



微织构接触界面的 动力学响应特性

..... 朱春霞 / 著



科学出版社

微织构接触界面的动力学响应特性

朱春霞 著

贵州师范学院内部使用

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在分析具有微结构形貌的表面特征的基础上,建立微结构表面轮廓的表征方程,并通过对具有微结构形貌的结合面间的接触特性参数分析,研究微结构表面的结构参数对结合面间的接触特性的影响规律,对提高机械系统动态性能、结构工作性能可靠性以及机械装备的精密度与稳定性等,具有重要的理论与现实意义。

本书可供从事机械工程领域相关方面研究的人员参考使用,也可作为机械工程领域相关专业教师、研究生和高年级本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

微结构接触界面的动力学响应特性/朱春霞著. —北京:科学出版社,2019.10
ISBN 978-7-03-062530-4

I. ①微… II. ①朱… III. ①结构-刀具(金属切削)-接触面-动力学性能-研究 IV. ①TG71

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第215893号

责任编辑:姜红 / 责任校对:彭珍珍
责任印制:吴兆东 / 封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年10月第一版 开本:720×1000 1/16

2020年1月第二次印刷 印张:7 1/4

字数:150 000

定价:99.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

机械系统因功能和结构的需求，往往设计成一个个的零部件，从而产生各种各样的机械结合面。整个机械系统的精密度、稳定性等性能，在很大程度上受到这些机械结合面的动力学响应特性的影响。接触刚度和接触阻尼是机械结合面动力学响应特性的两个主要参数，故而成为越来越多学者的研究目标。

近年来，表面织构技术因其良好界面可控性及优秀的物理性能，受到越来越多学者的关注。表面织构技术是在粗糙表面上加工特定尺寸、形状及排列的几何图案，从而改变表面的物理属性。有研究表明，具有微织构形貌的粗糙结合面间的接触特性也会发生变化。机械系统中的机械结合面的动态特性本质上来说是两个粗糙界面的接触问题，而微织构结合面间的接触问题就是相接触的两个粗糙表面上具有微织构形貌，因此，微织构结合面间的动态特性除了受到无织构区域粗糙度的影响，同样也受到微织构区域的织构参数的影响。对于无织构区域的接触状态可以追溯到相关表面接触的理论，然后根据微织构表面织构的分布研究微织构结合面间的接触特性。在机械系统中，结合面间的接触特性占整机特性中很大一部分，同时表面织构技术所表现出的良好的界面可控性及优秀的表面特性，使得研究微织构表面的形貌特征及织构参数对微织构结合面间接触特性的影响规律

具有重要的意义。本书在分析具有微结构形貌的粗糙表面的形貌特征的基础上，提取微结构表面的特征参数，建立表征方程，重构微结构表面，然后重点对具有微结构形貌的结合面间的法向静态、动态接触刚度及法向接触阻尼进行研究，在对具有微结构形貌的粗糙表面的形貌特征提取研究的基础上，研究无结构区域上的粗糙特征及结构参数对微结构结合面间的接触特性的影响，并通过有限元分析软件验证理论模型的有效性。

本书共 5 章。

第 1 章为绪论。主要介绍接触界面接触特性以及表面结构技术对其影响的研究现状，并介绍本书主要内容：分析微结构结合面上的结构参数对微结构结合面之间接触特性的影响规律。

第 2 章为具有微结构形貌的粗糙表面的表征方法。主要分析研究具有微结构形貌的粗糙表面的形貌特征，将微结构表面分为无结构与结构两个区域，分别提取这两个区域的特征参数，建立整个微结构表面的表征方程，并重构微结构表面，分析各种参数对其形貌的影响规律。

第 3 章为具有微结构形貌的结合面法向接触刚度研究。在对结构表面进行参数表征的基础上，建立微结构表面法向静态、动态接触刚度理论计算模型。研究具有微结构形貌的结合面的形貌参数对法向静态、动态接触刚度的影响。求出整个微结构结合面的法向静态、动态接触刚度。并通过数值仿真分析不同因素对于法向静态、动态接触刚度的影响。

第4章为具有微结构形貌的结合面法向接触阻尼研究。基于微结构表面的形貌特征,以及微观尺度下的微凸体在接触载荷作用下的变形过程,根据等效阻尼原理,建立微结构结合面间的法向接触阻尼理论模型,并分析不同因素对微结构结合面间的法向接触的影响规律。

第5章为具有微结构形貌的结合面有限元分析与实验研究。通过有限元非线性仿真分析与实验,分别分析具有微结构的粗糙表面的结构参数对结合面间的法向静态、动态接触刚度与法向接触阻尼理论的影响规律。

本书在分析具有微结构形貌的表面特征的基础上,建立微结构表面轮廓的表征方程,为对微结构表面的表征及后续的研究提供一定的理论依据。通过对具有微结构形貌的结合面间的接触特性进行分析,研究微结构表面的结构参数对结合面间接触特性的影响规律,对提高机械系统动态性能、结构工作性能可靠性及机械装备的精密度与稳定性等,具有重要的理论与现实意义。

本书是集作者多年来在机构动态特性和并联机构设计及理论方面的研究成果而写成,同时为了保持全书的系统性,吸收了国内外一些专家学者的研究成果,已在参考文献中详细列出。

本书的出版同时得到东北大学机械工程学院及其实验室和沈阳建筑大学机械工程学院的支持,并且得到了国家自然科学基金项目“基于表面结构效应的并联机构典型结合面及整机动态特性与实验研究”(项目编号:51575365)和辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才项目“具有表面微结构的受载机械结合面动力学特性

研究”（项目编号：XLYC1807065）的支持，还得到了硕士研究生方超同学和王润琼同学的协助，在此一并表示感谢。

限于作者水平，书中不足之处在所难免，殷切希望广大读者批评指正。

作者

2019年5月于沈阳

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 接触界面的动力学响应特性研究概述	2
1.2 接触界面的动力学响应特性国内外研究现状	3
1.2.1 机械结合面法向接触参数研究现状	4
1.2.2 结合面接触特性影响因素研究现状	6
1.2.3 表面织构对接触界面影响研究现状	8
1.3 本书主要内容	9
第 2 章 具有微织构形貌的粗糙表面的表征方法	12
2.1 相关理论基础	12
2.1.1 W-M 函数	12
2.1.2 结构函数法确定分形参数	15
2.2 具有微织构形貌的粗糙表面的表征	18
2.2.1 无织构区域的表征	20
2.2.2 织构区域的表征	21
2.3 粗糙表面的形貌特征仿真分析	25
2.3.1 微织构粗糙表面无织构区域的形貌特征仿真	25
2.3.2 微织构粗糙表面织构区域的形貌特征仿真	29
2.3.3 具有微织构形貌的粗糙表面的形貌特征仿真分析	37
2.4 结合面表面形貌数据测量实验	42
2.5 本章小结	45
第 3 章 具有微织构形貌的结合面法向接触刚度研究	46
3.1 具有微织构形貌的结合面的接触模型	47
3.1.1 织构区域的接触状态以及参数计算	48
3.1.2 无织构区域的接触状态以及参数计算	48

3.2 具有微结构形貌的结合面法向静态接触刚度理论建模	51
3.2.1 单个微凸体的法向静态接触刚度	51
3.2.2 具有微结构形貌的结合面法向静态接触刚度	53
3.2.3 不同因素对微结构结合面的法向静态接触刚度的影响规律分析	56
3.3 具有微结构形貌的结合面法向动态接触刚度理论建模	59
3.3.1 单个微凸体的法向动态接触刚度	59
3.3.2 具有微结构形貌的结合面的法向动态接触刚度	61
3.3.3 不同因素对微结构结合面法向动态接触刚度的影响规律分析	62
3.4 本章小结	66
第4章 具有微结构形貌的结合面法向接触阻尼研究	69
4.1 机械结合面接触阻尼产生的机理	69
4.2 具有微结构形貌的结合面的法向接触阻尼理论模型	71
4.3 不同因素对微结构结合面法向接触阻尼的影响规律分析	75
4.3.1 微结构结合面法向接触载荷对法向接触阻尼的影响	75
4.3.2 微结构结合面的结构密度对法向接触阻尼的影响	76
4.3.3 微结构结合面动态变形的振动幅值对法向接触阻尼的影响	77
4.3.4 微结构结合面动态变形的频率对法向接触阻尼的影响	78
4.4 本章小结	80
第5章 具有微结构形貌的结合面有限元分析与实验研究	81
5.1 具有微结构形貌的结合面的非线性静力学有限元分析	81
5.1.1 具有微结构形貌的三维粗糙表面的生成	82
5.1.2 具有微结构形貌的粗糙表面的三维实体模型建立	83
5.1.3 具有微结构形貌的结合面的接触刚度的有限元分析	86
5.2 具有微结构形貌的结合面的动力学实验分析	93
5.2.1 实验原理与方法	94
5.2.2 实验器材	95
5.2.3 实验试件	97
5.2.4 实验步骤	98
5.2.5 实验结果	99
5.3 本章小结	102
参考文献	103

第 1 章 绪 论

装备制造业是为一个国家经济发展和国防建设提供技术装备的基础性支柱产业，是一个国家工业水平、国防实力等综合国力的重要体现^[1]。随着科学技术的不断进步，各种各样的机器人甚至无人工厂取代了人工，集成化、智能化已经成为现代制造业的发展趋势。在现代化的制造业当中，机器人作为基本单元得到了广泛的应用。因此，提高机器人及各种机械设备的精密度、稳定性等性能成为热门的研究方向。

在机器人以及其他机械设备中，根据功能和结构的需要，往往要设计一个一个的零部件，在这些零部件之间就形成了许多机械结合面。结合面的特性对整机的性能有很大的影响，刚度和阻尼就是结合面接触特性中两个主要的参数。研究表明，机床中结合面的接触刚度占机床总刚度的 60%~80%，结合面对机床整机性能的贡献高达 90%，而结合面的接触阻尼占整机阻尼的 50%~90%^[2]。结合面对整机性能影响巨大，因此如何优化结合面的接触特性就成了非常重要的课题。传统的提高结合面质量的方法是提高表面材料的性能及表面热处理工艺等，但从根本上来说，这些方法都只提高了表面材料的物理属性，而未考虑表面形貌特征对结合面接触特性的影响。近年来，表面织构技术成为国际研究热点，一些具有

特殊形貌特征的表面会产生一些特殊的属性，并且具有微结构形貌的粗糙表面的结构参数会对结合面间的接触特性产生影响。随着技术的进步，高精密、高转速、高稳定性的机械设备要求对整个机械系统的结合面的动态特性有更高性能的优化。因此，研究表面形貌特征以及表面微结构参数对结合面接触特性的影响规律成为迫切需要解决的关键基础课题。

本书以具有微结构形貌的典型接触界面为具体研究对象，研究分析微结构表面的形貌特征及结构参数对接触界面间动力学响应特性的影响，应用微观接触力学理论和统计理论，从微观尺度下的接触状态对宏观微结构结合面的接触状态进行推测。围绕理论建模、计算仿真、有限元分析及实验分析开展研究。

1.1 接触界面的动力学响应特性研究概述

在机械设计中，机械系统往往不会是一个整体，而是根据需要设计成不同的零部件，以达到性能、结构和安装的要求。这样，在机械零部件之间就形成了各种各样的机械结合面，这些粗糙的结合面使得机械系统在整体上不再具有连续性。同时，这些结合面在复杂载荷作用下会在多自由度方向上产生微幅振动，使其表现出既储存能量又耗散能量，既产生刚度又产生阻尼的本质特性^[3]。结合面所表现出的这种复杂的本质特性会对机械系统的整体性能产生重大的影响：一方面大大影响机械的加工精度以及使用功效；另一方面降低机械的使用寿命，对机械系统的动态特性、稳定性、响应速度等性能都有重要的影响^[4]。因此，优化机械结

合面间的接触特性对于提升机械系统精密度、提高整机性能有着非常重要的意义。几十年来,学者通过各种方法(理论建模、计算机仿真及实验分析等)研究机械结合面间的动力学响应特性,但仍没有完全揭示各种因素对结合面动力学响应特性的影响规律。

近十年来,微织构表面所表现出来的特殊属性,尤其是其在界面可控性方面的优越表现,使得表面织构技术受到学者的广泛关注。微织构表面独特的性能也引起越来越多学者的关注。随着科技的进步,机械系统向着轻量化的方向发展,运转速度和精密程度也在不断提高。优化提高结合面间的接触属性对于提高机械装备的精密度与稳定性等性能有着十分重要的意义,所以,在设计中考虑结合面的接触特性的时候,就需要考虑各种对结合面接触特性产生影响的因素。

综上所述,研究表面织构参数对结合面接触特性的影响规律,对提高机械系统动态性能、结构工作性能可靠性及机械装备的精密度与稳定性等性能,具有重要的理论与现实意义。本书将重点研究具有微织构形貌的接触界面之间的法向静态、动态接触刚度及法向接触阻尼,分析具有微织构形貌的粗糙表面上的织构参数对结合面之间接触特性的影响规律。

1.2 接触界面的动力学响应特性国内外研究现状

早在 20 世纪 40 年代,就有人提出机械系统中的结合面的特性会在很大程度上影响整机的性能。直到 1956 年,苏联的 Reshtov 和 Levina 才开始真正系统地研

究结合面间的接触问题^[5]。此后，国内外的众多学者都开始通过各种方法深入研究结合面间的特性。

几十年来，随着物理及化学等基础学科的发展，人类对微观现象的理解越来越深入，现代制造技术的发展，使得现代加工技术已经能够控制机械加工表面的微观形貌特征，而表面微观形貌在减摩抗磨、增摩、减振、抗黏附、抗蠕爬等多个领域取得了良好的效果。同时，表面织构技术作为一种提高界面性能的方法，引起了越来越多学者的关注。

1.2.1 机械结合面法向接触参数研究现状

接触刚度与接触阻尼是机械结合面动力学响应特性中的两个主要参数，其中，接触刚度表示在外力作用下结合面抵抗变形的能力，接触阻尼则表示结合面消耗能量的能力。它们的大小直接影响机械系统的精密度、稳定性等性能，研究机械结合面接触刚度及接触阻尼的影响因素也是相关学者的主要关注方向。

早在 20 世纪 50 年代，国外学者 Levina、Ostrovskii、Dollbey 就通过实验研究了结合面的法向静态特性^[6-10]。20 世纪 70~80 年代，欧洲国家及美国、日本等的学者对结合面动态特性进行了大量的研究。当时主要通过实验方法、理论方法及实验理论相结合的方法对结合面动态特性进行研究。

在实验方面，Konowalski 等学者建立了结合面静态、法向动态接触刚度实验平台，通过实验得到了结合面在载荷作用下的接触变性和接触压力呈非线性关系这一结果^[11]。Dollbey 等^[12]研究了平面导轨的接触特性，发现了法向加卸载曲线

之间存在迟滞现象。国内学者也对结合面的接触特性进行了实验研究, 张艺等^[13]设计了结合面法向接触阻尼和接触刚度的实验平台, 并研究了结合面介质对结合面接触特性的影响; 杨红平等^[14]通过实验验证了基于微凸体弹塑性变形和分形理论的结合面法向接触模型, 分析了结合面的形貌参数对结合面间法向接触参数的影响规律。

在理论研究方面, 1966 年 Greenwood 和 Williamson 提出了著名的 GW 接触模型^[15], 之后许多学者基于这一模型, 深入地研究了结合面间的接触特性, GW 模型直至今今天还广为使用。但是该模型没有考虑微凸体的相互作用, 仅适用于轻载荷条件下。之后, Whitehouse 和 Archard 研究了接触表面微凸体的峰高与峰顶曲率的相关性及联合分布概率密度, 基于一些假设提出了 WA 模型^[16]。为了使模型更加准确可靠, 一些学者在 GW 模型及 WA 模型的基础上, 更加深入地研究了结合面接触的问题。著名的有 Onion 和 Archard 提出的 OA 模型^[17]及 Majumdar 和 Bhushan 根据数学分析几何思想提出的 MB 模型^[18]。国内的学者也对此进行研究, 得到了许多有意义的结论, 比如 Zhao 等^[19]推导出微凸体变形的临界变形量, 在微凸体受载荷作用发生变形时, 其接触载荷会连续平滑地变化, 他们基于此提出了一种新的粗糙结合面接触模型 (ZMC 模型); Jiang 等^[20]在分形理论的基础上, 提出了结合面间的接触刚度分形模型 (JZZ 模型), 并验证了所建模型的有效性; 杨红平等^[14]基于 ZMC 模型, 利用分形几何理论, 考虑微凸体在接触载荷作用下变形的连续性, 建立了微凸体在各种变形状态下的接触刚度模型

(YANG 模型)。

机械系统中的结合面受到各种各样载荷的作用,使得结合面之间的接触状态非常复杂,各国学者通过各种方法研究结合面之间的接触特性,提出了考虑各种因素对结合面之间特性的影响的接触模型,但是这些模型都是建立在一些假设之上、忽略了一些因素而得出的结论。因此,对于结合面之间的接触状态的研究,还需要继续深入。

1.2.2 结合面接触特性影响因素研究现状

由于对结合面接触特性产生影响的因素非常多,且多为非线性因素,结合面间的接触特性变得非常复杂。机械系统的工作环境也各不相同,结合面同时受到各种载荷的作用,影响因素之间相互交错,使得结合面间的接触特性更加复杂化。对于影响结合面接触特性的众多因素,根据特征的不同,大致分为以下三大类^[21]。

(1) 与组成结合面的零件有关的因素,如零件的结构、尺寸等,零件的连接状态(比如螺栓连接等),以及零件的运动状态(零件之间是否有相对滑动等)。

(2) 与结合面的工作环境有关的因素,如是否受到动态载荷的作用及动态载荷的幅值、频率等,有无初始面压(主要指法向面压),以及结合面间有无介质(比如润滑油等)。

(3) 与组成结合面的表面有关的因素,如结合面的材质、热处理情况、加工方法,结合面上的形貌特征(比如表面粗糙度、形状误差等),以及结合面上的织构特征(比如织构类型、织构参数等)。

在这些因素当中，第一类影响因素是在零件设计的时候考虑的，在零件设计成形之后，就已经确定；而由于机械设备的功能以及工作地点、环境的制约，第二类因素只能相对改善；第三类因素则是在加工时决定的，表面加工方法以及加工质量的好坏，将直接影响结合面的接触特性，且随着表面技术的发展，结合面的接触特性更加具有可控性。

研究各种因素对结合面接触特性的影响规律，有目的地对结合面进行改造，成为众多学者努力的方向。张艺^[22]研究了铸铁结合面同时受到法向和切向载荷时的接触刚度特性，得出结合面间的接触刚度随着接触载荷的增大而增大，且表现出一定的非线性特征的结论。温淑花^[23]基于分形理论建立了考虑域扩展因子影响的结合面法向接触刚度分形模型，得出结合面间的法向接触刚度随着接触载荷和分形维数的增大而增大，但随着尺度系数的增大而减小的结论。傅卫平等在考虑微凸体弹塑性变形以及相互作用的基础上建立结合面间接触刚度模型，发现结合面间的接触刚度随着表面的塑性指数的增大而增大，且具有非线性特征^[24-25]。以上研究是根据实验获取的各种数据，或者依据结合面上的微观形貌特征，由微观到宏观，建立结合面接触特性的近似公式表达。

对结合面间各种因素的影响规律的表达还有列表形式的^[21]。以表格或者类似表格的形式给出在各种条件结合面上的各种影响因素的数值与结合面接触特性的对照。这种方法的优点是简单、直观，但由于客观因素限制，影响因素的对照数值只能是有限个，且中间值的获取也不方便，从而影响结合面接触特性的预测。

1.2.3 表面织构对接触界面影响研究现状

表面织构技术就是通过一定的技术手段,有目的地在结合面表面上加工出具有一定规律排布的微小凹坑或者凹槽,改变表面的形貌特征,使得新形成的表面具有与之前光滑表面不同的物理属性,从而达到改变表面属性的目的。与传统的表面处理技术(热处理、电镀等)相比,表面织构技术可控性高、无污染、节能减排、加工对象范围广,且加工方法简单、对加工环境要求低,成为许多学者研究的热门方向。

目前,对于表面微结构的研究主要集中在以下几个方面。

(1) 表面微结构对摩擦副的摩擦磨损的影响。研究表明,具有微结构形貌的结合面间的摩擦磨损性能要明显优于无结构的结合面。Pettersson 等^[26]通过研究发现,在润滑状态下,具有沟槽形貌的摩擦界面的润滑特性以及摩擦磨损性能得到明显改善。朱章杨等^[27]发现表面微结构对于干摩擦接触状态下的摩擦磨损有很好的改善作用。肖敏^[28]通过理论与实验两方面验证平面滑动接触条件下,织构密度为 5%时,摩擦副中的摩擦力减小了 38%,磨损量减小了 72%。Pettersson 等^[29]发现在润滑条件下,具有表面微结构形貌的结合面的磨损现象明显减少了。

(2) 表面微结构对表面润湿性能的影响。研究发现,具有特定结构形貌的表面表现出不同的亲水疏水性质。Extrand 等^[30]通过实验研究发现,与光滑表面相比,具有微结构形貌的表面上的液滴产生了非圆的湿润区域,并且随着织构间隔的减