶),然后确定电感矩阵 ($n \times n$ 阶,其中一些元素取决于位置 θ),以及对角线电阻矩阵 ($n \times n$ 阶)。

按照“电动机”惯例,一方面我们可以表达电流与电压源之间的关系,另一方面又可以表达电磁转矩与电流的关系:

$$[\psi] = [L(\theta)][I] \quad (1.8)$$

$$[V] = [R][I] + \frac{d}{dt}[\psi] = [R][I] + \dot{\theta}[L'(\theta)][I] + [L(\theta)]\frac{d}{dt}[I] \quad (1.9)$$

在式(1.9)的右边,第一项表示电阻压降,第二项表示由于旋转而产生的电动势(电磁场 k) E_{rot} ,最后一项表示变压器电动势。

磁共能和转矩表示为

$$W = \frac{1}{2}[I]^T[L][I] \quad (1.10)$$

$$\gamma = \frac{\partial W}{\partial \theta} = \frac{1}{2}[I]^T[L'(\theta)][I] = \frac{1}{2\dot{\theta}}[I]^T[E_{\text{rot}}] \quad (1.11)$$

使用这种方法的难点在于求取矩阵 $L(\theta)$,在某些情况下,必须通过变换使矩阵仅包含可辨识的元素。

为了更深入地进行电机的分析和计算,大量使用计算工具势在必行,这些工具本质上都是采用有限元法或有限体积法而开发的。不算全部,这些工具就有: [FEMM4.2][®], [FLUX 2D][®], [MAXWELL][®], [JMAG][®]和 [QuickField][®]。再结合正版的计算工具,例如 [Matlab][®], [MATEMATICA7][®], [MAPLE][®], [MuPAD][®]和 [MAXIMA][®],可以全面检验电机或系统,包括影响电磁场、力和温度场的各种特性。引用这些工具的网址已列于参考文献。

1.1.2 旋转电机的机械学

本节主要讨论所有的旋转电机,尤其关注高速电机。问题不仅来自于材料的机械特性,还与高速时气隙中的气流特性有关,该特性会影响转子的散热。

为改善材料的机械特性,可以设置特殊的转子结构(有捆绑带的永磁转子、凸极电机的加固部分、笼型转子等),实现轻型高速电机的应用(从 10000r/min 到 100000r/min),例如电动工具、汽车推进、离心式压缩机、惯性存储或航空发电机。

这些电机的轴承必须能够承受高转速,采用主动磁轴承或超导轴承能够满足

这个要求。在高速电机情况下，转轴和转子的计算就显得更加重要。

对于转轴，切向应力由下式给出：

$$\tau_M = \frac{16\Gamma}{\pi d^3} \approx \frac{5\Gamma}{d^3} \quad (1.12)$$

式中， $\tau_M \in [15, 80]$ 是最大拉伸应力，其单位是 N/mm^2 （或 MPa ）， Γ 是传递转矩 ($\text{N} \cdot \text{mm}$)， d 是转轴的直径 (mm)。

当旋转部分（如齿部、导体、槽楔）的几何形状比较复杂时，铁心中的牵引力可由文献 [IVA 83] 给出：

$$\sigma_a = \frac{(m_a R_a + Z \cdot m_z R_z) \Omega^2}{2\pi h_a l_a} \quad (1.13)$$

式中， m_a 和 m_z 是圆柱主体部分和齿部各自的质量， R_a 和 R_z 是铁心和齿部在水平方向的平均半径， Z 是齿数， Ω 是转速， h_a 是圆柱主体部分的厚度， l_a 是转子槽的深度。

当电机旋转很快或超导电机时，会产生一个轴向磁场（尤其是单极磁场时），此时必须特别注意轴承的情况：

- 在工作温度为 $-256 \sim 220^\circ\text{C}$ 范围内，磁轴承的圆周速度可达到 250m/s [SKF]。必须采用控制柜以精确保持转轴的位置；
- 设置为动作铜盘的超导轴承可以不需要任何控制，因为它们是自稳定的。但是，需要放置制冷机以实现冷却 [NEX]；
- 高分子材料的轴承可以使电机转轴和固定部分实现电的绝缘 [PET 04]。这种材料允许在一个较大的转速和温度范围内工作。

对于系统集成型高速电机，需要另外关注的是校准措施。必须考虑两种偏差情况，即角度偏差和轴偏差（或水平偏差），或者这两种偏差的结合 [PIO 02]。

如果在转速为 $2000\text{r}/\text{min}$ 时，一个低于 0.05° 的角度偏差被认为是可行的，且偏差达到 0.10° 也是可以接受的。而在转速为 $20000\text{r}/\text{min}$ 时，这两个数值将分别减小为 0.005° 和 0.025° 。超过这些数值将带来严重的后果，如轴承过热，机械磨损和撕裂，以及耦合能力的破坏。

最后，想象一下由转轴的振动所带来的问题 [ZHO 01]。不同于传统的添加或压制物质的平衡方法，采用主动式轴承的动态控制可以形成磁悬浮而不接触转轴。

在一些特定的应用中，可以完全省去轴承；利用定子线圈的分布或磁路的形状可以即刻获得有用的转矩，以及转子的悬浮力 [AKI 05]。

1.1.3 旋转电机中的热交换

本节并不全面研究旋转电机中的热传输，主要是关注不同类型电机的一些特点。

首先, 时间谐波和空间谐波对热的产生具有非常快速和显著的作用, 此点在电机结构设计时很少提及。因为斩波电源电压的应用越来越少, 要使电机旋转得更快, 就必须增大电流有功分量的频率, 但这有赖于电流谐波成分的大量增加。在低速电机中, 因齿谐波而产生的磁场局部变化会引起发热, 我们在选择金属片厚度和冷却系统时必须注意这个问题。在计算中还要考虑捆绑带的使用。

众所周知, 超导材料都是工作在低温下, 这就出现了两种情况:

第一是预测电机线圈绕组所使用的组合超导体中热点产生的位置。

第二是设计一个冷却系统, 使之能够冷却超导线圈中的任何部分。在第4章, 针对超导电机, 我们提出了一些关于冷却系统的观点。

电机的温升计算因为需要处理很多参数而变得十分困难。这些参数包括电机的几何形状, 旋转速度, 材料的不均匀性, 组成材料的构成, 以及各部分的表面粗糙度等。由于计算机和数值计算方法的快速发展, 将实验研究和模拟分析相结合, 电机温升计算所取得的进步已超过了其他领域。

热模型应该是全局性的, 且比较复杂, 没有一般性, 每一种新电机就意味着一个新模型。

在评价可能采用的方法前, 我们需要描述一下热传导的方程 (符号的标记在本节的最后解释):

• 热传导遵循傅立叶定律 $\phi = \lambda \nabla \theta$, 该定律满足功率平衡, 可导出如下方程:

$$\lambda \Delta \theta + P_i = \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1.14)$$

• 热对流遵循牛顿定律:

$$\phi = hS(\theta_i - \theta_s) \quad (1.15)$$

• 热辐射遵循斯特凡-玻尔兹曼定律:

$$E = c_0 \cdot S \cdot \sigma (\theta_1^4 - \theta_2^4) \quad (1.16)$$

有两种主要途径可建立热模型。先介绍最简单的一种, 它包括电机的整体方法, 并可导出一个或两个具有代表性的模型。

在这个方法中, 近似认为电机是各向同性的, 平均温度为 θ_m 。如文献 [GRE 96] 和文献 [MAY 05] 所述, 使热量增加的总损耗 (焦耳损耗和铁心损耗) P_i 可分为两部分: 使电机温度升高的 δQ_i 和传导至外部的 δQ_e :

$$P_i dt = \delta Q_i + \delta Q_e \quad (1.17)$$

式 (1.17) 是一个简单的微分方程, 因为温度值不超过几百摄氏度, 可以用一个单一的式子 $\phi = S \cdot \alpha_t \cdot (\theta_1 - \theta_2)$ 来处理对外热传导的所有关系, 由此可得

$$P_i = M \cdot c_p \cdot \dot{\theta}_1 + \alpha_t \cdot S \cdot (\theta_1 - \theta_2) \quad (1.18)$$