



国家出版基金资助项目

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

湖北省学术著作出版专项资金资助项目



湖北省学术著作
出版专项资金
Hubei Provincial Academic Monograph
Publishing Special Fund

数字制造科学与技术前沿研究丛书

机床结合部 动力学建模及应用

Modeling and Application of Joints
on Machine Tools

毛宽民 李 斌 雷 声 著



武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press



国家出版基金资助项目

湖北省学术著作出版专项资金资助项目



数字制造科学与技术前沿研究丛书

机床结合部动力学建模及应用

毛宽民 李 斌 雷 声 著



武汉理工大学出版社

内 容 提 要

本书在建立结合部动力学模型和模型参数识别方法的基础上,建立了螺栓结合部动力学模型库,锥配合结合部动力学模型库,滚动导轨、滚珠丝杠结合部动力学模型库;在对结合部接触特性进行分析的基础上,提出了螺栓结合部虚拟材料模型,并考虑材料特性、加工方式、表面特征,建立了结合部虚拟材料模型库。利用现有商用有限元软件的二次开发功能,将所建立的结合部动力学模型库集成于商用有限元软件中,形成了机床整机动力学建模模块,可用于为机床动力学建模及结构分析与优化设计提供基础数据与方法。

图书在版编目(CIP)数据

机床结合部动力学建模及应用/毛宽民,李斌,雷声著. — 武汉:武汉理工大学出版社, 2018. 1
(数字制造科学与技术前沿研究丛书)

ISBN 978-7-5629-5386-9

I. ①机… II. ①毛… ②李… ③雷… III. ①机床-结合部位-动力学-系统建模-研究
IV. ①TG502.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 058671 号

项目负责人:田 高 王兆国

责任编辑:夏冬琴

责任校对:梁雪姣

封面设计:兴和设计

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市洪山区珞狮路122号 邮编:430070)

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

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:武汉中远印务有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:14.5

字 数:368千字

版 次:2018年1月第1版

印 次:2018年1月第1次印刷

印 数:1000册

定 价:87.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

数字制造科学与技术前沿研究丛书

编审委员会

顾问：闻邦椿 徐滨士 熊有伦 赵淳生

高金吉 郭东明 雷源忠

主任委员：周祖德 丁 汉

副主任委员：黎 明 严新平 孔祥东 陈 新

王国彪 董仕节

执行副主任委员：田 高

委员（按姓氏笔画排列）：

David He	Y. Norman Zhou	丁华锋	马 辉	王德石
毛宽民	冯 定	华 林	关治洪	刘 泉
刘 强	李仁发	李学军	肖汉斌	陈德军
张 霖	范大鹏	胡业发	郝建平	陶 飞
郭顺生	蒋国璋	韩清凯	谭跃刚	蔡敢为

秘书：王汉熙

总责任编辑：王兆国

总 序

当前,“中国制造 2025”规划和德国工业 4.0 以信息技术与制造技术深度融合为核心,以数字化、网络化、智能化为主线,将“互联网+”与先进制造业结合,正在兴起全球新一轮数字化制造的浪潮。发达国家特别是美、德、英、日等制造技术领先的国家,面对近年来制造业竞争力的下降,大力倡导“再工业化、再制造化”战略,明确提出智能机器人、人工智能、3D 打印、数字孪生是实现数字化制造的关键技术,并希望通过这几大数字化制造技术的突破,占领数字化设计与制造的高地,巩固和提升制造业的主导权。近年来,随着我国制造业信息化的推广和深入,数字车间、数字企业和数字化服务等数字技术已成为企业技术进步的重要标志,同时也是提高企业核心竞争力的重要手段。由此可见,在知识经济时代的今天,随着第三次工业革命的深入开展,数字化制造作为新的制造技术和制造模式,同时作为第三次工业革命的一个重要标志性内容,已成为推动 21 世纪制造业向前发展的强大动力,数字化制造的相关技术已逐步融入到制造产品的全生命周期,成为制造业产品全生命周期中不可缺少的驱动因素。

数字制造科学与技术是以数字制造系统的基本理论和关键技术为主要研究内容,以信息科学和系统工程科学的方法论为主要研究方法,以制造系统的优化运行为主要研究目标的一门学科。它又是一门新兴的交叉学科,是在数字科学与技术、网络信息技术及其他(如自动化技术、新材料科学、管理科学和系统科学等)与制造科学与技术不断融合、发展和广泛交叉应用的基础上诞生的,也是制造企业、制造系统和制造过程不断实现数字化的必然结果。其研究内容涉及产品需求、产品设计与仿真、产品生产过程优化、产品生产装备的运行控制、产品质量管理、产品销售与维护、产品全生命周期的信息化与服务化等各个环节的数字化分析、设计与规划、运行与管理,以及产品全生命周期所依托的运行环境数字化实现。数字化制造的研究已经从一种技术性研究演变成为包含基础理论和系统技术的系统科学研究。

作为一门新兴学科,其科学问题与关键技术包括:制造产品的数字化描述与创新设计,加工对象的物体形位空间和旋量空间的数字表示,几何计算和几何推理、加工过程多物理场的交互作用规律及其数字表示,几何约束、物理约束和产品性能约束的相容性及混合约束问题求解,制造系统中的模糊信息、不确定信息、不完整信息以及经验与技能的形式化和数字化表示,异构制造环境下的信息融合、信息集成和信息共享,制造装备与过程

的数字化智能控制、制造能力与制造全生命周期的服务优化等。本系列丛书试图从数字制造的基本理论和关键技术、数字制造计算几何学、数字制造信息学、数字制造机械动力学、数字制造可靠性基础、数字制造智能控制理论、数字制造误差理论与数据处理、数字制造资源智能管控等多个视角构成数字制造科学的完整学科体系。在此基础上,根据数字化制造技术的特点,从不同的角度介绍数字化制造的广泛应用和学术成果,包括产品数字化协同设计、机械系统数字化建模与分析、机械装置数字监测与诊断、动力学建模与应用、基于数字样机的维修技术与方法、磁悬浮转子机电耦合动力学、汽车信息物理融合系统、动力学与振动的数值模拟、压电换能器设计原理、复杂多环耦合机构构型综合及应用、大数据时代的产品智能配置理论与方法等。

围绕上述内容,以丁汉院士为代表的一批我国制造领域的教授、专家为此系列丛书的初步形成,提供了他们宝贵的经验和知识,付出了他们辛勤的劳动成果,在此谨表示最衷心的感谢!对于该丛书,经与闻邦椿、徐滨士、熊有伦、赵淳生、高金吉、郭东明和雷源忠等我国制造领域资深专家及编委会成员讨论,拟将其分为基础篇、技术篇和应用篇3个部分。上述专家和编委会成员对该系列丛书提出了许多宝贵意见,在此一并表示由衷的感谢!

数字制造科学与技术是一个内涵十分丰富、内容非常广泛的领域,而且还在不断地深化和发展,因此本丛书对数字制造科学的阐述只是一个初步的探索。可以预见,随着数字制造理论和方法的不断充实和发展,尤其是随着数字制造科学与技术制造企业的广泛推广和应用,本系列丛书的内容将会得到不断的充实和完善。

《数字制造科学与技术前沿研究丛书》编审委员会

前 言

结合部动力学行为对高性能、高精度数控机床的影响非常大,已经得到了国内外研究者的普遍关注。结合部动力学模型已经有基于赫兹接触理论的模型和弹簧阻尼器模型等多个模型,但是这些模型在应用于机床整机动力学建模时存在不同程度的缺陷,使得机床动力学建模的工程师们感到非常棘手。如何建立更加实用、使工程技术人员操作简便、能与现有有限元分析软件有机结合的结合部动力学模型是我们考虑的重点。在这样的想法下,我们提出了结合部八节点动力学模型,并且提出了基于传递函数矩阵与系统动力学矩阵互逆的结合部动力学模型参数识别方法。本书就是围绕这样的思想进行研究的。

本书在建立结合部动力学模型和模型参数识别方法的基础上,建立了螺栓结合部动力学模型库,锥配合结合部动力学模型库,滚动导轨、滚珠丝杠结合部动力学模型库;在对结合部接触特性进行分析的基础上,提出了螺栓结合部虚拟材料模型,并考虑材料特性、加工方式、表面特征,建立了结合部虚拟材料模型库。本书利用现有商用有限元软件的二次开发功能,将所建立的结合部动力学模型库集成于商用有限元软件中,形成了机床整机动力学建模模块,希望为机床动力学建模及结构分析与优化设计提供基础数据与方法。

本书由华中科技大学毛宽民、李斌和中南民族大学雷声著,华中科技大学博士研究生肖魏魏及硕士研究生徐强、黄小磊对螺栓结合部进行了大量的研究,硕士研究生涂智萌、郑益对滚动功能部件进行了大量探索,硕士研究生朱睿、叶俊在滚动导轨方面做了大量工作。正是他们的不懈努力以及创新思想,才使本书得以呈现给读者。

本书的研究内容是在国家自然科学基金“高速数控机床固定结合部单元动力学高精度建模方法研究”(50975104)、科技部“973 计划”项目“难加工航空零件的数字化制造基础研究”的课题 3“超强异形零件多轴加工失稳机制及控制品质优化”(课 2011CB706803)、国家 04 科技重大专项“高档数控机床与基础制造装备”的课题“重型机床动态综合补偿技术”(2009ZX04014-024)、国家科技支撑计划“面向汽车与航空产业发展的装备及自动化生产线应用示范”的课题“面向高效低损伤及加工安全的高端装备智能化控制技术与系统”(2012BAF08B01)等项目的资助下完成的。在此感谢这些项目的资助。

本书是作者在机床动力学研究方面的一家之言,目的是为机床动力学快速准确地建模提供基础数据和基本方法,难免挂一而漏万,错误之处在所难免,万望读者及各位专家提出宝贵意见,作者将不胜感谢。

作 者
2017 年 3 月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 目的和意义	(1)
1.2 研究现状	(1)
1.2.1 结合部建模研究现状	(1)
1.2.2 结合部参数识别方法研究现状	(4)
1.3 主要研究内容	(7)
2 螺栓结合部动力学建模	(9)
2.1 螺栓结合部动力学建模概述	(9)
2.1.1 机床螺栓连接固定结合面单元的建立	(9)
2.1.2 机床螺栓连接固定结合面单元的受力分析	(10)
2.1.3 机床螺栓连接固定结合面单元等效动力学模型的建立	(11)
2.2 螺栓结合部参数识别方法	(12)
2.2.1 固定结合部参数识别方法的理论基础	(13)
2.2.2 固定结合面动力学的参数识别方法	(14)
2.3 螺栓结合部模型参数识别	(17)
2.3.1 实验试件设计	(17)
2.3.2 模态实验装置和实验仪器	(18)
2.3.3 含结合面试件的模态实验测试	(20)
2.3.4 结合部参数的识别及验证	(27)
2.4 螺栓结合部参数化建模	(29)
2.4.1 螺栓结合部影响因素分类	(29)
2.4.2 基于正交实验的结合部各因素影响研究	(34)
2.4.3 结合面刚度值与预紧力的拟合	(36)
2.4.4 基于响应曲面法的螺栓结合部参数化建模	(40)
2.4.5 螺栓结合部参数化模型验证	(51)
2.5 不同材料螺栓结合部统计模型	(62)
2.5.1 铸造成型的机床部件材料属性参数校核	(62)
2.5.2 部件材料属性对螺栓结合部接触刚度影响分析	(63)
2.5.3 面向部件材料属性的螺栓结合部动力学特性统计模型	(65)
2.5.4 统计模型验证及机床结构建模应用	(68)
本章小结	(73)

3 锥配合结合部动力学建模	(74)
3.1 锥配合结合部动力学建模概述.....	(74)
3.2 锥配合结合部参数识别方法.....	(76)
3.3 锥配合结合部模型参数识别.....	(77)
3.3.1 锥面配合固定结合部模态实验试件设计.....	(77)
3.3.2 消除传感器质量效应的锥面配合固定结合部试件模态实验设置.....	(78)
3.3.3 锥面配合固定结合部试件模态实验结果分析.....	(81)
3.3.4 带锥度的有限单元参数识别.....	(82)
3.3.5 带锥度的有限单元识别参数的有效性验证.....	(84)
3.4 锥配合结合部模型验证.....	(85)
3.4.1 验证结构模态参数测试.....	(85)
3.4.2 验证结构有限元模型建立.....	(86)
3.4.3 验证结构计算模态参数与实验模态参数比较.....	(87)
本章小结	(89)
4 滚动导轨结合部动力学建模	(90)
4.1 滚动导轨结合部动力学建模概述.....	(90)
4.1.1 滚动导轨结合部有限元单元的建立.....	(90)
4.1.2 可动结合部动力学模型的建立.....	(91)
4.2 滚动导轨结合部参数识别方法.....	(92)
4.2.1 可动结合部参数识别的动力学模型.....	(92)
4.2.2 参数识别的优化方法.....	(94)
4.3 滚动导轨结合部模型参数识别.....	(95)
4.3.1 滚动直线导轨副模态实验设计.....	(95)
4.3.2 滚动直线导轨副试件的模态实验.....	(99)
4.3.3 动力学参数识别	(104)
本章小结.....	(109)
5 滚动功能部件结合部动力学建模	(110)
5.1 滚珠丝杠结合部动力学建模概述	(110)
5.1.1 滚珠丝杠各子结构的确立	(111)
5.1.2 滚珠丝杠结合部模型	(114)
5.2 滚珠丝杠结合部参数识别方法	(115)
5.2.1 结合部参数识别的基本理论	(116)
5.2.2 滚珠丝杠可动结合部的动力学参数识别分析	(118)
5.3 滚珠丝杠结合部模型参数识别	(119)
5.3.1 实验试件设计	(119)
5.3.2 传感器的布置和激励点的选择	(120)
5.3.3 模态实验的结果	(122)

5.3.4	用于结合部参数识别的频响函数分析	(123)
5.3.5	滚珠丝杠结合部参数识别结果	(125)
5.4	滚珠丝杠结合部模型验证	(126)
5.4.1	有限元单元的矩阵模型	(126)
5.4.2	代入结合部参数的滚珠丝杠整体模型	(129)
5.4.3	依据模型的仿真结果与实验结果的比较	(129)
5.4.4	与 Okwudire 结合部的比较	(130)
5.5	轴承结合部动力学建模	(131)
5.5.1	轴承结合部动力学模型建立	(131)
5.5.2	轴承结合部参数识别方法	(133)
5.5.3	轴承结合部模型参数识别及有效性验证	(137)
	本章小结	(147)
6	螺栓结合部虚拟材料动力学建模	(148)
6.1	螺栓结合部虚拟材料动力学建模概述	(148)
6.1.1	螺栓结合部虚拟材料动力学模型基本框架	(148)
6.1.2	螺栓结合部虚拟材料几何参数建模	(150)
6.1.3	虚拟材料物理参数建模	(152)
6.2	螺栓结合部虚拟材料模型几何参数识别	(155)
6.2.1	全面实验设计	(155)
6.2.2	克里金模型	(157)
6.2.3	虚拟材料几何模型参数库应用	(159)
6.3	螺栓结合部虚拟材料模型物理参数识别	(159)
6.3.1	虚拟材料模型参数识别方法	(159)
6.3.2	虚拟材料物理参数识别中的关键问题	(162)
6.3.3	虚拟材料物理参数识别	(166)
6.4	虚拟材料模型应用	(175)
	本章小结	(179)
7	机床整机动力学建模研究及应用	(180)
7.1	整机动力学建模整体思路	(180)
7.2	机床子结构结构动力学建模方法研究	(181)
7.2.1	机床结构组件动力学建模	(181)
7.2.2	基于有限元软件集成模块的机床固定结合部动力学建模	(183)
7.2.3	机床可动结合部动力学建模	(186)
7.2.4	机床子结构动力学模型组装	(188)
7.3	CKX5680 机床结构动力学建模	(189)
7.4	YK31320 滚齿机结构动力学建模	(191)
7.5	XCM1600 机床结构动力学建模	(193)

7.5.1	机床结构组件动力学建模	(193)
7.5.2	固定结合部动力学建模	(195)
7.5.3	可动结合部动力学建模	(196)
7.5.4	整机结构动力学模型组装	(201)
7.5.5	整机动态固有特性验证机床结构有限元模型的有效性	(201)
7.5.6	静态柔度系数验证机床结构有限元模型的有效性	(204)
本章小结		(207)
参考文献		(208)



绪 论

1.1 目的和意义

现代高效、高精度加工对机床性能的要求越来越高,且有竞争力的机床的生命周期不断缩短,传统的物理原型机制造、测试、修改、优化的设计方法逐渐不能满足现代机床设计的需求。运用虚拟机床技术建立机床结构的数学模型,在设计阶段预测机床静、动态性能,并根据预测结果修正设计方案,最终达到设计目标是实现高效、高水平机床设计的一种新途径。建立能准确模拟机床结构静、动态特性的数学模型是虚拟样机技术的基础。

机械系统都是由各种零件按照一定的要求装配起来的。通常我们称零部件之间相互接触的部分为“机械结合面”,简称“结合面”。根据研究统计^[1],机床整机 60%~80% 的刚度、90% 左右的阻尼来自各种结合部。无论是从机床设计、装配,还是从机床结构修改来说,结合部问题的研究都具有十分重要的意义。因此,在研究机床结构静、动态特性时,必须考虑结合部的影响。

1.2 研究现状

结合部问题的研究内容涉及结合部刚度和阻尼机理分析,结合部影响因素分析,结合部建模,模型参数获取,动力学特性分析,对机床机械结构系统建模及静、动态特性的影响以及结合部参数优化等诸多方面。其中,尤以结合部建模及模型参数获取最为重要,是分析、研究结合部动力学特性的关键。

1.2.1 结合部建模研究现状

机床结合部按照连接部件之间是否存在宏观的相对运动可分为固定结合部和可动结合部两大类。其中,固定结合部主要包括螺栓结合部和锥配合结合部。螺栓结合部是机床结构中最常用的一种结合部,采用螺栓固定连接两个部件。其接触表面绝大多数是单个平面。锥配合结合部用于机床主轴-刀柄之间的连接,是主轴系统的重要组成部分。可动结合部是机床运动部件必不可少的一个环节,主要起到动力传输和运动导向等作用,也是机床结构重要的支撑环节,主要包括轴承结合部、丝杆-螺母结合部、导轨-滑块结合部。关于结合部的建模问题,学者们进行了大量的研究。

1.2.1.1 螺栓结合部动力学建模研究

螺栓结合部是最常用的结合部,关于其建模技术的研究也最为广泛,常见的螺栓结合部模

型有弹簧阻尼模型、零厚度单元模型、面单元模型、八节点六面体模型以及虚拟材料模型等。

弹簧阻尼模型是最典型、最常用的结合部模型^[2-4]。早在 1979 年, Yoshimura^[5] 提出将机床的各个结合部等效为具有六个自由度的弹簧阻尼单元。直至近年, 依旧有不少学者采用弹簧阻尼单元建立机床结合部的动力学模型^[2,6-13]。不同弹簧阻尼模型建模如图 1-1 所示, 主要集中在弹簧阻尼器的类型、数目、连接耦合情况以及分布情况方面。常用的弹簧阻尼模型包括线性弹簧阻尼模型、非线性弹簧阻尼模型、考虑移动及转动耦合的弹簧阻尼模型、考虑不同分布的弹簧阻尼模型等。

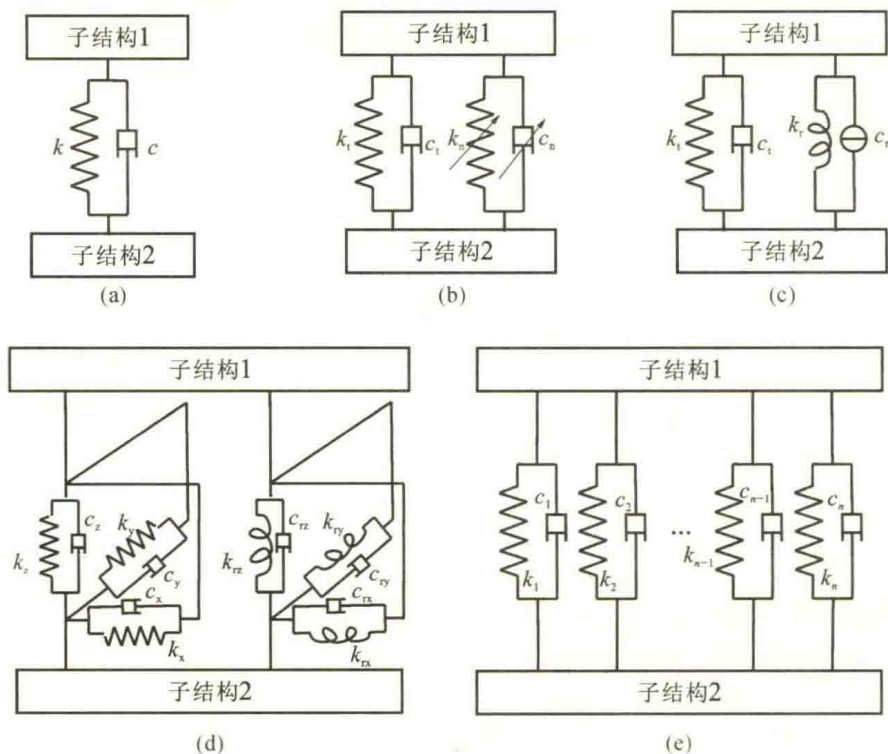


图 1-1 不同类型弹簧阻尼模型

(a) 线性弹簧阻尼模型; (b) 非线性弹簧阻尼模型; (c) 移动和转动时的弹簧阻尼模型;
(d) 三向移动和转动弹簧阻尼模型; (e) 分布弹簧阻尼模型

弹簧阻尼模型存在以下不足: (1) 在大部分模型中, 各弹簧阻尼器是相互独立的, 即忽略了各黏弹性单元之间及黏弹性单元的坐标之间的耦合关系, 而结合部的法向和切向特性是相互影响的; (2) 弹簧的数目及分布形式与结合面的接触情况 (材料、预紧力、表面粗糙度、加工方法等) 有很大的关系, 当结合部较多时, 使用过程烦琐, 且用这种方法识别的参数只适用于特定的结构, 模型参数的通用性较差。

零厚度单元模型如图 1-2(a) 所示, 将结合部等效为两个与子结构直接相连的平面单元的组合, 根据接触理论以及牛顿第三定理, 将整个结合部处理为 4 个 12×12 的刚度矩阵。零厚度单元的概念由 Goodman^[14] 于 1968 年提出, Hobbger^[15] 对零厚度单元进行了详细的阐述。1985 年 Bfer^[16] 将零厚度单元应用于地质学中。2014 年, 肖魏魏等^[17] 将零厚度单元的思想运用于锥配合结合部的建模中, 并得到了较为理想的结果。这种建模方法精度比较高, 但需要识别的参数多, 且建模及使用过程比较烦琐, 不方便与通用软件之间的连接应用。

毛宽民等^[18-22]提出采用刚度影响系数法,建立八节点六面体单元模型,如图 1-2(b)所示。该模型将螺栓连接等效为一个具有刚度和阻尼属性的八节点六面体单元,考虑了结合部节点间的耦合关系,能比较准确地反映结合部的动力学特性。

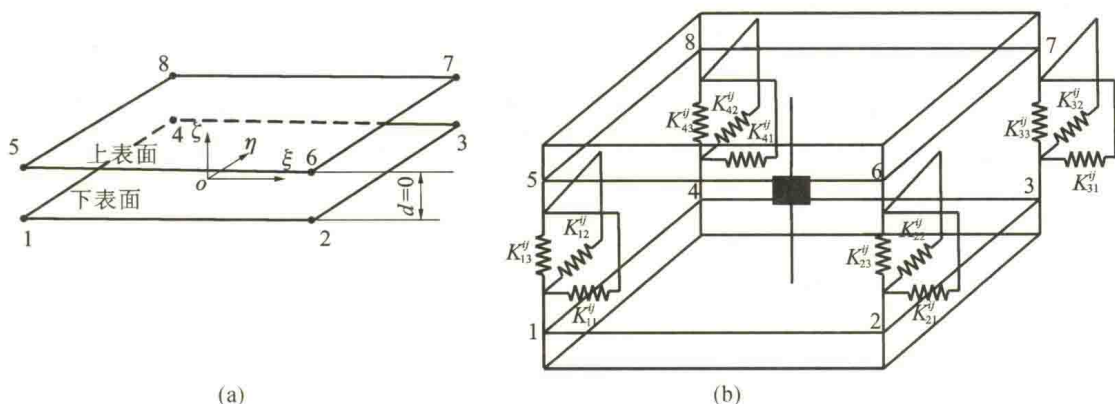


图 1-2 螺栓结合部模型

(a) 零厚度单元模型; (b) 八节点六面体单元模型

田红亮等^[23-26]提出将螺栓结合部当作厚度为 1mm 的各向同性的虚拟材料进行处理,并采用分形理论确定材料的弹性常数。同样采用虚拟材料建模的还有太原科技大学的贾文锋等^[27]、哈尔滨工业大学的刘宗山^[28,29]、北京工业大学的许腾云^[30]、华中科技大学的王书亭等^[31]。其主要差异在于虚拟材料的类型及参数的不同。

1.2.1.2 锥配合结合部动力学建模研究

锥配合结合部又称锥面配合固定结合部,它通过连接部件的锥孔与锥柄之间的配合,在轴向力的作用下,配合表面产生摩擦力,从而达到固定连接的效果。机床中常见的锥面配合固定结合部是主轴-刀柄锥面配合固定结合部。主轴-刀柄锥面配合固定结合部的理论建模方法大多是基于有限单元法。如图 1-3(a)所示,Shamine^[32]将 BT50 型锥面配合固定结合部简化为位于锥部两端的两自由度线性弹簧模型。弹簧的刚度通过基于频响函数的参数识别方法得到。Agapiou^[33,34]把主轴-刀柄锥面配合固定结合部简化成一个线性弹簧和一个旋转弹簧组合的两自由度模型,如图 1-3(b)所示。Namzi^[35]将主轴-刀柄锥面配合固定结合部模拟成沿接触表面均匀分布的径向和旋转弹簧,如图 1-3(c)所示。如图 1-3(d)所示,Ghanati^[36]用沿接触表面长度分布的弹簧阻尼器来模拟主轴与刀柄之间的锥面配合固定结合部动力学性能,其中每一个弹簧阻尼器包含四个元素: k_{xf} , k_{xm} , $k_{\theta f}$ 和 $k_{\theta m}$, 其含义分别为位移-力刚度、位移-转矩刚度、旋转角度-力刚度和旋转角度-转矩刚度。Xu 等^[37]将 BT50 型锥面配合固定结合部简化成一个五自由度的弹簧阻尼模型,每个弹簧阻尼器包含一个线性弹簧和线性阻尼,该模型在锥柱大端布置三个弹簧阻尼器,在锥柱小端布置两个弹簧阻尼器,如图 1-3(e)所示。

1.2.1.3 滚动功能部件动力学建模研究

机床最常见的可动结合部包括轴承结合部、直线导轨副导轨与滑块之间的结合部,以及滚珠丝杆副丝杆与螺母之间的结合部。机床中的轴承内圈和外圈之间通过钢质球形滚动体连接接触,直线导轨副中导轨与滑块之间通过钢质滚动体(滚珠或是滚柱)连接接触,滚珠丝杆副中丝杆与螺母之间也是通过钢质球状滚动体连接接触。在轴向/径向预紧力和(或)外部载荷作用下,滚动体产生弹塑性变形,因此这三种结合部一般建立弹簧阻尼模型^[38-50]。弹簧阻尼模型

的差异主要在于弹簧的类型以及是否考虑不同自由度方向的耦合情况。也有学者采用其他形式的单元建立滚动功能部件的模型,如:王世军等^[51]建立了导轨结合部的六节点等参单元接触模型;毛宽民课题组分别采用三自由度八节点六面体单元^[52]及两自由度八节点六面体单元^[48]建立了滚动导轨结合部的动力学模型;Wu等^[53]采用无厚度薄膜单元研究了滚动导轨的建模。

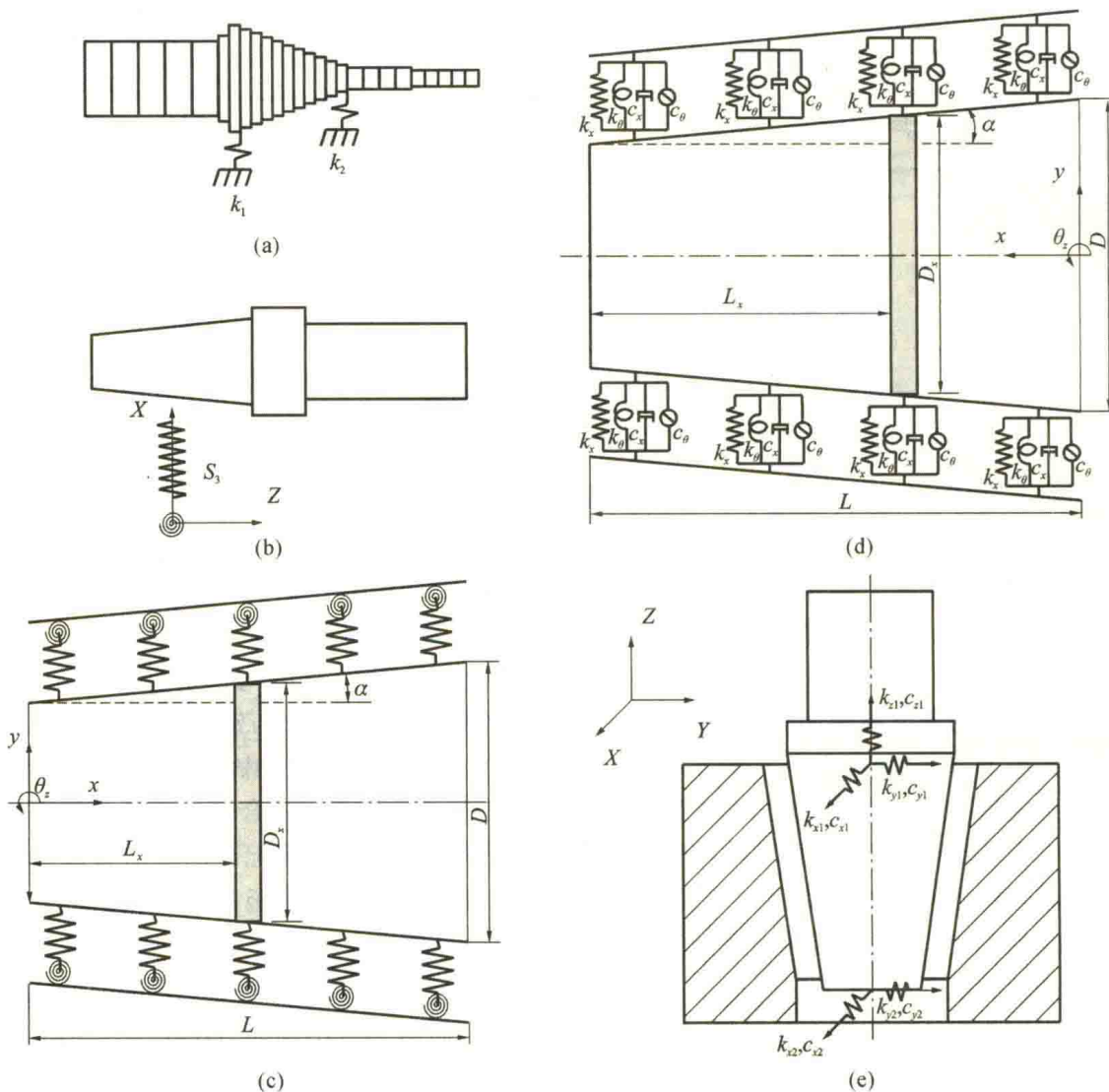


图 1-3 几种常见的主轴-刀柄锥面配合固定结合部模型

(a) 两自由度线性弹簧模型; (b) 两自由度的线性-旋转弹簧组合模型; (c) 均布的线性-旋转弹簧模型;
(d) 沿接触表面分布的线性-旋转弹簧阻尼模型; (e) 五自由度的弹簧阻尼模型

1.2.2 结合部参数识别方法研究现状

1.2.2.1 基于力与位移的参数识别方法

早期人们通过直接测试的方法研究结合面参数^[54,55],就是直接测试结合面处的力与位移(响应)之间的关系来研究结合面的刚度特性,通过反复加载卸载,测试结合面的力和位移(响应)的迟滞回线,而用迟滞回线所包含的面积大小来度量结合面处的阻尼特性。Dekoninck^[56]

通过施加动态切向力,测试在结合面处切向力-位移曲线,从迟滞回线中得到了金属结合面在单个载荷循环中所耗散的能量。蔡力钢等^[57]提出了一种基于直接位移测试、将结合部法向静刚度从整体结构中分离的方法。Eriten 等^[10]采用直接法测试结合部的切向刚度和阻尼。用这种方法识别所建立的结合面数学模型中的参数是最直接的,物理意义非常明确。然而,这种方法对实验的精度要求非常高,测试过程中参数的变化对结果有显著的影响。

1.2.2.2 基于赫兹接触理论的参数识别方法

结合部本身是一个接触问题,Johnson^[58]建立了光滑球与光滑平面接触的分析模型,根据赫兹接触理论,给出了接触刚度的计算公式。Greenwood 和 Tripp^[59]则考虑了粗糙度的影响,建立了光滑球与粗糙平面接触的分析模型,给出了粗糙表面接触刚度的计算公式。Greenwood 和 Williamson^[60]提出了粗糙平面与粗糙平面接触模型(粗糙表面的 GW 统计模型),由于 GW 模型更具一般意义,在结合面研究早期常被用来获得接触刚度。Majumdar 和 Bhushan^[61]利用 Weierstrass-Mandelbrot 分形函数^[62-64]提出了具有尺度独立性的粗糙表面弹塑性接触分形模型,田洪亮^[23,24,65,66]通过分形理论计算了螺栓结合部动力学模型的参数。通过理论分析的方法进行结合部的参数计算可以节约实验成本,但理论分析都是基于一定的假设进行推导的,关于实际加工表面的分形特性、分形维数和分形粗糙度参数,也是目前讨论的热点内容。

1.2.2.3 基于频响函数的参数识别方法

近年来,由于测试设备的发展,基于频响函数的参数识别方法被广泛应用于结合部的参数识别中^[67-75]。频响函数法最早是 Okubo 等^[76]在 1984 年提出来的,1988 年 Tsai 和 Chou^[77]对频响函数法进行了完善。基于频响函数的结合面参数识别方法的基本思路都是相同的,即建立结合部的模型之后,分别识别出子结构和整体结构的频响函数,由此反推出结合面的参数。由于参数识别是一个逆问题,系统中细微的噪声可能使得识别结果产生很大的误差。基于频响函数的参数识别方法主要差别在于未测试频响函数的估计、矩阵的求逆及测试噪声的处理方法不同。

Tsai 和 Chou^[77]提出了采用测试单个零件及组装部件的频响函数进行结合部的参数识别,该方法在求解过程中需要进行三次矩阵求逆,识别结果对误差相当敏感。Wang 和 Liou^[78]对这种方法进行了改进,只需要进行一次求逆即可识别,提高了识别精度。

提高参数识别精度的另一个方法是尽可能多地增加测试频响函数的数目。但在实际测试中,由于结构条件等因素的限制,许多频响函数无法进行实验测试。Yang 和 Park^[79]提出采用测试频响函数估计与实测结构相连接的部分自由度的频响函数,Wang 等^[80]将 Yang 和 Park^[79]的方法进行改进,可以估计所有的未测试频响函数。Montalvao 等^[81]和 Duarte^[82]研究了转动自由度的估计方法。

为了减少测试噪声的影响,Wang 和 Liou^[78]提出采用最小二乘法进行参数识别,采用所有的原点频响函数进行计算以平均随机误差。之后,Wang 和 Liou^[83]又提出采用条件数较好的方程进行参数识别以减少识别误差。Wang 和 Chuang^[84]提出采用误差方程以选择合适的测试数据进行参数识别。

减少噪声影响的另一种思路是采用正则化,其基本思想是通过引入一个正则化条件以实现解的光滑。主要难点在于正则化参数的选取。Hansen^[85]指出,在满足离散的 Picard 条件时,病态方程的解与残差在指数坐标下呈 L 形曲线,可以选择曲线拐点处对应的值作为正则

化参数。另一个常用的正则化参数的选取方法是广义交叉准则^[86](GCV)。GCV法基于统计的思想,计算得到方程的秩。Lukas^[87-89]对GCV法进行了大量的研究,提出了增强型广义交叉准则,使得该方法可以处理相关性强的数据。Ahmadian^[90]等首次将正则化方法引入模型修正中,并采用L曲线法和GCV法计算正则化参数。Friswell^[91]等对正则化方法进行了深入的研究,结果表明,基于正则化的模型修正能给出物理意义明确的修正结果。Titurus和Friswell^[92]总结了正则化在模型修正中的应用,并给出了基于灵敏度分析的模型修正方法。然而,采用L曲线法进行模型修正时,迭代过程中容易出现没有拐点的情况而使得正则化过程无法顺利进行。

由于频响函数可以方便地直接测试,也避免了分析造成的二次误差,基于频响函数的参数识别方法应用十分普遍。然而,对于小阻尼系统,各阶模态频率附近的频响函数的测试误差非常大,而固有频率是结构动态特性的主要参数之一,此时参数识别的精度受到严重影响。

1.2.2.4 基于模态参数的参数识别方法

由于低阶模态的模态参与因子很高,且便于实验测试与分析,可以采用模态信息进行结合部的参数识别。基于模态参数的识别方法大致流程都相似,首先建立结合面处的动力学模型,然后根据这个动力学模型,以理论得到的位移值与实验得到的位移值的误差和最小为目标构造优化数学模型,由此识别结合部的参数。基于模态法的模型修正主要涉及以下几个方面:模型缩聚与扩展、特征问题的灵敏度分析、修正参数的求解。

模型缩聚法将有限元模型的自由度进行缩减,使之与实验测试的自由度相对应。Guyan^[93]提出Guyan缩聚法,其核心思想是忽略副坐标上的惯性力,以降低质量矩阵和刚度矩阵的维数。由于缩聚过程简单方便,目前这种方法在通用软件中得到了广泛的运用。O'Callahan^[94]提出了一种改进的Guyan缩聚法(IRS法),IRS法的缩聚矩阵中,不仅包含了刚度信息,而且包含了质量信息,提高了模型缩聚的精度。为了进一步提高模型缩聚的精度,张德文等^[95]提出了逐级近似缩聚法,采用上一级缩聚的近似解去逼近副坐标中的惯性力,通过不断迭代提高缩聚精度。

模态扩展法将实验测试数据进行扩展,使之与有限元分析的自由度相匹配。其主要思想是构造一个变换矩阵,将实验测试得到的模态分量通过变换矩阵进行变换后,扩展成与有限元自由度相一致的模态分量。Berman等^[96,97]提出了动态扩展法,按照测试情况将特征方程中的测量自由度和非测量自由度进行划分,然后将特征方程展开,并进行一系列运算后获得转换矩阵,对测试模态进行扩展。运用扩展后的模态数据进行模型修正,运用修正后的模型重新进行扩展运算,如此迭代,直至满足精度要求。曾庆华^[98]提出采用最优拟合法进行模态扩展。该方法认为测量振型和分析振型均存在误差,构造扩展后的测量振型和分析振型的误差最小为目标函数,由此求解获得模态扩展转换矩阵,对实验模态进行扩展。

模态型修正方法通常选用固有频率、模态振型及MAC值作为修正的目标函数^[99-104],其重点为特征问题的灵敏度分析,包括特征值的灵敏度分析、特征向量的灵敏度分析及MAC值的灵敏度分析等。

Fox和Kapoor^[105]提出利用正交性条件,通过对特征方程求导,得到了无阻尼系统的特征值对设计参数的一阶灵敏度,并通过模态法求解特征向量的一阶灵敏度。Nelson^[106]提出采用Nelson法求解特征向量的一阶灵敏度。Lee等^[107]采用算术法计算无阻尼系统特征值及特征向量对设计参数的一阶灵敏度,并随后将这种方法扩展到有阻尼系统中^[108]。Adhikari^[109]