

Mc
Graw
Hill

Education

Making Things Move

互动电子创意设计与制作

Maker

机械电子创意实现 与项目制作



[美] Dustyn Roberts 著
郭洪红 译



科学出版社

互动电子创意设计与制作

Maker机械电子 创意实现与项目制作

[美] Dustyn Roberts 著
郭洪红 译

科学出版社

北 京

图字：01-2011-5264号

内 容 简 介

本书用生动形象的手绘插图、活泼而简练的语言、身临其境的现场实物图片，通过 Maker 将各种奇思妙想变成实作项目的过程，教授机械电子学的关键知识，并向大家传达了 Maker 的核心价值观——创意—转化—制作—集成—分享。

本书以项目为导向，主要内容涉及机构与机械设计基础知识、选材、零件连接方法、力学计算、电机控制、基本传动部件的使用及选型、简单机械的组合及转换、Arduino 编程与控制。

本书可作为高等院校师生、工程技术人员、科研人员的参考书，也可以作为没有工程技术背景的艺术家和 Maker 的入门参考书。

图书在版编目（CIP）数据

Maker 机械电子创意实现与项目制作 / (美) Dustyn Roberts 著；郭洪红译.
—北京：科学出版社，2012

（互动电子创意设计与制作）

ISBN 978-7-03-035714-4

I.M… II.①D…②郭… III.机电一体化—微控制器 IV.TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 238796 号

责任编辑：喻永光 杨 凯 / 责任制作：董立颖 魏 谨

责任印制：赵德静 / 封面制作：孙德峰

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京市四季青双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年1月第 一 版 开本：B5（720×1000）

2013年1月第一次印刷 印张：16 1/2

印数：1—4 000 字数：311 000

定价：42.00元

（如有印装质量问题，我社负责调换）



Dustyn Roberts

Making Things Move: DIY Mechanisms for Inventors, Hobbyists, and Artists

0-07-174167-4

Copyright © 2011 by McGraw-Hill Companies, Inc.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) and Science Press Ltd. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2013 by McGraw-Hill Education (Asia), a division of the Singapore Branch of the McGraw-Hill Companies, Inc. and Science Press.

版权所有。未经出版人事先书面许可，对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播，包括但不限于复印、录制、录音，或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔（亚洲）教育出版公司和科学出版社有限责任公司合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内（不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾）销售。

版权© 2013 由麦格劳-希尔（亚洲）教育出版公司与科学出版社有限责任公司所有。

本书封面贴有McGraw-Hill公司防伪标签，无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号：01-2011-5264

著者简介

Dustyn Roberts接受的是传统的工程教育，却有非传统的教授工程知识的方法。她最初是作为一名工程师在NASA（美国国家航空航天局）火星科学实验室样品采集处理系统的蜜蜂机器人（Honeybee Robotics）项目组工作，这款机器人定于2011年发射。在这个项目组工作期间，她还设计了一种机械钻；她曾经带领机器卡车在澳大利亚的矿区进行现场工作；并且给DARPA（美国国防部高级研究计划局）、NIH（美国国家卫生研究所）、NASA和DOD（美国国防部）写过提案；还曾经与Goddard太空飞行中心一起主持过一个项目，开发一种用于月球上的便携式样品采集处理系统。在与纽约的Eyebeam艺术与科技中心的两位艺术家进行交流后，她创建了Dustyn Robots（www.dustynrobots.com）网站，并且一直致力于做咨询工作，这些工作包括如何进行步态分析、如何设计降落伞引导系统等。2007年，她为纽约大学的互动远程通信项目（ITP）开发了一门Mechanisms and Things That Move（运动的机构与物体）的课程，并把这门课程的内容编成了这本书。

Dustyn在卡内基梅隆大学获得了机械与生物工程专业理学学士学位，在此期间还辅修了机器人学与贸易学，并获得了特拉华州大学的生物力学与运动学的硕士学位，现在正攻读纽约大学理工学院的机械工程博士学位。她还受到了Time Out New York, PSFK, IEEE Spectrum以及其他一些地方组织的关注。她现在与她的伴侣Lorena，以及她的猫Simba一起在纽约生活。

致谢

首先，我要感谢我所有的家人和朋友，是他们容忍了我太多“我不行，我不得不去写”这类借口；感谢我的父亲，他是一名工程师，即使他并没有什么商业头脑，也一直鼓励我有奇思妙想；感谢我的母亲，她甚至根本不知道我在说什么，但依然相信我的能力。

感谢纽约大学的交互远程通信项目（ITP），特别是 Red Burns 和 Tom Lgoe，请了我这样一名工程师来给艺术家们授课。很快 Tom 就不仅仅是我班里的领导了，因为从第一天开始，他就支持并鼓励大家，现在已经成了大家的良师益友。开始教课的时候，我仅仅是一名工程师，不过现在我也是一个 Maker。感谢你们给我的挑战，使我从事的领域能被其他人了解，并且可以通过制作提高其他人的能力。通过这个过程，毫无疑问，我所学的东西比我教的还要多。还要感谢 ITP 招收的学生，他们让我的教学过程特别愉快，我有机会与每一个学生互动交流，是他们帮我完成了这本书的撰写。

感谢 Eyebeam 艺术与科技中心，感谢该中心让参加实习期项目的艺术家来支持我的工作，也感谢它吸引了出色的实习生。没有团队中实习生的帮助，我完成这本书不仅会花费更长的时间，而且工作中会少很多乐趣。这些实习生不是为了免费的午餐和某些名利在工作。感谢 Sean Comeaux 制作插图，帮我找到了一种解释事物的新方法。感谢热情的 Sam Galison 和 Stina Marie Hasse Jorgensen 为网站的项目策划、摄影以及视频编辑所付出的热情及出色的工作。

我可以肯定他们任何时候都不会忘记第 6 章或者那位“不懒惰的苏珊”。感谢其他人，朋友及员工，是他们让我们的工作场所更有朝气。

感谢每一位远程帮助我编辑 Book&Bribe 的人（以及 Tom 帮我出的主意），我私下里仅通过提供点食物和饮料，就说服我的朋友和同事通读我的初稿。他们分别

是 Matt Bninski, Lee Carlson, Joanna Cohen, Stephen Delaporte, Russ de la Torre, Heather Dewey-Hagborg, Rob Faludi, Eric Forman, Michelle Kempner, Jenn King, Adam Lassy, Ben Leduc-Mills, Adi Marom, Gale Paulsen, Jennifer Pazdon, Lauren Schmidt, Greg Shakar, Ted Southern, Becky Stern, Mike Sudano, Corrie Van Sice, Dana Vinson, Irene Yachbes, 以及其他我可能忘记的朋友们。

感谢 McGraw-Hill 的团队, 感谢他们的耐心, 感谢他们能回答我每一个刨根问底的问题。感谢我的图书经纪人 Neil Salkind, 从我们的第一封 E-mail 开始, 他就满怀热情地教我首次尝试写这种书。

感谢 Kickstarter.com 及所有资助 Ben Leduc-Mills 和我开展 SADbot 项目的幕后工作者。同时感谢 Ben 的那些精彩的创意及对我的鼓励, 你将会造就一位了不起的计算机科学家。

最后, 感谢我的伴侣 Lorena, 感谢他对我无私的爱和支持。我无法用语言来描述他对我重要性。

前言

这本书写了什么

在一次我与 MakerBot 实业公司 (www.makerbot.com) CupCake CNC 发明人 Bre Pettis 的谈话中，我问他是否每个发明家都是经过培训的机械工程师，他的回答是“不对，如果我们说的话，不可能做成东西”。CupCake CNC 是一个微型的 3D 打印机，可以通过计算机建模的方法，用熔化的塑料制作与纸托蛋糕一样大小的 3D 实物。MakerBot 团队成员有能力用他们手上的工具和现有材料做出这样一个实物。在没有适当资源或资金的情况下，受过培训的工程师可能会知道任务的难易性而放弃尝试。但是 MakerBot 团队成员对他们要做的事情没有任何经验。他们只会坚持目标，并想办法完成任务。这本书是为所有想让自己做的机构动起来，却仅接受过一点或完全没有接受过正规工程培训的人写的。实际上，就像 Bre 说的一样，没有经过工程培训反而会对你更有帮助。

通过学习本书中所写的非专业的手段、实例以及 DIY 项目，你会成功地制作出能动的机构。也许你是一位想让自己的艺术品有生命的雕刻家，也许是一位探索机械原理的计算机科学家，或者是一位想给产品增加功能的产品设计师。或许之前你也做过一些项目，但是它们很容易出现问题。或者你之前没自己做过能动的机构，现在想学习如何做。在纽约大学 Tisch 艺术学院的互动远程通信项目班里，我的学生都是这种情况，是他们让我有了写这本书的想法。

该课程的名称叫做“运动的机构与物体”，这门课程的开展填补了在本项目的开展过程中，学生已经学习了怎么做（电子基础、交互设计和物联网）和他们想做什么（自动爬楼梯的婴儿推车、木质机械玩具及可以为电视机供电的固定自行车）之间的空白。我们的目标是从一个看似不可能的项目概念入手，注入一些基本的工程知识，最后出人意料地完成一个与最初的概念相似的作品。你会看到这些项目，也

可以在课程主页 <http://itp.nyu.edu/mechanisms> 上了解更多内容。在我教这门课的第一年中，我意识到我在工程设计工作中获得的实践经验可以用在一个完全没有工程基础知识的人上。有一个学生对我说：“你的课让我重新认识了世界”，另一个对我说：“设计和制作能够工作的东西让我非常有满足感”。本书旨在把这种满足感带给所有想学习机械知识却不知如何下手的人。

如果要控制的机械太小，不能完成任务，那么在机电设备上搭电路就没有意义了。你可以用你的力学和材料的基础知识，来避免高成本的过度设计。为了说明如何解决这类问题，我书中写的主题很广泛，内容从如何将联轴器和轴与电机连接，到如何实现旋转运动与直线运动的转换。通过与项目有关组件与系统的照片、图纸、图表和三维图像，来引导你学习每一章的内容。为了减小对那些听起来就很难的概念及图表的恐惧感，所有的插图都是由插图画家（不是工程师）手绘的，所以对概念的解释是以一种轻松的、引人眼球的、十分友好的方式来实现的。

我要强调尽可能使用现成的零部件，大部分的项目将会使用现成的金属、塑料、木材和纸板，也会用到一些能学会的加工技术。整本书设计了一些简单的项目，可以运用手头的材料来完成。在本书的最后，有一些更复杂的项目，运用了前面多个章节中用过的材料。学习本书能让你避免在机械设计过程中产生失误而导致挫折感，保证你能够在省时、省力、少受挫折的前提下，掌握有关机构的一般知识。而且即使从来没去过五金店，也可以自己做出机构。

这本书没写什么 ○

本书不是工程学的教材。阅读本书不需要有电子或机器人的背景知识，你也不需要知道微控制器是什么或者如何给微控制器编程。我写这本书的时候，是假定你家车库里没有五金件，假定你不知道车床为何物，或你并不能仅通过看电机的旋转轴就可以估算它的转矩。

每一章的知识都可以扩充为一本书，在很多书上都可以找到更详细的技术说明。这本书是写如何做东西的，只包括了做一个东西必须掌握的知识。也有少量的理论与背景知识，来帮助你理解机构的工作原理，方便你构思与制作自己的作品。如果这些内容对你来说太难，或者你已经掌握了这些背景知识，那么直接动手做吧。

如何使用本书 ○

就如《爱丽丝梦游仙境》中国王对白兔说的那样：“从头开始做起，一直继续到

最后，然后停止。”如果你真的没有一点儿做东西的经历，那么就最好读一下这本书。如果你没有看第4章中有关转矩的知识，学习第6章的转矩估算时就会感到沮丧。在一些小项目中，别怕把手弄脏，要习惯做东西。所有章节内容的安排都是先从零件开始，到最后完成一个运动机构，所以读到本书末尾的时候，你的工具袋里已经有了所有的工具，可以挑战第10章中的项目了。

本书的每一个项目设计都包括两部分：材料清单与操作方法。我曾经听说过烘焙是一门科学，烹饪是一门艺术。刚开始时，使机构运动起来有一儿像烘焙食物，你必须确保原料的比例恰当，按照书上的要求一步步地完成每一个步骤。但是一旦你习惯了做运动的机构，这件事看起来就像是烹饪了。除了掌握基本的配方外，你还可以添加自己的调料，自己开始做实验。

也可以把本书当作一本参考书，尤其是你本来就有一些机构运动的理论知识，而只需要一些实际操作方面的指导时，这本书作为参考书就更合适了。我读完工程学本科后，就是这种情况。我会计算让机构动起来的力或转矩，但不知如何选择电机、如何在电机轴上连接零件。因为学校里不会教你这些知识（至少我读的学校没有教），所以你需要通过经验来掌握。我希望这本书能让你实践操作的起点比我高。

创意便是最大的财富

虽然本书是在假定你没有任何有关机械背景知识的前提下写的，但是你做的任何事都会对你有帮助。我强调：任何事！

你能提供的最重要的东西是你的创意。我见过很多出色的项目，都出自完全没有工程经验的人之手，当然他们更没有工程方面的学位。如果你是一个充满激情的音乐家，有让吉他自动弹奏的想法，相对于你是一个知道吉他的工作原理却从没有弹过吉他的工程师来说，你更能做出一个好吉他。本书所列的工具会帮你将激情融入项目，将创意变成现实。书中列出了这些工具，也提供了如何使用这些工具的例子，但如何去运用它们的创意只能来源于你自己。

我并不是强调一定要成为一名艺术家。与大多数跟我一起工作过的学生和设计师们相比，我的右脑还不是最发达的。不过我知道如何通过做这些能运动的物体来与那些不是工程师的人交流。你可以通过阅读本书来消磨周六晚上的时间。但是我希望通过这本书中所提到的工具和方法，帮你把做人工饮料搅拌机想法变为现实。

本书包括大量你可以自己做的项目，概念和技巧是有限的，而你的想象力却是无限的。刚开始做的时候会有点难，不过一旦将一个很复杂的项目分解，你就会觉得一点也不复杂。本书能够帮助你，学到的知识越多，你以后做项目的灵感也就越丰富。

你需要知道什么

虽然不要求有工程 and 制作方面的经验，但为了能从本书中学到更多知识，仍需要掌握几点知识。最重要的就是如何使用互联网，至于为什么这么说，有三个原因。

(1) 在学习机械及相关的知识时，我们其实是站在巨人的肩膀上的。从 Instructables 网站 (www.instructables.com) 到达·芬奇的第一张机械图纸，可以在网上找到很多灵感，来帮助我们形成项目设计的思路，或者从类似的东西中学到知识。本书的目的是帮助完成项目，不是让你学会书中所有的内容，所以在开始前要先看看主题。你想把旋转运动转换成直线运动吗？可以想想，你不是第一个做这件事的人。利用本书中的基础知识，以及几十个专门研究把旋转运动转换为直线运动例子的网站，以激发你设计出自己需要的机构。借鉴这些经验，把它们用在自己的项目中，该用的时候就得用。正像 Aiden Lawrence Onn 和 Alexander 在 *Cabaret Mechanical Movement: Understanding Movement and Making Automata* (London: G&B Litho Limited, 1998) 一书中说的那样，“如果你想使物体运动起来，一定花点时间去学习其他物体是如何运动起来的”。

(2) 做东西需要工具和零件。你很可能需要在网上订购这些东西。虽然很多东西都可以用纸板和吸管来做，但你做“不懒惰的苏珊”(第 10 章项目 10.1) 时，你家附近不一定有卖这个项目中用到的直流减速电机的大商店。你也可以在网上淘到比你家附近五金商店更多的便宜东西，从手钻到曲别针。书中列出了每一个项目所用到的网址，我常用的有 McMaster-Carr (www.mcmaster.com)，SparkFun (www.sparkfun.com) 和 All Electronics (www.allelectronics.com)。

(3) 本书有一个配套的网站：www.makingthingsmove.com。没办法写在书中的一些内容，如彩色图片及视频，都会发布在这个网站上。也可以去看博客和其他一些资源。拥有这本书，你就会成为 Maker 文化的一分子，这种文化比你所了解的内涵要丰富得多。通过 makingthingsmove.com 网站，你可以与其他志趣相投的人交流经验。可以下载、加工和购买的电子文档的链接也会发布在网上，可以在 Thingiverse (www.thingiverse.com)，Ponoko (www.ponko.com) 或 Shapeways (www.shapeways.com) 上查找“dustyrobots”。

除了知道如何使用互联网，我还希望你有一点关于几何学、三角学、基础代数的知识。如果你能解出公式 $2 \times ? = 6$ 中的“？”，知道什么是正弦、余弦及正切，那就不用担心了，这本书中最复杂的内容也不过如此。你也需要知道直径、周长、切线及垂直的定义。如果你对这些知识有些生疏，那就赶快通过网络来巩固一下。

你需要准备什么

书中每个项目里都有一个材料和工具清单，方便你选择自己所需要的材料与工具。不过，如果你想有一个良好的开端，就先准备以下这些常用的工具（图 0.1）吧，会对你非常有用的。



图0.1 基本工具和材料

1. 手 钻

做项目时，若要在木材或薄金属板上装螺钉和木销，就需要手动钻孔。随便一个手钻都可以钻孔，不过我还是更喜欢那种像 Dewal 模型一样的可充电无线手钻。要确保手钻可以装小钻头 [钻头直径小至 $\frac{1}{16}$ in (1 in=2.54cm)]。Dremel 电磨也可以加工小型的工件，可用来切割和打磨小零件。

2. 万用表

只要你需要干一些电工活，如看看电池的电量、检查电路连接是否正确，就会用到万用表。确保万用表可以测量电压、电阻、电流及连通性。为了用起来方便，最好用一款量程可自动调节的万用表。有了这种万用表，你在测量前就不用估算被测值的大致范围了。量程可自动调节的万用表的价格可能会有点高，不过如果你不太精通电子学知识的话，它会帮你节省时间，减少你工作中的挫败感。自动关机是一种不错的节电方法。图 0.1 所示万用表是 SparkFun 的 TOL-08657，其量程可自动调节。相比那些低价的万用表来说，它测量的电流范围更大，测量电机电流时会很方便。

3. 测量工具

测量工具包括测量大件物体的卷尺、测量小件物体的金属尺，这种尺子在切

割东西时，也可用作基准边。还包括测量更小尺寸的卡尺，我推荐使用数码卡尺（SparkFun TOL-00067）。

4. 改 锥

改锥有 Phillips 平头改锥。最好准备几种不同尺寸的改锥。Jameco Electronics 公司（www.jameco.com）有一种手持式双面微型改锥（零件号为 127271），售价约为 2 美金。还有一种大的多功能改锥，是 Craftsman 的 4-IN-1（型号为 41161）。价格便宜的改锥用的材料可能是软金属，改锥头易弯曲变形，所以最好别用太便宜的改锥。

5. 多刃刀具

最常见的多刃刀具是瑞士军刀或 Leatherman 工具。多刃刀具是一个概括性的名称，方便携带，而且有了这种工具，在干一些小活时，就不用再买一大堆工具刀了。多刃刀具的形状、大小和价格各不相同，我推荐使用一个至少具有改锥、剪刀、锉、刀及锯的多刃刀具。我用 Leatherman 工具很多年了，当时的价格大概是 45 美金，在我工具箱里，它是最重要的工具。在 www.leatherman.com/multi-tools 上可以查到 Leatherman 工具。Maker Shed（www.makershed.com）有几种激光蚀刻多刃刀具，可能名叫“waranty voider”和“bomb defuser”。要买瑞士军刀，可以到 www.swissarmy.com/multitools 网站的“Do-It-Yourself”目录下去找。若要做特别复杂的项目，就需要准备带螺丝锥或开瓶器的工具。

6. 胶带和 WD-40

“如果一个物体不应该动却动了，那么你需要使用胶带；如果应该动却动不了，就需要使用 WD-40。”我不记得我第一次听到这句话是在什么地方了，可能是在我第一次生产实习的公司，老板放在办公桌上的一本一日翻一页的日历上看到的，这本日历叫“胶带的 365 天”。大多数读者都习惯使用标准宽度的银色胶带。WD-40 用起来也很方便，可以用在吱吱作响的合页上，也可以用来润滑齿轮以及其他运动件。

拥有工具不是最重要的，最重要的是使用工具时要保证安全。比如，安装电机时，若没有戴防护镜，就不能钻孔；也不要再在厨房桌子上给木材钻孔，因为木屑可能会弄伤你的眼睛，也可能钻到特意放在餐桌上的餐垫；在使用带尖的或边缘比较粗糙的东西时，要戴上手套，防止手被割破或刺伤。在每一个项目中，我都会强调安全问题。但是在干活之前，要养成先想一想操作过程的习惯，这样可以提前了解并消除可能会产生的安全隐患。伤口可以愈合，但是长时间听雷鸣般的钻孔声，你的听力可就很难恢复了；或使用 Dremel 切割轮时，如果操作方向不对，视力也难以恢复。所以，手头最少要有一幅防护眼镜、一对耳塞。总而言之，在做任何项目前，首先考虑的都是安全防护问题。

目录

第1章 机构·机械	1
1.1 6种简单的机构	2
1.1.1 杠 杆	2
1.1.2 滑 轮	8
1.1.3 轮和轴	12
1.1.4 斜面或楔	12
1.1.5 螺 纹	13
1.1.6 齿 轮	14
1.2 约束与自由度的设计	18
1.2.1 自由度	18
1.2.2 最小约束	20
项目1.1 Rube Goldberg的早餐机	21
第2章 如何选材	25
2.1 材料的参数	26
2.1.1 材料特性	26
2.1.2 材料失效：应力、弯曲与疲劳	26
2.1.3 如何设计公差	27
2.2 材料种类	29
2.2.1 金属材料	29
2.2.2 陶 瓷	31
2.2.3 高分子材料（塑料）	32

2.2.4 复合材料	33
2.2.5 半导体材料	35
2.2.6 生物材料	35
项目2.1 另类跳水板	35
第3章 固定与连接的方法	37
3.1 非永久性连接：紧固件	38
3.1.1 螺钉、螺栓和螺纹孔	39
项目3.1 钻螺纹孔	42
3.1.2 螺 母	46
3.1.3 垫 圈	46
3.1.4 钉子和U形钉	47
3.1.5 销 钉	47
3.1.6 弹簧卡环	47
3.2 永久性连接：黏合剂、铆钉或焊接	48
3.2.1 黏合剂	48
3.2.2 铆 钉	50
3.2.3 熔焊、铜焊和锡焊	51
第4章 力·摩擦·转矩	53
4.1 转矩的计算	54
4.2 摩 擦	57
项目 4.1 估算摩擦系数	60
如何减小摩擦	61
4.3 受力分析图与涂鸦机器人	62
4.4 力与转矩的测量	65
4.4.1 力的测量	65
4.4.2 转矩的测量	67
项目4.2 测量电机的转矩	67

第5章 功率·功·能量	69
5.1 机械能	70
5.2 电 能	71
5.3 为你的项目提供能量	75
5.3.1 原型机电源：可调台式电源	76
5.3.2 移动项目的选择：电池	77
5.3.3 可插接电源	79
5.3.4 可替代能源	81
5.3.5 弹簧及弹性能量的存储	85
项目5.1 捕鼠器小车	86
第6章 电机：产生和控制运动的执行器	89
6.1 电机的工作原理	90
项目 6.1：用磁铁DIY 电机	90
6.2 旋转执行器	92
6.2.1 直流电机	93
6.2.2 交流电机	100
6.2.3 旋转螺线管	101
6.3 线性执行器	102
6.3.1 直线电机	102
6.3.2 螺线管	103
6.4 电机控制	104
6.4.1 直流电机控制基础	104
项目6.2 最简单的直流电机控制电路	104
项目6.3 焊接电路	105
项目6.4 用面包板搭电路	108
项目6.5 电机反转	110
6.4.2 用PWM信号控制速度	112
项目6.6 用硬件PWM控制电机速度	113
6.4.3 更高级的直流电机控制方法	116

项目 6.7 用软件产生PWM信号控制电机速度	116
6.4.4 模型舵机的控制	120
项目 6.8 控制一个普通舵机	121
6.4.5 步进电机控制	124
项目 6.9 双极步进电机的控制	125
6.4.6 直线电机控制	128
6.4.7 电机控制提示及技巧	128
6.5 无电机驱动	131
6.5.1 流体压力	131
6.5.2 人造肌肉	132
第7章 传动件：轴承·联轴器·齿轮·丝杠·弹簧	135
7.1 轴承与轴套	136
7.1.1 径向轴承	137
7.1.2 推力轴承	140
7.1.3 线性轴承与滑轨	141
7.1.4 混合轴承与特殊轴承	142
7.1.5 轴承安装提示与技巧	143
7.2 联轴器	145
7.2.1 舵机	145
7.2.2 其他电机	146
7.2.3 使用离合器	151
7.3 轴环	152
7.4 齿轮	152
项目 7.1 自己动手做齿轮	154
7.4.1 惰轮	161
7.4.2 组合齿轮	162
7.5 皮带轮与链轮、皮带与链条	162
7.5.1 普通皮带轮与皮带	163
7.5.2 同步轮与同步带	164
7.5.3 链轮与链条	164

7.6 丝杠传动	164
7.7 弹 簧	165
7.7.1 压 簧	166
7.7.2 拉 簧	167
7.7.3 扭 簧	168
7.7.4 弹簧垫圈	169
7.7.5 板 簧	169
7.7.6 盘 簧	169
 第8章 组合简单机械的乐趣	171
8.1 运动形式的转换机构	172
8.1.1 曲 柄	172
8.1.2 凸轮与从动件	173
8.1.3 连 杆	176
项目8.1 缩放仪	177
8.1.4 棘轮和掣爪	178
8.1.5 运动转换	178
8.2 自动机械玩具	182
项目8.2 DIY一个玩偶：点头羊	184
 第9章 创意实现与分享	187
9.1 CTFIP循环	188
9.2 创意阶段	189
9.2.1 模拟化构思	189
9.2.2 数字化构思	189
项目9.1 下载并打开一个零件的3D图	193
9.3 转化阶段	194
9.3.1 模拟转化	195
9.3.2 数字转化	195
9.4 制作阶段	195