

机械结合面接触特性参数的理论与实验研究综述

杨红平¹, 赵荣珍², 李维谦³

(1. 天水师范学院 机电与汽车工程学院, 甘肃 天水 741001;

2. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050; 3. 天水星火机床责任有限公司, 甘肃 天水 741024)

摘要: 机械零部件之间的接触性能对装备的静动态、振动、运动响应等性能有着重要影响。通过对该领域相关文献的分析和归纳, 总结出机械结合面特性参数的理论计算和实验方法的基本框架以及这些理论方法之间的相联系, 为机械动力学的建模和计算提供系统的研究思路。

关键词: 机械结合面; 接触特性参数; 建模; 实验

中图分类号: TH131.1

文献标识码: A

文章编号: 1671-1351 (2015) 02-0054-06

装备制造业是一个国家综合国力和国防实力的重要体现, 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技术装备, 它对推进经济结构战略性调整、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。^[1]而机床行业又是装备制造业的基础行业, 高档数控机床产品的研发、分析与设计对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。

机械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,^[2-3]机床整机刚度的50%取决于结合面刚度, 整机阻尼的50~80%来自结合面阻尼。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中迫切需要解决的关键基础课题。本文针对机械结合面特性参数理论计算和实验研究现状进行详细总结和归纳, 并指出了存在的不足。

1 国内外结合面研究现状

零件、组件、部件之间通过许多相互接触的相对运动表面或相对固定表面联接起来, 称为“机械结合面”。机械结合面之间存在着接触刚度和接触阻尼, 影响结合面刚度和阻尼的因素较多,^[4-9]如: 表面加工方法; 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; 面间介质等。目前对结合面基础特性参数的研究还处于不完善的阶段, 一般采用实验的方法, 通过设计专门的实验装置和测试系统, 获得有限配对副、材料、加

工工艺等条件下的基础特性参数。但是, 实验法对实验结果的精度要求很高, 由于结合面物理、微观和宏观的几何特性以及受力的复杂性, 导致实验数据不够准确, 并受到实验环境和条件的限制。因此, 国内外不少学者从结合面微观接触角度展开研究, 揭示结合面接触机理, 获取接触特性参数。

1.1 结合面表面形貌表征

机械结合面接触问题是两个粗糙表面间的接触。1966年, Greenwood和Williamson^[10]研究发现, 机械加工表面由高度近似服从Gauss分布的微凸体组成, 为粗糙表面接触理论研究奠定了坚实的基础。1970年, Whitehouse和Archard^[11]进行三个基本形式的假设, 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。1971年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^[12]基础之上。1973年, Onion和Archard^[11]结合W-A模型提出O-A模型, 建立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GW模型相一致。沈萌红等^[13]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接触时的接触性能。饶柱石等^[14]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。

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。Patir^[15]利用数字化生成仪

收稿日期: 2015-01-12

作者简介: 杨红平 (1974-), 男, 甘肃秦安人, 天水师范学院机电与汽车工程学院副教授, 博士。

基金项目: 天水师范学院中青年教师科研项目“基于分形几何的结合面向接触刚度计算模型研究”阶段性成果

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 和 Tonder^[16]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.

Willner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、非平稳等特性.之后,大量的研究表明:^[18-20]机械加工的粗糙表面都具有统计自仿射分形特征.因此,Weierstrass等^[11]利用分形函数用来模拟处处连续、处处不可导且具有自仿射分形特征的粗糙表面. Majumdar^[11]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^[21]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,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方法进行分析 and 计算. Zhou^[22]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,通过基于分形理论的机械工程表面研究了表面的摩擦和磨损. Srinivasan^[23]首次提出基于分形理论的形状公差的面特征描述方法,并考虑公差带内的轮廓结构特征. 冯丽^[24-25]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取得了一定的成果. 陈国安^[26]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. 杨红平^[27-31]等研究了工程表面轮廓截面曲线的磨削加工表面形貌的变化过程的分形维数,指出表面轮廓分形维数能有效地反映表面粗糙度.

1.2 结合面特性接触实验

由于结合面特性受到多种复杂因素的影响,因此,直接通过建立实验平台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,成为研究结合面接触特性的参数的方法之一.

国外学者 Levina、Ostrovskii、Dollbey^[14,33-34]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. Polacco^[35]针对平面导轨研究,结果发现在法向加载曲线和卸载曲线间存在迟滞现象. Coonnoley^[36]研究表明,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. Konowalski等^[37]建立了结合面动静法向接触刚度实验平台,通过一系列载荷与

位移分析表明,在法向接触载荷下,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.

国内许多学者对于结合面静态和动态特性进行了深入的研究,取得了许多有意义的成果. 黄玉美等^[38]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结合面是迟滞变形阻尼机理的本质所在. 伍良生等^[39]制作了大量的单位面积垫块,研究了基于单位面积垫块的基础特性数据在各种不同的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,为其以后的复杂结构的动态特性预测奠定了基础. 史熙等^[40-41]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.

1.3 结合面接触理论模型

人们尝试着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有两类理论体系,一类是以解析方法建模,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,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^[11]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,忽略了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,^[42-49]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,^[50]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.

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, 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,^[51-57]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

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, 两接触表面间的变形经历了线性弹性、弹塑性共存、塑性三种变形, 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特性.^[54-57] Hjink^[58] 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. 日本的吉村允孝^[55] 对结合面对立式车床的整机性能影响进行了研究. 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, 并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^[59] 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^[60] 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^[61] 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^[59-60] 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^[62] 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, 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上世纪 60 年代, 饶柱石等^[14] 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. 张学良等^[63] 提出了一种固定结合面的动态建模方法, 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. 黄玉美等^[7] 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^[64] 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; 王世军等人^[65] 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^[66-67] 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. 杨红平等^[68-70] 基于分形几何理论和接触力学理论, 用分形理论表征粗糙表面微凸体参数, 考虑微凸体由弹性变形向弹塑性变形以至最终向完全塑性变形转化的过程, 建立各变形阶段微凸体的接触刚度模型. 在此基础上, 提出机械结合面法向接触刚度计算模型, 该模型揭示了在不同的塑性指数下, 结合面法向接触载荷与法向接触刚度之间的关系, 结果表明模型与实验相吻合.

2 结合面接触研究存在的不足

综上所述, 在结合面特性参数和实验研究中取得了不少成果, 但还存在一定的不足.

2.1 结合面表面相貌理论

虽然传统模型如 G-W 模型等是基于粗糙表面形貌的结合面接触研究, 基于表面分形参数的研究较多, 并用基于分形理论计算了有限条件下的结合面特性参数, 但如何准确描述不同加工, 材料等粗糙表面参数, 粗糙表面的分形对结合面接触特性参数的影响等问题研究较少.

2.2 结合面接触特性实验

虽然用实验方法研究结合面特性参数比较多, 但是从已设计的实验装置结构讲, 还没有尽可能多

地排除由于实验装置结构带给实验结果,使得实验误差与实际结果较大,同时实验数据采集系统的精度不够;温度对结合面特性参数的影响的实验装置较少.

2.3 结合面接触特性参数理论模型

无论是传统的统计学方法还是分形方法,均假设表面峰高或者接触点数服从某种函数分布,这种假设函数无法考虑机械加工表面实际三维粗糙峰的尺寸及空间分布,不能全面描述粗糙表面的形貌特征,而在粗糙峰之间的变形行为分析方面,绝大多数学者将两个粗糙表面的接触简化为刚性平面和等效粗糙面的接触,并对此种等效模型下的接触力学行为进行了比较研究,但实际两个粗糙表面发生接触时,微凸体之间的接触不仅仅只是峰对峰完全对称接触.因此,现有在假设前提下的机床结合面接触特性参数的模型计算值与实际值相比存在一定的偏差.

参考文献:

- [1] 国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定[D].国发[2010]32号,2010.
- [2] PEN Y.BEARDS C.F.Identification of effective linear joints using coupling and joint identification techniques[J].ASME, Journal of Vibration and Acoustics,1998,120(2):331-338.
- [3] IBRAHIM R.A.PETIT C.L.Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners[J].Journal of Sound and Vibration,2005,279(35):857-936.
- [4] CIULLI E,FERREIRA L.A.PUGLIESE G.et al.Rough contacts between actual engineering surfaces Part I.Simple models for roughness description[J].Wear,2008,264:1105-1115.
- [5] SONBATY I.A.KHASHABA U.A.SELMY A.I.et al.Prediction of surface roughness profiles for milled surfaces using an artificial neural network and fractal geometry approach[J].Journal of materials processing technology,2008,200:271-278.
- [6] BUCZKOWSKI R.KLEIBER M.Elasto-plastic statistical model of strongly anisotropic rough surfaces for finite element 3D contact analysis[J].Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,2006,195:5141-5161.
- [7] FU W.P.HUANG Y.M.ZHANG X.L.et al.Experimental investigation of dynamic normal characteristics of machined joint surfaces[J].ASME Journal of Vibration and Acoustics,2000,122(4):393-398.
- [8] ERITEN M,LEE C.H.POLYCARPOU A.A.Measurements of tangential stiffness and damping of mechanical joints:Direct versus indirect contact resonance methods[Z].Tribology International,2012.
- [9] 张学良.机械结合面动态基础特性与应用[M].北京:中国科学技术出版社,2002.
- [10] MAJUMDAR A.TIEN C.L.Fractal characterization and simulation of rough surfaces[J].Wear,1990,136:313-327.
- [11] GREENWOOD J.A.WILLIAMSON J.B.Contact of nominally flat surfaces[J].Proceedings of Royal Society A,1966,295:300-319.
- [12] NAYAK P.R.Random Process model of rough surface[J].ASME, 1971,93(5):398-407.
- [13] 沈萌红.各向异性粗糙表面的接触性能研究[J].浙江大学学报,1990,57(5):647-654.
- [14] 饶柱石.粗糙平面接触刚度的研究[J].机械强度,1994,35(2):71-75.
- [15] PATIR N.A numerical procedure for random generation of rough contacts[J].Wear,1978,47:263-277.
- [16] HU Y.Z.TONDER K.Simulation of 3-D random surface by 2-D digital filter and Fourier analysis[J].International Journal of Machine Tools & Manufacture,1992,32:82-90.
- [17] WILLNER K.Elasto-plastic normal contact of three-dimensional fractal surfaces using halfspace theory[J].Journal of Tribology,2004,126:28-33.
- [18] ERITEN M.POLYCARPOU A.A.BERGMAN L.A.Physics-based modeling for partial slip behavior of spherical contacts[J].International Journal of Solids and Structures, 2010,47:2554-2567.
- [19] SEPEHRI A.FARHANG K.On elastic interaction of nominally flat rough surfaces[J].ASME Journal of Tribology,2008,130/011014:1-5.
- [20] JI C.C.ZHU H.JIANG W.et al.Running in test and fractal methodology for worn surface topography characterization[J].Chinese Journal of Mechanical Engineering,2010,23(5):600-605.
- [21] VANDENBERG S.OSBOME C.F.Digital image processing techniques,fractal dimensionality and scale-space applied to surface roughness[J].Wear,1992,159:17-30.
- [22] ZHOU G.Y.LEU M.C.BLACK D.Fractal geometry model for wear prediction[J].Wear,1993,170:1-14.
- [23] SRINIVASAN R.S.A form tolerancing theory using fractals and wavelets[J].Journal of Mechanical & Design,1997,119:185-192.
- [24] 冯丽,谢沛霖.基于分形几何的表面微观形貌模拟及粘着弹性接触计算研究[J].润滑与密封,2007,32(6):74-77.
- [25] 李成贵,张国雄等.分形维数与表面粗糙度参数的关系[J].工具技术,2007,31(12):36-38.
- [26] 陈国安,葛世荣,张晓云.磨合过程中表面形貌变化的分形表征[J].润滑与密封,1999,2:55-56.
- [27] 杨红平,傅卫平,王雯,等.小波系数表征机械加工表面分形特征的计算方法[J].仪器仪表学报,2010,31(7):1454-1459.
- [28] 周超,高诚辉.基于离散傅里叶变换的分形粗糙表面轮廓合成与研究[J].机械工程学报,2011,47(17):99-103.
- [29] GOERKE D.WILLNER K.Normal contact of fractal surface-

- es—Experimental and numerical investigations[J].Wear,2008,264:589–598.
- [30] 葛世荣,朱华.摩擦学的分形[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [31] BIGERELLE M.NAJJAR D.IOST A.Relevance of roughness parameters for describing and modelling machined surfaces [J].Journal of Materials Science,2003,38:2525–2536.
- [32] 宋森熠,王立华,薛二鹏.分形理论及其在机械结合面中的应用[J].机械,2008,35(10):1–4.
- [33] CIAVARELLA M.MUROLO G.DEMELIO G.Elastic contact stiffness and contact resistance for the weierstrass Profile[J].Journal of the Mechanics and Physics of Solids,2004,52(6):1247–1265.
- [34] WANG F S.BLOCK J.M.CHEN W.W.et al.A multilevel model for elastic–plastic contact between a sphere and a flat rough surface[J].ASME,Journal of Tribology,2009,131/021409:1–5.
- [35] POLACCO A.PUGLIESE G.CIULLI E.et al.Investigation on thermal distress and scuffing failure under micro EHL conditions[J].The Netherlands,2006,(8):321–332.
- [36] COONNOLEY R.CONNOLLY R,H.Determining the normal stiffness of joint faces[J].ASME,1967.
- [37] KONOWALSKI K.Experimental research and modeling of normal contact stiffness and contact damping of machined joint surfaces[J].Advances in Manufacturing Science and Technology,2009,33(3):53–68.
- [38] 张学良,黄玉美.机械结合面静态基础特性参数的建模及其应用[J].机床,1997,(11):8–10.
- [39] SHI X.ANDREAS A.A.Measurement and modeling of normal contact stiffness and contact damping at the meso scale [J].ASME,Journal of Vibration and Acoustics,2005,127:125–136.
- [40] SHI X.ANDREAS A.Investigation of contact stiffness and contact damping for magnetic storage head–disk interfaces [J].ASME,Journal of Tribology,2008,130/021901:1–9.
- [41] YOSHIMURA M.Computer aided design improvement of machine tool structure incorporating joint dynamic data[J].Annals of CIRP,1979,18(1):241–46.
- [42] SELLGREN U.BJORKLUND S.ANDERSSON S.A finite element–based model of normal contact between rough surfaces [J].Wear,2003,254(11):1180–1188.
- [43] 赵永武,吕彦明,蒋建忠.新的粗糙表面弹塑性接触力学模型[J].机械工程学报,2007,43(3):95–101.
- [44] GAO Y.F.BOWER A.F,KIM K.S.et al.The behavior of an elastic–perfectly plastic sinusoidal surface under contact loading[J].Wear,2006,261(2):145–154.
- [45] ALMQVIST A.SAHLIN F.LARSSON R.et al.On the dry elasto–plastic contact of nominally flat surfaces[J].ASME,Journal of Tribology,2007,40:574–579.
- [46] JENG Y.R.PENG S.R.Elastic–plastic contact behavior considering asperity interactions for surfaces with various height distributions[J].ASME,Journal of Tribology,2006,126:620–625.
- [47] CIAVARELLA M.GREENWOOD J.A,Paggi M.Inclusion of interaction in the Greenwood and Williamson contact theory [J].Wear,2008,265(5):729–734.
- [48] YEO C.D.KATTA R.R.Lee J.Y.et al.Effect of asperity interactions on rough surface elastic contact behavior Hard film on soft substrate[J].Tribology International,2010,43:1438–1448.
- [49] NOGUEIRA I.Robbe–Valloire F.Gras R.Experimental validations of elastic to plastic asperity–based models using normal indentations of rough surfaces[J].Wear,2010,269:709–718.
- [50] SEPEHRI A.FARHANG K.Closed–form equations for three dimensional elastic–plastic contact of nominally flat rough surfaces[J].ASME,Journal of Tribology,2009,131(4).
- [51] LIOU J.L.LIN J.F.A modified fractal microcontact model developed for asperity heights with variable morphology parameters[J].Wear,2010,268:133–144.
- [52] GOEDECKE A.JACKSON R.L.Mock R.A fractal expansion of a three dimensional elastic–plastic multiscale rough surface contact model[Z].Tribology International,2012.
- [53] YANG J.KOMVOPOULOS K.A mechanics approach to static friction of elastic–plastic fractal surfaces[J].ASME,Journal of Tribology,2005,127(2):315–324.
- [54] PEI L.MOLINARI J.F.et al.Finite element modeling of elasto–plastic contact between rough surfaces[J].Journal of the Mechanics and Physics of Solids,2005,53(11):385–409.
- [55] BRIZMERA V.KLIGERMANA Y.ETSIONA I.Elastic–plastic spherical contact under combined normal and tangential loading in full stick[J].Tribology Letters,2007,25(1):61–70.
- [56] 刘天祥,刘更,谢琴,等.二维自适应粗糙表面弹塑性接触模型[J].机械工程学报,2007,43(9):91–95.
- [57] YASTREBOV V.A.DURAND J.PROUDHON H.et al.Rough surface contact analysis by means of the Finite Element Method and of a new reduced model [J].Comptes Rendus Mecanique,2011,339:473–490.
- [58] HJINK J.Analysis of A milling machine: Computed results Versus Experiment Data[J].M.T.D.R,1973,14(1):58–61.
- [59] KARTAL M.E.MULVIHILL D,M.Measurements of pressure and area dependent tangential contact stiffness between rough surfaces using digital image correlation[J].ASME,Journal of Tribology,2011,44:1188–1198.
- [60] SHIRO B.SHUNSUKE H.Stiffness evaluation of contacting surfaces by bulk and interface waves[J].Ultrasonics,2007,47:123–129.
- [61] JIANG S Y.ZHENG Y.J.ZHU H.A contact stiffness model of machined plane joint based on fractal theory[J].ASME Journal of Tribology,2010,132.
- [62] TIAN H.L.LI B.A new method of virtual material hypothesis–based dynamic modeling on fixed joint interface in ma-

- chine tools[J].ASME,Journal of Tribology,2011,51:239-249.
- [63] 张学良,温淑花,兰国生,等.平面结合面切向接触阻尼分形模型及其仿真[J].西安交通大学学报,2011,45(5):74-77,136.
- [64] 尤晋闽,陈天宁.结合面法向动态参数的分形模型[J].西安交通大学,2009,43(9):91-94.
- [65] 王世军,赵金娟,张慧军,等.一种结合面法向刚度的预估方法[J].机械工程学报,2011,47(21):111-115,122.
- [66] 刘恒,刘意,王为民.接触界面法向刚度等效的新方法[J].机械工程学报,2011,47(17):37-43.
- [67] 李辉光,刘恒,虞烈.粗糙机械结合面的接触刚度研究[J].西安交通大学学报,2011,45(6):69-74.
- [68] 杨红平,傅卫平,王雯,等.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[J].机械工程学报,2013,49(1):102-107.
- [69] MEDINA S.OLVER A.V.DINI D.The influence of surface topography on energy dissipation and compliance in tangentially loaded elastic contacts.ASME,Journal of Tribology,2012,134.
- [70] MISRA A.HUANG S.P.Effect of loading induced anisotropy on the shear behavior of rough interfaces[J].Tribology International,2011,44:627-634.

[责任编辑 艾小刚]

Review on Mechanic Joint Contact Characteristic Parameters and Experiment

Yang hongping¹, Zhao rongzhen², Li weiqian³

(1. School of Electromechanics and Automobile Engineering, Tianshui Normal University, Tianshui Gansu 741001, China;

2. School of Mechanic & Electronic Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050, China;

3. Spark Machine Tool Co.Ltd, Tianshui Gansu 741024, China)

Abstract: The mechanic joints surface properties have an important effect to the static and dynamic characters, resistance to vibration, response agility. With analyzing and inducing the related research literatures, the fundamental framework and interrelationship of the mechanic joints contact parameters theory modeling and experimental methods were summarized to supply systematic research thinking to the modeling and simulation in mechanic dynamics.

Key words: machine joints; contact characteristic parameters; modeling; experiment