



机构碰撞 动力学

含间隙铰链机构非线性接触力
建模和碰撞动力学研究

Mechanism impact dynamics

王旭鹏◎著 刘更◎审

 中国工信出版集团

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>



机构碰撞 动力学

含间隙铰链机构非线性接触力
建模和碰撞动力学研究

Mechanism impact dynamics

王加鹏◎董 刘 更◎申



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

高精密机械、航空/航天工程及机器人工业的快速发展,对机械系统提出了高速、高精度、高效率、高可靠性及长寿命等一系列设计和使用要求;但是,机构运动副中普遍存在的间隙及接触碰撞会导致机构出现动态输出振荡、运动精度下降、可靠性和使用寿命降低,甚至功能失效等问题。针对上述问题,本书开展了相关研究,全书共7章,涉及间隙铰链处接触力建模、含间隙铰链机构的碰撞动力学研究及实验验证等。

本书可供机械设计及理论专业的科研工作者、研究生、高年级本科生和相关工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

机构碰撞动力学:含间隙铰链机构非线性接触力建模和碰撞动力学研究 / 王旭鹏著.

—北京:电子工业出版社,2018.11

ISBN 978-7-121-35332-1

I. ①机… II. ①王… III. ①铰链机构—碰撞(力学)—机械动力学—研究 IV. ①TH112

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第245473号

策划编辑:刘小琳

责任编辑:刘小琳 特约编辑:白天明

印 刷:北京虎彩文化传播有限公司

装 订:北京虎彩文化传播有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:720×1 000 1/16 印张:15.75 字数:234千字

版 次:2018年11月第1版

印 次:2018年11月第1次印刷

定 价:68.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:liuxl@phei.com.cn, (010) 88254538。

前言

Foreward

高精密机械、航空/航天工程及机器人工业的发展，对机械系统提出了高速、高精度、高效率、高可靠性及长寿命等一系列设计和使用要求。机构作为机械系统中用来实现运动和动力传递的重要组成部分，其设计、建模和仿真分析的准确与否对整个机械系统的功能实现起到至关重要的作用。

针对机构运动副普遍存在的因间隙引起接触碰撞，进而导致机构出现动态输出振荡、运动精度下降、可靠性和使用寿命降低，甚至功能失效等问题。在国家自然科学基金（51275423：行星滚柱丝杠副滚滑摩擦机理与传动效率理论及试验研究）、国家 863 项目（×××收放机构动态性能分析与评估）、陕西省教育厅自然科技专项基金（17JK0551：基于变恢复系数的间隙铰链接触碰撞机理研究）、西安理工大学博士启动基金项目（106-451117002：含铰间弹塑性变形与时变磨损的机械系统动态特性研究）等的资助下，本书深入开展了旋转间隙铰链处接触力建模和含间隙铰链机构的碰撞动力学研究，设计了相应的实验系统；并且通过各种工况下的实验研究，对书中建立的接触力模型和基于该模型的含间隙铰链机构动态性能理论分析结果进行了验证。

本书的研究内容为有效辨识含间隙铰链机构动态性能影响因素和影响规律,为准确预测含间隙铰链机构的动力学行为,抑制由间隙引起的振动、冲击、摩擦及磨损,开展含间隙铰链机构优化设计、可靠性分析及寿命评估等奠定了理论基础。主要包括以下内容。

(1) 基于轴、轴承/轴套间发生正碰撞假设,考虑轴承/轴套轴向尺寸,建立了既满足干摩擦,同时也适用于含油膜润滑工况的、含规则间隙的线接触旋转铰模型。在此基础上,进一步建立了含间隙铰链机构动力学模型,为后续间隙铰链处非线性接触力和含间隙铰链机构碰撞动力学研究奠定了基础。

(2) 基于含间隙轴—轴承间“碰撞—恢复”过程的理论分析,详细研究对比了无阻尼 Hertz 接触模型、Persson 接触模型及改进 Winkler 弹性基础模型,以及含阻尼 Hunt 和 Crossley 模型及其几种改进模型,指出了传统模型存在的局限性。在此基础上,针对上述间隙铰链处接触力模型的不足,结合含轴向尺寸的间隙铰模型和改进的 Winkler 弹性基础模型,分别建立了一种不依赖碰撞恢复系数的非线性法向碰撞力模型 I,一种满足较大碰撞恢复系数且使用不受间隙、载荷限制的非线性法向碰撞力模型 II,一种可满足不同间隙、不同载荷及不同恢复系数的非线性法向碰撞力模型 III,以及一种改进的 Coulomb 摩擦力模型。以轴—轴承/轴套及含间隙曲柄滑块机构为例,通过理论研究和实验对比分析,验证了本书所建模型的正确性和有效性。其中,改进模型 III 在不同间隙、不同初始碰撞速度及不同恢复系数下,均比 Lankarani 和 Nikravesh 提出的经典法向碰撞力模型具有更高的计算精度。

(3) 计入油膜润滑对间隙铰链动态特性的影响,采用本书改进的非线性接触力模型 III 和 Hamrock 油膜力模型,建立了一种同时考虑挤压油膜作用和楔形油膜作用,且同时满足无限长轴承和无限短轴承的、改进的非线

性过渡力模型，并以曲柄滑块机构为例研究了含润滑和无润滑条件下该机构的动态特性。研究表明：与无润滑工况相比，当考虑间隙铰链处油膜润滑时，间隙处接触力高频振荡现象得到明显抑制，机构位移、速度及加速度等动态输出特性与理想值基本吻合；但随着间隙值和驱动转速的增大，或润滑油动力黏度系数的减小，间隙铰链处油膜润滑效果变差，机构动态性能下降。

(4) 利用本书提出的无润滑非线性接触力模型和含润滑过渡力模型，以曲柄滑块机构为例，建立了考虑间隙及润滑时的动力学模型，详细研究了间隙、转速、恢复系数、材料特性及润滑油动力黏度系数对机构动力学特性的影响规律。研究表明：在间隙的影响下，机构动态输出呈现出明显的振荡现象，且间隙、转速、恢复系数越大，振荡越明显、振荡幅值越大；采用不同的材料组合方式时振荡频率差异不大，但材料弹性模量越大，振荡幅值越大，且弹性模量较小的材料动态输出结果出现延迟现象；当考虑油膜润滑时，机构动态特性较无润滑时得到明显改善。间隙、转速和润滑油动力黏度系数对油膜力有直接影响，随着间隙、转速的增大和润滑油动力黏度系数的降低，机构在死点位置附近的最小油膜厚度明显降低，甚至出现小于安全油膜厚度的现象。

(5) 搭建了含间隙铰链机构实验系统，对不同间隙、不同转速和不同材料下滑块位移和加速度动态输出进行了实验测试，通过与本书相应数学模型和理论计算结果的对比分析，进一步验证了本书提出的非线性接触力模型和摩擦力模型，以及各种参数对含间隙铰链机构碰撞动力学特性的影响规律。

本书由西安理工大学王旭鹏副教授策划并统稿，西北工业大学刘更教授主审。在书稿编写过程中，西北工业大学的马尚君副研究员、佟瑞庭副教授、吴立言教授、韩冰助理研究员，西安理工大学的吉晓民教授，西安

机构碰撞动力学

含间隙铰链机构非线性接触力建模和碰撞动力学研究

航空学院的王晋鹏讲师等提供了大力支持。此外，国内外同行已发表文献中的研究方法、研究成果也是本书的重要资料和组成部分，在此对相关人士一并表示感谢。

由于作者的水平有限、时间仓促，错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2018年10月

目录

Contents

第 1 章 绪论	001
1.1 本书写作背景与意义	001
1.2 国内外相关领域研究现状	004
1.2.1 接触碰撞和非线性接触力建模研究现状	004
1.2.2 含间隙铰链机构碰撞动力学研究现状	009
1.2.3 含间隙铰链机构实验研究现状	016
1.3 现有研究中存在的问题	022
1.4 本书主要研究内容	023
第 2 章 含间隙铰链机构建模理论和方法	025
2.1 概述	025
2.2 间隙铰链模型	026
2.2.1 间隙描述方法	026
2.2.2 间隙铰链数学模型	027
2.3 间隙铰链处接触力模型	032

2.3.1	法向无阻尼接触力模型	033
2.3.2	法向含阻尼接触力模型	042
2.3.3	切向摩擦力模型	049
2.4	含间隙铰链机构碰撞动力学模型	052
2.4.1	自由运动状态动力学模型	052
2.4.2	接触碰撞状态动力学建模	053
2.4.3	自由运动—接触碰撞状态转换识别	053
2.5	本章小结	054
第3章	改进的无润滑非线性接触力建模及应用	056
3.1	概述	056
3.2	改进的无润滑非线性法向碰撞力模型	057
3.2.1	改进的非线性法向碰撞力模型I	057
3.2.2	改进的非线性法向碰撞力模型II	063
3.2.3	改进的非线性法向碰撞力模型III	069
3.3	改进的切向 Coulomb 摩擦力模型	079
3.4	算例	080
3.4.1	算例I	080
3.4.2	算例II	086
3.4.3	算例III	094
3.4.4	算例IV	107
3.5	本章小结	110

第 4 章 改进的含润滑非线性过渡力建模及应用	113
4.1 概述	113
4.2 含润滑间隙旋转铰链建模	114
4.3 含润滑间隙铰链油膜力模型	116
4.3.1 Reynolds 方程	116
4.3.2 基于 Reynolds 方程的油膜力模型	117
4.4 改进的含润滑非线性过渡力建模	120
4.4.1 Flores 含润滑非线性过渡力建模	120
4.4.2 改进的过渡力建模	122
4.5 算例	122
4.6 本章小结	133
第 5 章 含间隙铰链机构碰撞动力学仿真与参数影响规律研究	135
5.1 概述	135
5.2 含间隙铰链机构动力学建模	136
5.2.1 含间隙曲柄滑块机构模型	136
5.2.2 机构运动学和动力学模型	138
5.3 不考虑润滑时的机构碰撞动力学分析	139
5.3.1 径向间隙影响分析	139
5.3.2 驱动载荷影响分析	143
5.3.3 材料特性影响分析	146
5.3.4 恢复系数影响分析	149
5.4 考虑润滑时机机构碰撞动力学分析	152

5.4.1	径向间隙影响分析	153
5.4.2	驱动载荷影响分析	156
5.4.3	润滑油动力黏度系数影响分析	161
5.5	本章小结	165
第 6 章	含间隙铰链机构实验研究	167
6.1	概述	167
6.2	实验原理及实验台系统	168
6.2.1	实验原理	168
6.2.2	实验台设计	169
6.3	实验结果	174
6.3.1	不同间隙下的实验结果	175
6.3.2	不同转速下的实验结果	181
6.3.3	不同材料下的实验结果	185
6.4	实验结果与仿真结果对比分析	189
6.5	本章小结	214
第 7 章	总结与展望	216
7.1	本书的主要工作及结论	216
7.2	本书的创新之处	220
7.3	本书的不足与展望	221
	参考文献	223

第 1 章

01

绪论

1.1 本书写作背景与意义

面向高速、高精度、高效率、高可靠性及长寿命等设计要求，机械系统需要综合考虑更多的设计因素。机构作为机械系统中用来实现运动和动力传递的重要组成部分，其设计、建模和仿真分析的准确与否对整个机械系统的功能实现起着至关重要的作用。在对机构进行研究的过程中，机构中相邻两构件连接铰链（轴—轴承/轴套）处径向间隙的影响引起了国内外研究者的关注。在 20 世纪 70 年代之前，研究主要集中在铰链处间隙对机构运动可靠性的影响；但随着研究的逐渐深入，铰链处间隙对机构动态特性的影响逐渐成为国内外研究的热点，并在传统机构动力学的基础上，产生了另一个机构动力学前沿课题——含间隙铰链机构动力学（Dynamics of Mechanisms with Clearances, DMC）^[1-3]。

传统方法在进行机构动力学分析时，往往对机构中连接铰链进行理想化处理，忽略间隙、磨损、润滑及弹塑性变形等因素的影响^[4]。然而，在工

程实际中，为了满足机构运动要求，相邻构件的连接铰链中总是设计有合理的配合间隙；同时，加工制造过程产生的误差，以及使用过程因摩擦、磨损和变形产生的间隙等，均使铰链中的间隙及其对机械系统性能的影响不容忽视^[5-6]。在航天领域，间隙铰链处产生的非线性接触力易诱发空间机构（如太阳能帆板、雷达天线阵列、空间桁架）在展开过程中出现结构振动和变形，进而导致空间机构出现结构失稳、定位精度不够、太阳帆板/天线打开失灵等故障，严重时可能直接导致飞行失败^[7-9]。美国哈勃太空望远镜就曾因太阳能帆板处间隙铰链的影响，出现了周期性“卡死—滑动”现象^[10]；我国的东方红三号卫星在间隙铰链的影响下，也出现过严重的“颤振”现象^[11]。在航空领域，由于间隙铰链的影响，导致导弹舵机、折叠弹翼等在工作时出现同步性差、偏转角度不到位的故障，直接影响导弹气动载荷和姿态控制。在高速重载机械领域，间隙铰链会导致连接件之间产生严重的磨损和不规则间隙^[12]，如图 1-1 和图 1-2 所示。统计分析表明，磨损是机械零件失效的主要形式，有 30%~80%的机械设备损坏是由磨损导致的^[13-14]。在机器人领域，间隙铰链的影响已成为影响智能机器人和机床用机械手运动稳定性和定位精度的瓶颈之一^[15]。

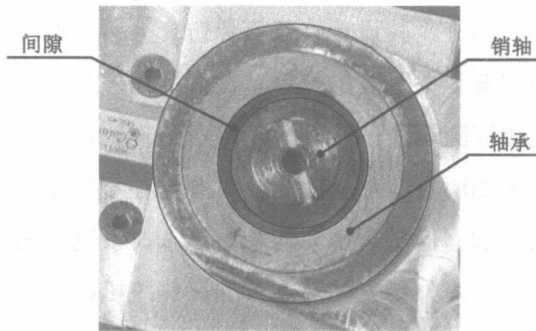


图 1-1 磨损导致的不规则间隙铰链^[12]

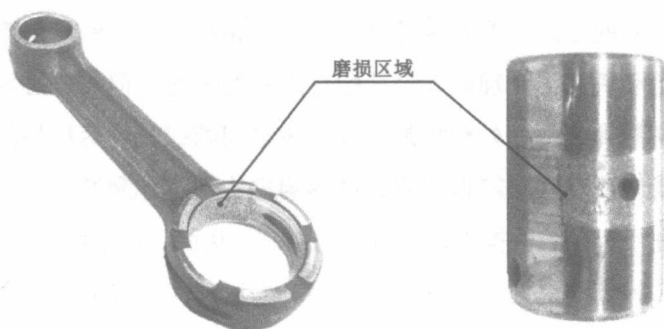


图 1-2 间隙铰链处的磨损现象^[12]

研究表明, 间隙铰链的存在会对机构本身及机械系统带来一系列不利的影响:

(1) 间隙会加剧铰链处两构件出现金属—金属接触碰撞的现象, 并产生明显的冲击碰撞载荷—非线性接触力, 导致机械系统动态输出振荡, 且幅值增大几倍甚至十几倍^[16-17]; 同时, 非线性接触力会使机构杆件弹性变形加剧, 并影响机构运动的可靠性和稳定性, 严重时甚至可能导致机构失效^[18-19]。

(2) 由于间隙铰链处的接触碰撞影响, 会明显加剧机构的振动, 进而使机构运动精度降低、工作效率下降。

(3) 间隙会引起铰链处的摩擦和磨损现象, 导致铰链处零件表面损伤, 机构工作效率下降, 寿命缩短。特别是对于高速、重载和微机械系统, 这种影响会更加明显。

(4) 对于含润滑的间隙铰链, 因间隙处磨损产生的碎屑可能会造成润滑油污染或油路堵塞。

(5) 由于间隙铰链的影响, 机构的运动可能会呈现很强的非线性动力学行为, 甚至混沌现象, 并因很难有效辨识而导致机械系统控制失效^[20]。

精密机械工程、航空/航天工程的发展, 对减小甚至消除间隙的影响、精确预测含间隙铰链机构动力学行为的要求越来越迫切。理论上, 消除或

降低间隙影响的方法主要有两种^[21, 22]：一种是提高加工制造精度，以此来消除相对运动所需的合理的、设计配合之外的间隙，但这势必导致加工制造成本的大幅提高；另外一种则是准确描述含间隙铰链处两构件的相对运动关系和非线性接触力，辨识间隙铰链影响机构动态行为的主要因素，并在此基础上进行合理的机构设计和有效的控制，从而尽可能降低间隙的影响。显然，第二种方法更利于工程实际中的机构设计，并降低间隙对机构动态性能的影响。从 20 世纪 70 年代开始，国内外研究者开展了大量的含间隙铰链机构非线性接触力建模和碰撞动力学方面的研究，并取得了一系列研究成果。但是，由于碰撞过程高度复杂和突出的非线性特性，此类问题的研究至今还远未达到与连续动力学相同的水平^[23]。

基于上述原因，含间隙铰链机构非线性接触力建模和碰撞动力学研究逐渐成为国内外机械工程、航空/航天工程及机器人领域迫切要解决的关键问题之一^[1-2, 24-28]。深入系统地进行含间隙铰链机构非线性接触力建模和碰撞动力学研究，辨识间隙铰链对机械系统动态特性影响的因素和影响规律，从而精确地预测含间隙铰链机构的动力学行为，对抑制间隙导致的振动、冲击、摩擦、磨损等具有重要的理论价值和工程应用价值。

1.2 国内外相关领域研究现状

1.2.1 接触碰撞和非线性接触力建模研究现状

由于间隙的存在，导致机构在工作时含间隙铰链两元素（轴—轴承）之间发生相互接触和碰撞，且碰撞过程与轴—轴承的几何尺寸、材料属性、碰撞时相对初始速度及碰撞时间等参数有关，并展现出明显的非线性特性。因此要准确进行含间隙铰链机构碰撞动力学研究，首先应建立准确的、用

以描述间隙铰链处碰撞特性的接触碰撞模型和与之对应的非线性接触力模型^[29, 30]。

按照对接触过程变形、碰撞时间的不同假设, 可以将接触碰撞的建模方法归纳为冲量动量法、非线性连续接触力模型法及基于连续介质力学的有限元法^[23, 30]。

1. 冲量动量法

这种建模方法假设间隙铰链处碰撞体(轴—轴承)均为刚体, 在碰撞过程中接触表面无弹性变形, 并不考虑接触体间的摩擦力作用; 同时, 假设碰撞过程在瞬间完成, 忽略碰撞持续时间和碰撞力作用过程。基于该模型分析时, 碰撞过程被划分为压缩和恢复两个过程, 无法直接利用碰撞力和碰撞加速度描述接触碰撞过程, 而是通过碰撞力冲量和系统广义速度来描述碰撞前后的运动关系; 此外, 该方法在描述碰撞过程时引入了恢复系数, 结合动量守恒定理计算碰撞前后的瞬时速度关系^[31]。因此, 恢复系数的准确定义是正确使用冲量动量法求解接触碰撞问题的关键所在; 但研究表明恢复系数是由碰撞体的材料特性所确定的常数, 且目前尚无完备的理论计算方法, 一般需要通过实验测得。结合上述论述可知, 冲量动量法是一种近似的建模方法, 且存在较大的局限性^[30]。

2. 非线性连续接触力模型法

冲量动量法无法直接得到接触碰撞过程的接触力, 无法获得碰撞过程的接触力、碰撞体速度、碰撞体加速度及弹性变形随时间的变化规律, 而这些参数往往是很多涉及含间隙铰链机构碰撞问题的工程应用领域研究者们关注的重点, 因此需要提出一种能够求解接触碰撞时接触力随时间变化的计算模型。连续接触力模型假设接触力是由接触碰撞时发生局部接触变形产生的, 建立以变形量和碰撞速度为参数的非线性接触力模型^[32, 33], 该非线性接触力由法向碰撞力和切向摩擦力组成。

国内外研究者在连续接触力模型方面进行了大量研究，并提出一系列不同形式的非线性接触力模型。

1) 间隙铰链处的法向碰撞力模型

基于碰撞过程完全弹性变形假设，Hertz 在研究弹性非协调接触时提出了经典的 Hertz 接触模型，但是该法向碰撞力模型没有考虑碰撞过程中的能量损失^[34]。在 Hertz 碰撞力的基础上，国内外研究者建立了许多改进的法向碰撞力模型，用来描述碰撞过程中的能量损耗，Kelvin-Voigt 线性弹簧阻尼模型为首个包含碰撞过程能量损耗项的法向碰撞力模型^[35]。基于 Kelvin-Voigt 模型，Dubowsky 等研究者进行了一系列含间隙铰链机构动态特性方面的理论和实验研究^[36-38]。但是，Kelvin-Voigt 模型在碰撞开始时出现弹性变形量为零而碰撞力却大于零的现象，致使数值积分不连续，并且在碰撞恢复阶段，可能会出现阻尼力与弹性力之和小于零的异常情况，因此存在一定的局限性。Hunt 和 Crossley 假设碰撞过程的能量损耗由内部阻尼引起，并建立了黏滞阻尼系数与恢复系数、碰撞初速度及接触刚度之间的关系，进而提出了一种改进的接触碰撞力模型^[39]；许多研究者基于 Hunt-Crossley 模型开展含间隙铰链机构碰撞动力学方面的研究^[40-44]。Lankarani 和 Nikravesh 在 Hunt 和 Crossley 研究工作的基础上^[45]，假设碰撞过程的能量损耗来源于材料阻尼，且碰撞弹性变形和恢复过程材料阻尼特性一致，从而提出了一种新的基于 Hertz 接触理论和恢复系数的非线性弹簧阻尼模型。Lankarani-Nikravesh 法向碰撞力模型（简称“L-N 模型”）能够反映碰撞过程的能量损耗，并且考虑了碰撞体的材料特性、弹性变形、碰撞速度及恢复系数等因素，为目前应用最为广泛的法向碰撞力模型，并在不同领域得到了大量应用^[46-56]。但由于 L-N 模型基于恢复系数接近 1 推导而得，所以当恢复系数较小时便不再适用^[57-58]，且仅当恢复系数不小于 0.75 时，碰撞后速度误差小于 10%，同时能量损耗误差小于 25%^[57]。其他研究者如 Gonthier、秦志英和陆启韶、Flores 等也提出了与 L-N 模型类似的非线性弹簧阻尼模型，并对黏滞阻尼系数进行修正^[59-61]。