



张学良 著

机械结合面 动态特性 及应用

中国科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

机械结合面动态特性及应用/张学良著. —北京:中国科学技术出版社, 2002.8

ISBN 7-5046-3344-5

I. 机... II. 张... III. 机床-运动(力学)-研究 IV. TG502.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 060121 号

中国科学技术出版社出版

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:62179148 62173865

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京印刷学院实习工厂印刷

*

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:9 字数:200 千字

2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—800 册 定价:25.00 元

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、
脱页者,本社发行部负责调换)

内 容 简 介

本书论述了机械结合面问题研究的概况;提出了机械结合面法向和切向接触刚度的分形模型,进行了数字仿真与实验验证;提出了机械结合面动态特性实验研究装置科学合理的设计原则,设计了新的实验研究装置与测试系统,给出了机械结合面动态基础特性参数获取的理论模型和实验研究方法;通过大量的系统的机械结合面动态基础特性参数的实验获取与分析研究,全面地系统地研究和揭示了机械结合面动态特性参数的基本影响因素对机械结合面动态基础特性参数的影响规律和影响程度;提出了机械结合面动态基础特性参数的神经网络结构化建模思想与建模方法;对机械结合面的阻尼机理进行了进一步的探讨;介绍了机械结合面动态特性参数识别的几种方法;简要介绍了机械结合面动态基础特性参数数据的应用技术与方法。

本书可供高等院校有关专业的教师、高年级学生、研究生以及工程技术人员参考使用。

责任编辑 董新生
封面设计 李 丽
责任印制 安利平
责任校对 刘红岩

序 言

机械结合面在机械结构中大量存在,从而使机械结构或系统不再具有连续性,导致了问题的复杂性。机械结合面的接触刚度常常是机械结构整体刚度的重要组成部分,有时甚至成为整体刚度的薄弱环节,所以在研究机械结构的静特性时,必须充分考虑到机械结合面的接触刚度。由于机械结合面上接触压力总限制在一定的范围内,不可能无限大,而机械结合面本身又存在着一定的几何形状误差以及微观不平度,有些机械结合面间还存在着各种各样的油介质等,当受到动载荷作用时,结合面间会产生微小的相对线位移或角位移,使机械结合面既存储能量又消耗能量,表现出既有弹性又有阻尼,即存在接触刚度和接触阻尼。机械结合面的这种动态特性对机械结构的动态特性产生很大影响,使其阻尼增加,固有频率降低。因此从力学的角度分析机械结合面问题,可以说它和机械结构的静特性、振动与振动控制及其动态特性都存在着十分密切的关系。

本书是以作者的博士学位论文《机械结合面动态基础特性理论、实验与建模研究》为基础,并增加了作者多年来有关机械结合面动态特性研究的成果而写成。同时为了保持全书的系统性而吸收了国内外学者的观点和研究成果。

本书的研究内容曾分别以论文的形式发表在《Journal of Vibration and Acoustics》、《中国机械工程》、《农业机械学报》、《应用力学学报》、《机械科学与技术》、《制造技术与机床》(原《机床》)、《西安理工大学学报》、《太原重型机械学院学报》等科技学术刊物和一些国际学术会议的论文集上。其中的主要研究内容得到了机械工业发展基金(95SA0103)和山西省青年科技基金(20011022)的资助。

本书紧紧围绕机械结合面动态特性的基础理论、实验、物理力学机理、建模及参数识别技术这一研究主题,从七个方面分若干层次进行了较为深入的理论与实验研究。这七个方面是:(1)机械结合面接触刚度的分形模型及其数字仿真的研究;(2)机械结合面动态特性的实验研究装置与研究方法的研究;(3)机械结合面动态基础特性参数的变化规律、物理力学机理以及数学建模的研究;(4)机械结合面动态基础特性参数的人工神经网络结构化建模的研究;(5)机械结合面阻尼机理探讨;(6)机械结合面动态特性参数识别研究;(7)机械结合面动态基础特性参数实验数据的应用技术。

本书共分9章,各章内容具体安排如下:

第一章 绪论。主要介绍了本书有关研究内容的研究意义,以及机械结合面研究的历史与现状,分析了存在的问题。

第二章 简要介绍了粗糙表面的形貌特征及其定量化描述方法。

第三章 介绍了分形几何的基本概念以及粗糙表面的分形几何特征和接触分形理论,在此基础上提出了机械结合面法向和切向接触刚度的分形模型,并进行了数字仿真研究。

第四章 在对机械结合面动态特性影响因素进行分类的基础上,给出了其分析与处理

方法,进而对机械结合面动态特性实验研究中存在的问题与不足进行了分析,在此基础上提出了机械结合面动态特性实验研究装置的设计原则,并设计了新的机械结合面法向与切向动态特性实验研究装置和测试系统,给出了机械结合面动态特性参数获取的理论模型,最后提出了实验研究内容与研究方法。

第五章 在对实验获得的大量机械结合面动态基础特性参数数据进行整理分析研究的基础上,给出了机械结合面动态基础特性参数随其各基本影响因素的变化规律,并从物理与力学机理上进行了定性解释,进而对其进行了数学建模研究。

第六章 首先介绍了人工神经网络的基本理论和前向网络的学习算法,在此基础上从生物学和信息论的观点出发,给出了“动态智能神经元”和“广义智能 BP 网络”的概念,进而针对人工神经网络技术处理和解决问题的特点,提出了机械结合面动态特性基本影响因素的特征提取与特征描述方法,在此基础上提出了一种集建模与建库思想于一体的机械结合面动态基础特性参数的人工神经网络结构化建模思想与建模方法,实际建模证明了其可行性。

第七章 介绍了机械结合面阻尼耗能机理,提出了自己的观点,并结合前面章节的研究,提出了固定结合面阻尼耗能的一种辅助补充阻尼耗能机理——结合面微观局部撞击阻尼耗能机理,最后给出了固定结合面阻尼耗能的定量化物理数学描述。

第八章 主要介绍作者关于机械结合面动态特性参数识别所提出的一些方法。

第九章 简要介绍作者关于机械结合面动态基础特性参数实验数据的应用技术。

机械结合面的动态特性问题是一个十分复杂的问题,至今仍然是一个研究的难点。作者希望,本书的出版能够对其研究提供一点借鉴。但由于作者学识有限,错误和不足在所难免,祈望读者赐教。

作者
2002年元月

目 录

序言

1 绪论	(1)
1.1 引言.....	(1)
1.2 机械结合面研究的重要意义.....	(1)
1.3 结合面研究概况.....	(3)
1.3.1 结合面基础理论研究的概况.....	(3)
1.3.2 结合面静态特性实验研究的概况.....	(4)
1.3.3 结合面动态特性实验研究的概况.....	(6)
1.3.4 结合面动态特性参数识别研究的概况.....	(7)
1.3.5 结合面应用技术研究概况.....	(8)
1.4 结合面研究存在的问题与不足.....	(9)
参考文献	(9)
2 粗糙表面的形貌特征及其定量化描述	(13)
2.1 引言.....	(13)
2.2 粗糙表面的形貌及其特征的定量化描述.....	(13)
2.2.1 金属加工表面的性质及其形貌特征.....	(13)
2.2.2 表面形貌特征的定量化描述.....	(15)
2.3 本章小结.....	(19)
参考文献	(19)
3 机械结合面接触刚度分形模型	(20)
3.1 引言.....	(20)
3.2 粗糙表面的自仿射分形特征及其数学表征.....	(21)
3.2.1 分形几何学的产生.....	(21)
3.2.2 分形维数的基本概念.....	(22)
3.2.3 粗糙表面轮廓线的分形特性.....	(22)
3.2.4 表面微观形貌分形特征的数学表征.....	(22)
3.2.5 分形参数 D 和 G 的获得.....	(24)
3.3 粗糙表面的接触分形模型.....	(24)
3.3.1 接触点的大小(面积)分布.....	(25)
3.3.2 粗糙表面的真实接触面积.....	(25)
3.3.3 接触点的变形.....	(25)
3.3.4 真实接触面积与载荷的关系.....	(27)

3.3.5	真实接触面积与粗糙表面间的分离之间的关系	(27)
3.4	互补误差函数 $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 的一种简单拟函数表示	(28)
3.5	结合面的法向接触刚度分形模型 I	(28)
3.6	结合面的法向接触刚度分形模型 II	(31)
3.6.1	结合面的法向接触刚度分型模型 II	(31)
3.6.2	结合面法向接触刚度分型模型 II 的数字仿真及实验验证	(33)
3.6.3	结论	(33)
3.7	结合面的切向接触刚度分形模型	(35)
3.7.1	结合面切向接触刚度分型模型	(35)
3.7.2	结合面切向接触刚度分形模型的数字仿真及实验验证	(38)
3.7.3	结论	(39)
3.8	本章小结	(40)
	参考文献	(40)
4	结合面动态特性实验研究	(42)
4.1	引言	(42)
4.2	结合面动态特性影响因素的分类及分析处理方法	(43)
4.2.1	结合面动态特性影响因素的分类	(43)
4.2.2	结合面动态特性影响因素的分析处理方法	(44)
4.3	结合面动态特性实验研究的简单分析评述	(45)
4.3.1	结合面法向动态特性实验研究	(46)
4.3.2	结合面切向动态特性实验研究	(46)
4.4	结合面动态特性实验研究装置的设计	(47)
4.4.1	结合面动态特性实验研究的特点	(47)
4.4.2	结合面动态特性实验研究装置的设计原则	(47)
4.4.3	结合面动态特性实验研究装置的设计及其特点	(48)
4.5	结合面动态特性实验研究的内容与研究方法	(49)
4.5.1	研究内容	(50)
4.5.2	研究方法	(50)
4.6	结合面动态特性参数实验获取的理论模型	(51)
4.6.1	结合面法向动态特性参数实验获取的理论模型	(51)
4.6.2	结合面切向动态特性参数实验获取的理论模型	(52)
4.7	本章小结	(52)
	参考文献	(53)
5	结合面动态特性实验结果的整理分析及数学建模	(55)
5.1	引言	(55)
5.2	结合面法向动态基础特性参数实验结果的整理分析及数学建模	(55)
5.2.1	结合面法向动刚度	(55)
5.2.2	结合面法向阻尼	(63)
5.3	结合面切向动态基础特性参数实验结果的整理分析与数学建模	(73)

5.3.1	结合面切向动刚度	(73)
5.3.2	结合面的切向阻尼	(79)
5.4	结合面法向和切向动态特性的比较	(97)
5.4.1	结合面法向和切向动刚度的比较	(97)
5.4.2	结合面法向和切向阻尼的比较	(97)
5.4.3	讨论	(97)
5.5	本章小结	(99)
	参考文献	(100)
6	结合面动态基础特性参数的人工神经网络结构化建模	(101)
6.1	引言	(101)
6.2	人工神经网络的特点简介	(101)
6.3	多层前向网络的学习算法	(102)
6.3.1	BP 网络结构及学习算法	(102)
6.3.2	广义智能 BP 网络及其学习算法——广义智能 BP 算法	(104)
6.4	基于人工神经网络的结合面动态基础特性参数的结构化建模	(106)
6.4.1	结合面动态特性基本影响因素的特征提取及其描述	(106)
6.4.2	神经网络训练样本集的构造	(107)
6.4.3	训练样本的预处理	(108)
6.4.4	结合面动态基础特性参数的人工神经网络结构化建模方法	(108)
6.4.5	结合面动态基础特性参数的人工神经网络结构化建模实例	(108)
6.5	本章小结	(117)
	参考文献	(117)
7	结合面阻尼机理探讨	(119)
7.1	引言	(119)
7.2	结合面阻尼机理	(119)
7.2.1	结合面不同状况下的分析与讨论	(119)
7.2.2	结合面阻尼的产生原因	(120)
7.3	对结合面阻尼机理的再认识	(121)
7.4	本章小结	(122)
	参考文献	(122)
8	机械结合面动态特性参数的识别	(123)
8.1	引言	(123)
8.2	基于 Kuhar 动力聚缩法和实验模态分析的最小二乘识别法	(123)
8.2.1	Kuhar 动力聚缩法简介	(123)
8.2.2	基于 Kuhar 动力聚缩法和实验测试模态分析的最小二乘识别法	(124)
8.3	基于实测传递函数矩阵识别机械结合面阻尼参数的方法	(124)
8.4	机械结合面动态特性参数识别的优化方法	(127)
8.5	本章小结	(128)
	参考文献	(129)

9 机械结合面动态基础特性参数的应用	(130)
9.1 引言	(130)
9.2 机械结合面单元接触刚度矩阵的建立	(130)
9.3 含有机机械结合面的机械结构静态特性的解析	(131)
9.4 含有机机械结合面的机械结构静态特性解析实例	(131)
9.5 本章小结	(132)
参考文献	(132)

1 绪 论

本章首先给出了机械结合面的概念及其分类,在此基础上论述了机械结合面研究的意义,接着分析了这一研究的历史、现状,并指出了存在的问题。

1.1 引 言

众所周知,机床乃至各类机械,为了满足各种功能、性能和加工要求以及运输上的方便,一般都不是一个连续的整体,而是由各种零件按照一定的具体要求组合起来的。称零件、组件、部件之间相互接触的表面为“机械结合面”,简称“结合面”,或称“接触面”。

从运动来看,结合面可分为三类,即固定结合面、半固定结合面和运动结合面。

固定结合面是最为普遍的一种结合面,它主要起固定连接和支承的作用。运动结合面是指相互连接的两个零部件之间在工作状态时存在宏观相对运动的结合面。而半固定结合面则是指有时固定,有时又会出现相对运动的结合面,如摩擦离合器的连接与接触等。

按照结合面的结构形状,结合面又分为平面结合面和曲面结合面。

机床结构中的箱体与床身的连接面,机架与机座的连接面;圆柱形的固定连接面,圆柱销的连接面,铆钉的连接面;锥面连接面,包括楔形连接面和圆锥形连接面等,都属于固定结合面。重要的固定结合面还有螺纹连接面,包括螺栓与机件的连接以及螺杆与螺母的连接这样两种连接面。焊接的连接面也是一种固定结合面。

运动结合面中最普遍的是滑动导轨和滚动导轨的连接面、轴承的连接面、丝杠与螺母或其他产生直线位移与角位移的运动机构的连接面,齿轮轮齿的啮合面等等也都属于运动结合面。

总之,结合面在机械结构中不胜枚举。因此,从中也不难悟出其重要作用了。

1.2 机械结合面研究的重要意义

由于结合面在机械结构中的大量存在,从而使机械结构或系统不再具有连续性,进而导致了问题的复杂性。结合面存在着接触刚度和接触阻尼,因此从力学的角度分析结合面问题,可以说它和机械结构的静态特性、振动与振动控制及其动态特性都存在着十分密切的关系。

首先,结合面的接触刚度常常是机械结构整体刚度的重要组成部分,有时甚至成为整体刚度的薄弱环节,所以在研究机械结构的静态特性时,必须充分考虑到结合面的接触刚度。一般情况下,机床中的结合面的接触刚度约占机床总刚度的 60% ~ 80%^[1]。对于不同的机床,这个比例的具体值也不尽相同。Levina 和 Resketov 指出,在机床总的静变形中,由各结合面引起的变形量高达 85% ~ 90%,并且特别指出,在力封闭链上各连接部件之间,如果一

个结合面刚度低,则其他构件的刚度再高也将失去意义^[2]。Levina^[3]的实验研究表明,对于车床,其溜板、刀架的变形量是机床总变形的40%,而其中仅三个导轨结合面的变形就占了30%,也就是说,机床刀架、溜板结构中,结合面变形占其总体结构变形的3/4之多。而车床尾架变形的60%~70%是由其结合面引起的。普通立铣床中,工作台及升降台的变形占整机变形的60%~70%,而其中的大部分变形则是由其结合面所引起的^[4]。Tayler曾发现,对于单臂龙门刨床,当刀架和立柱结合面被假设为完全刚性时,单臂龙门刨床的刚度可提高39%^[2]。

其次,结合面均属于“柔性结合”,这是因为结合面上接触压力总限制在一定的范围内,不可能无限大,而结合面本身又存在着一定的几何形状误差以及微观不平度,有些结合面间还存在着各种各样的油介质等,当受到动载荷作用时,结合面间会产生微小的相对线位移或角位移,使结合面既存储能量又消耗能量,表现出既有弹性又有阻尼,即存在接触刚度和接触阻尼。结合面的这种动态特性将对机械结构的动态特性产生很大影响,使其阻尼增加,固有频率降低。而结合面的接触刚度和接触阻尼,尤其是其接触阻尼,比零件材料本身的阻尼要大得多^[16]。德国学者J.彼特斯(Peters)^[5]分别用钢和铸铁两种主轴,做了安装前后阻尼的对比实验,结果表明,安装后钢主轴的阻尼比是钢本身阻尼比的300倍,安装后的铸铁主轴的阻尼比是铸铁本身阻尼比的30倍。德国学者洛菲尔德^[5]对车床先测床身阻尼,然后分别安装拖板、床头箱和尾架,每安装一件测量一次阻尼,其阻尼逐步增加,直到床身阻尼的8倍。C.F. Beads^[6]认为,在大多数的结构中,大约有90%的阻尼产生于结合面,而控制某些接触阻尼,可以大大地影响结构特性。对于像机床、齿轮箱、动力机械等机械或机器,其总阻尼的90%以上来源于结合面的接触阻尼,和机械零件本身的阻尼相比,结合面接触阻尼占有绝对优势^[7]。国外一些研究资料^{[8][36]}还表明,机床构件材料内部的对数阻尼比为0.005~0.01,而一台机床的总阻尼比为0.1~0.6,一般认为是0.3。所有这些都表明,结合面接触阻尼在机械结构中的作用之大,从而也说明了对其研究的重要性。

机床的振动和颤振是影响机床加工精度和生产率的主要原因之一^[9~11]。随着机械加工刀具的发展及高速切削和强力切削的发展和运用,还有机床自动化程度的不断提高以及超精加工的发展,都要求必须对机床的振动和颤振产生的原因和过程有深入的理论解释。研究^[10,11,17]表明,机床发生颤振的主要原因之一是切削力的非线性,再就是机床结构的非线性。而机床结构非线性的一个主要来源则是其中所包含的各种结合面的非线性特性。没有遍及机床结构的阻尼,特别是结合面的阻尼,机床的振动和颤振就不可能得到抑制。因此研究机床的动态特性问题及其振动与颤振的产生和消除或抑制问题,以提高机床的生产率和加工质量,都不得不涉及到结合面的动态特性,特别是其阻尼特性。因此可以毫不夸张地讲,结合面非线性动态特性的研究必将会为机床非线性颤振理论的研究作出重要的贡献。

应用有限元法、模态分析与综合技术,可以对机械结构的动态特性在设计阶段做出预断,这就是动态优化设计^[7,13]。应用这一技术,有利于大大缩短机床或其他机械、机器的设计周期,提高产品质量,降低成本,从而增强产品在市场中的竞争力。然而到目前为止,应用上述技术尽管可以对复杂结构零件的动态响应及动态特性做出比较准确的计算和判别,却在计算由零件组成的组合件或部件时产生很大的误差,主要原因是在正确建立结合面的动力学模型,特别是确定结合面的动态特性参数时存在困难。而传统的机床结构优化设计是基于线性理论,人们发现基于这个理论的模态分析及结构动态优化设计在实际中往往不能

得到满意的结果^[10]。吉村允孝^[14]对立式车床进行的研究,证明了由于机床结构中结合面的非线性刚度和非线性阻尼性质使机床的切削颤振带有明显的非线性性质。陈花玲^[10,11]基于机床结构中结合面的迟滞非线性特性,建立了一个新的非线性颤振理论模型,较满意地解释了几种复杂的颤振现象。可见,在进行机床结构的动态优化设计时,必须建立考虑机床结构特别是结合面非线性特性的非线性理论模型,分析机床的稳定性与机床结构非线性因素之间的关系,在此基础上,才能使机床的动态特性得到合理的评价,进而进行动态优化设计。因此,研究和掌握结合面的非线性动态特性,将会为机床结构乃至各类机械结构的动态优化设计提供必要的理论基础。

总之,结合面动态特性的研究无论是从理论上还是从实际应用上都具有十分重要的意义。

1.3 结合面研究概况

说明结合面在一台机床整机性能中的重要作用,最早是在 1939 年,德国柏林工业大学的 Kienzle 和 Kettner^[18]在一篇关于比较铸造和焊接床身的论文中提到的,而真正的开始研究则是在 1956 年,由苏联的 Reshetov 和 Levina^[19]所进行的。从那以后,世界各国(如苏联、德国、英国、日本、加拿大等,还有我国)的众多学者都进行了大量的研究工作,并公开发表了大量的研究论文和研究报告,取得了相当多的研究成果,但尚未达到实用化的阶段。

关于结合面问题的研究,可以分成四个大的方面,即结合面基础理论研究、结合面特性实验研究、结合面动态特性参数识别研究和结合面应用技术研究。下面就从这几个方面对结合面的研究工作做一分析概述。

1.3.1 结合面基础理论研究的概况

结合面问题从本质上讲是粗糙表面间的接触问题,因此关于结合面特性的理论研究可以追溯到有关粗糙表面的接触理论研究,而粗糙表面的接触理论研究的基础则是经典的赫兹接触理论。

研究粗糙表面的接触,首先要建立其物理力学模型。1966 年, J. A. Greenwood 和 J. B. Williamson^[91]发现许多工程表面上的微凸峰高度近似于 Gauss 分布,并基于三个假设提出了著名的 GW 接触模型,为粗糙表面间的接触理论研究奠定了具有里程碑意义的基础,至今这一模型仍广为人们所接受。但 GW 模型的一个重要前提假设是微凸峰的接触是相互独立的,这种假设只有在轻载小变形时才近似成立,载荷大、微凸体变形严重时将会产生较大的误差。此外,微凸体峰顶曲率半径相同的假设也较苛求,通常使用这个模型时,一般将其推广为微凸体峰顶的平均曲率半径。1970 年, D. J. Whitehouse 和 J. F. Archard^[83]基于各向同性、Gauss 分布和自相关函数为指数函数形式的三个基本假设,研究了峰高与峰顶曲率的相关性及其联合分布概率密度,提出了 WA 模型。1971 年 P. R. Nayak 基于 Longuet - Higgison 分析海洋表面所建立的统计几何理论,提出了一种新的粗糙表面接触模型,其前提是表面轮廓高度、斜率和峰顶曲率服从联合高斯分布^[85]。它是将随机表面模拟成一个二维正态过程来研究,从而在数学上比 GW 模型和 WA 模型更严格更复杂。1973 年, R. A. Onion 和 J. F. Archard^[84]利用 WA 模型确定了接触面积和接触载荷与粗糙表面间的分离关系,并与 GW 模

型的计算结果相一致,称之为 OA 模型。Back 等^[25]在假定结合面粗糙微凸峰高度分布为指数函数的情况下,从理论上证明了结合面法向变形与结合面面压之间的关系符合指数函数关系,与实验结果相一致。1990 年,沈萌红等^[86]通过对 OA 模型的扩展,研究了由指数衰减可分自相关函数和高斯高度分布函数模拟的各向异性粗糙弹性表面与光滑表面接触时的接触性能。1992 年,张波等^[87]针对工程中许多接触表面的接触特性都取决于塑性接触后的表面形貌的情况,研究了塑性接触对表面形貌的影响,提出了相应的计算模型,并考虑了法向载荷与切向载荷的影响。1994 年,饶柱石等^[88]从材料表面微观特征的分析着手,采用弹性接触理论和概率分析方法,考虑了表面波纹度的影响,提出了粗糙表面法向接触刚度的一种新的理论计算方法。鉴于上述各种模型和计算方法均是基于对粗糙表面粗糙度的传统定量化统计描述,从而其结果缺乏客观的惟一性这一共同问题,Majumdar 和 Bhushan^[90]提出了以分形几何为基础的粗糙表面接触分形模型。

以上的研究都是关于结合面法向静态特性的理论研究,而关于结合面切向静动态特性的理论研究,则是在 20 世纪 80 年代由日本学者山田昭夫等^[57,89]所进行的。他们基于一定的前提假设,首次从理论上推导了结合面的切向接触刚度,并基于结合面微观滑移耗能机理推导了结合面切向阻尼耗能的数学计算表达式。

20 世纪 90 年代末期到本世纪初,作者基于粗糙表面接触的分形理论与分形模型以及球体与真实光滑平面的接触理论,从理论上首次提出了机械结合面法向接触刚度和切向接触刚度的分形模型,进行了数字计算仿真分析,并通过实验定性地验证了其正确性^[92,93,94,95]。

尽管结合面基础理论的研究还存在着这样那样的问题或不足,但毕竟为我们从理论上解释结合面特性的变化规律找到了一些根据,并且还可以在在一定程度上对结合面的特性进行理论预测。

1.3.2 结合面静态特性实验研究的概况

机床的性能受到机床中所包含的各种结合面的静、动态特性的显著影响,要分析这些因素的影响,就必须弄清构成结合面的构件的变形以及结合面上的压力分布状况。而要计算这些值就不仅要考虑结合面的变形,而且还要考虑到结合面周围的构件变形。因此,结合面的研究首先是从结合面的静态特性开始的,而最早则是在苏联于 20 世纪 50 年代对各种滑动导轨和铸铁固定结合面的静态特性所进行的测定^[24]。关于结合面的法向静态特性,许多学者如 Levina^[20,21]、Ostrovskii^[22]及 Dolbey 和 Bell^[23]先后对相对较小的金属结合面进行了实验研究,结果表明,结合面的变形是结合面上的法向压力的函数,具有非线性,且这种函数关系基本符合指数函数关系,并认为这种结合面变形是结合面上粗糙微凸峰的变形。Back 等^[25,26]、Connoley^[27,28]也进行了这方面实验研究,而 Dolbey 和 Bell^[23]的实验研究是在平面导轨的面压范围($P_n < 0.5\text{MPa}$)内进行的,结果发现在法向加载曲线和卸载曲线之间出现了迟滞现象,Levina^[20,21]、Ostrovskii^[22]也有类似的发现。但对于固定结合面,实际机床中的结合面面压要比滑动结合面的面压高,Connoley^[29]、Schofield^[30,31]和 Thornley^[28,32]对此都进行了实验研究,结果发现其法向加、卸载曲线基本上不同于低面压时的情况。Back 等^[25]认为,结合面的塑性变形对结构中零件的初始相对位置是重要的,但对于结合面的工作刚度即接触刚度而言,只有其弹性变形才是人们所关心的。结合面的法向接触刚度大小是由结合面法

向压力和结合面变形之间的关系曲线的斜率来决定的。这些研究均表明,结合面的法向接触刚度与结合面的材料(主要是其弹性性能)、结合面加工方法及表面粗糙度、接触面积以及结合面的法向压力等有关。Connoley^[27]的研究表明,形成结合面的两个粗糙表面上的加工网纹的相对方向或多或少地对结合面的法向接触刚度产生影响。Dolbey 和 Bell^[23]的研究表明,结合面的硬度对结合面的法向接触刚度无影响。由于上述研究基本上是针对较小的试件所进行的,因此结合面波纹度和平面度的影响是很小的,从而可以忽略不计。实际中结合面的平面度误差会随着结合面尺寸的增大而增大,而这种平面度误差将会影响到结合面上尖峰的分布或结合面的承载面积大小,从而导致结合面的法向接触刚度与结合面的名义面积不成正比,Connoley^[27]的研究证实了这一点。导轨结合面的平面度误差可以引起相同类型机床的整体刚度不一致,Tenner^[33]对 7 台单立柱坐标镗床所进行的静刚度测量结果的分散性说明了这一点。Levina^[21,34]和 Tenner^[33]都曾给出了含有规律性(凸状的、正弦曲线形的)平面度误差的结合面的法向接触变形的表达式。尽管这些工作与实际情况存在着较大差异,但毕竟说明了平面度误差的影响。

以上介绍的都是关于结合面法向静态特性的研究。实际机械结构中,力从一个构件传到另一个构件都是由结合面上的法向和切向力来实现的,所以研究和搞清结合面的切向静态特性也十分必要。早在 20 世纪 60 年代末,基尔萨诺娃等就对此进行了研究,结果表明结合面的切向变形与切向载荷之间成非线性关系^[24]。Kirsanova^[33]、Masuko^[34]、益子^[24]、Burdekin^[35]等的研究进一步肯定了基尔萨诺娃早期的研究工作。他们的研究结果可简单地归纳为:

(1)结合面的切向加载和卸载曲线之间存在迟滞现象,即使在切向载荷小于结合面最大静摩擦力的情况下也如此。

(2)结合面的切向接触刚度与结合面面压成非线性关系,并随之增大而增大。

上述的研究工作基本上是对最基本的二平面接触的结合面所进行的。实际机械结构中最典型的结合面是螺栓结合面,由于其接触部位至少有两个,故其静态特性的研究就相对困难了。伊藤、周三^[36]对两种典型的螺栓结合面承受弯曲载荷的情况进行了实验研究,并对螺栓的分布形式和结合部的尺寸对螺栓结合面静态特性的影响进行了研究。严格地讲,这种研究结果中包含有结构的影响,因此是针对性的研究。20 世纪 70 年代末,小泉忠由等^[37]对螺栓结合面承受切向重复加载时的切向静态特性进行了实验研究,结果表明,切向变形随重复加载次数的增加而减小,其减小率与结合面材料及其表面粗糙度有关,并随表面粗糙度增大而增大。

在国内,有关结合面静态特性的研究相对较晚,大约起始于 20 世纪 80 年代初,而令人欣慰的是这方面的研究已取得了相当大的成就,特别是西安理工大学以黄玉美教授为主的结合部研究室,通过对多种结合条件下平面结合面静态特性的实验研究,已获得了大量可供实际设计使用的结合面静态特性参数数据^[38],通过对结合面静态特性影响因素的详细分析,给出了其合理的科学的分类与分析处理方法,进而提出了结合面静态基础特性参数的概念^[39],从而大大丰富了结合面静态特性研究的内容。正是由于他们出色的研究工作,在国内外产生了较大的影响,国外文献^[40]已将该研究室列为国际上的结合面主要研究机构之一。

总之,关于结合面静态特性的研究较多,也较全面系统,目前可以认为基本成熟,并在以

下几个方面业已基本形成共识。

(1)影响结合面静态特性的主要影响因素有^[39]:结合面预面压、材料、加工方法及表面粗糙度、结合面的结构类型与尺寸、结合面的功能、结合面形状误差、结合面间的介质状况、结合面上的静载荷等。

(2)影响结合面静态特性的影响因素可以分为三类^[39],即:

①与结构有关的因素,如结合面的结构类型与尺寸、结合面的功能、结合面形状误差等。

②与工况有关的因素,如结合面上的静载荷等。

③反映结合面固有特性的因素,如结合面面压、材料、加工方法及表面粗糙度、结合面间的介质状况等。

(3)结合面面压对结合面静刚度的影响规律可以用指数函数规律来描述。

(4)结合面静态特性影响因素的处理方法^[39]:

①与结构设计有关的影响因素在设计预测时予以处理;

②反映结合面固有特性的因素以结合面静态基础特性参数数据来体现。

(5)结合面静态特性可用有限个非线性弹簧来代替。

(6)结合面的静变形与相应的力之间的关系曲线在加、卸载时出现迟滞现象,从而表明结合面间存在阻尼,并在一定程度上解释了结合面阻尼的产生机理。

1.3.3 结合面动态特性实验研究的概况

机械结构中的阻尼如此之大,以致不能按材料阻尼来处理,而这种阻尼则主要是来自于其中的各种结合面阻尼^[5]。因此,研究结合面的阻尼,将会对理解和把握机械结构的整体阻尼具有重要意义。与结合面静态特性研究相比,结合面动态特性的研究要困难得多,其原因有二,一是结合面本身并非是一个独立的动力学单元,它只能存在于机械结构系统中;二是结合面本身的阻尼与它所处的结构系统中的其他结构阻尼往往处于同一个数量级^[7]。正是由于此,对结合面动态特性实验研究的测试设备和测试技术提出了更高的要求。

20世纪60年代后期,Corbach就对二平面结合面的法向特性进行了一系列实验研究;而Bell和Burdekin则利用尺寸与实际机床相近的模型,研究了滑动速度与阻尼的关系,同时也研究了润滑油的使用效果和导轨材料对阻尼的影响;东本的实验研究证实了Bell的结果^[24]。

Andrew^[41]、Thornley^[42]、P. E. R. A.^[43]和Dolbey^[44]以及Dekonink^[45]都曾试图测量结合面的法向动态特性,但由于他们的实验装置和测试方案存在的固有缺陷,从而所得结果的可靠性较差,Back等^[25]认为只有Andrew的结果对于得出一些一般性的结论才是较为可靠的,并基于Andrew的实验结果得出了三个重要结论,即:①无油结合面的法向动刚度接近于法向静刚度,其阻尼很小;②具有油膜的结合面,其阻尼较大,且阻尼系数与法向载荷无关,而结合面的阻尼损耗因子与频率有关;③具有油膜的结合面的法向阻尼机理相当于挤压油膜阻尼。但因缺乏具体的实验数据,没能给出结合面的法向阻尼系数。

20世纪70年代,日本学者堤正臣、伊东谊和益子正己^[46]对承受弯曲载荷的螺栓结合面的动态特性进行了实验研究,得出了一些重要的定性结论,并提出了结合面间的相对运动是结合面阻尼产生的原因。Rogers^[47]、Dekonink^[48]和堤正臣等^[49]的研究才可以认为是对结合面切向动态特性研究的真正开始。他们共同的结论是结合面切向动态特性具有迟滞非线性

性,这种迟滞非线性是结合面阻尼产生的主要原因,且每个振动周期的阻尼耗能与振动频率无关,并给出了其阻尼耗能的数学模型。堤正臣还进一步分析了结合面切向阻尼的产生机理,认为结合面间的微观滑移是结合面切向阻尼产生的原因。20世纪80年代末到90年代初,印度学者 Padmanabhan^[50,51]再次进行了与 Rogers 的研究基本相同的实验研究,并利用响应表面法建立了结合面的切向阻尼耗能模型。小泉忠由等^[37,53]以及狩野正树^[54,55]、山中和行^[56]和山田昭夫等^[57]也都先后进行了结合面切向动态特性的研究。

1979年苏联学者^[52]曾进行了机床螺纹连接阻尼的研究,认为其能量耗损的原因是螺纹间及相配零件结合面处的摩擦,以及接触表面的相互碰撞,并通过多因素相关递归分析,得出了单个螺纹连接的阻尼比。这一研究结果是至今仅有的,因而其可靠性如何尚待进一步的研究。

20世纪80年代末,日本著名学者伊东谊^[40]对机床结合面研究的历史进行了回顾与展望,他认为确定结合面阻尼及其衰减能的理论计算方法依然没有得以解决。从此以后,结合面的研究便进入了一个低潮期。

国内黄玉美等^[58,59,60]对结合面动态基础特性参数的理论及其获取方法的研究独具特色,提出了用于获取具有通用性的结合面动态基础特性参数的实验装置的设计原则和结合面动态基础特性参数的影响因素的处理方法。

20世纪90年代末,作者针对前人在机械结合面法向和切向动态特性实验研究中存在的一些问题,提出并进一步完善了用于获取具有通用性的结合面动态基础特性参数的实验装置的合理的设计原则,并设计了新的实验研究装置,在此基础上进行了大量的实验研究,取得了许多研究成果^[92,96,97,98]。

综上所述,结合面动态特性的实验研究可以认为在以下几个方面是比较一致的。

(1)影响结合面动态特性的因素除了前面已经提及的影响结合面静态特性的因素以外,还有结合面上的动载荷大小、振动频率、结合面间的动态相对位移;

(2)结合面动态特性具有非线性;

(3)结合面阻尼的产生机理因具体结合条件不同而不同,主要有库仑摩擦阻尼、挤压油膜阻尼、迟滞变形和微观滑移所产生的结合面阻尼;

(4)结合面动态特性可以用结合面的法向和切向刚度与阻尼来模拟。

1.3.4 结合面动态特性参数识别研究的概况

第1.3.3节介绍的是依靠实验方法直接测定结合面动态特性参数的研究工作,其特点是易于控制各影响因素,从而可以系统地研究各影响因素对结合面动态特性的影响规律与影响程度,并建立起它们之间的数学关系,而且所获得的实验数据通用性较强。但是,以前人们曾认为由这种实验研究方法直接获得的结合面动态特性参数缺乏通用性,于是提出了利用计算机模拟技术来识别结合面动态特性参数的方法,以望解决之。

关于结合面动态特性参数识别的研究,日本著名学者吉村允孝等^[61]于20世纪70年代中期首次进行了这方面的工作,这无疑为结合面动态特性参数的获取提供了一种新方法,但就其具体研究来看,还是以结合面一定的承力状况作为前提。而1979年他们所进行的另一个研究^[62]却只利用了实验所测得的实验装置系统的一、二阶固有频率和模态阻尼比,没有考虑和利用相应的振型,因此必然影响到识别结果的可靠性。T. Inamura 等^[63]与 J. M.