



国际电气工程先进技术译丛

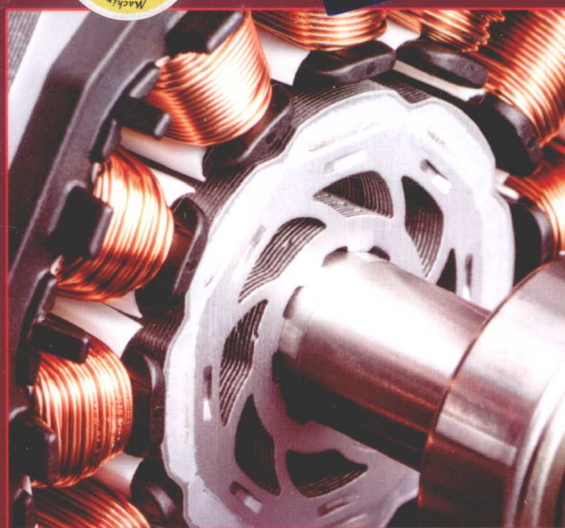
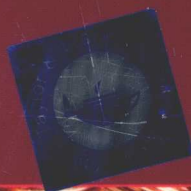
CRC Press
Taylor & Francis Group

电机及其传动系统—— 原理、控制、建模和仿真

**Electric Machines and Drives:
Principles, Control, Modeling, and Simulation**

[美] 沙欣·费利扎德 (Shaahin Filizadeh) 著

杨立永 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

电机及其传动系统—— 原理、控制、建模和仿真

[美] 沙欣·费利扎德 (Shaahin Filizadeh) 著

杨立永 译



机械工业出版社

Electric Machines and Drives: Principles, Control, Modeling and Simulation/by Shaahin Filizadeh/ISBN: 9781439858073

Copyright © 2013 by Taylor & Francis Group, LLC

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved;

本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版并在限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis Sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。
北京市版权局著作权登记图字: 01 - 2014 - 6485 号

图书在版编目 (CIP) 数据

电机及其传动系统: 原理、控制、建模和仿真/ (美) 费利扎德 (Filizadeh, S.) 著; 杨立永译. —北京: 机械工业出版社, 2015. 11
(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Electric Machines and Drives: Principles, Control, Modeling, and Simulation

ISBN 978-7-111-51520-3

I. ①电… II. ①费…②杨… III. ①电机 - 电力传动
IV. ①TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 217180 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

责任校对: 陈越 封面设计: 马精明

责任印制: 李洋

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2015 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 10.75 印张 · 220 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-51520-3

定价: 59.80 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

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

Shaahin Filizadeh 博士在总结“电机及其传动”课程教学工作的基础上编写了本书，在本书中，充分地考虑了学生在学习过程中的反馈意见，具有内容系统、适于教学、习题丰富、讲述透彻、深入浅出和内容新颖等特点。

第1章和第2章讲述了电机的基本结构和基本电磁学定律，第3章讲述了直流电机的基本工作原理和调速方法，第4~7章讲述了交流电机的基本工作原理和调速方法，第8章简要地介绍了本书涉及的电力电子技术，第9章介绍了一种新颖的基于仿真技术的电机传动系统设计方法。

本书可作为高等院校电气工程、机电工程、自动化、新能源等相关专业本科生的教材和参考书使用，也可作为相关技术人员的参考用书。

译者序

在生产生活的各个领域，电机及其传动系统有着广泛的应用，因而，在国民经济中具有重要的作用。近年来，随着电力电子技术、控制理论与控制技术、微处理器技术的飞速发展，电机传动领域无论是在理论方面还是实践方面均呈现出迅猛发展之势，其中一个突出的特点就是交流系统全方位地取代了直流系统。

在以上技术发展的背景下，作者结合自己的教学经验，特别强调教学过程中学生的反馈意见，使得本书特别适合作为电气工程、机电工程、自动化、新能源等相关专业的本科生教材，同时本书也是相关技术人员的很好的参考书。

本书内容的系统性很强，涵盖了电机学和电机传动系统两部分内容，虽然涉及内容广泛，但是强调应用、弱化理论、精心组织，作者用相对较少的篇幅对相关内容进行了深入浅出的介绍。

结合当前电机传动领域的发展现状，作者弱化直流部分，强化交流部分，合理地安排了直流传动系统和交流传动系统的内容比例。不同于国内的相关书籍，作者采用新颖的角度，对知识点进行了深入浅出的讲述，同时精心设计了 MATLAB 仿真实例，有利于降低知识点的理解难度。特别值得指出的是，作者对本书的习题进行了精心的设计，本书的习题有助于加深对知识点的理解，而且还能够引导读者进行创造性的思考，有利于培养读者的分析问题和解决问题的能力。

在本书的第9章中，作者介绍了基于仿真技术的电机传动系统的设计方法，不同于传统的设计方法，这种方法把系统作为一个整体进行考虑，为进一步提高整个系统的整体设计水平提供了一种新的思路，代表了当今电机传动领域的一个新的发展方向，特别值得关注。

限于译者的水平，本书可能存在一些翻译不当之处，欢迎读者提出宝贵的修改意见和建议。

杨立永

2015年5月

前 言

在现代生活中，电机具有重要的作用，但是又经常不为人们所察觉。对于我们的生活，电能已经不可或缺，而电能就是利用电机产生的，许多设备也是由各种各样的电机驱动的。很难想象，如果没有电机，我们的世界会成为什么样子；也很难评估，电机给我们的生活带来了多么大的便利。

很长一段时间内，关于电机的研究是电气工程领域的主要研究内容。然而，在过去的二三十年间，电机领域的研究有减弱的趋势。而关于数字和计算机系统方面的研究成为了许多大学的主要研究内容。

在最近一段时间，电机技术被应用到了许多新生的和飞速发展的大功率场合，例如，可再生能源发电项目、电动汽车和混合动力汽车等。在电力电子领域和控制系统领域出现了很多的新技术，也给电机的发展注入了新的活力。本书的目的在于通过对电机的物理原理和传动系统的运行原理的学习，激发出学生对电机及传动系统的兴趣。

章节概述

本书共包含9章和3个附录。第1章和第2章讲述电机的基本物理原理，介绍了电磁感应定律和相互作用定律，通过大量的例子阐明了这些原理在电机学中的重要作用。第3章讲述了直流电机的相关内容。首先，讲述直流电机的运行原理。然后，讲述了一个简单的动态模型，在此基础上介绍了速度和转矩的控制方法。第4~6章讲述了感应电机的相关内容。在介绍了感应电机物理原理的同时，还讲述了感应电机建模、基于稳态的传动系统和高性能传动系统等方面的内容。第7章介绍了永磁同步电机的建模和高性能控制等问题。第8章讲述了在电机传动系统中用到的电力电子技术。在研究现代电机及其传动系统时，计算机仿真技术是不可或缺的。该技术是对传统分析方法强有力的发展，另外，在电机设计中，计算机工具也应用得越来越广泛。第9章讲述了基于仿真技术的电机传动系统的优化设计方法。

附录A对动力系统的数值仿真技术进行了介绍，这部分内容是非常重要的。在这部分内容的基础上，学生可以编写自己的仿真代码，利用自己建立的计算机模型，进行相关仿真实验。

附录B对功率半导体器件进行了介绍。

附录C列出了三角函数的基本公式。

计算机工具和技术

在本书中，使用了许多计算机工具和技术，主要包括以下三种：

1. 对于简单的问题，利用在附录 A 中介绍的相关技术进行数字仿真，使用的计算机工具为 MATLAB®。

2. 利用 Mathcad 进行绕组波形、电感波形的分析和相关计算。

3. 基于 PSCAD/EMTDC 软件，对电力电子电路驱动的电机系统进行瞬态仿真。PSCAD /EMTDC 具有强大的建模和仿真能力，尤其适用于对大功率电力传动系统进行仿真，是一种被广泛应用的商业软件。

可以通过出版商获得这些仿真程序。可以在 WWW.PSCAD.COM 网站免费下载学生版的 PSCAD/EMTDC 软件。还可以根据相关说明，通过出版商获得本书的幻灯片和习题答案。

教学方法

对本书内容进行少量改动，即可作为高年级本科生和研究生的一个学期的教学内容。根据学生的学习背景和是否学过电力电子技术，教师可对第 8 章内容进行取舍，还可以适当补充相关材料（例如，DC - DC 变流器）。教师根据教学大纲的特殊要求，可以对第 9 章的内容进行取舍。

需要特别注意本书中的仿真内容，可以把仿真实例作为进一步仿真的基础，还能通过布置仿真作业和仿真项目对其进行完善。

在每章的习题部分，提供了大量的学习材料，通过这些习题，可以对每章的知识点进行复习和深化，利用这部分内容还引入了一些额外知识。

MATLAB®是 MathWorks 公司的注册商标。若需要对相关产品进行咨询，可参考以下信息：

The MathWorks, Inc.

3 Apple Hill Drive

Natick, MA 01760 - 2098 USA

Tel: 508 647 7000

Fax: 508 - 647 - 7001

Email: info@mathworks.com

Web: www.mathworks.com

致 谢

在本书的写作过程中，直接或间接地得到了许多人的帮助。在学习“电机及其传动”这门课程时，有许多本科生提供了宝贵的反馈信息，为提高课程的质量做出了贡献，这些内容也成为了本书的核心内容。本书有些内容来源于学生的作业，特别感谢 Mziar Heidari、Maryam Salimi、Farhad Yahyaie、Jesse Doerksen 和 Garry Bistyak 等人，他们出色的作业为本书提供了相关材料。Mohamed Haleem Naushath 阅读了本书全部手稿，提供了有益的反馈意见。Steven Howell 对大多数证明进行了检查，指出了其中的错误，并提出了改进意见。

本书的工作得到了来自 Manitoba HVDC 研究中心的 Randy Wachal 和 Roberta Desserre 的大力支持和帮助，两人还为本书准备了 PSCAD/EMTDC 仿真案例。

Manitoba 大学的同事们对本书给予了一贯的支持和帮助，作者与 Ani Gole 教授进行了深入的讨论，系主任 Udy Annakkage 教授对本书的写作给予了鼓励和时间上的支持，对此表示感谢。由于本书的写作，经常会延误与学生的会面时间，在此表示歉意。

感谢爱妻 Leila 和儿子 Rodmehr 对本书写作给予的理解、支持和鼓励，没有他们的付出，本书是一项不可能完成的任务，对母子二人深表谢意！

作者简介

Shaahin Filizadeh 博士分别于 1996 年和 1998 年，在伊朗获得谢里夫理工大学电气工程专业的学士和硕士学位。于 2004 年获得曼尼托巴大学的博士学位。目前，他为该校的副教授。

Filizadeh 博士的研究方向为电力电子、电力系统仿真、电气传动、混合动力机车驱动及优化技术，是多个 IEEE 工作组的研究团队成员，担任感应电机建模研究团队的负责人，同时为曼尼托巴省的一名专业注册工程师。

目 录

译者序

前言

致谢

作者简介

第 1 章 电机的物理基础	1
1.1 引言	1
1.2 感应和相互作用定律：定性讨论	1
1.3 感应和相互作用定律：深入讨论	3
1.3.1 线圈中的感应电压	3
1.3.2 感应电流和相互作用定律	5
1.3.3 一个简单的电动机：运动中的相互作用定律	5
1.3.4 感应定律和相互作用定律的共同作用	7
1.4 电机系统的能量转换	8
1.4.1 利用相互作用定律计算转矩	8
1.4.2 基于能量守恒原理的能量转换分析	10
1.4.3 线性系统的能量转换	13
1.5 磁路的非线性现象	15
1.5.1 线性铁心的解	16
1.5.2 非线性铁心的解	16
1.5.3 考虑磁滞因素	18
1.6 结束语	19
习题	20
参考文献	21
第 2 章 交流电机原理	22
2.1 引言	22
2.2 交流电机绕组的布置	22
2.2.1 集中绕组	22
2.2.2 短距绕组	24
2.2.3 分布式绕组	26
2.2.4 正弦分布式绕组	27
2.3 多相电机的绕组	28
2.3.1 三相集中绕组	29

2.3.2 三相正弦分布式绕组	29
2.4 增加极数	31
2.4.1 单相多极绕组	31
2.4.2 三相绕组布置	31
2.4.3 多极电机的旋转磁场	32
2.5 绕组布置实例	33
2.6 绕组的电感	34
2.6.1 简单圆形转子电机的自感和互感	34
2.6.2 凸极转子电机的自感和互感	36
2.6.3 分布式绕组的电机互感	38
2.6.4 交流电机的分析方法	40
习题	41
第3章 直流电机原理	43
3.1 引言	43
3.2 简单的直流电机	43
3.2.1 直流电机的感应电压及其整流	43
3.2.2 换向过程及要求	46
3.3 直流电机中主磁场和电枢的相互作用	47
3.4 他励直流电机的动态模型	48
3.5 稳态性质及其传动系统的原理	53
3.5.1 稳态运行	53
3.5.2 传动系统	53
3.6 直流电机的闭环速度控制	55
3.6.1 基本调压速度控制环	55
3.6.2 带有电流内环的调速系统	57
3.7 调速系统的变流器电路	59
3.8 结束语	59
习题	60
参考文献	60
第4章 感应电机模型	61
4.1 引言	61
4.2 在 abc 坐标系上的电机方程	61
4.3 电机方程的坐标变换	64
4.3.1 坐标变换的原理	64
4.3.2 磁链方程和电压方程的变换	65
4.3.3 电机转矩方程的变换	67
4.4 稳态模型的推导	68

4.5	等效电路参数的确定及处理	70
4.6	结束语	75
	习题	75
	参考文献	77
第5章	感应电机的稳态控制方法	78
5.1	引言	78
5.2	稳态模型分析	78
5.3	控制方法简介	83
5.4	定子电压控制	83
5.5	定子频率控制	84
5.6	恒 V/f 控制	85
5.7	定子电流控制	89
5.8	结束语	93
	习题	93
	参考文献	94
第6章	感应电机的高性能控制方法	95
6.1	引言	95
6.2	磁场定向(矢量)控制	95
6.2.1	其他实现方法	100
6.2.2	其他类型的磁场定向控制	101
6.3	直接转矩控制	101
6.3.1	直接转矩控制的原理	101
6.3.2	定子磁链和转矩估计器	103
6.4	结束语	105
	习题	105
	参考文献	106
第7章	同步电机的高性能控制方法	107
7.1	引言	107
7.2	三相永磁同步电机模型	107
7.2.1	在 ABC 三相坐标系中的电机模型	108
7.2.2	转矩方程推导	109
7.2.3	转子参考坐标系中的电机方程	111
7.2.4	稳态模型	112
7.3	PMSM 的转矩控制	113
7.3.1	转矩和速度控制原理	113
7.3.2	实际问题	114
7.4	结束语	115

习题	116
参考文献	117
第 8 章 电机驱动用电力电子电路	118
8.1 引言	118
8.2 交流电源变换	118
8.2.1 三相 AC-DC 整流器	119
8.2.2 AC-AC 变换:三相交-交变频器	122
8.3 直流电源的变换	124
8.3.1 两电平 VSC 开关单元	125
8.3.2 可控直流电压	125
8.3.3 可控交流电压	126
8.3.4 可控交流电流	128
8.3.5 AC-DC-AC 变频器	129
8.4 电力电子电路的实际问题	131
8.4.1 转矩波动	131
8.4.2 开关损耗	131
8.4.3 噪声和电磁辐射	132
8.5 结束语	132
习题	133
参考文献	134
第 9 章 基于仿真技术的电机传动系统设计	135
9.1 引言	135
9.2 基于仿真技术的优化设计方法	136
9.2.1 目标函数的设计	137
9.2.2 非线性优化算法的必要条件	137
9.3 电机传动系统的优化设计实例	138
9.3.1 间接矢量控制系统的优化设计	138
9.3.2 多目标优化	143
9.3.3 多最优解	145
9.4 结束语	149
参考文献	150
附录 A: 动态系统的数字仿真	151
A.1 引言	151
A.2 动态系统的状态空间表示法	151
A.3 Euler 数字积分法	152
A.4 结束语	153
习题	153

参考文献	154
附录 B: 功率半导体器件	155
B.1 引言	155
B.2 不控型开关器件	155
B.3 半控型开关器件	156
B.4 全控型开关器件	156
B.5 结束语	157
参考文献	157
附录 C: 三角恒等式	158
C.1 基本运算	158
C.2 和差与乘积	158
C.3 组合公式	159

第 1 章 电机的物理基础

1.1 引言

电机是用来实现能量转换的装置，绝大多数电机实现的是电能和机械能之间的转换。电动机是把电能（输入）转换为机械能（输出）的机械；发电机实现反向转换，把输入的机械能转换为电能。因此，要进行电机方面的学习，必须掌握能量转换原理的相关知识。

电机的形式多样，大小不同，以不同方式应用在各个领域。例如可以利用小功率电机来实现小型硬盘中的精确位置控制，而在电厂，由涡轮机驱动的大型发电机能够产生大量的电能。虽然，在功率等级和应用场合等方面，各种电机存在着很大的区别，但是其工作原理和基本结构（以磁路为媒介，把电机的机械部分和电气部分耦合起来）都是相同的。

虽然，在磁场的产生方式与绕组的耦合方式上，各种电机有所不同，但是，在不同电机中，以磁路为媒介，都可以实现能量在电气部分和机械部分之间的转换和流动。所以，要学习电机，就必须详细了解电机的磁场结构以及磁场在能量转换过程中的作用。虽然，通常使用 Maxwell 方程的矢量计算来研究电磁系统的工作过程，但是，本书在描述电机行为时，并没有使用这种复杂的数学工具。

本章的重点是基于简单的物理学定律，建立电机学的理论基础。在讲述过程中，仅把数学作为一种工具，如果能够使用词语、图形和定性描述的手段进行说明时，就不以数学的方式进行说明。但是，在对电机进行详细建模和定量分析时（例如第 3、4 章），数学工具还是必不可缺的。在本章的最后，回顾了磁路耦合功能，对非线性磁路的数字仿真问题进行了初步的讨论。

1.2 感应和相互作用定律：定性讨论

所有电机都是通过电磁介质把电气部分和机械部分连接起来的，其原因在于磁场和导体相互作用时发生的两个有趣的现象。

考虑如图 1.1 所示的简单情况，在图 1.1 中，规则线圈（导体）被放置在均匀的磁场中，线圈两侧连接有转轴，转轴放在凹槽中。图 1.1 仅给出了截面图，实际线圈垂直于纸面。回顾物理知识可知，当通过一个给定平面的磁通量改变时，可以在线圈中产生感应电压。假设线圈垂直于纸面，且在外部原动机的带动下旋

转，则通过线圈的磁通量就会随时间变化而变化，进而在线圈的两端（图 1.1 中 1 点和 2 点）感应出电压。

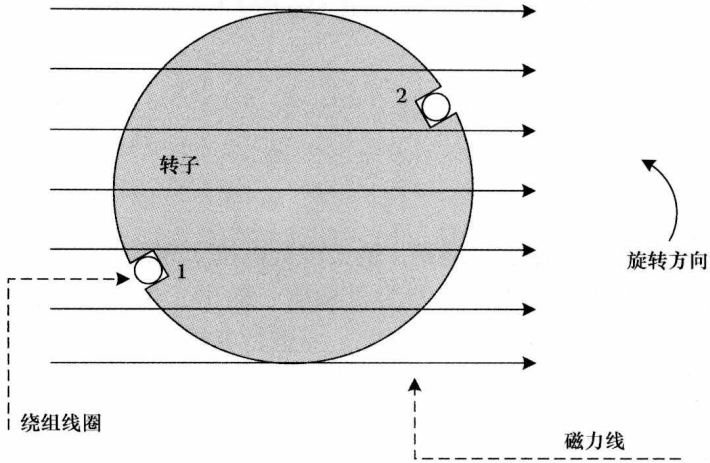


图 1.1 磁场中的旋转导电线圈

且不关心感应电压的具体表达形式，先建立一个事实：在磁场中旋转的线圈，因为磁通的变化，会产生感应电压，这就是 Faraday 感应定律。该定律是发电机运行的基本原理，在发电机中，机械能（原动机）带动磁场中的绕组旋转，产生感应电压。

利用相同的模型也可以解释电动机是如何工作的。在图 1.2 中，线圈的两端（1，2）和外部电压源连接，在线圈中产生电流（如图 1.2 所示，电流在端子 2 处流出纸面，在端子 1 处流入纸面）。

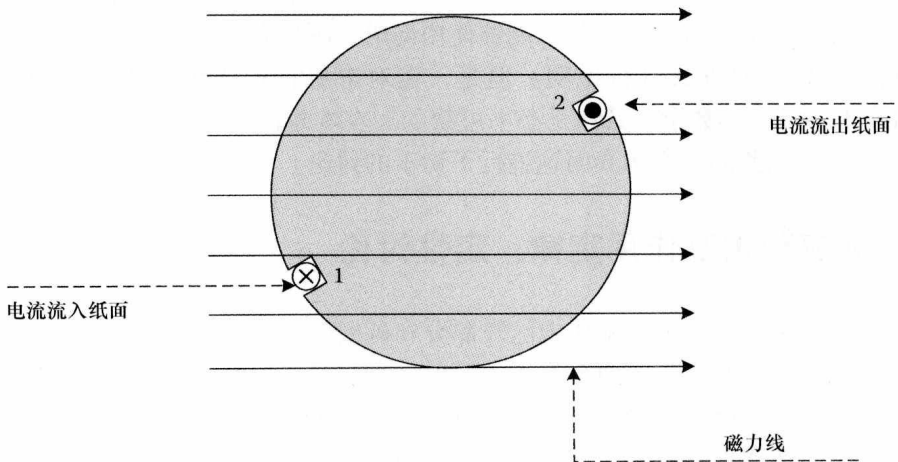


图 1.2 磁场中的载流线圈

在磁场中的载流线圈会产生作用于线圈上的力（转矩）。如 1.4 节所述，作用在线圈上的力会产生一个机械转矩，使线圈（转子）旋转。此时，不关心转矩的具体表达式，也不关心线圈是否可以连续旋转。相互作用定律解释了在磁场中载流导体上力和转矩的产生机理，它是电动机运行的基本原理。

值得注意的是，在图 1.1 和图 1.2 给出的发电机和电动机的模型中，包含完全相同的组件，这个事实具有重要的意义。基于这个事实，可以说一个电机既能运行在发电机状态，也能运行在电动机状态，如果能量是由机械能转换成电能，则运行在发电机状态；反之，则运行在电动机状态。实际的电机具有更加复杂的结构，这些结构保证了能量转换的高性能和高效率，然而，它们的基本原理保持不变。

1.3 感应和相互作用定律：深入讨论

在本节中，考虑与感应定律和相互作用定律相关的一些简单案例。虽然，这些案例是现实情况的简化，但是，能够反映电机运行的真实情况。数学作为一种必要且有力的手段，下面用之对相关现象进行描述。

1.3.1 线圈中的感应电压

考虑图 1.3a 给出的简单案例，图中线圈 1-1' 为电机的定子绕组，匝数为 N ，布置在相隔 180° 的两个齿槽中。电机转子产生的磁场在空间中按正弦规律分布，即

$$\mathbf{B}_R(\phi) = B_m \cos(\phi - \theta_r) \hat{\mathbf{r}} \quad (1.1)$$

该式 (1.1) 说明了磁通密度矢量在定子和转子之间的气隙中的分布情况。如图 1.3a 所示，磁通密度的方向为径向，在空间中按正弦分布。可以通过转子绕组的适当配置得到正弦磁通分布，也可以通过永磁体得到，在下面

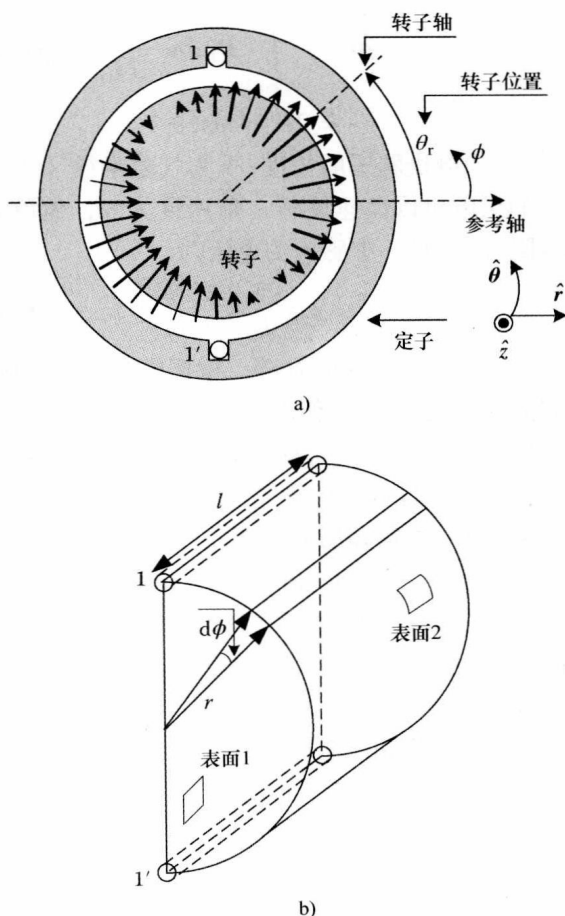


图 1.3 感应电压
a) 机械结构 b) 积分曲面