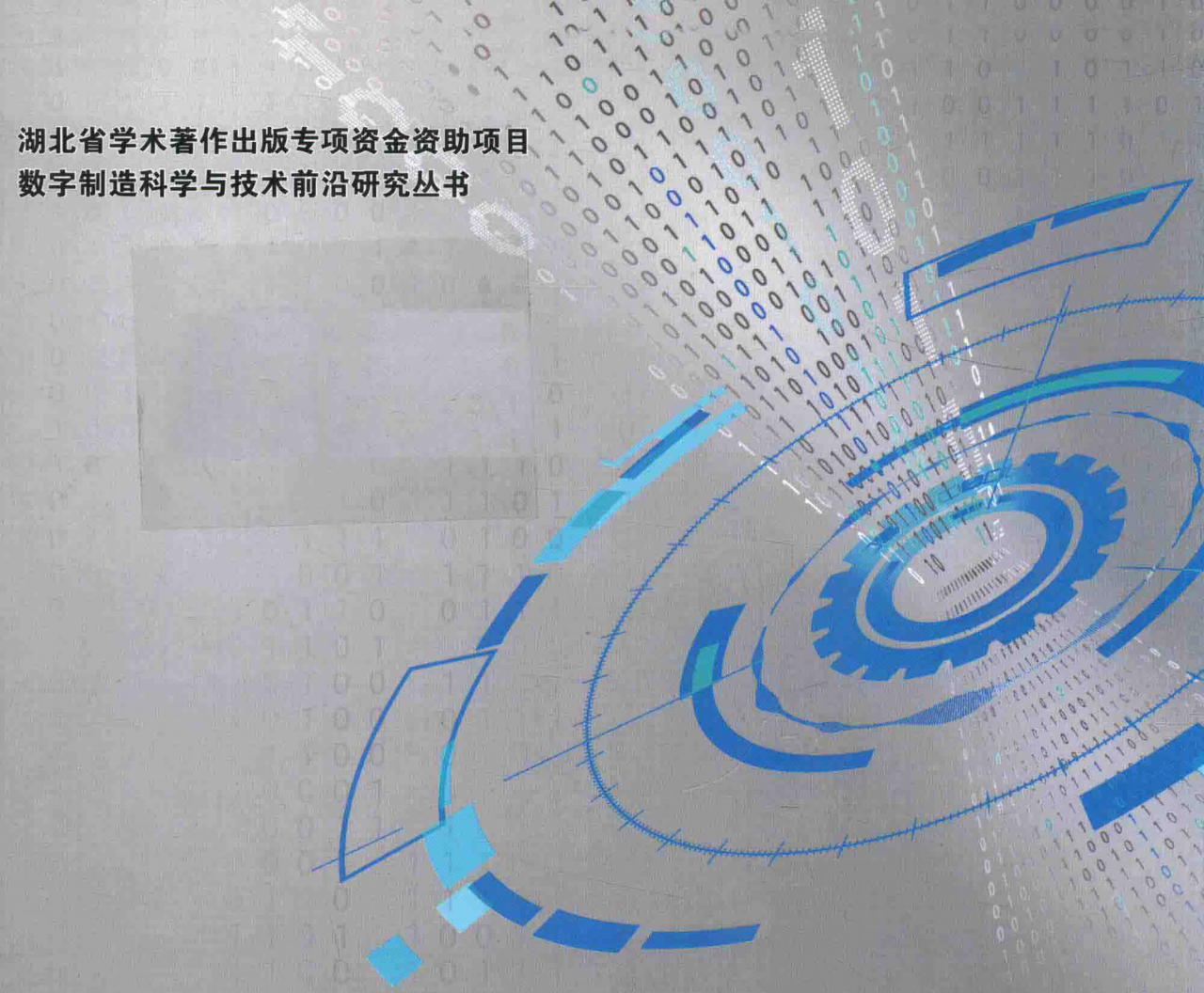


湖北省学术著作出版专项资金资助项目
数字制造科学与技术前沿研究丛书



机械系统 结 合 部 数字化建模与分析

Digital Modeling and Analysis of Mechanical Joints

孙 伟 汪 博 著



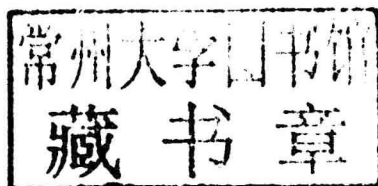
武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press

1 版专项资金资助项目

数字制造科学与技术前沿研究丛书

机械系统结合部数字化 建模与分析

孙伟 汪博 著



武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

内 容 提 要

本书主要以机械系统中最常见的螺栓联接结合部和数控机床中最常用的主轴系统结合部、直线滚动导轨结合部为对象,介绍了上述结合部数字化建模与分析的方法。

本书主要内容包括:围绕螺栓联接结合部,以螺栓联接梁为例,给出了包含螺栓联接结合部的结构系统非线性表征与测试方法,悬臂的螺栓联接梁结构非线性解析动力学建模方法,以及基于力状态映射法和多尺度法辨识螺栓联接结合部刚度和阻尼参数的方法;围绕主轴系统结合部,给出了主轴系统刀尖点频响函数及切削力的测试方法,进行了考虑主轴-轴承和主轴-刀柄-刀具结合部特性的阻抗耦合子结构法建模与有限元法建模,分析了转速、结合部参数等对主轴系统固有特性和振动响应的影响规律;围绕导轨系统结合部,给出了导轨结合部静力学及动力学试验方法,完成了直线滚动导轨基于 Hertzian 接触理论的解析建模和用 ANSYS 软件实现的有限元建模,分析了静载荷、预紧力及几何参数对直线滚动导轨副静力学特性、固有频率和振动响应的影响规律。

本书所介绍的机械结合部数字化建模与分析方法可为从事复杂机械系统建模的研究人员、教师提供参考,也可作为研究生学习机械结合部测试、建模与分析的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

机械系统结合部数字化建模与分析/孙伟,汪博著. —武汉:武汉理工大学出版社,2016.12
(数字制造科学与技术前沿研究丛书)

ISBN 978-7-5629-5384-5

I. ①机… II. ①孙… ②汪… III. ①数字技术-应用-机械系统-系统建模-研究 ②数字技术-应用-机械系统-系统分析-研究 IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 281778 号

项目负责人:田 高 王兆国

责任编辑:李兰英

责任校对:徐 环

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

字 数:362 千字

版 次:2016 年 12 月第 1 版

印 次:2016 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1—1000 册

定 价:56.00 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 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、日等先进制造技术领先的国家,面对近年来制造业竞争力的下降,最近大力倡导“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,打造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科学。它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,以及整个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!

《数字制造科学与技术前沿研究丛书》的出版得到了湖北省学术著作出版专项资金项目的资助。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之中,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

通过数字化制造技术可实现对产品的设计、功能仿真及原型制造,进而快速生产出达到用户要求的机械产品。在数字化制造技术中,对机械产品的数字化建模是实施这项技术的关键。好的模型可实现对机械系统静态、动态性能的科学预测与评价,从而确保研发出质量好、竞争力强的机械产品。

机械系统由各种零部件组成,各零部件之间存在着结合部,表现为平面接触、圆柱(圆锥)面接触及球面接触等。结合部对机械系统的动、静力学特性有着重要的影响。以数控机床为例,机床的静刚度中 30%~50%取决于结合部的刚度特性,机床的动柔度有 60%以上是源自结合部,机床的阻尼值更是有 90%以上来源于结合部的阻尼。结合部对机械系统性能的影响如此之大,因而在机械系统数字化建模中,必须考虑结合部特性参数对系统力学性能的影响。研究结合部特性的建模、应用及如何精确地识别其参数(即结合部刚度、阻尼系数)等问题成为一个重要的基础性课题。

目前,对结合部的建模方法分为微观分形几何学建模方法和宏观振动学建模方法,本书重点关注结合部的宏观振动学建模方法。结合部的宏观振动学建模方法又可分为有限元法、解析法和试验法。总体上看,目前对结合部动力学机理的研究尚不成熟,导致对包含结合部的机械系统动力学预测变得非常困难,因此,迫切地需要建立起包含结合部的机械系统振动分析理论以指导设计。

本书以机械系统中最常见的螺栓联接结合部,以及数控机床中对加工精度有着重要影响的主轴系统结合部和直线滚动导轨结合部为对象,研究其振动特性的数字化建模方法。螺栓联接主要指被联接件上开有通孔,插入螺栓后再在螺栓的另一端拧上螺母的联接形式,其主要用于联接两个较薄的零件。螺栓联接界面的存在,造成了结构局部刚度和阻尼的不连续。在振动环境下,联接界面在切向可能发生相对滑移,在法向可能发生间隙分离和冲击碰撞,因而螺栓联接结合部成了一个复杂的非线性力学系统。主轴系统结合部包含主轴-轴承、主轴-刀柄及刀柄-刀具结合部。当主轴处于高速旋转状态时,轴承结合部中的滚珠与滚道接触状态时刻发生改变,滚珠产生的离心力与陀螺力矩等直接导致轴承刚度呈现非线性特性;另外,主轴-刀柄-刀具结合部的圆柱或者圆锥结合面会产生迟滞现象,这对主轴系统动力学特性及切削稳定性的影响也无法忽视。直线滚动导轨结合部一般由导轨、滑块、滚动体等组成,它以滑块和导轨间的钢球滚动来代替传统导轨的直接滑动,具体结合部的形式体现在滚珠同导轨沟槽的滚动接触。直线滚动导轨通常有 4 排滚珠,上下各两排,滚珠同沟槽的接触刚度及阻尼受外载荷影响,因而整个直线滚动导轨系统也表现出非线性力学特性。

本书共分 12 章,第 1 章为绪论,介绍了结合部的定义、分类及螺栓联接结合部、主轴系统结合部和直线滚动导轨结合部数字化建模的研究现状。

第 2 章至第 4 章,围绕螺栓联接结合部,以螺栓联接梁为例,提出了包含螺栓联接结合部的结构系统非线性表征测试方法,介绍了检测原理及相应的测试实施方法。然后,分析了螺栓

结合部非线性产生的机理,在充分考虑螺栓接触面之间的非线性动力学现象的基础上,对悬臂的螺栓联接梁结构进行了非线性解析动力学建模。最后,分别采用改进的力状态映射法和多尺度法从时域和频域辨识出螺栓联接梁结合部的刚度和阻尼参数。

第5章至第8章,围绕主轴系统结合部,全面分析了主轴系统结合部的建模方法,提出了主轴系统刀尖点频响函数及切削力的测试方法,这是主轴系统动力学建模的基础。在此基础上,进行了考虑主轴-轴承和主轴-刀柄-刀具结合部特性的阻抗耦合子结构法建模与有限元法建模。基于所创建的模型,分析了转速、结合部参数等对主轴系统固有特性和振动响应的影响规律。

第9章至第12章,围绕直线滚动导轨结合部,对导轨结合部的建模方法进行了总结与归纳,提出了导轨结合部静力学及动力学试验方法。从单个滚珠-沟槽建模出发,完成了基于Hertzian(赫兹)接触理论的解析建模和用ANSYS软件实现的有限元建模;将单个滚珠-沟槽的接触特性引入到整个直线滚动导轨分析模型中,创建了整个系统的解析及有限元模型。基于上述模型,分析了静载荷、预紧力及几何参数对单个滚珠受力情况及直线滚动导轨副静力学特性的影响规律;分析了静载荷、预紧力及几何参数对直线滚动导轨副固有频率和振动响应的影响规律。

本书所研究的相关内容,主要是在国家自然科学基金项目“高档机床运动结合部的非线性振动分析与优化设计研究, No. 50905029”和“基于薄壁工件的刚柔耦合系统稳定性分析与实验研究, No. 51405070”,以及中央高校基本科研业务费专项资金项目“复杂形状工件在高速加工过程中若干问题的研究, No. N150304007”的共同资助下,由孙伟副教授和汪博博士共同完成的。其中,孙伟副教授主要负责螺栓联接结合部和直线滚动导轨结合部数字化建模部分,汪博博士主要负责复杂主轴系统结合部的数字化建模。此外,在本书撰写过程中,还得到了韩清凯教授、李星占博士和孔祥希博士的大力帮助,在此一并致谢。

由于作者水平有限,本书难免会有许多欠妥之处,敬请读者批评指正。

作者

2016年4月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 目的和意义	(1)
1.2 机械系统结合部的基本概念	(2)
1.2.1 结合部的定义及分类	(2)
1.2.2 几种典型的结合部	(3)
1.2.3 结合部对机械系统性能的影响	(6)
1.3 国内外研究现状	(7)
1.3.1 螺栓联接结合部建模	(7)
1.3.2 主轴系统结合部建模	(7)
1.3.3 直线滚动导轨结合部建模	(10)
1.4 本书的主要内容	(12)
参考文献	(14)
2 螺栓联接梁结构的检测与表征测试	(19)
2.1 测试的基本原理和方法	(19)
2.1.1 叠加原理测试	(19)
2.1.2 谐波失真测试	(20)
2.1.3 互换性测试	(20)
2.1.4 定力幅频响应函数测试	(21)
2.1.5 频域相关函数测试	(21)
2.1.6 Hilbert 变换法	(22)
2.2 试验测试系统的建立	(23)
2.2.1 硬件组成	(23)
2.2.2 软件组成	(24)
2.3 检测与表征测试	(25)
2.3.1 谐波失真测试	(25)
2.3.2 相关函数测试	(26)
2.3.3 定力幅频响应函数测试	(27)
2.4 本章小结	(29)
参考文献	(30)
3 基于力状态映射法的螺栓联接梁结构动力学参数识别	(31)
3.1 螺栓联接梁结构非线性动力学模型的建立	(31)
3.1.1 螺栓联接梁线性动力学模型的建立	(31)

3.1.2	非线性联接单元	(33)
3.1.3	Iwan 模型	(35)
3.1.4	螺栓联接梁非线性模型的建立	(36)
3.2	Force-state mapping 法及其数值仿真	(37)
3.2.1	Force-state mapping 法	(37)
3.2.2	时域数据积分方法	(39)
3.2.3	数值仿真	(39)
3.3	面向螺栓联接梁结合部的动力学参数辨识流程	(42)
3.4	实例研究	(43)
3.4.1	试验测试	(43)
3.4.2	参数辨识	(45)
3.5	本章小结	(47)
	参考文献	(47)
4	基于多尺度法识别螺栓联接梁结构的动力学特性参数	(48)
4.1	螺栓联接梁结构两自由度非线性模型的建立	(48)
4.2	非线性模型的多尺度法解析求解	(49)
4.2.1	求解不同时间尺度下的微分方程	(49)
4.2.2	ϵ^0 阶项的解	(51)
4.2.3	ϵ^1 阶项的解	(52)
4.2.4	求解频率响应函数	(53)
4.3	非线性模型螺栓联接梁模型中参数的识别	(54)
4.3.1	模型线性参数的识别	(54)
4.3.2	模型非线性参数的识别	(54)
4.4	基于多尺度法解的非线性模型参数识别流程	(55)
4.5	实例研究	(55)
4.5.1	试验测试	(56)
4.5.2	线性参数的识别	(58)
4.5.3	非线性参数识别	(59)
4.6	本章小结	(61)
	参考文献	(62)
5	主轴系统结合部的建模方法	(63)
5.1	结构描述	(63)
5.1.1	高速主轴-轴承结合部	(63)
5.1.2	高速主轴-刀柄-刀具结合部	(64)
5.2	高速主轴-轴承结合部建模方法	(64)
5.2.1	主轴-轴承子结构模型	(64)
5.2.2	高转速情况下五自由度球轴承受力与变形关系	(65)

5.3 高速主轴-刀柄-刀具结合面的建模	(72)
5.3.1 主轴-刀柄-刀具结合面子结构模型	(72)
5.3.2 主轴-刀柄-刀具结合面有限元模型	(73)
5.4 本章小结	(76)
参考文献	(76)
6 主轴系统结合部动力学特性的试验方法	(78)
6.1 概述	(78)
6.2 高速主轴系统频响函数测试	(79)
6.2.1 试验对象和试验设备	(79)
6.2.2 不同刀柄刀具组合的主轴系统频响函数测试	(80)
6.2.3 不同悬伸长度刀具的主轴系统频响函数测试	(82)
6.3 切削性能测试	(83)
6.3.1 试验对象和试验设备	(84)
6.3.2 试验测试过程与结果	(84)
6.4 本章小结	(87)
参考文献	(88)
7 考虑结合部特性的高速主轴系统建模及固有特性分析	(89)
7.1 概述	(89)
7.2 阻抗耦合子结构法建模原理	(89)
7.2.1 自由状态下 Timoshenko 梁的频响函数	(89)
7.2.2 自由状态下 Timoshenko 梁的固有振型	(90)
7.2.3 Timoshenko 梁的耦合	(93)
7.3 基于阻抗耦合子结构法求解主轴系统固有特性流程	(94)
7.4 基于阻抗耦合子结构法研究主轴系统固有特性实例分析	(95)
7.4.1 高速主轴系统的阻抗耦合子结构模型	(95)
7.4.2 高速主轴系统的各轴段固有频率	(96)
7.5 半理论法预测高速主轴系统刀尖点频响函数	(97)
7.5.1 半理论法概述	(97)
7.5.2 基于半理论法高速主轴系统刀尖点频响函数预测与分析	(98)
7.6 结合部刚度对高速主轴系统频响函数的影响分析	(99)
7.6.1 轴承结合部刚度对主轴单元端部频响函数的影响分析	(100)
7.6.2 主轴-轴承结合部刚度对高速主轴系统刀尖点频响函数的影响分析	(104)
7.6.3 主轴-刀柄结合部刚度对高速主轴系统刀尖点频响函数的影响分析	(105)
7.6.4 刀柄-刀具结合部刚度对高速主轴系统刀尖点频响函数的影响分析	(106)
7.7 本章小结	(108)
参考文献	(109)
8 考虑结合部特性的高速主轴系统振动响应分析	(110)

8.1	概述	(110)
8.2	基于有限元法的高速主轴系统振动响应分析	(110)
8.2.1	高速主轴系统振动响应分析模型	(110)
8.2.2	高速主轴系统振动响应分析流程	(113)
8.3	不同结合部模型对高速主轴振动响应的影响分析	(115)
8.3.1	刚性联接模拟结合部对高速主轴系统振动响应的影响	(115)
8.3.2	集中弹簧模型模拟结合部对高速主轴系统振动响应的影响	(116)
8.3.3	分布式弹簧模型模拟结合部对高速主轴系统振动响应的影响	(117)
8.4	转速对高速主轴系统振动响应的影响分析	(119)
8.5	轴承参数对高速主轴系统振动响应的影响分析	(122)
8.5.1	轴承间隙对高速主轴系统振动响应的影响分析	(123)
8.5.2	轴承接触刚度对高速主轴系统振动响应的影响分析	(127)
8.5.3	轴承类型对高速主轴系统振动响应的影响	(131)
8.6	切削力对高速主轴系统动态响应的影响分析	(135)
8.7	本章小结	(139)
	参考文献	(140)
9	直线滚动导轨结合部动力学建模方法	(142)
9.1	表征导轨系统动力学特性的参数	(142)
9.2	导轨系统动力学建模方法	(143)
9.3	导轨结合部处理方式	(144)
9.3.1	用弹簧阻尼单元模拟结合部	(145)
9.3.2	用解析表达式描述结合部特性	(146)
9.3.3	用假想材料模拟结合部特性	(146)
9.3.4	用自创的结合部单元来模拟结合部	(147)
9.3.5	用接触单元模拟结合部特性	(148)
9.4	本章小结	(149)
	参考文献	(149)
10	直线滚动导轨副的静力学及动力学试验	(151)
10.1	直线滚动导轨副静力学试验	(151)
10.1.1	试验装置与原理	(151)
10.1.2	测试过程与结果	(152)
10.2	安装在床身上的直线滚动导轨模态试验	(154)
10.2.1	试验目的与原理	(154)
10.2.2	试验结果分析	(155)
10.3	直线滚动导轨结合部动力学参数识别	(157)
10.3.1	导轨结合部动力学参数辨识原理	(157)
10.3.2	识别流程	(158)

10.3.3	直线滚动导轨频响函数矩阵测试	(159)
10.3.4	导轨结合部动力学参数辨识	(159)
10.4	本章小结	(161)
	参考文献	(161)
11	直线滚动导轨副静力学建模与分析方法	(163)
11.1	概述	(163)
11.2	直线滚动导轨副静力学解析建模	(164)
11.2.1	单个滚珠-沟槽接触解析建模	(164)
11.2.2	直线滚动导轨副解析建模	(165)
11.2.3	解析模型的修正	(167)
11.3	直线滚动导轨副静力学有限元建模	(168)
11.3.1	单个滚珠-沟槽有限元建模	(169)
11.3.2	整体导轨系统有限元静力学分析	(171)
11.3.3	组件有限元模型	(172)
11.4	预紧力及静载荷对直线滚动导轨副静力学特性的影响	(173)
11.4.1	基于修正解析模型的分析	(173)
11.4.2	基于组件有限元模型的分析	(175)
11.5	几何参数对直线滚动导轨副静力学特性的影响	(178)
11.6	本章小结	(180)
	参考文献	(181)
12	直线滚动导轨副动力学建模与分析方法	(182)
12.1	概述	(182)
12.2	直线滚动导轨副动力学解析建模	(183)
12.2.1	无阻尼直线滚动导轨副动力学建模	(183)
12.2.2	有阻尼直线滚动导轨副动力学建模	(186)
12.3	基于解析模型的直线滚动导轨副动力学特性分析	(187)
12.3.1	直线滚动导轨副固有频率及振型	(187)
12.3.2	直线滚动导轨副频响函数分析	(188)
12.3.3	直线滚动导轨副动力学时域响应分析	(189)
12.4	直线滚动导轨副动力学有限元建模	(190)
12.5	直线滚动导轨副固有特性研究	(191)
12.5.1	预紧力及静载荷对直线滚动导轨副固有特性的影响分析	(191)
12.5.2	几何参数对直线滚动导轨副固有特性的影响分析	(194)
12.5.3	基于有限元法的直线滚动导轨副固有特性分析	(198)
12.6	直线滚动导轨副动力学响应研究	(201)
12.6.1	基于解析模型的动力学响应分析	(201)
12.6.2	基于有限元模型的动力学响应分析	(203)

12.7 本章小结..... (204)

参考文献..... (204)

附录 A K_n 求解过程 (206)

附录 B 频响函数表达式 (207)

附录 C 相关公式..... (208)

1

绪论

1.1 目的和意义

数字化技术与传统制造技术的结合即为数字化制造技术^[1],通过数字化制造技术可实现对产品的设计、功能仿真以及原型制造,进而快速生产出性能达到用户要求的产品。在数字化制造技术中,对机械产品的数字化建模是实施这项技术的关键。好的模型可科学地预测与评价机械系统静态、动态性能,从而确保研发出质量好、竞争力强的机械产品。

机械系统由各种零部件组成,各零部件之间存在着结合部,表现为平面接触、圆柱面接触以及球面接触等。结合部对机械系统的动、静力学特性有着重要的影响,因而在机械系统数字化建模过程中必须考虑结合部力学特性。所以,研究结合部的数字化建模、模型应用以及如何精确地识别结合部参数(即结合部刚度、阻尼系数)等问题成为数字化制造领域中的一个重要的基础性课题。本书主要以机械系统中最常见的螺栓联接结合部和数控机床中最常用的主轴系统结合部、直线滚动导轨结合部为对象,开展结合部的数字化建模与分析方法研究。

螺栓联接是机械结构系统中最常见的联接形式之一,通常情况下,螺栓联接结构的结合部会对系统的动力学特性产生很大的影响。与刚性联接对照,结合部的力学特性参数会使结构的固有频率、刚度和阻尼等发生改变,而表现出非线性动力学特性。在包含螺栓联接的结构动力学问题中,常规的方法是基于线性化思想,将结构视为固定联接的,或是将联接等效为线性弹簧单元和线性阻尼单元组合的形式,然后采用模型修正、试验辨识等方法给出弹簧单元和阻尼单元的线性参数。但这种等效线性化的思想不足以描述螺栓结合部本质的力学特性,因而需要创建更合理的可描述螺栓结合部非线性力学行为的分析模型,同时也需要科学地辨识相关的结合部力学参数。

高速主轴系统通常是指采用远高于常规加工的切削速度(12000r/min 以上)和进给速度(30m/min 以上)的主轴系统,包括高速主轴单元(或者是电主轴单元)以及刀柄和刀具等。高速主轴系统结合部包括主轴-轴承结合部、主轴-刀柄结合部和刀柄-刀具结合部。长期以来,对高速主轴系统进行动力学设计与切削稳定性预测时,通常将主轴-轴承结合部简化为弹簧联接,而将主轴-刀柄-刀具结合部视为一个刚性联接的系统,这种分析模式经常会引起预测结果与实际情况产生较大的偏差,因而难以满足高性能主轴系统的研发需求。国内外研究者对主轴-轴承结合部的动力学特性研究较多,而对主轴-刀柄-刀具结合部动力学特性研究相对较少,尤其是转速升高后,主轴-轴承、主轴-刀柄-刀具之间结合部表现出的非线性现象,使得主轴系统的动力学特性变得更加复杂,因此,只有掌握有效模拟高速主轴系统结合部动力学特性的方法,才能实现对主轴切削稳定性的准确预测和主轴结构的合理设计。

直线滚动导轨结合部主要由导轨、滑块、滚珠及其附件组成,由于存在大量的滚动接触结合面,在支撑方向静载荷及动载荷作用下,导轨系统会发生复杂的力学行为,直接影响着数控机床的加工精度和加工效率。支撑与运动功能是直线滚动导轨的主要功能,对其支撑与运动性能研究的关键是对滚珠与导轨及滑块结合部特性的研究,而创建合理的结合部分析模型是对结合部特性研究的核心。此外,直线滚动导轨通常含有两排或四排滚珠,为了科学地对导轨结合部的力学性能进行分析,必须考虑滚珠的分布,即开展直线滚动导轨系统精细化建模的研究。在导轨系统力学建模的基础上,获得直线滚动导轨结合部静力学及动力学参数的变化规律,对于导轨系统结构设计以及数控机床部件或整机系统力学性能分析都有重要的意义。

目前,虽然有比较成熟的有限元计算分析软件及多体动力学分析软件,可对已知边界条件的复杂结构的动态特性做出比较精确的计算和判断,但计算存在结合部的动力学系统时却经常产生很大误差。如何准确地识别结合部的接触刚度和接触阻尼,并能通过系统建模实现对机械系统的动态优化设计,一直是国内外动力学建模领域研究的难点和热点之一。

本书面向上述三类结合部,分别介绍相关的力学试验、解析及有限元建模方法。围绕螺栓联接结合部,以螺栓联接梁为例,提出了非线性表征测试方法,介绍了检测原理以及相应的测试实施方法,搭建了针对螺栓联接梁结构的振动测试系统;然后,在表征测试和机理分析的基础上,分别用改进的力状态映射法和多尺度法辨识出螺栓联接梁结合部的刚度和阻尼参数。围绕主轴系统结合部,全面分析了主轴系统结合部的建模方法,提出了主轴系统频响函数及切削力的测试方法;在此基础上,进行了考虑主轴-刀柄-刀具结合部动力学的阻抗耦合子结构法建模与有限元法建模;基于所创建的模型,分析了转速、结合部参数等对主轴系统动力学特性的影响规律。围绕导轨系统结合部,对导轨结合部的建模方法进行了总结与归纳;提出了导轨结合部静力学及动力学试验方法;引入导轨结合部模型,分别采用解析法和有限元法,完成了直线滚动导轨系统静力学及动力学建模。上述研究,可为同类结合部建模提供参考,也可考虑结合部特性进行机械系统部件及整机建模提供参考,最终为机械系统的数字化建模及数字化制造提供技术支持。

1.2 机械系统结合部的基本概念

1.2.1 结合部的定义及分类

机械系统通常由大量的零件或部件所组成,各零件、组件、部件之间存在的相互联接、接触的表面称为结合面,而把包含结合面以及相联接的零件接触部分统称为结合部。通常,机械系统的零部件数量越多,则结合部的数量就越多。相对于完整构件,结合部系统因为刚度较低、变形较大,因而通常被认为是机械系统中的薄弱环节。此外,由于结合部的接触面在受力时会发生宏观或微观的相对滑移进而产生耗能,这是一种结构阻尼(为了方便,很多研究将其视为等效的黏性阻尼),因而也可以认为机械系统的阻尼主要来自结合部。

机械系统中的结合部接触形式种类繁多,为了便于理解可按照表 1.1 对其进行分类。

表 1.1 机械系统中结合部的分类

分类标准	具体种类	举例
是否可动	固定结合部	螺栓联接结合部
	半固定结合部	摩擦离合器的联接与接触
	移动结合部	直线滑动及滚动导轨
接触面的形状	平面接触	螺栓联接结合部
	圆柱(锥)面接触	主轴与刀柄的锥面接触,刀柄与刀具的圆柱面接触
	球面接触	滚珠与沟槽
运动形式	滑动	滑动导轨
	滚动	轴承结合部、滚动导轨结合部
结合面数量	单平面结合部	螺栓结合部、主轴-刀柄结合部、刀柄-刀具结合部
	多平面结合部	平导轨、V型导轨、燕尾导轨

1.2.2 几种典型的结合部

以下对本书涉及的三类结合部进行简要介绍。

(1) 螺栓联接结合部

螺栓联接主要指被联接件上开有通孔,插入螺栓后再在螺栓的另一端拧上螺母的联接形式,其主要用于联接两个较薄的零件。螺栓联接是机械结构设计中最为常用的一种联接形式,在航空航天、汽车、核能、建筑设施、船舶以及各种通用机械设备中都有着广泛的应用,图 1.1 为典型的螺栓联接结合部。螺栓联接所用的螺栓包含普通螺栓及高强度螺栓,普通螺栓按其加工的精细程度和强度分为 A、B、C 三个级别,高强度螺栓联接分为摩擦型联接及承压型联接等。

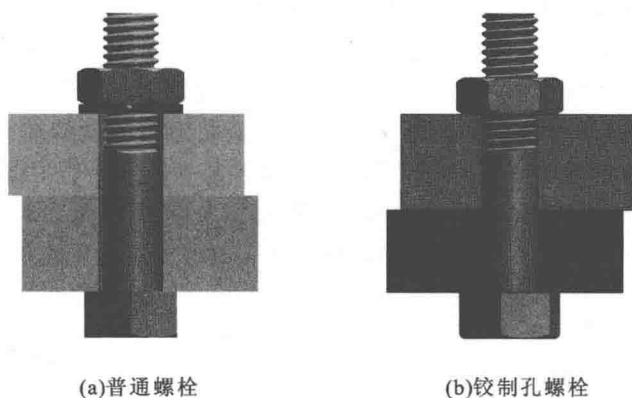


图 1.1 典型的螺栓联接结合部

由于联接界面的存在,造成了结构局部刚度和阻尼的不连续。在振动环境下,联接界面在切向可能发生相对滑移,在法向可能发生间隙分离和冲击碰撞。滑移形式既包括只发生在界面局部区域上的微观尺度上的滑移,又包括接触面整体相对运动的宏观尺度上的滑动。间隙