

机械结合面 基础特性参数的

理论计算与实验研究

JIXIE JIEHEMIAN JICHU TEXING CANSHU DE
LILUN JISUAN YU SHIYAN YANJIU

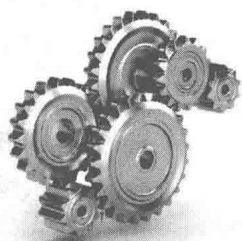
杨红平 傅卫平 编著



江南大学出版社

机械结合面基础特性参数的 理论计算与实验研究

JIXIE JIEHEMIAN JICHU TEXING CANSHU DE
LILUN JISUAN YU SHIYAN YANJIU



杨红平 傅卫平 编著

西南交通大学出版社

• 成 都 •

内 容 简 介

本书紧紧围绕机械结合面特性参数的基础理论、实验及其力学机理建模进行研究,主要从以下几个方面进行较深入的理论和实验研究。具体内容为:① 机械加工表面形貌特征描述及分形特性描述;② 基于小波变换方法表征机械加工表面分形特征;③ 结合面接触特性参数实验获取;④ 基于分形几何与接触力学理论的结合面法向接触刚度计算模型;⑤ 基于改进粒子群-BP神经网络算法的结合面接触刚度建模与预测。

本书可供高等院校相关专业教师、本科生、研究生以及工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

机械结合面基础特性参数的理论计算与实验研究 /
杨红平, 傅卫平编著. —成都: 西南交通大学出版社,
2016.3

ISBN 978-7-5643-4595-2

I. ①机… II. ①杨… ②傅… III. ①机床—结构—
研究 IV. ①TG502.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 044464 号

机械结合面基础特性参数的理论计算与实验研究

杨红平 傅卫平 编著

责任编辑 李 伟
特邀编辑 欧阳柳
封面设计 墨创文化

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)

发行部电话 028-87600564 028-87600533

邮政编码 610031

网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 成都蓉军广告印务有限责任公司

成品尺寸 170 mm × 230 mm

印 张 9.75

字 数 175 千

版 次 2016 年 3 月第 1 版

印 次 2016 年 3 月第 1 次

书 号 ISBN 978-7-5643-4595-2

定 价 36.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

装备制造业是为国民经济发展和国防建设提供技术的基础性产业。近几年,随着现代机械日益向高速、高效、高精度和大型集成化方向发展,对机床等机械设备整机特性研究提出了更高的要求。因为机械零部件之间的结合面性能对整机装备的静、动态特性,抗振性,运动响应敏捷性等性能有重要影响,因而结合面特性参数的研究对于提升高端装备制造水平具有重要理论意义和应用价值。

本书将围绕结合面基础特性参数,从表面形貌描述和表征、实验平台设计与搭建、结合面微观接触建模和分析、结合面接触特性参数的预测仿真等几个方面进行论述。

(1) 通过表面形貌测量仪测量了实际加工粗糙表面的二维和三维形貌。根据机械加工表面具有统计自相似和尺度不变性的结构,应用 M-B 分形函数模拟了不同维数下的表面粗糙形貌,并对分形理论表现的自仿射性、尺度不变性等进行研究。通过几种粗糙表面分形维数方法的计算误差比较,得出用小波变换的方法计算分形维数精度最高。提出采用工程常用的 3 种小波函数小波变换系数方法评价表面形貌的分形特征,对实验获得的机械结合面试件的分形维数进行了表征计算。

(2) 在对结合面特性参数的影响因素、实验特点和有限元分析的基础上,设计了结合面特性参数法向和切向实验装置以及相应的实验测试系统;给出了单位结合面静态特性参数和动态特性参数的获取原理;获取了不同结合面条件下特性参数的实验拟合曲线,并由此计算出了部分材料在特定加工方法下的静态法向和切向刚度计算公式。最后对结合面法向动态特性参数进行了实验研究,得到了部分结合面法向动刚度和阻尼随振动频率、动态相对位移幅值和法向载荷的变化规律。

(3) 提出了基于分形几何理论和接触力学理论的结合面法向接触刚度数学模型,揭示了分形维数、尺度系数、塑性指数、材料等影响因素对结合面特性参数的影响规律。根据建立的粗糙表面分形几何模型表征了结合面表面形貌特征参数,依据接触力学理论将粗糙表面单个微凸体的接触分为弹性、弹塑性和

塑性 3 个阶段,给出了相应的接触载荷、接触面积和接触刚度模型。将分形几何和接触力学理论有机地结合,根据所建立的微观法向接触刚度模型,仿真和分析了法向接触刚度与法向载荷、接触面积等主要量纲因素间的关系,并分别以实验结果作为算例,对接触刚度理论模型计算结果进行实验验证和比较分析。

(4)提出了应用仿生学理论对结合面法向和切向刚度实验数据进行仿真预测建模的方法。针对传统粒子群算法的易陷于局部极值和收敛精度不高的缺点,采用改进粒子群算法训练 BP 神经网络的参数,实现了改进粒子群-BP 神经网络混合优化算法。针对影响结合面的主要因素进行特征提取与特征描述。以实验结果作为算例,对结合面法向和切向接触刚度实验曲线及预测曲线进行对比和相对误差分析。

(5)通过机械结合面微观形貌、表面接触机理和相关实验的研究,揭示了机械结合面法向接触特性;采用理论建模和实验研究相结合,评价了结合面理论模型的有效性和可行性,为后续的研究奠定了理论与实验研究基础。

本书由杨红平、傅卫平共同编著,由傅卫平进行统稿修改。其中,第 2 章至第 8 章由杨红平编写,第 1 章由傅卫平编写。同时,该书得到国家自然科学基金(No.51565053)、国家自然科学基金(No.51275407)、甘肃省科技计划项目(No.1506RJZE113)、甘肃省科技厅高校科研基金(No.2015A-134)、国家重点基础研究发展计划项目(973)的子项目(No.2009CB724406)、国家重大科技专项子课题(No.2009ZX04014-32)等项目的资助。

随着科学技术的不断发展,机械结合面特性参数方面的研究也不断深入,而编者的水平有限,书中难免出现疏漏和不妥之处,敬请广大读者批评指正,以便我们在未来的教学和科研工作中不断改进,提高我们的研究水平,进而使本书再版时更臻完善。

杨红平 傅卫平

2015 年 11 月

目 录

第 1 章	结合面接触特性研究概述	1
1.1	结合面基础理论研究现状	2
1.2	结合面特性实验研究现状	4
1.3	结合面接触模型研究现状	6
1.4	结合面特性参数理论模型研究现状	7
第 2 章	传统的表面质量评价体系	10
2.1	表面精度	10
2.2	表面粗糙度及其测量基准	11
2.3	取样长度和评定长度	13
2.4	表面粗糙度评定参数	14
第 3 章	表面粗糙度测量方法	21
3.1	测量方法的发展	21
3.2	接触式测量	21
3.3	非接触式测量	23
第 4 章	机械加工表面形貌特征描述	29
4.1	机械加工粗糙表面形貌描述	29
4.2	机械加工粗糙表面形貌表征	34
4.3	分形几何简介	36
4.4	粗糙表面分形特性的数学表征	39
4.5	机械加工粗糙表面分形特性描述	40
第 5 章	机械加工表面分形特性表征	45
5.1	小波分析原理	45

5.2	小波变换及其基本性质	47
5.3	多分辨分析与 Mallat 算法	50
5.4	小波变换方法在表征粗糙表面中的研究	53
5.5	小波变换法计算粗糙表面分形维数	56
5.6	表面形貌分形特性算例评价与分析	60
第 6 章	结合面基础特性参数实验	62
6.1	结合面实验装置的特点、影响因素和设计原则	62
6.2	结合面特性实验研究装置的设计	64
6.3	结合面静、动态基础特性参数实验获取原理	71
6.4	结合面基础特性实验参数研究	73
第 7 章	结合面法向接触刚度模型计算与分析	84
7.1	理论研究概述	84
7.2	基于分形理论和基础理论的结合面法向接触刚度理论建模	90
7.3	接触模型假设	90
7.4	粗糙表面微凸体参数计算	91
7.5	表面微凸体接触模型	93
7.6	不同影响因素的理论计算结果与分析	100
7.7	实验验证与分析	120
第 8 章	结合面接触刚度仿生学建模与预测	124
8.1	改进粒子群-BP 神经网络优化算法	125
8.2	机械结合面法向接触刚度影响因素的特征分析与描述	127
8.3	基于 MPSO-BP 神经网络模型的结合面法向接触刚度建模	129
	参考文献	137

第1章 结合面接触特性研究概述

装备制造业是一个国家综合国力和国防实力的重要体现,是国民经济各个生产部门得以运行的“母机”,在整个经济总量当中占有重要比重。装备制造业的提升和发展为我国经济发展和国防建设提供了高新技术装备,它对推进经济结构战略性调整、推动产业升级、扩大国内需求、实现经济可持续发展的战略至关重要。而机床行业又是装备制造业的基础行业,是为传统机械工业、国防工业、汽车工业、航空航天工业、电子信息技术工业以及其他加工工业提供加工装备的部门。振兴装备制造业,必须首先发展机床制造业。机床产品,特别是高档数控机床产品的研发、分析与设计,是具有高附加值的高端装备制造产业链的前端环节,解决该环节存在的关键理论与技术问题,对于提升高端装备制造乃至整个装备制造产业链的价值和水平,具有重要理论意义和应用价值。

结合面是在机械装备上无处不在的环节,无论固定连接,还是运动副,均以结合面相连。结合面性能对机械装备的动态特性、抗振性、运动响应敏捷性等性能有重要影响。研究表明,整机刚度的50%取决于结合面刚度,整机阻尼的50%~80%来自结合面阻尼。

结合面对整机性能影响如此之大,以致成为机械装备静、动特性分析和设计的关键。机械整机结构设计的最大难点在于缺乏科学有效的结合面模型及相关参数,不得不采取试凑的方法进行计算,使机械装备整机设计的仿真计算往往存在很大误差。而传统的实验方法是采用大量实验获得结合面参数,无数次的实验使机械装备的设计制造不仅代价昂贵,而且非常盲目。因此,提供具有准确性的结合面建模方法是进行机械装备自主创新设计开发迫切需要解决的关键基础课题。下面将研究结合面静、动特性的建模、实验、预测方法,为机械装备性能设计提供科学方法和设计依据。

零件、组件、部件之间通过许多相互连接的相对运动表面或相对固定表面连接起来,称为“机械结合面”,简称“接触面”或“结合面”,实现定位、承载、导向等功能。机械结合面之间存在着接触刚度和接触阻尼,对机械整机的静态和动态特性有着至关重要的作用。结合面的接触刚度成为机械结构整体刚度的重要组成部分,因此,在研究机械结构的静、动态特性时,结合面间接触

刚度需要充分考虑。

早在 20 世纪 60 年代,国外学者就对结合面的法向静态特性进行了实验研究,Levina 和 Resketov 指出,结合面所引起的变形量占机床总变形量的 85%~90%,那么构件的刚度高于或低于某结合面的刚度则没有意义。通过实验进一步表明,车床刀架、溜板箱等的变形量占机床总变形量的 40%,其中 3 个导轨的变形所占比例高达 30%,而机床尾架 60% 的变形主要由结合面的变形引起。方便、准确地获取可靠的结合面刚度与阻尼参数正是产品研发、分析与设计过程中存在的一个关键理论与技术问题。

1.1 结合面基础理论研究现状

从本质上讲,机械结合面接触问题是两个粗糙表面间的接触,因此,研究结合面接触特性理论要从有关粗糙表面理论开始。

机械粗糙表面的评定参数很多,从数学理论基础而言,可以分为几何评定参数、纵向评定参数、横向评定参数、形状评定参数和随机过程评定参数。研究表明,粗糙表面的轮廓高度变化是一种非平稳的随机过程,这会导致上述几何评定参数和形状评定参数随着度量区间及尺度的变化而表现出不稳定性。也就是说,几何评定参数和形状评定参数属于一种尺度相关的评定参数,其数值随着测量尺度的变化而出现不同的数值。

Greenwood 和 Williamson 发现机械加工表面由高度近似服从 Gauss 分布的微凸体组成,提出了 G-W 理论,为粗糙表面接触理论研究奠定了坚实的基础,至今为此得到了研究者的广泛应用。Whitehouse 和 Archard 进行 3 个基本形式的假设,即基于自相关函数为指数函数、各向同性和高斯分布,研究了联合分布概率密度及峰高与峰顶曲率的相关性,从而提出了 W-A 理论。Nayak 将随机表面模拟成一个二维正态过程,提出了统计几何理论,但理论建立在表面轮廓高度、斜率和峰顶曲率服从高斯分布基础之上;其优点是在数学上比现有的 O-W 模型和 W-A 模型更严格。Onion 和 Archard 结合 W-A 模型提出了 O-A 模型,建立了接触面积和接触载荷与粗糙表面间的分离关系,计算结果与 G-W 模型一致。Back 等从理论上进一步证明得到,结合面法向变形与面压之间的关系服从指数函数关系,并与实验结果一致。

国内不少学者进行了结合面微观理论研究,并且取得了一定的成果。沈萌红等通过对 O-A 模型进行扩展,研究了自相关函数和高斯高度分布函数模拟的

各向异性光滑表面与粗糙弹性表面接触时的接触性能。张波等针对实际工程应用中的表面接触特性,考虑了法向载荷和切向载荷,并研究了工程表面对相应形貌塑性接触的影响规律,提出了对应的结合面接触的计算模型。饶柱石等首次提出了一种粗糙表面法向接触刚度的理论计算方法,该方法从材料的表面微观特性角度出发,考虑了表面波纹度的影响,采用了弹性接触理论和概率分析的方法。

传统测量统计的方法可直接获得粗糙表面参数,通过计算机生成与其尺寸表面相符合的表面形貌。Patir 利用数字化生成仪获得粗糙表面,通过生成的表面微凸体,其高度满足高斯分布。Hu 等提出了基于高度标准差和自相关函数,构造三维粗糙表面的生成方法。采用传统方法生成的粗糙表面广泛应用于求解粗糙表面的接触分析中。传统方法的优点是能够生成大量具有统计参数的粗糙表面,有利于分析不同特征表面的回归公式和接触特性的原始数据。然而,由于尺寸表面具有随机性和不平稳性,导致表面形貌的统计参数对确定的表面往往具有不确定性,所以建立的粗糙表面接触模型对接触刚度的预测结果也就不是唯一,这是由于表面粗糙度形貌程度具有毫米、微米和纳米级甚至更小的多重尺度特性,特征并不唯一,在一定的测量条件下得到统计学表面表征参数不能反映表面粗糙度的全部信息,而只能反映与粗糙度信息、仪器分辨率和取样长度有关的表面特征信息。上述各种对粗糙表面的描述都采用传统的方法进行量化描述,从而导致描述结果缺乏客观的唯一性。因此,寻找与尺度无关的粗糙度评定参数对结合面研究具有重要意义。分形几何理论是近年来非线性方法研究的热点之一,它对描述具有标度律特征的自然现象具有很好的适用性。Sayles 等发现机械加工表面的微观形貌具有分形特性,即使是原子尺度,表面形貌仍具有多尺度性、自仿射性、非平稳性等特性。之后,大量的研究表明,机械加工的粗糙表面都具有统计自仿射分形特征。因此,Weierstrass-Mandelbrot (简称 W-M) 利用分形函数来模拟处处连续、处处不可导且具有自仿射分形特征的粗糙表面。Majumdar 以实测的粗糙表面计算出分形特性参数,将其真实表面特性参数代入 W-M 分形函数中,获得了模拟轮廓曲线,并与实测的轮廓曲线进行比较,发现两者有很好的一致性。Vandenberg 利用数字图像处理技术对分形维数和表面粗糙度空间进行了研究,也证实了表面的分形特征可以由针式轮廓仪测量值的功率谱分析得到。Zhao 提出了采用结构函数的方法计算工程表面形貌的分形维数,通过研究基于分形理论的机械工程表面的摩擦和磨损过程,发现对于不同材质的表面形貌分形维数难以区分。Srinivasan 首次提出基于分形理论的形状公差的面特征描述方法,并首次考虑公差带内的轮廓结构特征。冯丽运用分形理论,对粗糙表面磨损、磨合过程和分形表征进行表面分形特征

描述、磨损预测、分形接触等方面的研究,为后续研究结合面接触工作奠定了理论基础。陈国安等利用分形维数研究了工程表面轮廓截面曲线磨合表面形貌的变化过程,指出表面轮廓分形维数在一定程度上克服了传统粗糙度参数尺度相关的不足,能有效地反映表面粗糙度。Thomas 等把分形理论真正地应用于表征工程表面的微观形貌领域,指出工程表面呈现出随机性、自仿射性、多尺度特征、自相似性和非平稳性的无序性。

1.2 结合面特性实验研究现状

由于结合面特性受到如表面加工方法,结合面的材质及其热处理方法,表面粗糙度和表面完整性,结合面的类型、尺寸、形状,面压及其分布,面间介质,结合面之间的相对振动位移和振动频率,结合面表面温度及其分布等多种复杂因素的影响,直接通过理论模型计算结合面基础特性参数难度较大。因此,通过建立实验平台,采用实验方法获得在一定条件下的结合面基础特性参数与其影响因素之间的关系,成为研究结合面特性的主要方法之一。

早在 20 世纪 50 年代,国外学者 Levina、Ostrovskii、Dollbey 等就对结合面的法向静态特性进行了试验研究,这些研究揭示了结合面的法向静刚度与结合面粗糙度、实际接触面积和法向面压力有关,研究结果表明,结合面间的变形与法向面压之间具有非线性函数关系,而且这种函数关系基本符合指数函数关系,并且进一步研究表明,结合面间的变形是由微凸体变形引起的。Dolbey 和 Bell 针对平面导轨进行研究,发现在法向加载曲线和卸载曲线间存在迟滞现象。对于结合面间的接触刚度的研究而言,结合面的法向接触刚度的数值大小是由结合面间的法向面压和结合面间的变形关系曲线的斜率确定,结合面间的接触刚度与结合面加工方法、接触面积、材料和法向压力等因素有关。Coonnoley 的研究进一步表明,两个接触的粗糙表面的加工刀具纹理对结合面法向接触刚度产生一定的影响。Dolbey 等的研究表明结合面表面硬度对结合面间的法向接触刚度影响较小。

以上研究都是针对较小结合面的法向接触刚度研究,因此,表面波纹度和表面平面度对接触刚度的影响较小,从而在研究单位结合面时这两个影响因素可以忽略。在实际结合面研究中,由于平面度受到结合面尺寸的影响,随着结合面尺寸的增大,平面度也随之增大,因为结合面平面度误差会对表面微凸体的高度分布、承载面积有较大影响,从而导致结合面名义接触面积和法向接触

刚度不成正比。

Konowalski 等建立了结合面静、动态法向接触刚度实验平台,通过一系列载荷与位移分析,结果表明,在一系列结合面法向接触载荷下,结合面间的接触变形与接触压力间为非线性关系,通过动态实验结果进一步发现封闭的迟滞回线,这为研究结合面阻尼奠定了一定的实验基础。

国内许多学者对结合面静态和动态特性进行了深入研究,取得了许多有意义的成果。傅卫平等对结合面动态基础特性参数的理论及其获取方法进行了较为深入的研究,提出了通过实验的方法获得具有通用性的结合面特性参数的方法,设计了结合面动态基础特性参数的实验装置,明确了结合面动态基础特性参数的实验装置的设计原则、影响因素的处理方法;提出了固定结合面间的微观滑移阻尼耗能,微观(局部)滑移阻尼耗能为主、微观(局部)撞击阻尼耗能为辅的固定结合面是迟滞变形阻尼机理的本质所在。伍良生等制作了大量的单位面积垫块,通过基于单位面积垫块的基础特性数据在各种不同工况下对基础特性进行识别,建立了简单的结合面基础特性参数,为其以后复杂结构的动态特性预测奠定了基础。张广鹏等基于结合面动态基础特性实验参数,研究了机床导轨结合面动态特性的建模解析方法,并将其应用于机床整机动态特性解析,为机床整机动态特性解析中结合面参数的确定提供了一种方法,使机床图样设计阶段预测整机动态特性成为可能。史熙设计了结合面法向接触阻尼和刚度的实验平台,通过实验的方法获得结合面基础特性实验数据,并进一步研究了改变结合面介质对接触刚度和阻尼的影响程度。

动态测试以及模态分析技术的不断发展为结合面动态特性识别提供了更加有利的条件。杨家华等以模态分析作为理论基础,应用基于模型的正弦扫描频率响应函数测试、优化设计方法及复模态分析,提出了一种识别模型结合面特性参数的方法。陈新提出通过实测传递函数来辨识结合面参数,并推导出相应的理论公式,该辨识方法提高了计算精度,克服了实测传递函数矩阵进行反复、直接求逆运算的问题。张杰等提出了一种在复杂机械结构结合面动力学建模基础上的结合面参数识别的方法。陈天宁等应用有限元理论,建立了机床床身底座结构的动力学模型,以数控车床 6 动态试验数据作为实验原始数据,对结合面线性弹簧-阻尼单元的刚度值运用有限元软件进行了参数优化识别。

由于影响结合面阻尼和刚度的因素众多,机理复杂,人们虽然可以从微观机理上尝试性地解释一些因素对结合面刚度和阻尼的影响规律,但是很难从微观机理上对结合面刚度和阻尼(特别是对结合面阻尼)进行定量分析计算。因此,人们一直主要从宏观角度对结合面刚度和阻尼进行研究,包括参数获取、

参数识别与因素影响规律研究,并且大多需要采用试验研究方法。日本著名的机床设计专家 Yoshimura 提出了利用结合面基础特性参数(即单位面积结合面刚度和阻尼)计算实际机床结构中结合面刚度和阻尼的方法。因此,如何获得单位面积结合面刚度和阻尼参数成为问题的关键。黄玉美、傅卫平等系统地研究了获取结合面基础特性参数的方法,由大量试验获得了一批结合面基础特性参数(单位面积法向刚度、法向阻尼、切向刚度和切向阻尼),并获得了部分因素的影响规律,将这些数据形成数据库或参数表供实际设计使用。

1.3 结合面接触模型研究现状

通过试验方法直接或间接获取结合面参数的研究主要存在以下问题:

第一,大多数结合面参数获取的试验方案和数据处理方法都没有排除所研究的结合面以外结构的影响,即不能把所研究的结合面特性从试验装置模型中有效分离出来,由于包含了与具体试验装置结构有关的成分,因而所获取的结合面参数不具有通用性。

第二,结合面刚度和阻尼参数不仅与结合面上的面压分布有关,而且与结合面之间的相对振动位移和振动频率有关,并且具有非线性关系,而已有的关于结合面参数试验识别的研究一般无法单独控制结合面间的相对振动位移和振动频率,因而必须将待识别的结合面参数假设为与相对振动位移和振动频率无关的常数。

第三,在机床产品图纸设计阶段分析整机的静态和动态特性时,由于结合面基础特性参数影响因素很多,试验工作量巨大,有时影响因素的试验范围受试验装置或条件的限制,不可能遍及各个因素的全部变化范围及其全部组合,不得不将这些因素中可量化的因素(面压、频率、位移、粗糙度等)离散为有限数量的数据点,将不易量化的因素(加工方法、热处理方法等)选取有限个常用的试验点。而实际设计使用条件与这些数据点及试验点不对应时,就需要利用试验得到的离散数据点的基础特性参数进行插值。由于结合面基础特性参数与这些因素的关系往往具有强非线性,因而插值将不可避免带来较大误差,况且不易量化的因素还无法插值。此外,由于结合面基础特性参数对试验装置和试验条件的状态比较敏感,为了保证试验数据的可重复性,需要耗费很多时间和精力,使得试验效率大大降低。

为了解决上述第三个问题,人们尝试从结合面的微观机理模型入手来研究

结合面特性,期望能够从理论上直接计算出结合面基础特性参数。结合面基础特性参数的理论计算主要涉及两个固定粗糙表面的接触问题,一般分别按两类理论体系进行研究:一类是以解析方法建模的研究体系,主要包括统计接触模型、分形接触模型、多尺度接触模型等;另一类是以数值方法建模的研究体系,主要包括有限元方法、分子动力学方法、多尺度方法等。两类研究体系都涉及微观形貌模型和微观接触模型,都需要对粗糙表面微观接触几何和微观接触力学进行各种假设和描述。G-W 模型是统计接触模型中最经典的代表。它将粗糙表面假设为一定密度的等曲率球状微凸体,并按高斯分布覆盖在名义表面上,微凸体变形符合 Hertz 弹性接触规律,忽略微凸体相互作用以及基体变形。自 G-W 模型提出以来涌现出各种改进的统计接触模型,这些模型的假设比经典 G-W 模型更接近实际表面形貌和接触状态,即使如此,G-W 模型的有效性仍然得到实验证实。

尽管基于统计接触模型可以研究两个粗糙表面接触问题,但是多数研究将问题简化为一个等效粗糙表面与一个刚性光滑表面的接触模型。与仪器分辨率相关的统计学参数为基础建立的统计接触模型的计算结果一般具有不确定性,而以粗糙表面自仿射性分形几何特征为基础建立的分形接触模型的分析结果具有唯一确定性。分形接触模型主要包括 M-B 模型、改进 M-B 模型和扩展 J-S 模型等。

M-B 模型和改进 M-B 模型都用 W-M 分形函数模拟粗糙表面的轮廓曲线,对接触的两粗糙表面进行简化,其中一个等效的粗糙表面,另一个是刚性光滑表面,而前者仅考虑微凸体的弹性和塑性变形,后者把微凸体接触变形形式分为弹性、弹塑性和塑性。直接基于分形接触理论研究两个粗糙表面接触问题、各向异性问题、微凸体相互作用问题相对少得多。

针对解析接触模型在解决复杂形体接触、大载荷压力作用下表面微凸体之间的相互作用以及接触应力集中产生的塑性变形等方面的局限性,有限元数值方法在粗糙表面接触问题中逐渐得到广泛应用,但其高计算量和数值复杂性不适用于解决一般工程微观接触问题,而其他数值方法尚不能解决弹塑性问题。以往大多数研究只限于利用统计接触模型、分形接触模型和有限元接触模型分析真实接触面积和接触压力分布之间的关系。

1.4 结合面特性参数理论模型研究现状

当两个粗糙表面受到载荷作用时,在加载初始阶段,由于法向载荷较小,

两接触表面接触峰点产生弹性变形,结合面法向刚度表现为线性特性,随着载荷的不断增大,两接触表面多个接触峰点在载荷作用下产生弹性、塑性共存及塑性的变形,此时结合面法向接触刚度表现出非线性特性。因此,随着结合面间载荷的增加,两接触表面间的变形经历了弹性、弹塑性共存、塑性3种变形,这种连续变化使结合面接触刚度与载荷间表现出由线性向非线性变化的特性,两接触表面间产生了相对位移,从而使结合面做功并不断储存能量。在复杂动载荷作用下,结合面两接触表面间阻尼作用及其卸载弹性的非线性特性,使得结合面消耗或释放储存能量,其中一部分能量消耗于使两接触表面按卸载弹性的非线性曲线恢复到保留残余变形的位罝,另一部分能量消耗于阻尼能并转化为热能释放,从而使得结合面表现出卸载迟滞特性。荷兰的Hjink等对卧式铣床的结合面特性进行了研究,建立了卧式铣床的计算模型,并且获得了机床的动态特性。但是在研究中没有能够考虑到结合面动态特性对机床的影响,因此计算值与实验值相差较大。Padmanabhan对机械结合面切向动态特性参数进行了实验研究,并建立了结合面切向阻尼耗能模型。日本的吉村允孝研究了结合面对立式车床的整机性能影响。研究发现,机床结构中的结合面阻尼对机床整体的性能影响很大。非线性的结合面特性使机床振动明显带有同样的非线性性质。在他所建立的机床理论模型中,加入了结合面的动态特性参数,计算与实验测得的值非常接近,证明了结合面对机床整机动态特性的影响。Kartal等将先进的数字相关技术引入到了结合面接触刚度的测定中,用数字相关技术准确地测量了钛合金粗糙表面间的接触刚度。在法向面压下,对切向接触刚度与名义接触面积和磨损的关系进行了分析。经过反复试验研究发现,切向接触刚度与法向名义接触面积的大小是成比例的,这一点与实际测量的结果是相符的。Shiro等用超声波测量方法成功获取了接触面法向和切向刚度。通过对比发现,这种用超声波测量方法所获取的接触面法向和切向刚度与实际测得的刚度基本一致。Jiang等利用分形接触理论,得到了结合面法向接触刚度和切向接触刚度的分形模型。Shi等利用统计接触理论,得到了结合面的法向接触刚度的理论计算模型。Tian等将微观接触部分假设为虚拟的各向同性材料,利用分形接触模型解析描述虚拟材料的法向和切向特性,并考虑二者的相互作用,将虚拟材料的解析模型应用到机床固定结合面的有限元模型中,通过模态试验证明了虚拟材料模型的有效性。

国内结合面的实验研究开始于20世纪60年代,80年代有很多高校科研人员和学者参与到了结合面研究中,90年代末围绕动力学模型建立和模态特征参数识别已经取得了很大的成绩。饶柱石等分析了材料表面的微观特性,在研究

了大量的两个粗糙平面接触时的刚度问题后,在相关数学理论基础上,提出了一种接触面接触刚度计算的方法,并通过计算验证了其结果。田洪亮等提出了一种固定结合面的动态建模方法。他们通过研究经典的赫兹接触理论及分形几何理论,提出了一种新的固定结合面动态建模方法。这种方法将结合面设置为一种虚拟材料,这种虚拟材料考虑到了结合面法向和切向的作用力,以及基本的材料属性,包括弹性模量、剪切模量、泊松比和密度等,最后通过计算值与实验值的对比,发现计算结果和实验结果相吻合。宋建伟等在研究机械结合面特性参数时,将有限元分析法引入到结合面研究中。这是一种实验研究与计算机辅助分析联合使用的方法。通过有限元对钻床立柱和摇臂建立了动力学模型,通过 ANSYS 中的优化分析模块成功识别了钻床立柱和摇臂的阻尼和刚度参数。袁景侠等提出了一种新的识别机床结合面接触刚度和阻尼的方法。这种方法需要知道机床的几个振型,利用这几个振型对机床结合面参数进行识别。最后利用计算机仿真技术对这种方法进行验证,并且成功地识别了立柱底部接触刚度和阻尼参数。

近 10 多年来,人们利用这些模型计算结合面参数。张学良、黄玉美和傅卫平等基于分形接触理论提出了结合面法向接触刚度模型,之后又给出了切向接触刚度和切向接触耗能的分形模型。陈天宁等以分形接触理论为基础,建立了结合面法向接触刚度分形模型,并通过分形参数表达的微凸体在弹性和塑性接触区产生的弹性与塑性应变能,给出了与基体质量有关的接触阻尼表达式。王世军等通过表面形貌测量仪获取粗糙表面的轮廓数据,拟合生成粗糙表面轮廓曲线,在此基础上建立考虑摩擦的二维粗糙表面的有限元弹塑性接触模型,用罚函数法计算加载过程中接触层的应力、位移和接触面积,进而得到结合面法向接触刚度。刘恒等将界面接触层等效为一个和此界面接触层等厚度的无界面弹塑性体和一个无厚度均质弹簧串联构成的系统,利用有限元法计算出法向接触刚度。李辉光等基于弹塑性理论对具有粗糙表面的长方微元体进行有限元接触分析,给出了根据受力和变形关系计算粗糙表面接触刚度的方法,得到了不同载荷作用下的法向和切向界面接触刚度。Medina 等基于弹性接触假设,采用多水平网格求解算法研究了切向加载时表面拓扑对接触表面能量耗散及法向和切向刚度的影响。

第 2 章 传统的表面质量评价体系

2.1 表面精度

机械零件表面精度所研究和描述的对象是零件的表面形貌特性。零件的表面形貌可以分为 3 种成分：表面缺陷、表面粗糙度和表面波纹度。不同形貌成分的产生原因，评定参数以及它们对零件功能的影响各不相同。

2.1.1 表面缺陷

表面缺陷是在加工储存和使用过程中生成的实际表面的那些单元体、不规则体。那些单元体或不规则体的类型，明显区别于构成一个粗糙度表面的那些单元体或不规则体。在实际的表面上存在缺陷并不表示该表面不使用，缺陷的可接受性取决于表面的用途和功能。

表面缺陷可以分为凹缺陷、凸缺陷、混合表面缺陷、区域缺陷、外观缺陷 5 类。表面缺陷可以用缺陷的长度、宽度、深度、高度、面积以及缺陷数等参数进行评定，并用相应参数的允许值在图样上表达设计要求。目前尚未制定相应的规范标准。

2.1.2 表面粗糙度

表面粗糙度是指加工表面具有的较小间距和微小峰谷不平度。其两波峰或两波谷之间的距离（波距）很小（在 1 mm 以下），用肉眼是难以区别的，因此它属于微观几何形状误差。表面粗糙度越小，则表面越光滑。

2.1.3 表面波纹度

表面波纹度是零件表面形貌中具有明显周期性波动的中间几何形貌，其波