



装备科技译著出版基金

电机与MATLAB[®]

(第2版)

Electrical Machines with MATLAB[®]
Second Edition

[美] Turan Gönen 著
朱张青 陈春林 辛博 译



CRC Press
Taylor & Francis Group



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

电机与 MATLAB®

(第2版)

Electrical Machines with MATLAB®
Second Edition

[美] Turan Gönen 著

朱张青 陈春林 辛 博 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字：军-2012-105 号

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

本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下 CRC 出版公司出版，并经其授权翻译出版。版权所有，侵权必究。

National Defence Industry Press is authorized to publish and distribute exclusively the **Chinese (Simplified Characters)** language edition. This edition is authorized for sale throughout **Mainland of China**. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体翻译版授权由国防工业出版社独家出版并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。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机与 MATLAB: 第 2 版/ (美) 图兰·格嫩 (Turan Gonen) 著; 朱张青, 陈春林, 辛博译. —北京: 国防工业出版社, 2017.5

书名原文: Electrical Machines with MATLAB (Second Edition)

ISBN 978-7-118-10434-9

I. ①电… II. ①图… ②朱… ③陈… ④辛… III. ①Matlab 软件—应用—电机—控制系统—研究 IV. ①TM301.2-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 139133 号

※

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)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售



*

开本 787×1092 1/16 印张 31¼ 字数 788 千字

2017 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 129.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

第 1 版前言

由于电气工程类专业的各种课程造成的负担过重，因此很多大学已经开始只提供一门“电机”课程。写这本书的主要目的是为课时为三个学分的入门级“电机”课程提供一本有意义且易于阅读的教材。这本书的意图并不是介绍电机的设计，而是旨在让电气和其他工程学科的学生自学之用。在学习这本书之前，假设学生已经学完“电路分析”课程，并且熟悉电磁场。

本书是由我在加州州立大学萨克拉门托分校、密苏里大学哥伦比亚分校、俄克拉荷马大学、佛罗里达国际大学以及爱荷华州立大学开设的课程内容演变而来的，它是为大三本科生和在职工程师编写的。本书适用于电气和非电气工程类专业的学生或者需要自学的在职工程师。

本书对基本概念详加解释，并且用许多例子进行了说明。本书的特点包括充足的示例，以及需要利用各章节中提供的信息来解决的习题。每个新术语在文中首次引入时，都有明确的定义，并且尽力使读者熟悉行业中所用的词汇和符号。此外，本书的编写符合现代惯例，全书采用国际单位制（SI）。

对于每一个电气工程专业的学生而言，不管他或她的特定专业领域是什么，熟悉交流电路中涉及的三相电路、功率和功率测量的基本概念都是非常重要的。然而，根据我在长期教学生涯中的经验和观察，在基本电路分析的课程结束后，对于这些知识点的回顾往往不充分，或者在某些情况下由于缺少时间，未做任何回顾。因此，作为补救，对于这些知识点的简要回顾包含在本书的前两章中。当然，教师可以根据需要自行决定是否要详细介绍。

此外，实际上大多数选修基本“电机”课程的学生并不是专门研究电力工程的。而且，他们也不会在自己的职业生涯中设计任何电机，即使是那些专门研究电力工程的学生，可能也不需要去做相关工作。因此，基于同 IEEE 电力工程学会一样的原因，在本书中使用了一种更加普遍的方式来介绍电机。

为使读者与电机应用领域和电力系统领域中的新进展保持同步，在附加的五章中介绍了新的现代话题，包括可再生能源、风能和风能转换系统、太阳能系统、储能系统和智能电网。

同时，在这个版本中包含了几个新的附录，还包含了一个扩展词汇表，用于定义电机中使用的术语。

希望学习本书的学生有复代数、正弦分析、相量图、相量分析和其他基本概念的知识基础。在阅读后续章节之前，先简要回顾前面两章，建立知识背景，这不失为一个好方法。在一个学期的课程中，根据课程目标，建议内容应至少涵盖磁路、变压器、感应电机、同步电机和直流电机等章节。教师可以向出版商索要一本完整的解题手册。

第 2 版前言

在这个版本中，本书已经进行了彻底的复查，以确保它没有任何错误。例如，所有的例题和章末的习题都已经通过手动和使用 MATLAB®程序的方式进行了重新计算，以确保不会出现任何可能的错误。

此外，为使读者与电机应用领域和电力系统领域中的新进展保持同步，在附加的五章中介绍了新的现代话题，包括可再生能源、风能和风能转换系统、太阳能系统、储能系统和智能电网。

关于 MATLAB®和 Simulink®产品信息，请联系：

The MathWorks, Inc.

3 Apple Hill Drive

Naticks, MA, 01760-2098 USA

Tel: 508-647-7000

Fax: 508-647-7001

E-mail: info@mathworks.com

Web: www.mathworks.com

Turan Gönen

萨克拉门托，加利福尼亚

致 谢

我要向 David D. Robb 博士及其同伴表示感谢，感谢他们善意的鼓励、宝贵的建议和多年来的友谊；也要向电力数学协会的 Paul M. Anderson 博士表示由衷的感谢，感谢他不断的鼓励和建议。

我要向众多的同事表示衷心感谢，特别是爱达荷大学的 Herbert Hess 博士和阿肯色大学的 Juan C. Balda 博士，感谢他们指出第 1 版书中存在的错误。同时要感谢华盛顿州立大学的 Anjan Bose 博士，克拉克森大学的 Thomas H. Ortmeyer 博士，内华达大学拉斯维加斯分校的 Yahya Baghzouz 博士，伍斯特理工学院的 Alexander E. Emanuel 博士，克莱姆森大学的 Elham B. Makram 博士和已故的 Adly A. Girgis 博士，爱荷华州立大学的 Alvin Day 博士，亚利桑那州立大学的 G.T. Heydt 博士，密苏里大学哥伦比亚分校的 Charles Slivinsky 博士、Richard G. Hoft 博士、Cyrus O. Harbourt 博士和 James R. Tudor 博士，爱荷华州立大学已故的 John Pavlat 教授，密苏里大学罗拉分校的 Max Anderson 博士和 Earl F. Richards 博士，佛罗里达国际大学的 James Story 博士，我已故的朋友阿尔伯塔大学的 Don Koval 博士，以及加州州立大学萨克拉门托分校的 B. P. Lathi 博士，感谢他们的关心、鼓励和宝贵意见。还要感谢加州州立大学萨克拉门托分校的 Salah Yousif 博士，感谢他的支持和鼓励。

另外，还要特别感谢西门子公司 Gerhard W. Juetten 和 Klaus Habur，通用电气公司的 John R. Stoutland、Ron Stevens 和 Darlene Heare，加拿大通用电气公司的 Gary B. Lister，ABB 公司的 Bill Petruska，瑞恩电气公司的 Andy Carpenter 和 Marilyn Muscenti，北美变压器公司的 Judy Chaves，以及 MagneTex 公司的 Robert Murray 和 Otto Stoll。

我还要感谢研究本书各个部分的很多学生，他们来自加州州立大学萨克拉门托分校、密苏里大学哥伦比亚分校、俄克拉荷马大学、佛罗里达国际大学。他们做出了很多贡献，为本书改进提出了宝贵的建议。

我要衷心地感谢 Lynne Onitsuka，感谢她在我遇到困难的时候，提供的计算机辅助及其专业技能。

最后，我要感谢我的硕士研究生 Alan Escoriza，他重新求解了书中全部的例题和习题，并解答了 MATLAB[®] 示例。

作者介绍

Turan Gönen 是加州州立大学萨克拉门托分校 (CSUS) 电力学院院长, 电气工程教授。此前, 他曾是密苏里大学哥伦比亚分校能源系统和资源专业主任, 电气工程教授。Gönen 教授还在密苏里大学罗拉分校、俄克拉荷马大学、爱荷华州立大学、佛罗里达国际大学和安卡拉大学担任教学职位。他曾讲授“电机”和“电力工程”课程长达 38 年时间。

Gönen 教授在电力行业也有很强的专业背景, 在美国和海外, 他在许多公司担任过设计工程师累计有 8 年时间。他曾在联合国工业发展组织 (UNIDO) 担任顾问, 并在阿美石油公司、博莱克威奇公司和市政公用行业担任顾问工程师。他撰写了 100 多篇学术论文以及 4 本著作:《电力配电系统工程》《现代电力系统分析》《电力输送系统工程: 分析和设计》《面向工程经理的工程经济学》。

Gönen 教授是美国电气电子工程师协会 (IEEE) 和工业工程师学会 (IIE) 的终身会员, 他曾任职于 IEEE 电力工程协会工作组和多个委员会, 同时也是众多荣誉协会的成员, 包括 Sigma Xi 科学研究学会、Phi Kappa Phi 荣誉学会、Eta Kappa Nu 荣誉学会、Tau Alpha Pi 荣誉学会。

Gönen 教授在 1964 年和 1966 年分别获得伊斯坦布尔科技大学电气工程学士学位和硕士学位, 1975 年获得爱荷华州立大学电气工程博士学位。同时, 他在 1973 年获得爱荷华州立大学工业工程硕士学位, 1978 年获得爱荷华州立大学工业工程博士学位, 1980 年获得俄克拉荷马大学工商管理学硕士学位。Gönen 教授分别在 1997 年和 2009 年两次获得加州州立大学萨克拉门托分校 (CSUS) 杰出教师奖。

目 录

第 1 章 基本概念	1
1.1 引言	1
1.2 配电系统	4
1.3 分散式储能和发电系统	5
1.4 普通电机概述	6
1.5 单相交流电路中的有功和无功	8
习题	12
第 2 章 三相电路	14
2.1 引言	14
2.2 三相系统	14
2.2.1 理想三相电源	16
2.2.2 对称(平衡)三相负载	20
2.3 不平衡三相负载	27
2.4 三相电路中平均功率的测量	30
2.5 功率因数校正	34
习题	36
第 3 章 磁路	45
3.1 引言	45
3.2 载流导体的磁场	46
3.3 安培磁路定律	47
3.4 磁路	50
3.5 含气隙的磁路	56
3.6 铁磁性概述	57
3.7 磁芯损耗	60
3.7.1 磁滞损耗	60
3.7.2 涡流损耗	61
3.8 求给定磁动势的磁通	68
3.8.1 试探法	69
3.8.2 图解法	69
3.8.3 磁化曲线法	70
3.9 永久磁铁	72
习题	73

第4章 变压器	79
4.1 引言	79
4.2 变压器结构	82
4.3 法拉第与楞次定律的简要回顾	83
4.4 理想变压器	85
4.4.1 变压器中的极性规定	88
4.4.2 变压器中的阻抗转移	89
4.4.3 理想变压器中输入功率和输出功率之间的关系	90
4.5 实际变压器	95
4.6 实际变压器的近似等效电路	98
4.7 等效电路的参数测定	102
4.7.1 开路测试	103
4.7.2 短路测试	104
4.8 变压器铭牌及额定参数	106
4.9 变压器的运行特性	109
4.9.1 变压器的电压调整率	110
4.9.2 变压器的效率	114
4.10 三相变压器	117
4.11 三相变压器的连接方式	119
4.12 自耦变压器	124
4.13 三绕组变压器	128
4.14 仪表互感器	129
4.15 浪涌电流	131
习题	132
第5章 机电能量转换原理	140
5.1 引言	140
5.2 基本概念	140
5.3 机电能量转换	147
5.3.1 场能量	148
5.3.2 磁力	152
5.3.3 能量和辅能	154
5.3.4 饱和系统中的磁力	154
5.4 旋转电机的研究	157
5.5 单边励磁的旋转系统	157
5.6 多边励磁的旋转系统	161
5.7 圆筒型电机	164
5.7.1 单相同步电机	166
5.7.2 单相感应电机	166

5.8	导体上产生的力	167
5.9	磁场中运动导体的感应电压	168
	习题	170
第 6 章	(电磁) 感应电机	172
6.1	引言	172
6.2	感应电机的结构	174
6.3	旋转磁场的概念	176
6.3.1	图像法	177
6.3.2	分析法	179
6.4	感应电动势	181
6.5	转差率的概念	181
6.6	转差率对转子感应电动势频率及大小的影响	183
6.7	感应电机的等效电路	186
6.7.1	定子电路模型	186
6.7.2	转子电路模型	187
6.7.3	完整等效电路	188
6.7.4	近似等效电路	189
6.8	工作计算	190
6.9	启动时的等效电路	195
6.10	使用戴维南等效电路确定功率及转矩	199
6.11	运行特征	201
6.12	通过鼠笼型转子设计来改善电机特征参数	206
6.13	感应电机的启动	208
6.13.1	直接启动	208
6.13.2	降压启动	209
6.13.3	通过连续电阻或阻抗限制电流	210
6.14	转速控制	214
6.15	确定等效电路参数的测试	215
6.15.1	空载试验	215
6.15.2	直流实验	216
6.15.3	堵转实验	216
	习题	220
第 7 章	同步电机	226
7.1	引言	226
7.2	同步电机的结构	226
7.3	同步电机的磁场激励	228
7.4	同步转速	229
7.5	同步发电机的工作原理	230
7.6	等效电路	232

7.7	同步电动机的运行	237
7.8	功率与转矩特性	238
7.9	同步电机的硬度	241
7.10	激励改变的影响	242
7.10.1	连接至一个无限大的母线的同步发电机	242
7.10.2	单独运转的同步发电机	244
7.11	使用阻尼绕组克服机械摆动	246
7.12	同步电动机的启动	246
7.13	同步电动机作为同步电容器运行	246
7.14	同步电动机作为同步电抗器运行	247
7.15	确定等效电路参数的实验	248
7.15.1	开路实验	248
7.15.2	短路实验	249
7.15.3	直流实验	249
7.15.4	不饱和同步电抗	250
7.15.5	饱和的同步电抗	251
7.15.6	短路比	251
7.16	同步电机的性能曲线	252
7.17	同步发电机的并联工作	253
	习题	254
第 8 章	直流电机	260
8.1	介绍	260
8.2	结构特点	261
8.3	电枢绕组概述	263
8.4	直流电机基础	264
8.5	电枢电压	265
8.6	励磁方式	267
8.7	电枢反应	269
8.8	换向整流	270
8.9	补偿绕组	272
8.10	磁化曲线	272
8.11	直流发电机	275
8.12	他励发电机	275
8.13	自励并励发电机	276
8.14	串励发电机	278
8.15	复励发电机	279
8.16	电压调整	280
8.17	输出功率	283
8.18	输出转矩	284

8.19	功率流和效率	285
8.20	直流电动机特性	288
8.20.1	调速	289
8.20.2	转速-电流特性	289
8.20.3	速度-转矩特性	290
8.20.4	转矩-电流特性	291
8.20.5	内部感应电势-电流特性	291
8.21	直流电动机控制	294
8.22	直流电动机启动	297
8.23	直流电动机制动	301
	习题	303
第 9 章	单相和专用电动机	308
9.1	引言	308
9.2	单相感应电动机	308
9.2.1	等效电路	310
9.2.2	性能分析	311
9.3	单相感应电动机的启动	315
9.4	单相感应电动机的分类	316
9.4.1	分相电动机	316
9.4.2	电容启动电动机	317
9.4.3	电容运行电动机	318
9.4.4	电容式启动与运行电动机	319
9.4.5	屏蔽磁极(罩极)电动机	319
9.5	交直流两用电动机	321
9.6	单相同步电动机	323
9.6.1	磁阻电动机	324
9.6.2	磁滞电动机	325
9.6.3	步进电动机	325
9.7	次同步电动机	327
9.8	永磁直流电动机	328
	习题	331
第 10 章	电机的暂态与动态	334
10.1	引言	334
10.2	直流电机	334
10.3	他励直流发电机	335
10.3.1	励磁回路暂态响应	336
10.3.2	电枢回路暂态响应	337
10.4	他励直流电动机	340
10.5	同步发电机的暂态过程	343

10.6	短路暂态过程	344
10.7	暂态稳定	348
10.8	转动方程	349
	习题	352
第 11 章	可再生能源	354
11.1	引言	354
11.2	可再生能源	355
11.3	分散式储能和发电系统	356
11.4	集成可再生能源电力系统	356
11.5	分布式发电	356
11.6	可再生能源的普及率	357
11.7	主动配电网	357
11.8	微电网的概念	358
	参考文献	360
第 12 章	风能与风能转换系统 (WECS)	361
12.1	简介	361
12.2	风能转换系统的优点和缺点	362
12.2.1	风能转换系统的优点	363
12.2.2	风能转换系统的劣势	363
12.3	风力涡轮机的分类	363
12.4	风力涡轮机的视觉影响	367
12.5	风力发电机种类	368
12.6	风力涡轮机控制系统	370
12.6.1	恒速风力涡轮机	370
12.6.2	变速风力发电机	371
12.7	风力气象学	371
12.8	风能	374
12.9	风力的影响	377
12.10	风电塔高度对风能的影响	377
12.11	风速测量	379
12.12	风力发电机特性	380
12.13	效率和性能	381
12.14	风力涡轮机效率	383
12.14.1	发电机效率	383
12.14.2	齿轮箱	384
12.14.3	综合效率	384
12.15	效率的其他因素	385
12.16	并网	386
12.17	未来与风能相关的问题	387

12.18	美国风能输电系统的发展	388
12.19	能量储存	388
12.20	风力发电预测	390
	习题	391
	参考文献	392
第 13 章	太阳能系统	393
13.1	引言	393
13.2	晶体硅	394
13.3	光照对太阳能电池性能的影响	397
13.4	光功率密度对太阳能电池特性的影响	399
13.5	温度对太阳能电池特性的影响	401
13.6	太阳能电池效率	402
13.7	太阳能电池的互连	403
13.8	整体系统结构	405
13.9	薄膜太阳能电池	407
13.10	聚光太阳能电池	407
13.11	系统光伏平衡	408
13.12	转换技术类型	408
13.13	线性 CPS 系统	408
13.14	电力塔 CPS 系统	409
13.15	DISH/ENGINE CSP 系统	409
13.16	光伏应用	409
13.16.1	交互式光伏系统	409
13.16.2	独立光伏系统	410
	习题	410
	参考文献	411
第 14 章	储能系统	412
14.1	简介	412
14.2	储存系统	412
14.3	储存装置	413
14.3.1	水利发电	413
14.3.2	空气压缩式储存	414
14.3.3	抽水蓄能	414
14.3.4	氢能源	415
14.3.5	大功率液流电池	415
14.3.6	大功率飞轮	415
14.3.7	大功率超级电容	416
14.3.8	超导磁体能量储存	416
14.3.9	热力或者冷冻储存	417

14.4	电池类型	417
14.4.1	蓄电池	418
14.4.2	钠硫电池	418
14.4.3	液流电池技术	419
14.4.4	锂离子电池	419
14.4.5	铅酸电池	420
14.4.6	镍镉电池	420
14.5	电池使用中的运行问题	421
14.6	燃料电池	421
14.6.1	燃料电池的类型	423
	参考文献	425
第 15 章	智能电网	426
15.1	概述	426
15.2	建设智能电网的必要性	428
15.3	发展智能电网的原因	430
15.4	配电自动化	433
15.5	有源配电网络	433
15.6	配电网络中的电压/电抗控制 (VVC)	434
15.6.1	传统方法实现配电网络的电压/电抗控制	434
15.6.2	配电网络中电压/无功控制的 SCADA 方法	435
15.6.3	集成电压/无功控制优化 (Integrated Volt/Var Control Optimization, IVVC)	438
15.7	现有电网	439
15.8	管理控制和数据获取	439
15.9	先进 SCADA 概念	441
15.10	变电所控制器	442
15.11	集成子站自动化的远景产品研制	443
15.12	智能电网的升级	446
15.13	智能微电网	448
15.14	微电网的拓扑结构	449
15.15	智能电网的拓扑结构	450
15.16	智能电网的标准	450
15.17	智能电网应用中的挑战	451
	参考文献	452
附录 A	相量的简要回顾	453
A.1	引言	453
	习题	457
附录 B	标幺制	458
B.1	简介	458

B.2 单相系统458

B.3 标么值向物理值的转换.....465

B.4 基值的变换465

B.5 三相系统466

习题.....474

附录 C 凸极同步电机.....475

 C.1 介绍475

附录 D 英制到国际单位制的单位转换.....481

附录 E 国际单位制到英制的单位转换.....482

附录 F 定子绕组483

 F.1 简介483

 习题.....486

参考答案.....486

参考文献.....490

第 1 章 基本概念

1.1 引言

1882 年之后，随着美国对电能需求的快速增长，其发电厂数量也迅速增加。^①美国对电能方面需求增长如此迅速的主要原因有：电能在许多方面都是最便捷的能源形式。尽管电能不能被有效地存储，但是它的便捷性促使它的使用不断增长，它可以利用电缆远距离传输到消耗节点并容易被转换成机械能、辐射能、热能、光能及其他形式。此外，通过大规模电厂发电的生产方式，可以产生规模经济效应，即单位电能的价格随着工厂规模的扩大而降低。一般来说，除了传输线路和控制器件之外，电能的使用还包括各种各样的转换设备。

电力或电能^②系统的结构是非常庞大和复杂的，但可以用 5 个主要的组成部分来描述。能源可能是通过在火炉中燃烧煤、天然气或加热锅炉中的水所产生的蒸汽；可能是堤坝中的水；可能是燃汽轮机中燃烧的石油或煤气；也可能是核反应堆中的裂变物质，用于加热水来产生蒸汽。发电系统把这些能源转变为电能。传输系统通过高压（通常为特高压）电缆将大量的电能从发电系统传送到主要负荷中心分布的地点。配电系统通过低压电网分配电能给用户。最终，通过负载来利用电能，将电能转化成单一或多种需要的能量形式，提供给电灯、电动机、电加热器或其他装置。

图 1.1 详细描述了一个从源端到所连接的负载之间传输能量的电力系统。需要注意的是，在这个系统中，第一变压器（在发电厂的旁边）称为升压变压器，第二变压器（在传输线路的末端）称为降压变压器。

根据热力学能量守恒定律，能量永远不会耗尽，它只是简单地转化为不同的形式。目前可行的能量转化方法可以分为四类。第一类中包括了产生现在 99% 以上电能的传统方法，它将化石燃料中的热能或核裂变能通过热能的形式转换为机械能然后再转换为电能，或者是将水能转换为电能。第二类中包括了一些技术上可行但能量转换效率很低的方法，比如内燃机和燃汽轮机。第三类中包括了一些仅能提供小部分电能的方法，例如太阳能光伏电池、燃料电池以及普通电池。第四类中包括了一些技术上暂时不可行但是有很大发展潜力的方法，例如，核聚变反应堆、磁流体（MHD）发电机和电气体发电机。

① 根据美国能源部的最新研究，在 1991 年，范围在 1~120hp 的电动机总数已达到 125000 台。研究表明，53%~58% 的电能是被电动机驱动系统消耗的。

② 由于语境的不同，在电力工业中，“电能”这个术语的使用逐渐广泛从而取代了“功”的术语。如今，这两个术语也可互换使用。