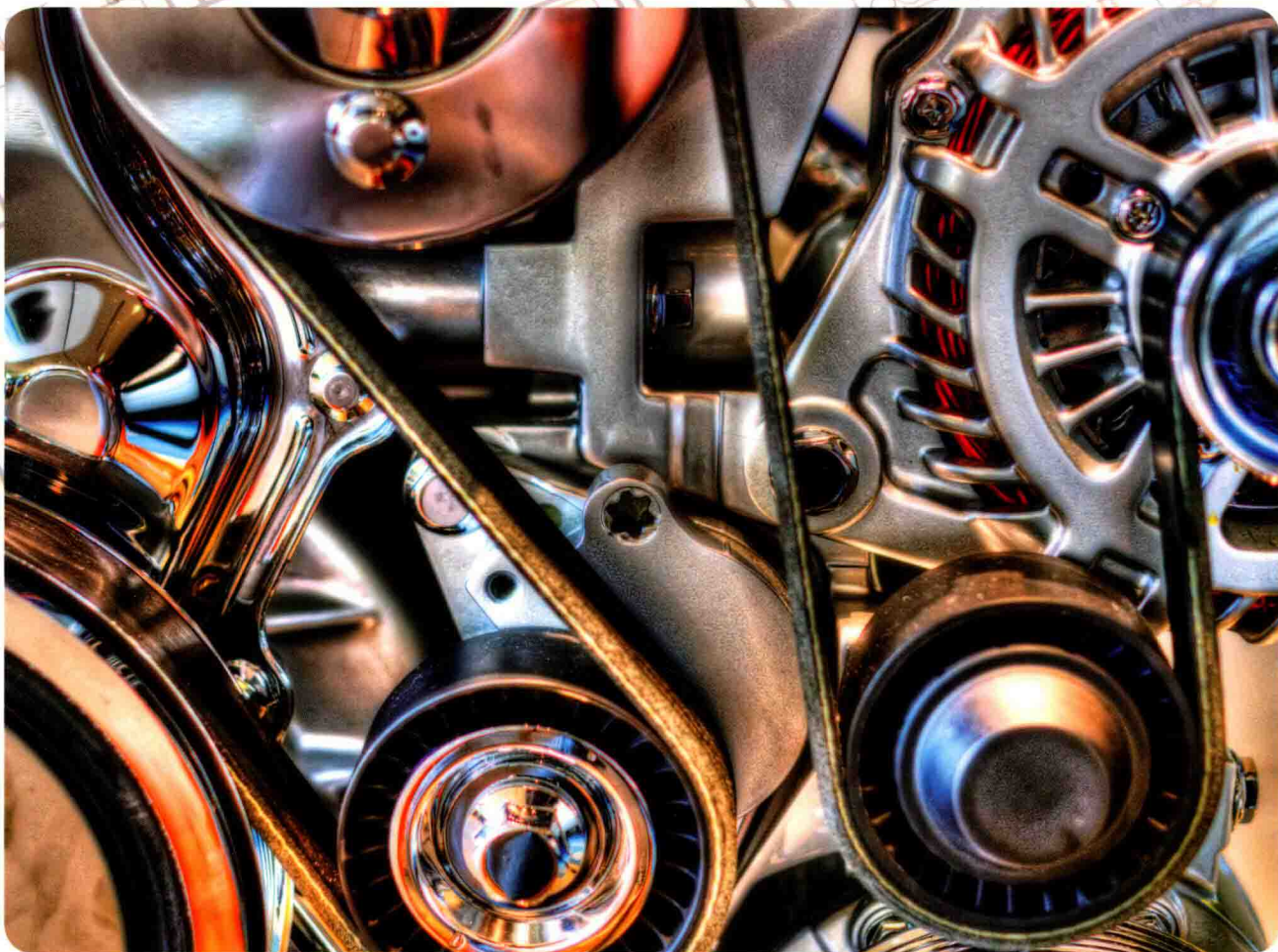


创客指南—— 玩转电动机

[美] Matthew Scarpino 著

符鹏飞 匡昊 译



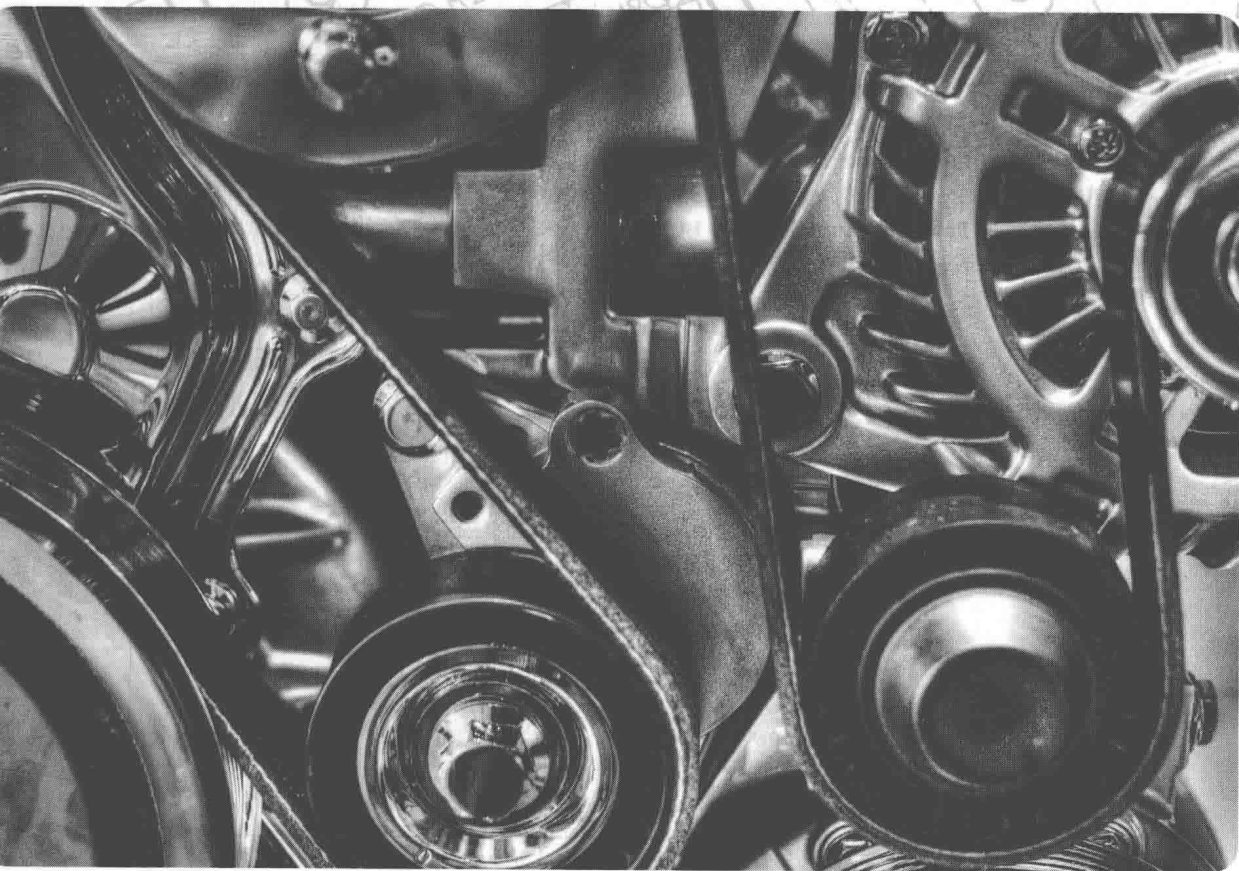
中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

创客指南—— 玩转电动机

[美] Matthew Scarpino 著 符鹏飞 匡昊 译



人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

创客指南：玩转电动机 / (美) 斯卡尔皮诺
(Matthew Scarpino) 著；符鹏飞，匡昊译. — 北京：
人民邮电出版社，2017.8
ISBN 978-7-115-45614-4

I. ①创… II. ①斯… ②符… ③匡… III. ①电动机
— 使用方法—指南 IV. ①TM32-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第158856号

版权声明

Authorized translation from the English language edition, entitled *Motors for Makers: A Guide to Steppers, Servos, and Other Electrical Machines*, 9780134032832 by Matthew Scarpino, published by Pearson Education, Inc., publishing as Addison-Wesley, Copyright © 2016 by Pearson Education, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc. CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD. and POSTS & TELECOM PRESS Copyright © 2016.

本书中文简体字版由 **Pearson Education Asia Ltd.** 授权人民邮电出版社独家出版。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

版权所有，侵权必究。

-
- ◆ 著 [美] Matthew Scarpino
译 符鹏飞 匡昊
责任编辑 陈冀康
责任印制 焦志炜
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京市艺辉印刷有限公司印刷
- ◆ 开本：800×1000 1/16
印张：19.25
字数：346千字 2017年8月第1版
印数：1-2 000册 2017年8月北京第1次印刷
- 著作权合同登记号 图字：01-2016-0758号
-

定价：79.00元

读者服务热线：(010)81055410 印装质量热线：(010)81055316
反盗版热线：(010)81055315

内容提要

技术的进步、社会的发展，推动了科技创新模式的嬗变，也推动了创客的不断发展，而电动机的制作和使用成为创客必备的技能之一。

本书是一本关于步进电动机、伺服电动机以及其他电动机的使用指南。全书分为4部分共14章。第1部分是概述，主要介绍了电动机是什么以及电动机是如何工作的。第2部分是探索电动机，介绍了许多创客常用的电动机，重点是交流电动机、步进电动机和伺服电动机。第3部分是电动机实战，主要介绍了如何实际应用电动机。第4部分是附录，补充了一些电动机的相关信息。

本书适合创客一族、电动机爱好者、硬件爱好者及动手能力较强的读者阅读参考。

作者简介

Matthew Scarpino 是一位有着 12 年硬件和软件设计经验的工程师，拥有电子工程硕士学位，同时他还是一位高级认证互联设计师（CID+, Advanced Certified Interconnect Designer），他也是《Designing Circuit Boards with EAGLE: Make High-Quality PCBS at Low Cost》《Programming the Cell Processor: For Games, Graphas, and Coropotation》一书的作者。

前言

当我在2002年获得电子工程硕士学位的时候，不禁感到有点儿失望。我觉得我知道了所有关于模拟电路的理论，但对实际电路板仍然一无所知。我能够计算出电动机中的洛伦兹力，但却不知道电动机控制器在实际应用中是如何工作的。简单地说，我可以写代码、解方程，但我还是做不了任何事情。

在我获得学位之后不久，第一块 Arduino 主板出现在了市场上，它凭借简单性和低成本引发了全球电子业界人士的关注，短短几年之后，创客运动（the Maker Movement）应运而生。创客对深度的数学和物理知识不感兴趣，他们关心的是能做出什么东西。无论是3D打印机还是树莓派，创客只关心炫酷的硬件，尤其是当这个硬件是一个电子产品的时候。

但如果涉及电动机的话，创客就会感到紧张。四轴飞行器越来越受到市场的欢迎，但我并没有看见多少创客在设计他们自己的电子调速器（ESC）或对自己的机器人手臂进行编程。实际上这是完全可以理解的，电动机比其他电子元件更加复杂。使用电动机的时候，您不得不考虑像电压和电流这样的电气参数，也不得不考虑类似转矩和角速度这样的机械参数。

电动机这个话题并不简单，不过本书的目标是让这些概念对于非工科出身的创客来说不再高高在上。本书的重点是制作，只需读者在数学和物理方面有一定的基础知识即可上手。和其他讨论洛伦兹力与电磁通量这些概念的书不同，本书侧重于实用知识；和使用各种方程式对您狂轰滥炸的

书不同，我将向您展示有哪些种类的电动机可用，以及如何去控制它们。

您需要花点时间和耐心去适应，一旦您熟练了，就能够在新的且迷人的项目上开始工作了，机器人和远程遥控车将完全在您的掌控之中。道路是漫长的，但我可以向您保证，目的地绝对值得让您踏上旅途。

本书的适用读者

正如书名所指明的，这是一本为创客准备的书。如果您正在寻找有关相量图和麦克斯韦方程的教科书，那么这本书不适合您。如果您正在寻找的是有关电动机的运行和控制的书，那么您选对了，您可以在本书中了解有关电动机的种类和它们适用于做什么的知识。

这本书并不适合初学者，在写这本书的时候，我假定您已经知道了电压、电流、欧姆等基本概念。此外，我假定您还可以看懂简单的电路图，可以明白系统的大致工作原理。

本书的组织方式

为了尽可能清晰地介绍好电动机，本书的内容分成以下4个部分。

- 第一部分为“概述”，介绍了电动机是什么以及它们是如何工作的。第1章介绍了电动机的历史，并解释了实现电动机运行的两个模块。第2章在第1章的基础上进行了扩展，进一步解释了电动机是如何将电压和电流转换成转矩和角速度的。
- 第二部分为“探索电动机”，考察了许多创客常用的电动机。这一部分内容重点放在了直流电动机、步进电动机和伺服电动机上，并进一步探讨了交流电动机、直线电动机以及齿轮等内容。对于每一种类型的电动机，均揭示了其运行原理和控制方法。
- 第三部分为“电动机实战”，介绍了3种在实际应用中的电动机。第9章~第11章分别介绍了如何使用流行的硬件板 Arduino Mega、树莓派、BeagleBone Black (BBB) 控制电动机。第12章解释了如何构建电子调速器 (ESC)，第13章详细解说了如何构建四轴飞行器。最后一章讨论了电动汽车这一重要话题。
- 第四部分为“附录”，提供了一些补充信息，希望它们对您有所帮助。附录A讨论了发电机这一话题，并介绍了不同种类的可以将运动转换成电力的机器。附录B对相关术语进行了说明。

书中出现的源代码和电路设计文件可以从异步社区官方网站下载。

让我知道您在想什么

请尽管给 mattscar@gmail.com 发邮件，我通常在及时反应方面口碑不错，尽管不能承诺对每一个关注都会有反馈。

目录

第一部分 概述

1 电动机入门 3

1.1 历史简介 4

1.1.1 奥斯特的罗盘指针 4

1.1.2 耶德利克的自转转子 4

1.2 剖析电动机 5

1.2.1 外部构造 5

1.2.2 内部构造 6

1.3 电动机概述 7

1.3.1 直流电动机 8

1.3.2 交流电动机 8

1.4 目标和结构 9

1.5 小结 9

2 基本概念 11

2.1 转矩和角速度 11

2.1.1 力 12

2.1.2 转矩 12

2.1.3 角速度 14

2.1.4 转矩转速曲线 15

2.2 磁铁 15

2.3 等效电路 18

2.3.1 电损耗 18

- 2.3.2 反向电动势 19
- 2.4 功率和效率 20
 - 2.4.1 功 20
 - 2.4.2 旋转功率 20
 - 2.4.3 电功率 21
 - 2.4.4 效率 21
- 2.5 小结 22

第二部分 探索电动机 25

3 直流电动机 27

- 3.1 直流电动机基础 27
 - 3.1.1 转矩、电流和 K_T 28
 - 3.1.2 转速、电压和 K_V 29
 - 3.1.3 K_T 和 K_V 的权衡 30
 - 3.1.4 开关电路 31
 - 3.1.5 脉冲宽度调制 (PWM, Pulse Width Modulation) 33
- 3.2 有刷电动机 34
 - 3.2.1 机械换向 35
 - 3.2.2 有刷电动机的种类 36
 - 3.2.3 优点和缺点 38
 - 3.2.4 控制电路 38
- 3.3 无刷电动机 41
 - 3.3.1 无刷直流电动机的构造 41
 - 3.3.2 内转子和外转子电动机 43
 - 3.3.3 无刷直流电动机的控制 45
- 3.4 电子调速器 48
 - 3.4.1 免电池电路 50
 - 3.4.2 可编程性 50
- 3.5 电池 51
- 3.6 小结 52

4 步进电动机 53

- 4.1 永磁式 (PM) 步进电动机 54
 - 4.1.1 结构 54
 - 4.1.2 运行 56
- 4.2 反应式 (VR) 步进电动机 57

- 4.2.1 结构 58

- 4.2.2 运行 58

4.3 混合式 (HY) 步进电动机 60

- 4.3.1 结构 60

- 4.3.2 运行 62

4.4 步进电动机控制 62

- 4.4.1 双极步进电动机控制 62

- 4.4.2 单极步进电动机控制 64

- 4.4.3 驱动模式 66

4.5 小结 70

5 伺服电动机 73

5.1 业余爱好者伺服 74

- 5.1.1 脉冲宽度调制 (PWM) 控制 75

- 5.1.2 模拟和数字伺服 76

- 5.1.3 旋转编码器 77

5.2 伺服控制概述 78

- 5.2.1 开环和闭环系统 79

- 5.2.2 伺服电动机建模 80

- 5.2.3 拉普拉斯变换 81

- 5.2.4 框图和传递函数 83

- 5.2.5 伺服电动机的传递函数 84

5.3 PID 控制 85

5.4 小结 87

6 交流电动机 89

6.1 交流电源 (AC) 89

- 6.1.1 单相电源 90

- 6.1.2 三相电源 90

6.2 多相电动机概述 91

- 6.2.1 定子 91

- 6.2.2 旋转磁场 92

- 6.2.3 同步速度 94

- 6.2.4 功率因数 94

6.3 异步多相电动机 96

- 6.3.1 电磁感应 96

- 6.3.2 电流和转矩 97

- 6.3.3 鼠笼式转子 98

- 6.3.4 绕线转子 98
 - 6.4 多相同步电动机 101
 - 6.4.1 双励磁同步电动机 101
 - 6.4.2 永磁式同步电动机 102
 - 6.4.3 磁阻式同步电动机 102
 - 6.5 单相电动机 103
 - 6.5.1 分相电动机 104
 - 6.5.2 电容启动电动机 104
 - 6.5.3 罩极电动机 105
 - 6.6 交流电动机控制 106
 - 6.6.1 涡流驱动器 106
 - 6.6.2 变频驱动器 107
 - 6.6.3 VFD 谐波失真 108
 - 6.7 通用电动机 109
 - 6.8 小结 110
 - 7 齿轮和减速电动机 113
 - 7.1 齿轮概述 113
 - 7.1.1 功率传输 114
 - 7.1.2 齿距 115
 - 7.1.3 侧隙 117
 - 7.2 齿轮类型 117
 - 7.2.1 正齿轮 117
 - 7.2.2 斜齿轮 118
 - 7.2.3 锥齿轮 120
 - 7.2.4 齿条和小齿轮 (pinion) 121
 - 7.2.5 涡轮 121
 - 7.2.6 行星齿轮系 122
 - 7.3 减速电动机 123
 - 7.4 小结 124
 - 8 直线电动机 127
 - 8.1 线性执行器 128
 - 8.1.1 运行和结构 129
 - 8.1.2 线性执行器的例子 130
 - 8.1.3 线圈炮 131
 - 8.2 直线同步电动机 131
 - 8.2.1 结构 131
 - 8.2.2 案例研究: 安川的 SGLG 135
 - 8.2.3 案例研究: 磁悬浮列车系统 136
 - 8.3 直线感应电动机 137
 - 8.3.1 结构和运行 137
 - 8.3.2 LINIMO 列车线路 (东部丘陵线) 138
 - 8.4 单极电动机 140
 - 8.4.1 结构和运行 140
 - 8.4.2 轨道炮 141
 - 8.5 小结 143
-
- ### 第三部分 电动机实战 145
- 9 使用 Arduino Mega 控制电动机 147
 - 9.1 Arduino Mega 简介 148
 - 9.1.1 Arduino Mega 电路板 148
 - 9.1.2 微控制器和 ATmega2560 149
 - 9.2 Arduino Mega 编程 151
 - 9.2.1 准备 Arduino 环境 152
 - 9.2.2 使用环境 154
 - 9.2.3 Arduino 编程 155
 - 9.3 Arduino 电动机接口板 160
 - 9.3.1 电压 161
 - 9.3.2 L298P 双 H 桥连接 162
 - 9.3.3 控制有刷电动机 163
 - 9.4 步进电动机控制 164
 - 9.4.1 Stepper 库 165
 - 9.4.2 控制步进电动机 167
 - 9.5 伺服电动机控制 169
 - 9.5.1 Servo 库 169
 - 9.5.2 控制伺服电动机 170
 - 9.6 小结 172
 - 10 使用树莓派控制电动机 173
 - 10.1 树莓派 174
 - 10.1.1 树莓派电路板 174
 - 10.1.2 BCM2835 片上系统 175

- 10.2 在树莓派上编程 176
 - 10.2.1 Raspbian 操作系统 177
 - 10.2.2 Python 和 IDLE 178
 - 10.2.3 GPIO 接口 179
- 10.3 控制伺服电动机 184
 - 10.3.1 配置 PWM 184
 - 10.3.2 控制伺服电动机 187
- 10.4 RaspiRobot 主板 189
 - 10.4.1 L293DD 四通道半 H 电动机驱动器 190
 - 10.4.2 RaspiRobot 的 Python 代码 191
 - 10.4.3 控制有刷直流电动机 192
 - 10.4.4 控制步进电动机 193
- 10.5 小结 195
- 11 使用 BeagleBone Black 控制电动机 197
 - 11.1 BeagleBone Black 198
 - 11.1.1 BBB 电路板 198
 - 11.1.2 AM3359 片上系统 199
 - 11.2 BBB 编程 200
 - 11.2.1 Debian 操作系统 201
 - 11.2.2 Adafruit-BBIO 模块 202
 - 11.2.3 访问 GPIO 引脚 203
 - 11.3 生成 PWM 信号 207
 - 11.4 双电动机控制器扩展板 210
 - 11.4.1 BBB-DMCC 通信 211
 - 11.4.2 PWM 信号发生器 212
 - 11.4.3 开关电路 212
 - 11.4.4 电动机控制 213
 - 11.5 小结 215
- 12 设计一个基于 Arduino 的电子调速器 217
 - 12.1 电子调速器设计概述 217
 - 12.2 开关电路 220
 - 12.2.1 MOSFET 管 221
 - 12.2.2 MOSFET 管驱动器 223
 - 12.2.3 自举电容 225
 - 12.3 过零检测 226
 - 12.3.1 第一步: 3 个绕组相对于 U_p 的电压 228
 - 12.3.2 第二步: 两个通电绕组相对于 U_o 的电压 229
 - 12.3.3 第三步: 悬空绕组相对于 U_o 的电压和悬空反向电动势 229
 - 12.3.4 第四步: 合并结果计算悬空反向电动势 230
 - 12.4 设计原理图 230
 - 12.4.1 排母连接器 231
 - 12.4.2 MOSFET 管和 MOSFET 管驱动器 232
 - 12.4.3 过零检测 233
 - 12.5 电路板布局 234
 - 12.6 控制 BLCD 235
 - 12.6.1 一般 BLDC 控制 235
 - 12.6.2 通过 Arduino 接口 BLDC 237
 - 12.7 小结 241
- 13 设计一架四轴飞行器 243
 - 13.1 框架 244
 - 13.2 螺旋桨 245
 - 13.2.1 螺旋桨动力学 245
 - 13.2.2 选择螺旋桨 248
 - 13.3 电动机 250
 - 13.4 电气性能 251
 - 13.4.1 发射机/接收机 252
 - 13.4.2 飞行控制器 255
 - 13.4.3 电子调速器 (ESC) 257
 - 13.4.4 电池 258
 - 13.5 结构 260
 - 13.6 小结 261

14 电动汽车 263

14.1 电动汽车转换 263

14.1.1 电动机 264

14.1.2 控制器 266

14.1.3 电池 266

14.1.4 变速器 267

14.2 现代的电动汽车 267

14.2.1 特斯拉汽车公司的 Model S 268

14.2.2 日产聆风 (Leaf) 269

14.2.3 宝马 i3 271

14.3 源自特斯拉汽车公司的专利 272

14.3.1 可变控制电动机管理 272

14.3.2 感应电动机冲片设计 273

14.3.3 双电动机驱动和控制系统 275

14.3.4 高效制造转子的方法 277

14.4 小结 277

第四部分 附录 279

附录 A 发电机 281

A.1 概述 281

A.2 直流发电机 282

A.3 交流发电机 284

A.3.1 交流发电机的运行 284

A.3.2 磁力发电机和自激发电
电机 285

A.4 小结 287

附录 B 术语表 289

第一部分



概述

第一卷

朱熹

电动机入门

众多电子元器件中，没有一个能够像电动机一样具有多变性和挑战性，机器人抓取物品、电动汽车在路上行驶以及无人机离地起飞都是通过电动机来完成的。目前，四轴飞行器和 3D 打印机引起了人们的极大关注，但是对于系统设计者而言，电动机控制电路才是他们关注的重点。

除了令人兴奋以外，电动机还有令人难以理解的工作特性。当开发者在选择电阻时，他们只需要关注一些简单的特性，如阻值精度、工作温度和功率等级等。但是在选择电动机的时候，则需要考虑包括以下几项在内的很多问题。

- 电动机是直流（DC）驱动还是交流（AC）驱动？
- 如果是直流电动机，应该选择有刷还是无刷？
- 如果有刷直流电动机，是选择永磁式、串励还是并励？
- 如果是无刷直流电动机，是选择内转子还是外转子？
- 电动机的 K_v 值是否满足系统的转速和转矩要求？
- 如果电动机的转矩不够，那么要选择哪种类型的传动齿轮？

这些问题比较难以回答，大部分有关电子和机器人的书籍中都没有深入讨论这些问题。反之，在大部分描述详细的电路设计中，均会明确告知电动机的型号。在这些书中，也许会提到为什么需要使用特定的电动机来完成任务，但是不会深入介绍电动机。仅通过这些信息，您很难根据自己的需求选择合适的电动机。

本书从不同角度介绍了电动机。我的目标是介绍很多不同类型的电动

机，并且告诉您如何挑选合适的电动机。对于每一种电动机，我都会讨论它的电源需求以及其可被控制的方式。

本书的阅读对象是创客，而不是科学家或工程师。在介绍电动机时，我将尽量避免那些冗长的公式，包含电场和磁场的矢量方程式。虽然我在攻读研究生学位期间学习了这些知识，但是只是知道这些公式并不会让您的四轴飞行器飞得更快，也不会让您的遥控汽车的机动性更好。

1.1 历史简介

本书不会深入探究电动机的物理知识，但是有两个历史性的进展是需要我们了解的。第一个是在丹麦的罗盘指针摆动实验，第二个是在匈牙利的旋转电线实验。

1.1.1 奥斯特的罗盘指针

奥斯特·汉斯是丹麦物理学家，他主要研究的是电和磁的关系。1820年，他发现了一个奇怪的现象：当电线中的电流发生变化时，附近的罗盘指针会随着摆动。图1.1所示为他的实验示意图。

尽管这个实验很简单，但是它揭示了电动机的两个基本要素——变化的电流和磁场是如何交互的。当它们靠得足够近时，就产生了运动。

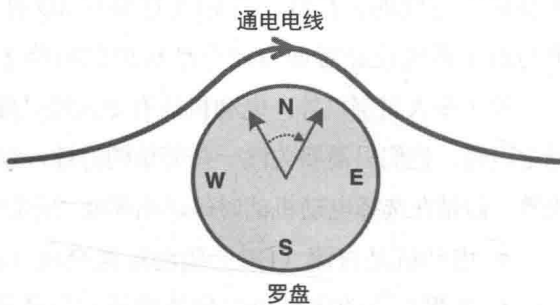


图 1.1 奥斯特的实验

1.1.2 耶德利克的自转转子

奥斯特的实验在科学界掀起了一股飓风。在法国，安德烈·玛丽·安培发现了电线中的电流和电线周围磁场的关系方程；在英国，法拉第·迈克尔设计了一系列实验来演示通电的电线如何在磁场中运动。

然而第一个发明实用电动机的是匈牙利的物理学家耶德利克·阿纽什，他没有将电线放在罗盘外面，而是将电线绕成线圈放在磁场中，当线圈中的电流发生变化时，线圈就开始旋转。