

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

柔性设计

柔性机构的分析与综合

Flexure Design
Analysis and Synthesis of
Compliant Mechanism

于靖军
毕树生
裴旭
赵宏哲
宗光华
著

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

柔性设计

柔性机构的分析与综合

Flexure Design

Analysis and Synthesis of Compliant Mechanism

于靖军 毕树生 裴旭 赵宏哲 宗光华 著



高等教育出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

柔性设计: 柔性机构的分析与综合 / 于靖军等著.

-- 北京: 高等教育出版社, 2018. 1

(机械工程前沿著作系列)

ISBN 978-7-04-048777-0

I. ①柔… II. ①于… III. ①柔性连杆机构 IV.

① TH112.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 264937 号

策划编辑 刘占伟
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 刘占伟
责任校对 刘丽娟

封面设计 杨立新
责任印制 刘思涵

版式设计 杜微言

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 山东临沂新华印刷物流集团
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 39.75
字 数 760千字
插 页 5
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>
版 次 2018年1月第1版
印 次 2018年1月第1次印刷
定 价 99.00 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 48777-00

内容简介

本书基于作者对柔性机构学基础理论长达 20 多年的研究和积累,密切结合精密工程、仿生机器人等应用需求,系统地总结了面向柔性设计的理论与方法。

全书总共分为三篇:分析建模篇、设计综合篇与设计实例篇。

第 1~6 章为分析建模篇,是全书的理论基础。第 1 章为绪论,系统介绍了柔性设计与应用研究进展,以及主流柔性设计方法;第 2 章对与柔性设计主题相关的基本概念进行了全面概述;第 3、4 章分别对基本柔性单元和柔性模块(简单柔性机构)进行了分析建模;第 5 章针对柔性机构特有的主运动与寄生运动问题进行了研究;第 6 章则对柔性机构的动力学问题进行了初步探讨。

第 7~12 章为设计综合篇,是全书精华所在,分别从自由度、刚度、精度、强度、能效等多维度对柔性设计方法进行了探索。第 7 章系统介绍了柔性机构的图谱化构型综合方法;第 8 章从刚度综合的角度,利用参数化思想,实现了柔性机构构型与尺度的统一综合;第 9 章则从胞元结构与胞元式设计方法两个层面来探索柔性机构的创新设计问题;第 10 章基于大行程、高精度的柔性设计需求,提出了寄生运动误差补偿与对称设计方法;第 11 章借助结构屈曲理论构建了大转角柔性铰链的强度设计方法;第 12 章则从能效的角度,对柔性系统的驱动/传动、静平衡问题进行了初步探索,是对柔性设计理论及方法的有益补充。

第 13~15 章为设计实例篇,是对前两篇理论方法的综合应用。第 13 章介绍了一种大行程柔性轴承的设计过程,借助的是胞元与精度设计方法;第 14 章给出了一种两自由度柔性移动平台的设计,借助的是图谱、胞元与刚度设计方法;第 15 章从系统的角度给出了多轴并/混联柔性机构在微操作机器人系统中的成功应用。

作为全书的数学基础,在附录中还增加了旋量理论基础的概述。

本书可供机构学、机器人学、精密机械与仪器等相关专业的研究生参考,也可以作为相关行业工程师、设计师的参考资料。

前 言

柔性机构(或称柔顺机构)是一类借助柔性单元的变形实现运动、力或能量传递与转换的装置。与传统的刚性机构相比,柔性机构具有高精度、高可靠性、无间隙、无摩擦、无磨损、免润滑、免装配、可整体加工、易于小型化等优点,在先进制造、光学工程、生物医学、航空航天等领域的应用日渐广泛,已成为高端装备的核心关键技术之一,在精密工程领域扮演着重要角色。

然而,由于柔性机构的运动总是伴随着复杂的变形过程,使得对其建模、分析和设计比刚性机构困难得多;特别是大行程柔性机构,涉及非线性、运动和力相互耦合等复杂问题求解,精确建模十分困难,更缺少有效的方法来指导创新设计。柔性机构学权威 Howell 教授在其著作 *Handbook of Compliant Mechanisms* 中指出:“将不同功能集成到单个或少数几个零件的做法虽有一定的优势,但也导致必须对运动和力学特性进行同步设计;柔性机构中的变形通常是非线性的,这无疑使设计变得更加困难”。

针对柔性设计过程中的精确建模与创新设计等难题,北京航空航天大学从 1994 年开始,系统地开展了“高精度柔性机构设计理论与方法”研究。研究过程中,注重机构学与数学、力学、机器人学以及精密工程等学科的交叉,在构型综合、创新设计、性能评价、参数化建模、运动学分析与综合等方面形成了系统性的研究成果。目前,已发表相关学术论文 120 余篇,其中在 *ASME Transaction*、*Mechanism and Machine Theory*、*Precision Engineering*、*Review of Scientific Instruments* 等国际核心期刊发表 SCIE 论文 40 余篇。所提出的理论方法得到国际同行认可,并予以借鉴。此外,相关研究成果获中国发明专利授权近 20 项。

全书共分为三篇。第 1~6 章为分析建模篇,也是全书的理论基础;第 7~12 章为设计综合篇,从多个视角对柔性设计方法进行了探索;第 13~15 章为设计实例篇,是对前两篇理论方法的综合应用。

第 1 章系统介绍了柔性设计与应用研究进展,以及主流柔性设计方法。第 2 章对与柔性设计主题相关的基本概念进行了全面概述。第 3、4 章分别对基本柔性单元和柔性模块进行了分析建模。第 5 章对柔性机构的主运动与寄生运动问题进行了研究。第 6 章对柔性机构中的一些动力学问题进行了初步探讨。第 7 章系统介绍

了柔性机构的图谱化构型综合方法。第 8 章利用参数化思想尝试了柔性机构的刚度综合。第 9 章从胞元结构与胞元式设计方法两个维度来探索柔性机构的创新设计问题。第 10 章基于大行程高精度的柔性设计需求, 提出寄生运动误差补偿与对称设计方法。第 11 章借助结构屈曲理论构建了大转角柔性铰链的强度设计方法。第 12 章从能效的角度, 对柔性系统的驱动/传动、静平衡问题进行了初步探索。第 13 章介绍了一种大行程柔性轴承的设计, 借助的是胞元与精度设计方法。第 14 章介绍了两自由度 XY 柔性纳米定位平台的设计。第 15 章从系统的角度给出了多轴并/混联柔性机构在微操作机器人系统中的应用。作为全书的主要数学基础, 在附录中增加了对旋量理论基础的概述。

本书作者均为从事柔性机构学基础理论及技术应用研究的科研人员。第 1、2 章由于靖军、毕树生、宗光华撰写; 第 3、4 章由于靖军、裴旭、赵宏哲撰写; 第 5 章由于靖军、宗光华撰写; 第 6 章由毕树生、于靖军撰写; 第 7 章由于靖军、裴旭、宗光华撰写; 第 8 章由于靖军、裴旭撰写; 第 9、10 章由于靖军、裴旭、赵宏哲撰写; 第 11 章由宗光华撰写; 第 12 章由毕树生、于靖军撰写; 第 13 章由毕树生撰写; 第 14 章由于靖军撰写; 第 15 章由毕树生、宗光华、于靖军撰写; 附录由于靖军撰写。全书由于靖军统稿、编辑和校对。

作者指导的博士生和硕士生的研究成果为本书的撰写提供了素材。博士毕业生包括李守忠、余志伟、刘浪、张述卿、姚艳彬、贾明、晁代宏、吴铤、赵玮等; 硕士生包括陆登峰、贾瑞鹏、张雷、徐熠、李振国等。我们对本书的所有贡献者表示诚挚的感谢!

本书涉及的研究工作得到了国家自然科学基金、教育部博士点基金等项目的资助。本书的出版得到了高等教育出版社的大力支持, 在此表示衷心感谢!

由于作者水平有限, 书中难免有疏虞之处, 热忱欢迎读者和专家批评指正。

作者

2017 年春

目 录

第一篇 分析建模

第 1 章 绪论	3
1.1 历史沿革	3
1.2 柔性机构的优缺点	5
1.3 柔性机构的应用	7
1.3.1 柔性机构与精密工程	7
1.3.2 柔性机构与仿生机器人	10
1.3.3 柔性智能结构	14
1.3.4 几种颇具应用前景的新型柔性机构	17
1.4 分析与综合方法概述	20
1.5 本书内容	28
参考文献	30
第 2 章 基本概念	39
2.1 柔性单元、柔性铰链、柔性机构与柔性模块	39
2.1.1 柔性单元	39
2.1.2 柔性铰链	40
2.1.3 柔性机构	47
2.1.4 柔性模块	48
2.1.5 典型的柔性系统——柔性工作台	50
2.2 线性变形与非线性变形	54
2.3 行程与载荷	54
2.4 强度与应力	54
2.5 刚度与柔度	55
2.6 自由度与约束	55
2.7 精度:轴漂与寄生运动	56
2.8 材料选择	56

2.9 加工方法概述	58
参考文献	59
第 3 章 柔性单元的柔度建模	61
3.1 小变形条件下柔性梁的一般力学模型	61
3.1.1 均质梁	61
3.1.2 变截面梁	68
3.2 基于旋量理论的柔度建模	75
3.2.1 Von Mises 的梁变形理论	75
3.2.2 柔度的坐标变换	78
3.3 大变形柔性单元的伪刚体模型	80
3.3.1 经典伪刚体模型	80
3.3.2 基于瞬心概念的簧片伪刚体模型	83
3.4 大变形柔性单元的约束模型	87
3.4.1 Awtar 模型	88
3.4.2 改进的 Awtar 模型	92
3.4.3 簧片的特性评估	95
3.4.4 模型验证	99
3.5 有关柔度概念的分类思考	100
3.6 本章小结	101
参考文献	102
第 4 章 柔性模块的建模与性能评价	105
4.1 主要性能参数	105
4.2 基于旋量理论的柔度建模与性能评价	107
4.2.1 全局柔度矩阵的建模公式	107
4.2.2 实例分析	108
4.3 等效伪刚体建模与性能评价	124
4.3.1 平行双簧片型柔性模块	125
4.3.2 LITFP	126
4.3.3 交叉簧片型柔性铰链	138
4.3.4 车轮形柔性铰链	141
4.3.5 蝶形柔性铰链	145
4.4 基于梁约束模型的柔性模块性能分析与评价	147
4.4.1 建模	149
4.4.2 特性分析	155
4.4.3 设计实例: 高精度、常值刚度的柔性铰链设计	166

4.5 本章小结	171
参考文献	171
第 5 章 柔性机构的主运动与寄生运动分析	175
5.1 柔性单元的等效自由度与约束模型	175
5.2 基于图谱法的自由度与过约束分析	180
5.2.1 一般分析方法	180
5.2.2 柔性机构中的冗余约束	185
5.2.3 一种用于验证自由度分析结果的模块化、可重构柔性教具	187
5.3 基于特征柔度矩阵的自由度分析	189
5.3.1 一般分析方法	189
5.3.2 实例分析	190
5.4 柔性机构的寄生运动分析	195
5.4.1 梯形柔性模块	197
5.4.2 平行双簧片型柔性模块	199
5.5 本章小结	199
参考文献	199
第 6 章 柔性机构动力学基础	201
6.1 柔性动力学建模方法简介	201
6.2 单自由度柔性机构的动力学建模	202
6.2.1 基于集中参数法的柔性机构动力学建模	202
6.2.2 基于瞬心的大行程柔性铰链动力学建模	209
6.2.3 基于梁约束模型的大行程柔性铰链动力学建模	212
6.2.4 3 种动力学建模方法的有限元模态验证与对比	216
6.3 多自由度柔性机构的动力学建模	217
6.3.1 简化模型	217
6.3.2 考虑阻尼的动力学建模	221
6.4 柔性动力学实验	224
6.4.1 基本原理	224
6.4.2 实验设备与方案	225
6.4.3 实验过程与结果分析	226
6.5 本章小结	229
参考文献	229

第二篇 设计综合

第 7 章 图谱化构型综合	233
7.1 图谱化构型综合的基本思路	234
7.2 子空间	236
7.2.1 同维子空间	236
7.2.2 约束空间的分解	238
7.3 常见柔性铰链及柔性机构的分类综合	242
7.3.1 柔性铰链的分类与枚举	242
7.3.2 常用的多轴柔性机构	245
7.4 多轴柔性机构的图谱化构型综合	248
7.4.1 并联式柔性机构的图谱化构型综合	248
7.4.2 串/混联式柔性机构的构型综合	254
7.5 并/混联柔性机构构型综合的深层考虑	255
7.5.1 简单全并联的实现条件	255
7.5.2 柔性机构的串/混联实现	264
7.6 柔性机构的驱动空间	271
7.7 本章小结	274
参考文献	274
第 8 章 参数化刚度综合	277
8.1 刚度与自由度之间的映射关系	278
8.1.1 基本思想	278
8.1.2 柔性单元结构参数对自由度的影响	278
8.2 刚度综合流程	279
8.3 综合实例	281
8.3.1 串联式柔性机构	281
8.3.2 并联式柔性机构	286
8.3.3 混联式柔性机构	292
8.3.4 仿真验证	297
8.4 应用实例: 一种 2-DOF 重力梯度敏感机构的刚度设计	298
8.4.1 构型综合	299
8.4.2 基于刚度的构型优选	299
8.4.3 刚度综合与优化设计	305
8.4.4 仿真分析与验证	308
8.5 本章小结	309
参考文献	309

第 9 章 胞元设计	311
9.1 胞元设计的基本思想	311
9.2 基于模块分层的构型设计	314
9.3 基于特殊柔性胞元的大行程柔性机构设计	317
9.3.1 复合型柔性机构的优势	317
9.3.2 基于 VCM 胞元的大行程柔性铰链设计	318
9.3.3 基于 GCSFM 胞元的大行程柔性铰链设计	330
9.4 胞元结构与柔性设计	338
9.4.1 常见胞元结构的分类	338
9.4.2 常见大应变胞元结构的特性分析	340
9.4.3 基于不同特性的胞元式柔性机构设计	341
9.5 本章小结	358
参考文献	359
第 10 章 基于误差补偿的精度设计	361
10.1 柔性机构的误差源	361
10.1.1 柔性单元的误差源分析	362
10.1.2 外围元件及外部因素的误差源分析	365
10.2 基于刚柔寄生运动相互补偿的单轴柔性机构精度设计	366
10.2.1 寄生运动分析	366
10.2.2 基于刚柔寄生运动补偿的柔性直线导向机构设计方法	368
10.2.3 设计实例——基于 LITFP 模块的柔性直线导向机构设计	371
10.3 基于约束特性的误差补偿原理与单轴柔性直线机构设计	377
10.3.1 基于约束特性的误差补偿原理	377
10.3.2 高精度柔性直线导向机构的设计	380
10.4 基于寄生运动补偿的多轴柔性机构设计	391
10.4.1 寄生运动补偿原理	391
10.4.2 设计过程	392
10.4.3 设计实例	395
10.5 对称设计提高精度的原理性论证	402
10.5.1 对称串联设计	402
10.5.2 对称并联设计	404
10.6 本章小结	405
参考文献	406
第 11 章 屈曲设计	409
11.1 屈曲设计的灵感来源	409

11.2	基于屈曲理论的挠曲线构型法	412
11.2.1	压杆稳定的概念	412
11.2.2	轴心受压杆件的大挠度弹性理论	415
11.2.3	挠曲线构型法	424
11.3	DC 型柔性铰链的设计与性能分析	427
11.3.1	构型设计	427
11.3.2	挠曲线形状对铰链性能的影响	431
11.3.3	实验	440
11.4	本章小结	443
	参考文献	444
第 12 章	考虑能效的柔性设计	445
12.1	驱动器选择	445
12.2	柔性运放机构的设计	448
12.2.1	运动缩放的必要性	448
12.2.2	柔性运放机构的选型与设计考虑	449
12.2.3	新型大行程、高精度运放机构的设计方法	456
12.3	柔性静平衡机构的设计	457
12.3.1	零刚度柔性机构的一般设计思想	458
12.3.2	负刚度柔性模块的设计	458
12.3.3	零刚度柔性设计	471
12.3.4	模型制作与性能测试	483
12.4	本章小结	484
	参考文献	485
 第三篇 设计实例		
第 13 章	大行程柔性轴承	489
13.1	柔性轴承及其应用	489
13.2	广义三交叉簧片型柔性轴承的设计、分析与测试	494
13.2.1	构型设计与优选	494
13.2.2	刚度与精度建模	496
13.2.3	样机模型与测试	504
13.3	内外环柔性轴承的设计、分析与测试	514
13.3.1	构型设计	514
13.3.2	刚度特性分析	516

13.3.3 实验测试	521
13.4 本章小结	524
参考文献	525
第 14 章 大行程 XY 柔性工作台	527
14.1 构型设计	527
14.1.1 拓扑结构演化	527
14.1.2 柔性模块的构型设计	528
14.1.3 柔性 XY 工作台的构型设计	531
14.2 参数设计	535
14.2.1 参数化刚度设计	535
14.2.2 基于误差补偿的精度设计	542
14.2.3 不同类型平台的柔度矩阵比较	544
14.2.4 有限元分析与改进设计	547
14.3 原型设计与性能测试	552
14.3.1 样机组成	552
14.3.2 性能测试	555
14.4 本章小结	559
参考文献	559
第 15 章 柔性微操作机器人	561
15.1 典型的微操作机器人系统	561
15.1.1 面向生物工程显微操作的机器人系统	562
15.1.2 面向光波导器件耦合对接的微操作机器人系统	565
15.2 典型的微操作机器人机构	569
15.3 3 维平动柔性微操作机构的构型综合	573
15.4 混联式柔性微操作机构的参数设计	575
15.4.1 平面 3-RRR 并联柔性平台的结构一体化设计	576
15.4.2 空间 3-RPS 并联柔性平台的参数设计	579
15.4.3 6-DOF 柔性微操作机器人的性能指标	581
15.5 微操作机器人系统自动对接实验	583
15.6 本章小结	585
参考文献	585
附录 旋量理论基础及图谱表达	587
A.1 旋量理论基础	587
A.1.1 旋量	587

A.1.2	运动旋量与力旋量	588
A.1.3	旋量的互易积与约束旋量	590
A.1.4	旋量系与旋量空间	591
A.1.5	运动旋量系与约束旋量系	592
A.2	旋量理论的图谱化表达	593
A.2.1	基本概念	593
A.2.2	自由度(约束)等价线	595
A.2.3	冗余线	597
A.2.4	对偶法则	599
A.2.5	自由度与对偶约束空间图谱	600
	参考文献	600

索引	607
----	-----

第一篇 分析建模

第 1 章 绪论

第 2 章 基本概念

第 3 章 柔性单元的柔度建模

第 4 章 柔性模块的建模与性能评价

第 5 章 柔性机构的主运动与寄生运动分析

第 6 章 柔性机构动力学基础

第 1 章 绪 论

自然界中到处可见柔性设计的实例,人类从中获取灵感并成功使用柔性的历史也有 8 000 多年,但作为一门科学对其进行系统研究只有不到 30 年的时间。特别在机构学领域,柔性设计理论的研究得到了迅猛发展,各种设计方法层出不穷;柔性设计广泛应用到精密工程、仿生机械与机器人、智能结构、日常用品等多个领域。

本章将从柔性的历史发展、柔性机构的优缺点、应用与设计方法等方面对其进行较全面的概述,希望读者能够对柔性及柔性机构有个整体认识。

1.1 历史沿革

人与自然之间存在很多差异,其中一方面可体现在“产品”设计方式上:人类缔造的伟大工程,总是体现出刚而强的一面,而自然设计的万物往往是刚柔并济的。

以生物界来说,许多生物体可通过巧妙地使用自身机体的柔性将能量转化为精妙复杂的运动。例如,如图 1.1 所示,蝗虫的腿通过特定的柔性设计,将其肌肉内储存的能量快速地释放出来,产生高出自身尺寸数百倍的跳跃;蜈蚣依赖分布柔性完成掘洞或其他功能;许多昆虫或鸟类依靠胸腔的柔性能够以很高的频率来拍打翅膀;人类心脏的瓣膜更是柔性应用的伟大“杰作”:柔性可使其抵抗数以百亿次的冲击而不疲劳。

人类从自然界中获取柔性灵感的历史可以追溯到 8 000 年前,那时的人类已发明和使用弓和弹弓之类的工具(图 1.2a)。弩也是古人利用柔性的典型实例,如亚历山大的攻城弩、中国的连弩等。处于大同盆地地震带上的山西应县木塔(图 1.2b),自 1056 年建成以来,经历了多次地震洗礼,仍安然无恙。研究发现,是木塔结构中的柔性吸收了地震能所致^[1]。

虽然人类认识并利用柔性的原理由来已久,但是对其进行科学研究却只有几百