

机械工程前沿著作系列 HEP
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

机器人科学与技术丛书

柔顺机构 设计理论与实例

Handbook of Compliant Mechanisms

Larry L. Howell
Spencer P. Magleby
Brian M. Olsen 编著

陈贵敏 于靖军
马洪波 邱丽芳 译

高等教育出版社

机械工程前沿著作系列 HEP
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

机器人科学与技术丛书

柔顺机构 设计理论与实例

Handbook of Compliant Mechanisms

Larry L. Howell, Spencer P. Magleby, Brian M. Olsen 编著
陈贵敏, 于靖军, 马洪波, 邱丽芳 译

ROUSHUN JIGOU
SHEJI LILUN YU SHILI

高等教育出版社·北京

图字: 01-2014-1903 号

Handbook of Compliant Mechanisms/by Larry L. Howell, Spencer P. Magleby and Brian M. Olsen/ISBN 9781119953456

Copyright © 2013 John Wiley & Sons Ltd.

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Higher Education Press Limited Company and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

图书在版编目 (CIP) 数据

柔顺机构设计理论与实例 / (美) 豪厄尔
(Howell, L. L.), (美) 玛格莱比 (Magleby, S. P.),
(美) 奥尔森 (Olsen, B. M.) 编著; 陈贵敏等译. -- 北
京: 高等教育出版社, 2015. 3

(机器人科学与技术丛书)

书名原文: Handbook of compliant mechanisms

ISBN 978-7-04-042151-4

I. ①柔… II. ①豪… ②玛… ③奥… ④陈… III.
①柔性结构 - 机构综合 IV. ①TH112

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 033484 号

策划编辑	刘占伟	责任编辑	刘占伟	特约编辑	陈 静	封面设计	杨立新
版式设计	张 杰	插图绘制	杜晓丹	责任校对	李大鹏	责任印制	毛斯璐

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街4号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	北京中科印刷有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.landaco.com.cn
印 张	19.5	版 次	2015年3月第1版
字 数	380千字	印 次	2015年3月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	79.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 42151-00

“机器人科学与技术”丛书编委会

名誉主编: 熊有伦

主 编: 戴建生

委员 (按姓氏笔画排序):

丁 汉	丁华峰	丁希仑	于靖军	王田苗	王 宏	王国彪
王树新	王 皓	王德伦	方跃法	孔宪文	邓宗全	甘东明
朱向阳	刘辛军	刘 宏	刘宏斌	刘金国	刘荣强	刘景泰
孙立宁	李 兵	李泽湘	李建民	李树军	李洪波	李秦川
李瑞琴	李端玲	杨广中	杨廷力	邹慧君	沈惠平	张 丹
张克涛	张建伟	张宪民	陈学东	陈贵敏	陈 超	陈 焱
陈义明	武传宇	易建强	金国光	赵永生	赵 杰	赵铁石
赵景山	侯增广	姚立纲	徐扬生	徐 凯	高 峰	郭为忠
郭进星	黄 田	黄 真	黄 强	曹政才	崔 磊	康荣杰
葛巧德	韩建达	蔡敢为	廖启征	谭 民	熊蔡华	颜鸿森
戴振东	魏国武	Andreas Müller	Gim Song Soh			

译者简介



陈贵敏 西安电子科技大学教授。2005年毕业于西安电子科技大学,获机械制造及自动化博士学位。2007年10月至2008年10月在美国杨百翰大学做访问学者。先后主持国家自然科学基金项目2项,发表科研论文60余篇,授权发明专利10余项。主要研究方向:柔顺机构及其应用。



于靖军 北京航空航天大学教授。2002年毕业于北京航空航天大学,获机械设计及理论博士学位。现任学术期刊 *Frontiers of Mechanical Engineering* 编委。先后主持国家自然科学基金项目3项,发表科研、教学论文100余篇,获省部级以上科研教学奖励2项,授权发明专利10余项。著有《机械装置的图谱化创新设计》,主编本科生教材《机械原理》、研究生教材《机器人机构学的数学基础》,参编教材《机械原理实验教程》、《高等机械原理》等。主要研究方向:柔顺机构、并联机构、精微机械、运动几何学等。



马洪波 西安电子科技大学副教授。2004年毕业于西安电子科技大学,获机械制造及自动化博士学位。主持国家自然科学基金项目1项,参研国家重点项目1项,发表科研论文20余篇。主要研究方向:柔顺机构、结构的不确定性分析、优化及鲁棒设计等。



邱丽芳 北京科技大学教授。1991年毕业于北京科技大学,获机械制造工艺及设备硕士学位,2008年获北京科技大学机械设计及理论博士学位。主持国家自然科学基金项目1项,参加国家自然科学基金项目2项,发表科研、教学论文50余篇,获省部级及以上教学奖励4项。译有《机械设计:机器和机构分析与综合》、《系统动力学》,主编本科生教材《机械原理》,参编《机械创新设计》、《齿轮传动设计手册》、《机械设计》、《现代机械设计方法实用手册》等著作。主要研究方向:柔顺机构;平板折展机构等。

译者序

不同于传统刚性机构那样通过运动副和构件连接实现运动和功能,柔顺机构主要依靠柔性单元的变形来实现运动、力和能量的传递和转换。经过近 30 年的发展,柔顺机构已成为现代机构学领域中的一个重要分支,并在精密工程、机器人等领域得到广泛应用。这主要源于柔顺机构所具有的诸多优点,如性能好(如高精度、重量轻、摩擦小)、成本低(如易于加工、零件数少)和便于小型化(如使微纳机械器件成为可能)等。然而,与传统机械设备相比,柔顺机构仍然是新生事物,对于设计者而言,最大的困难在于查找相关案例和资源以指导他们开展柔顺机构的相关设计。虽然许多人已经开始认识到柔顺机构的优势,但苦于缺乏将其付诸工程实际的系统知识。尽管已有大量的期刊论文和文献为柔顺机构的深度工程化提供了一定程度上的指导,但是设计者仍需要一份更为简洁直观的参考资料,能够在柔顺机构的概念设计阶段为他们提供启发和帮助。相对刚性机构而言,柔顺机构的建模分析和构型综合要复杂很多,相关的理论和方法呈现出“多元化”的趋势。对于初学者以及工程设计人员来说,急需一本可以让他们快速而全面地掌握柔顺机构相关理论和设计方法的参考书。

美国杨百翰大学 Larry L. Howell 教授被认为是柔顺机构研究的权威和主要奠基人之一,他于 2001 年所著的 *Compliant Mechanisms* 被誉为柔顺机构领域的奠基之作,奉为柔顺机构的经典,他提出的“伪刚体模型”更是在柔顺机构分析及设计理论中占据着重要地位。该书的中译本《柔顺机构学》已于 2007 年由北京工业大学余跃庆教授翻译、高等教育出版社出版发行。

在 *Compliant Mechanisms* 出版之后的十余年间,柔顺机构从设计理论到应用都得到了长足发展。系统化的方法层出不穷,典型的设计方法有刚体替换法、结构矩阵法、连续法(包括拓扑优化、均匀化、基础结构、窗函数、水平集等)、约束设计法、基于旋量理论的拓扑综合法、模块法等。这些方法的提出大大提升了柔顺机构的创

新设计水平, 扩展了柔顺机构的应用范围。

正是在这样的背景下, Howell 教授在其第一部专著的基础上, 策划并组织编写了 *Handbook of Compliant Mechanisms*。参编人员全部是长期从事柔顺机构设计理论与应用研究的学者和工程师。该书系统地汇集了柔顺机构学领域近 30 年的主要研究成果, 其中包括主流的柔顺机构建模和综合设计方法以及精心编排的柔顺机构可视化图库, 可以帮助读者快速且全面地掌握柔顺机构领域的整体状况, 并在设计初期为设计者提供灵感和启发。

我国对柔顺机构的研究虽然稍晚, 但近年来在分析及设计理论方面开展了卓有特色的研究, 取得了可喜的研究成果, 研究单位由开始的寥寥数家扩展到现在的几十家, 研究队伍日益壮大, 柔顺机构学已成为中国机构学研究的一支重要力量。近年, 随着精密工程、仿生机器人以及智能结构的迅速发展, 柔顺机构已得到越来越多的中国学者和设计人员的重视。然而, 除了中译本《柔顺机构学》之外, 目前国内尚无其他与柔顺机构相关的专著, 这对开展柔顺机构研究十分不利。*Handbook of Compliant Mechanisms* 中译本即本书的出版将在一定程度上弥补这一缺失。

本书的主要译者均为长期从事柔顺机构研究的中青年学者, 对当今的主流设计方法有较深入的了解和应用, 同时也与 Howell 教授有着良好的合作关系。本书的翻译工作是在 Howell 教授的大力支持下开展并完成的。

本书的出版得到了高等教育出版社的大力支持, 在此表示诚挚的谢意! 感谢戴建生教授对书名译法的宝贵建议!

本书的翻译工作得到了国家自然科学基金委员会的资助 (51175396, 51175010), 在此表示特别的感谢!

在翻译过程中, 为了尽量保持原文的风格和科学的严谨性, 部分语句可能存有直译的痕迹。对于原书中存在的一些小错误, 通过与 Howell 教授的沟通, 已在译文中直接修改, 不再一一加注指出。若有不妥或错误之处, 敬请读者和专家批评指正。

译者

编著者列表

章节编著者

Shorya Awtar, 美国密歇根大学安娜堡分校助理教授

Mary Frecker, 美国宾夕法尼亚州立大学帕克校区教授

Jonathan Hopkins, 美国加利福尼亚大学洛杉矶分校助理教授

Larry Howell, 美国杨百翰大学 (犹他州普罗沃市) 教授

Brian Jensen, 美国杨百翰大学 (犹他州普罗沃市) 副教授

Charles Kim, 美国巴克内尔大学 (路易斯堡市) 助理教授

Girish Krishnan, 美国密歇根大学安娜堡分校博士后

Craig Lusk, 美国南佛罗里达大学 (坦帕市) 副教授

Spencer Magleby, 美国杨百翰大学 (犹他州普罗沃市) Ira A. Fulton 工程与技术学院副院长

Chris Mattson, 美国杨百翰大学 (犹他州普罗沃市) 副教授

Brian Olsen, 美国新墨西哥州洛斯阿拉莫斯国家实验室研发工程师

图库主要编著者

G. K. Ananthasuresh, 印度科学理工学院 (印度班加罗尔市)

陈贵敏, 西安电子科技大学 (中国西安市)

Martin Culpepper, 麻省理工学院 (美国马萨诸塞州剑桥市)

Mohammad Dado, 约旦大学 (约旦安曼市)

Haijun Su (苏海军), 俄亥俄州立大学 (美国俄亥俄州哥伦布市)

Simon Henein, 瑞士电子与微技术中心 (瑞士纳沙泰尔市)

Just L. Herder, 代尔夫特理工大学 (荷兰代尔夫特市)

Jonathan B. Hopkins, 美国加利福尼亚大学洛杉矶分校 (美国加利福尼亚州洛杉矶市)

Nilesh D. Mankame, 通用汽车公司研发中心 (美国密歇根州沃伦市)

Ashok Midha, 密苏里科技大学 (美国密苏里州罗拉市)

Anupam Saxena, 印度理工学院坎普尔分校
Ümit Sönmez, 沙迦美国大学 (阿拉伯联合酋长国沙迦市)
于靖军, 北京航空航天大学 (中国北京市)

图库编著者

Imad F. Bazzi, 通用汽车公司研发中心 (美国密歇根州沃伦市)
毕树生, 北京航空航天大学 (中国北京市)
Ozgur Erdener, 伊斯坦布尔技术大学 (土耳其伊斯坦布尔市)
Bilin Aksun Güvenc, 奥坎大学 (土耳其伊斯坦布尔市)
Huseyin Kızıl, 伊斯坦布尔技术大学 (土耳其伊斯坦布尔市)
裴旭, 北京航空航天大学 (中国北京市)
Ahmet Ekrem Sarı, Altinay 机器人技术股份有限公司 (土耳其伊斯坦布尔市)
Nima Tolou, 荷兰代尔夫特理工大学 (荷兰代尔夫特市)
Levent Trabzon, 伊斯坦布尔技术大学 (土耳其伊斯坦布尔市)
Cem Celal Tutum, 丹麦技术大学 (丹麦灵比市)
赵宏哲, 北京航空航天大学 (中国北京市)
宗光华, 北京航空航天大学 (中国北京市)
Yörükoğlu, Ahmet, 土耳其阿奇立克公司研发工程师

学生编著者

Bapat, Sushrut, 美国密苏里科学技术大学
Barg, Matt, 美国杨百翰大学
Berg, Fred van den, 荷兰代尔夫特理工大学
Black, Justin, 美国杨百翰大学
Bowen, Landen, 美国杨百翰大学
Bradshaw, Rachel, 美国杨百翰大学
Campbell, Robert, 美国杨百翰大学
Chinta, Vivekananda, 美国密苏里科学技术大学
Dario, P., 意大利比萨圣安娜大学
Davis, Mark, 美国杨百翰大学
Demirel, Burak, 瑞典皇家工学院
Duffield, Luke, 美国杨百翰大学
Dunning, A.G., 荷兰代尔夫特理工大学
Emirler, Mümin Tolga, 土耳其伊斯坦布尔技术大学

Foth, Morgan, 美国杨百翰大学
George, Ryan, 美国杨百翰大学
Güldoğan, Bekir Berk, 土耳其伊斯坦布尔技术大学
Greenberg, Holly, 美国杨百翰大学
Hardy, Garrett, 美国杨百翰大学
Harris, Jeff, 美国杨百翰大学
Howard, Marcel J., 荷兰代尔夫特理工大学
Ivey, Brad, 美国杨百翰大学
Jones, Andrea, 美国杨百翰大学
Jones, Kris, 美国杨百翰大学
Kluit, Lodewijk, 荷兰代尔夫特理工大学
Koecher, Michael, 美国杨百翰大学
Koli, Ashish, 美国密苏里科学技术大学
Kosa, Ergin, 土耳其伊斯坦布尔技术大学
Kragten, Gert A., 荷兰代尔夫特理工大学
Kuber, Raghvendra, 美国密苏里科学技术大学
Lassooij, Jos, 荷兰代尔夫特理工大学
McCort, Ashby, 美国杨百翰大学
Morsch, Femke, 荷兰代尔夫特理工大学
Morrise, Jacob, 美国杨百翰大学
Pate, Jenny, 美国杨百翰大学
Peterson, Danielle Margaret, 美国杨百翰大学
Ratlamwala, Tahir Abdul Husain, 加拿大安大略理工大学
Reece, David, 美国杨百翰大学
Samuels, Marina, 美国杨百翰大学
Sanders, Michael, 美国杨百翰大学
Shafiq, Mohammed Taha, 阿拉伯联合酋长国沙迦美国大学
Shelley, Dan, 美国杨百翰大学
Shurtz, Tim, 美国杨百翰大学
Simi, Massimiliano, 意大利比萨圣安娜大学
Skousen, Darrell, 美国杨百翰大学
Solomon, Brad, 美国杨百翰大学
Steutel, Peter, 荷兰代尔夫特理工大学
Stubbs, Kevin, 美国杨百翰大学

Tanner, Daniel, 美国杨百翰大学

Tekeş, Ayşe, 土耳其伊斯坦布尔技术大学

Telford, Cody, 美国杨百翰大学

Toone, Nathan, 美国杨百翰大学

Wasley, Nick, 美国杨百翰大学

Wengel, Curt, 美国杨百翰大学

Wilding, Sam, 美国杨百翰大学

Williams, David, 美国杨百翰大学

Wright, Doug, 美国杨百翰大学

余志伟, 北京航空航天大学

赵山杉, 北京航空航天大学

Zirbel, Shannon, 美国杨百翰大学

致 谢

来自世界各地的编著者参与了《柔顺机构设计理论与实例》的编写工作。柔顺机构领域的多位专家编写了第 2 和第 3 部分中的众多章节,其他编著者参与编写了本书中的图库部分(第 4 部分)。在此对每位编著者表示感谢。

Brian Winder 和 Jonathan Hopkins 撰写了柔顺机构图库部分的初稿,在此表示感谢。感谢 Jung-Ah Ahn (Jade) 和 Stephen Jensen 在图形绘制方面的帮助,也感谢 Danielle Peterson 在管理工作上的帮助。柔顺机构图库部分的组织形式借鉴了 Ivan I. Artobolevskii 的 7 卷巨著 *Mechanisms in Modern Engineering Design: A Handbook for Engineers, Designers and Inventors*。谨以此书纪念 Ümit Sönmez 博士,他在参与本书编写工作期间出人意料地去世了。

前 言

柔顺机构应用日渐广泛，这源于它们所具有的诸多优点：卓越的性能（如精度高、重量轻、摩擦小）、低廉的成本（如易于加工、零件数少）和易于小型化（如微纳机械器件）。然而，与传统机械设备相比，柔顺机构仍然是新生事物，对设计者而言，还难以找到丰富的实例和资源来指导他们完成设计。许多人开始认识到柔顺机构的优势，但苦于缺乏将它们付诸工程实际的系统知识。尽管已有大量的期刊论文和书籍为柔顺机构的工程应用提供了方方面面的指导，但是设计者需要一份更为简洁直观的参考资料，以便能够在柔顺机构的概念设计阶段为他们提供启发和帮助。

本书总结了柔顺机构的建模和综合设计方法，并汇编了各种各样的柔顺机构，可为那些想在设计中应用柔顺机构的读者提供启发和指导。本书的前几章介绍了柔顺机构的基本背景、主要设计方法和分类，并以案例的形式讲述了如何运用本书来指导柔顺机构设计。本书包含了许多柔顺机构的简图和功能描述，可在设计初期为设计者提供灵感。

本书可以作为工程师、设计者以及其他产品设计相关人员的参考资料。我们希望本书能够对柔顺机构的研发有所帮助。

本书包含如下几个部分：

第一部分，柔顺机构导论和本书的使用指南；第二部分，柔顺机构的建模；第三部分，柔顺机构的综合方法；第四部分，柔顺机构的可视化实例图库。

我们衷心地感谢所有的编著者，他们的工作使得该书的出版成为可能。我们希望该书能够帮助设计者更好地开展柔顺机构创新设计。

与该书相关的研究得到了美国国家自然科学基金会资助（资助号 CMMI-0800606），但书中的任何观点、成果以及结论或者建议均是作者的，而不代表美国国家自然科学基金会的观点。

Brian M. Olsen 是洛斯阿拉莫斯国家安全股份有限公司的员工、美国能源部洛

斯阿拉莫斯国家实验室的研发工程师。书中的观点仅代表 Brian 和其他作者的观点，而不代表美国能源部或美国政府的见解、立场和观点。

Larry L. Howell

美国杨百翰大学

Spencer P. Magleby

美国杨百翰大学

Brian M. Olsen

美国洛斯阿拉莫斯国家实验室

2012 年 12 月

目 录

第一部分 柔顺机构导论

第 1 章 柔顺机构简介	3
1.1 什么是柔顺机构?	3
1.2 柔顺机构有哪些优点?	5
1.3 柔顺机构带来了哪些挑战?	6
1.4 为什么柔顺机构的应用变得越来越普遍?	7
1.5 哪些基本概念可以帮助我们理解柔顺性?	7
1.5.1 刚度和强度的不同	7
1.5.2 大柔度和高强度可以集于一身	8
1.5.3 产生柔性的基本方法	9
1.6 结论	11
参考文献	12
第 2 章 使用本书进行柔性装置设计	13
2.1 内容纲要	14
2.2 设计柔顺机构时的几点考虑	14
2.2.1 疲劳失效	14
2.2.2 获得大变形	15
2.2.3 保持高离轴刚度	16
2.2.4 力与变形之间的耦合	16
2.3 在图库中寻找思路和概念	17
2.4 柔顺机构建模	17
2.4.1 根据变形大小选择建模方法	18
2.4.2 解析建模法与近似建模法的比较	18
2.5 综合出自己的柔顺机构	18
2.5.1 修改图库中找到的概念设计	19
2.5.2 替换现有的刚体机构	19

2.5.3 从功能需求出发	19
2.6 柔顺机构设计方法总结	20
2.6.1 选择概念设计	20
2.6.2 确定设计参数的取值	20
扩展阅读	21

第二部分 柔顺机构建模

第 3 章 中行程柔性机构的分析	27
3.1 引言	27
3.2 挠曲梁的几何非线性建模	29
3.3 梁约束模型	32
3.4 实例分析: 平行四边形柔性机构	35
3.5 结论	38
扩展阅读	39
第 4 章 大挠度变形单元的建模	41
4.1 引言	41
4.2 大挠度的弯曲方程	42
4.3 弯曲非线性方程的求解	43
4.4 例子	43
4.4.1 固定 - 铰接型柔性梁	43
4.4.2 固定 - 导向型柔性梁 (双稳态机构)	45
4.5 结论	47
扩展阅读	48
参考文献	48
第 5 章 使用伪刚体模型	51
5.1 引言	51
5.2 平面梁的伪刚体模型	53
5.3 伪刚体模型的应用: 开关机构的实例研究	56
5.3.1 设计方案 I: 短臂柔性铰链 (SLFP) 开关	56
5.3.2 设计方案 II: 柔性梁开关	57
5.3.3 设计方案 III: 固定 - 导向型柔性梁开关	57