

DOI: 10.7652/xjtuxb201611018

粗糙表面确定性接触模型中峰的再定义

王庆朋, 张力, 杜宝程, 郑仁蔚
(重庆大学汽车工程学院, 400044, 重庆)

摘要: 为了解决目前不同微凸峰确定准则所等效的接触模型中可能存在峰的不连续、重叠、丢失而造成接触过程中缺失基准,从而导致粗糙表面在相互作用过程中不能进行有效计算等问题,在 3 点峰和 3 点谷的基础上,定义当 3 个连续峰的中间峰高于相邻峰时为真峰、当 3 个连续谷的中间谷低于相邻谷时为真谷,并对其进行匹配得到“谷-峰-谷”模式的微凸峰。通过一组粗糙表面,分析了不同的采样间隔和粗糙度对峰数量、平均峰半径和峰高度的影响,并与文献中不同的准则进行了对比。结果表明:不同微凸峰确定准则所等效的模型具有很大的不确定性;随着采样间隔的增加,峰数量明显减少,平均峰半径和峰高度增大,当采样间隔小于 $0.5\ \mu\text{m}$ 时,不同的确定准则影响减小;随着粗糙度的降低,峰数量略微增多,平均峰半径增大,平均峰高度减小。该模式的微凸峰为接触特性的演化提供了一个基准。

关键词: 粗糙表面;微凸峰;确定准则;峰半径

中图分类号: O343.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)11-0115-06

Re-Definition of Asperity-Peak for Deterministic Contact Model on Rough Surfaces

WANG Qingpeng, ZHANG Li, DU Baocheng, ZHENG Renwei
(College of Automotive Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: No baseline exists to evaluate the contact characteristics for deterministic contact model owing to the discontinuity, overlapping and missing of the asperity-peak. Based on the criteria of 3-point peak and 3-point valley, the middle higher peak or lower valley can be firstly identified as the true one in the three continuous peaks or valleys, and then a new asperity-peak of “valley-peak-valley” mode is defined. The proposed criterion is validated through a set of different surface profiles, and compared with other criteria found in the literature. The results show the huge influence obtained after using these different criteria. The number of asperity peaks decreases obviously with the increasing sampling interval, however, the mean asperity-peak radii and heights increase. The effects of different criteria on the calculated asperity-peak properties become almost negligible when the sampling interval is below $0.5\ \mu\text{m}$. The number of asperity peaks increases slightly with the decreasing surface roughness, and a similar tendency is found for the mean radii while the mean heights have an opposite effect. This criterion can provide a baseline for the evolution of the contact characteristics.

Keywords: rough surface; asperity peak; identification criteria; asperity-peak radius

收稿日期: 2016-03-01。 作者简介: 王庆朋(1987—),男,博士生;张力(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175530)。

网络出版时间: 2016-09-08 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160908.1104.012.html>

在机械系统中,界面处的表面形貌对系统的动态特性、摩擦学性能、表面完整性以及装配可靠性等都有着至关重要的影响。目前,研究粗糙表面接触模型的方法主要有概率统计、分形理论、数值计算和确定性理论等。Greenwood 等将粗糙表面视为一系列等半径且高度服从高斯分布的球体,提出了经典的粗糙表面与平板之间的接触模型^[1],这一理论得到了广泛的应用,但是该学者也意识到等半径建模方法的不足^[2]。Nayak 采用功率谱密度函数对随机表面进行表征^[3],该方法需要设计合理的滤波器,缺乏通用性。Majumdar 等首先基于 W-M 分形函数建立了 M-B 弹塑性接触模型^[4],由于分形参数的尺度独立性,这一方法也有了很大的发展,但是该方法只适用于具有分形特征的工程表面。文献[5-6]采用有限元的方法对粗糙表面进行弹塑性分析,该方法可以最大程度地逼近真实接触情况,Persson 对此指出,如果对一粗糙表面考虑到纳米尺度,可能包括约 7 个数量级,对应 10^{21} 个自由度,这样进行数值计算显然是不现实的^[7]。对真实粗糙表面上的微凸体进行简化是必要的,在已有文献中常见的有:球^[1]、椭球^[2]、圆柱^[8]、锥^[9]和正弦曲线^[9]等一些简单的形状,由于球状微凸体的理论分析和实验研究相比其他形状更容易实现,因此被更多的学者所采用。对于二维粗糙表面轮廓的确定性接触模型,Greenwood 提出了 3 点峰准则(3PP)^[10],利用中间点高于相邻两点的 3 点构建一个圆,类似地,Tomanik 提出 5 点峰准则(5PP)^[11],Pogačnik 等提出 7 点峰准则(7PP)^[12]。Poon 等在 3 点峰的基础上,增加了峰点与相邻两点高度差必须大于设定值这一条件(M3PP)^[13],Ghosh 等基于刚性平面和轮廓的两个

交点以及这两点之间的最大值,提出可变半径 3 点峰准则(VR3PP)^[9]。以上 5 个准则均是首先确定轮廓上的 3 个点,然后利用三角形外接圆确定半径和圆心位置。Bigerelle 等提出的准则和文献[9]类似,只是半径的计算方法不同^[14]。

随着测量仪器分辨率的逐步提高,粗糙表面的测量面临着一个问题,即所测量的参数是用一个有限的值来近似一个无限的值^[2],换言之,当采样间隔趋于无限小,微凸峰的数量将趋于无限多,峰半径和接触面积将趋于无穷小,接触压力将趋于无穷大。由此可见,目前粗糙表面确定性接触模型中峰的信息具有很大的不确定性。此外,以上准则所确定的模型中可能存在峰的不连续、重叠、丢失而导致接触过程中缺失基准等问题。鉴于此,本文对粗糙表面上的微凸峰进行重新定义,得到“谷-峰-谷”模式的微凸峰,并且与文献中不同的准则进行了对比,从而验证了本文所建准则的有效性。

1 确定性接触模型

1.1 微凸峰的确定准则

表面几何特征使界面的研究,包括机械、热、物理或化学等,能够更深入地探索微观本质。在确定性接触模型中就是如何定义微凸峰的数量、大小和位置。在一定采样长度和采样间隔情况下的微凸峰确定准则^[9-13]如表 1 所示。

通过表 1 可以看出,对于粗糙表面轮廓,由不同的采样间隔和峰高度可以得到不同的微凸峰信息,尤其在极限情况下,可以得到无穷多个半径为无穷小的微凸峰,这显然不符合实际接触。为了更合理、有效地确定微凸峰,本文借鉴了地貌的概念。所谓

表 1 微凸峰的确定准则^[9-13]

准则	描述	峰数量	峰半径	特点
3PP ^[10]	$z_i > z_{i-1,i+1};$ $z_i > m$	恒定	恒定	计算简单,分辨率相关,可能出现峰不连续、重叠和半径过小的情况。
5PP ^[11]	$z_i > z_{i-2,i-1,i+1,i+2};$ $z_i > m$	恒定	恒定	计算简单,分辨率相关,可能出现峰不连续、重叠和丢失的情况。
7PP ^[12]	$z_i > z_{i-3,i-2,i-1,i+1,i+2,i+3};$ $z_i > m$	恒定	恒定	同 5PP。
M3PP ^[13]	$z_i > z_{i-1,i+1}, z_i > m;$ $\min(\Delta z_{1,i}, \Delta z_{2,i}) > v_{\text{set}}$	可变	可变	计算相对简单,分辨率相关,可能出现峰不连续和丢失的情况。
VR3PP ^[9]	$z_i = \max(z_{l,i}, \cdots, z_{r,i});$ $z_{l,i}, z_{r,j} = v_{\text{set}}$	可变	可变	计算相对复杂,分辨率相关,可能出现峰不连续的情况。

注: m 为轮廓中线; z_i 为 i 点轮廓高度; Δz_i 为相邻两点之间的高度差; v_{set} 为准则中的设定值。

山峰或山谷,是因为其高于或低于四周,实际中并没有将山峰上的某块石头或山腰上的侧峰称为山峰(更严格地说,应该为主峰),山谷类似。山峰和山谷对应,即一峰对两谷。工程粗糙表面轮廓和地貌特征只是尺度上的差别。任何简化的微凸峰其实都包含着许多更小尺度的微凸峰,而针对这一问题,作者对单个微凸峰的接触特性进行了分析,并且提出混合弹塑性接触模型^[15]。

1.2 计算流程

- 对于二维粗糙表面轮廓,主要的计算步骤如下:
- (1)利用中间点高于相邻两点的 3 点确定轮廓上的一个峰,利用中间点低于相邻两点的 3 点确定轮廓上的一个谷;
 - (2)在步骤(1)的基础上,利用“峰上峰”再求一峰,“谷下谷”再求一谷;
 - (3)对步骤(2)的结果进行匹配,并且要求中间峰高度必须大于相邻两谷,从而实现“谷-峰-谷”模式的微凸峰。

在计算过程中,相邻微凸峰共用一个谷,这样就可以确保等效表面的连续性,避免重叠。计算流程如图 1 所示,等效粗糙峰的示意图如图 2 所示。

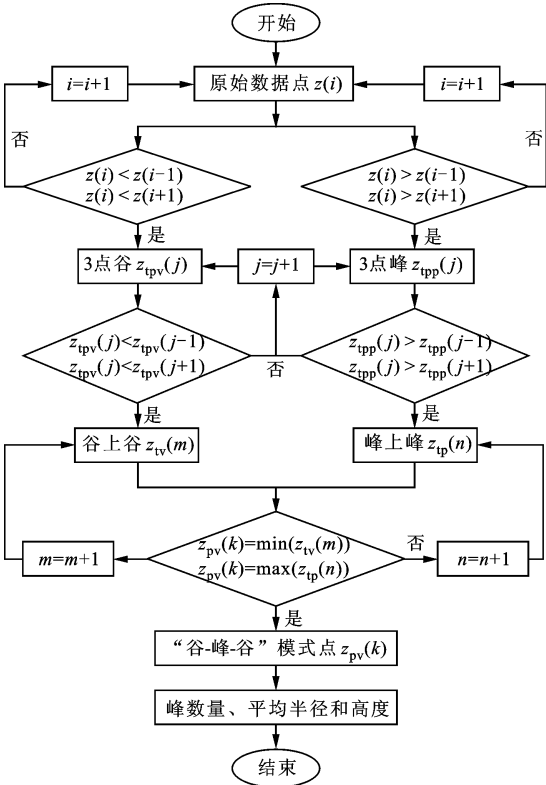


图 1 确定性接触模型中粗糙峰的计算流程

1.3 粗糙表面轮廓

目前,对于粗糙表面轮廓数据点的获得主要通

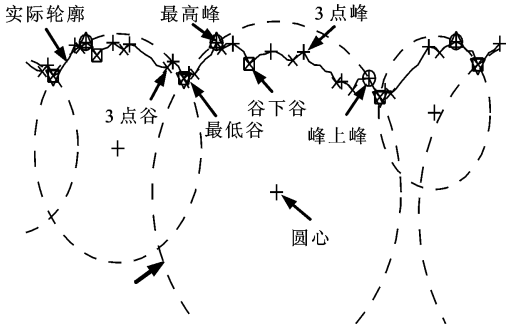


图 2 确定性接触模型中等效粗糙峰的示意图

过实验测量和计算机仿真,由于本文意在验证所建粗糙峰的确 定 准 则,不 失 一 般 性,采 用 分 形 理 论 获 得 一 组 二 维 表 面 轮 廓,当 采 样 长 度 为 800 μm、采 样 间 隔 为 0.5 μm 时 的 粗 糙 度 算 术 平 均 偏 差 R_a 和 均 方 根 偏 差 R_q 如 表 2 所 示,其 中 轮 廓 4 及 其 等 效 模 型 如 图 3 所 示。从 图 中 可 以 看 出,轮 廓 上 主 要 的 峰 和 谷 被 提 取 了 出 来,而 谷 又 是 相 邻 圆 的 交 点,这 克 服 了 3PP、5PP、7PP 和 VR3PP 准 则 结 果 中 出 现 的 等 效 峰 不 连 续、重 叠 和 丢 失 等 现 象,并 为 压 缩 过 程 中 面 积 或 体 积 演 变 提 供 了 一 个 基 准。

表 2 表面轮廓的粗糙度

参数	轮廓 1	轮廓 2	轮廓 3	轮廓 4	轮廓 5	轮廓 6	轮廓 7
$R_a/\mu\text{m}$	2.747	2.204	1.862	1.577	1.374	1.110	0.846
$R_q/\mu\text{m}$	3.376	2.712	2.293	1.944	1.695	1.371	1.045

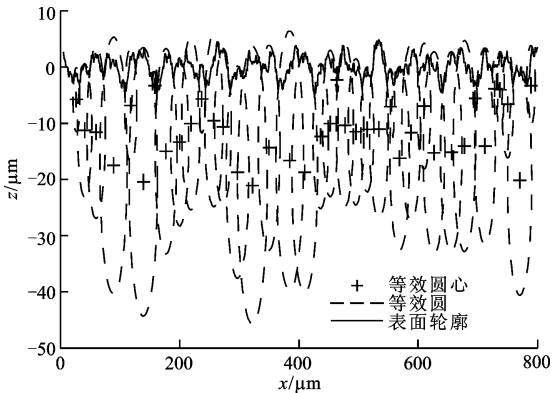


图 3 粗糙表面轮廓 4 及其等效峰

2 不同准则结果的比较

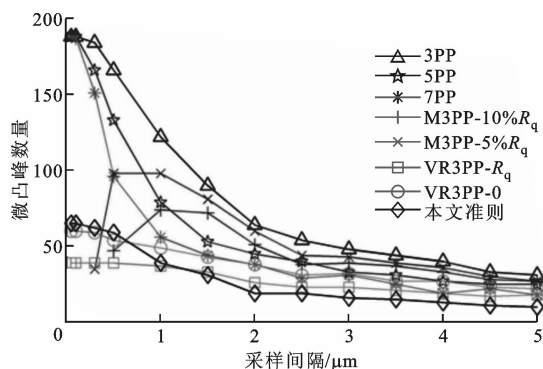
为了对不同准则的结果进行比较,采用了采样长度和高度 2 种对比方案:①同一表面轮廓不同的采样间隔;②同一采样间隔不同的表面轮廓。由于 M3PP 准则中设定值有不同的取值,根据文献[12-13]的对比结果,本文选取了 5% R_q 和 10% R_q ;在

VR3PP 准则中刚性平面有不同的位置高度,本文取 $0\ \mu\text{m}$ 和 R_q 。

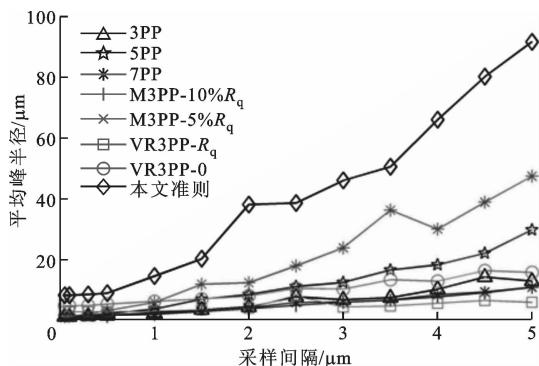
2.1 不同采样间隔的影响

为了分析不同采样间隔对微凸峰数量、平均峰半径和峰高度的影响,采用表面轮廓 4, 采样间隔分别为 0.05 、 0.1 、 $0.3\ \mu\text{m}$ 和在 $0.5\sim 5\ \mu\text{m}$ 之间每隔 $0.5\ \mu\text{m}$ 进行一次取值。

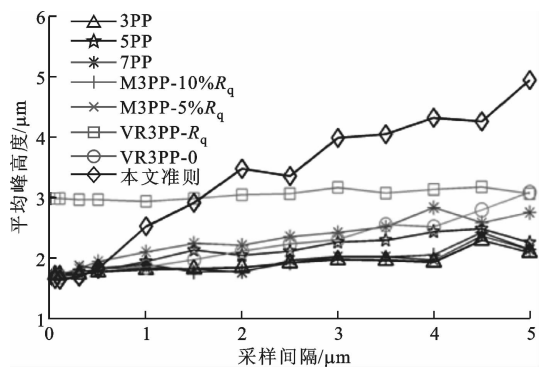
2.1.1 微凸峰数量 对于不同的微凸峰确定准则,峰数量、平均峰半径和峰高度随采样间隔的变化如图 4 所示。从图 4a 中可以看出,峰数量随着采样间隔的增加而减小,这就如同在一定区域内等效球体、



(a) 采样间隔对微凸峰数量的影响



(b) 采样间隔对平均峰半径的影响



(c) 采样间隔对平均峰高度的影响

图 4 采样间隔对不同准则等效峰结果的影响

晶胞和原子数目的变化规律一样。图中变化最为明显的是 3PP、5PP 和 7PP 准则计算的结果,从采样间隔 $0.05\ \mu\text{m}$ 的约 190 个峰降低到采样间隔 $5\ \mu\text{m}$ 的 30 个左右。VR3PP 准则中高度为 R_q 和 $0\ \mu\text{m}$ 的两个结果以及本文准则对应的结果变化较为平缓,本文准则对应的结果从开始的 65 个峰减少到最后的 10 个。M3PP 准则中 $5\% R_q$ 和 $10\% R_q$ 的两个结果在采样间隔大于 $1.5\ \mu\text{m}$ 时的变化趋势与其他准则的结果类似,但是在采样间隔小于 $1.5\ \mu\text{m}$ 时的结果开始变小,如果再小就不能确定微凸峰信息。

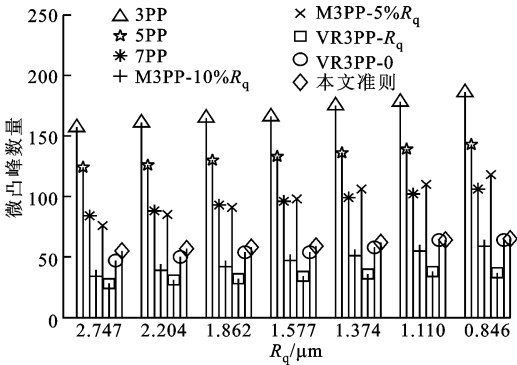
2.1.2 平均峰半径 微凸峰平均半径的变化规律如图 4b 所示,其变化趋势和峰数量的变化正好相反。从物理角度来看,基元的尺度减小,其数量肯定增加,原来表现为接触的,可能因为尺度的减小而发生分离,相应的接触面积必然减小,在同等受力条件下接触压力将变大,这与工程中细化晶粒的结果是一致的,即所谓的“越小越强”。在采样间隔为 $0.05\ \mu\text{m}$ 时,除了 M3PP 准则不能计算之外,其他准则的结果均在 $10\ \mu\text{m}$ 以内,3PP 准则的结果最小,为 $0.47\ \mu\text{m}$,从小到大依次为 5PP、7PP 和 VR3PP 准则所确定的结果,本文准则确定的平均峰半径最大,为 $7.54\ \mu\text{m}$ 。在采样间隔为 $5\ \mu\text{m}$ 时,不同准则之间差别变大,最为明显的是 5PP、7PP 和本文准则所确定的结果,其他准则均在 $20\ \mu\text{m}$ 以下。

2.1.3 平均峰高度 微凸峰平均高度的变化规律如图 4c 所示。从整体变化趋势来看,平均峰高度随着采样间隔的增加而变大,这可以理解为,减小间隔使原来更小尺度、相对较低的微凸峰成为新的等效峰。3PP、5PP 和 M3PP 准则确定的峰高度在 $1.5\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 之间变化,7PP 和 VR3PP 准则的 $0\ \mu\text{m}$ 位置的结果变化范围更大一些,本文准则确定的结果变化最为明显,而 VR3PP 准则 R_q 位置的结果变化较为平缓。

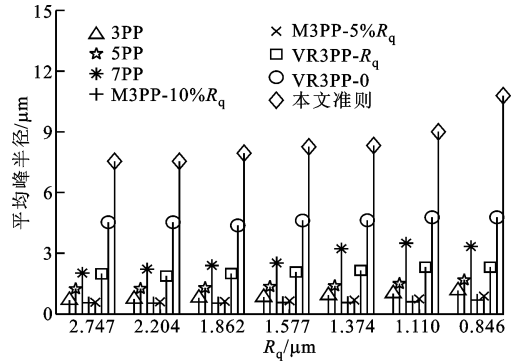
2.2 不同粗糙度的影响

为了分析不同粗糙度对微凸峰数量、平均峰半径和峰高度的影响,采用采样间隔为 $0.5\ \mu\text{m}$ 对 7 个表面轮廓进行分析。

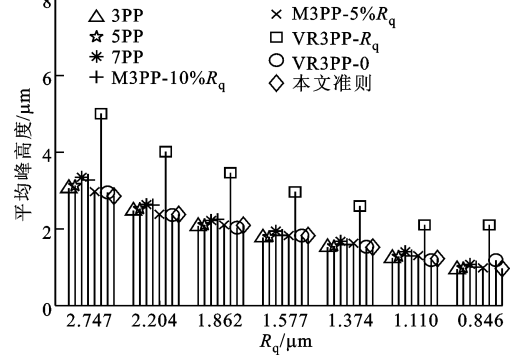
2.2.1 微凸峰数量 微凸峰数量、平均峰半径和峰高度随着粗糙度的变化如图 5 所示。从图 5a 中可以看出,对于不同的微凸峰确定准则,均表现为峰数量随着粗糙度的降低而增多。这是因为粗糙度的降低使表面轮廓变得平整,也就会有更多的点符合峰的确定准则。3PP 准则对应的微凸峰数量最多,从 R_a 为 $2.747\ \mu\text{m}$ 时的 157 个变为 R_a 为 $0.846\ \mu\text{m}$ 时



(a)粗糙度对微凸峰数量的影响



(b)粗糙度对平均峰半径的影响



(c)粗糙度对平均峰高度的影响

图 5 粗糙度对不同准则微凸峰结果的影响

的 186 个;3PP、5PP、7PP 和 VR3PP 对应结果的增长率近乎相同;M3PP 由于对 3PP 准则增加了限制条件,所以数量要小于 3PP、5PP 的结果,但增长率表现为最大,同时条件中设定值的增加使数量减小,5% R_q 的结果几乎是 10% R_q 的两倍;本文准则的数量增长率最小,从开始的 55 个增加到 65 个。

2.2.2 平均峰半径 从图 5b 可以看出,平均峰半径随着粗糙度的降低而变大,本文和 7PP 准则对应的结果变化最为明显,其他准则的结果几乎不变,同时本文准则确定的峰半径比其他准则的大。除了 7PP、VR3PP 的 0 μm 位置和本文准则峰半径计算的结果大于 2 μm 以外,其他的均小于 2 μm 。对于

M3PP 准则,当采样间隔小于 0.3 μm 时不能确定相应的微凸峰信息。

2.2.3 平均峰高度 从图 5c 可以看出,平均峰高度的变化趋势和峰数量、平均峰半径的相反,对于不同准则所对应的平均峰高度随着粗糙度的降低而降低,其变化范围为从开始的 3 μm 左右降低到 1 μm 左右,除了 VR3PP 准则 R_q 位置的结果,其他准则对应的结果呈现出几乎一致的趋势,可见在同一采样间隔下的微凸峰高度受不同准则的影响很小。

3 结 论

目前,不同微凸峰确定准则所等效的接触模型中可能存在峰的不连续、重叠、丢失而导致接触过程中缺失基准,不能合理地分析接触面积或接触力等的演化规律。本文对粗糙表面上的微凸峰进行了重新定义,最终实现“谷-峰-谷”模式的微凸峰,该准则能够提取表面轮廓中主要的峰和谷,并且使等效模型的表面轮廓连续,从而为接触过程中材料守恒提供了一个基准。通过一组粗糙表面轮廓与文献中不同的准则进行对比,验证了本文准则的有效性。

通过对比分析知,不同微凸峰确定准则所等效的模型具有很大的不确定性。随着采样间隔的增加,微凸峰数量随之减少,平均峰半径和峰高度增大,当采样间隔小于 0.5 μm 时,确定准则的影响减小;随着粗糙度的降低,微凸峰数量随之增多,平均峰半径变大,而平均峰高度减小。

参考文献:

[1] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P. Contact of nominally flat surfaces [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1966, 295: 300-319.

[2] GREENWOOD J A. A simplified elliptic model of rough surface contact [J]. Wear, 2006, 261(2): 191-200.

[3] NAYAK P R. Random process model of rough surfaces [J]. Journal of Lubrication Technology, 1971, 93(3): 398-407.

[4] MAJUMDAR A, BHUSHAN B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces [J]. Journal of Tribology, 1991, 113(1): 1-11.

[5] BRIZMER V, ZAIT Y, KLIGERMAN Y, et al. The effect of contact conditions and material properties on elastic-plastic spherical contact [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(18): 5736-5749.

- [6] 赵波, 戴旭东, 张执南, 等. 单峰接触研究及其在分形表面接触中的应用 [J]. 摩擦学学报, 2014, 34(2): 217-224.
ZHAO Bo, DAI Xudong, ZHANG Zhinan, et al. Single asperity contact and its use for fractal surface contact [J]. Tribology, 2014, 34(2): 217-224.
- [7] PERSSON B N J. Contact mechanics for randomly rough surfaces; on the validity of the method of reduction of dimensionality [J]. Tribology Letters, 2015, 58(1): 1-4.
- [8] 田红亮, 陈甜敏, 郑金华, 等. 平行轴圆柱副接触分析 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(1): 8-15.
TIAN Hongliang, CHEN Tianmin, ZHENG Jinhua, et al. Contact analysis of cylindrical pair with parallel axes [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(1): 8-15.
- [9] GHOSH A, SADEGHI F. A novel approach to model effects of surface roughness parameters on wear [J]. Wear, 2015, 338/339: 73-94.
- [10] GREENWOOD J A. A unified theory of surface roughness [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1984, 393: 133-157.
- [11] TOMANIK E. Modeling of the asperity contact area on actual 3D surfaces: SAE 2005-01-1864 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2005.
- [12] POGAČNIK A, KALIN M. How to determine the number of asperity peaks, their radii and their heights for engineering surfaces: a critical appraisal [J]. Wear, 2013, 300(1/2): 143-154.
- [13] POON C Y, BHUSHAN B. Surface roughness analysis of glass-ceramic substrates and finished magnetic disks, and Ni-P coated AlMg and glass substrates [J]. Wear, 1995, 190(1): 89-109.
- [14] BIGERELLE M, NIANGA J M, NAJJAR D, et al. Roughness signature of tribological contact calculated by a new method of peaks curvature radius estimation on fractal surfaces [J]. Tribology International, 2013, 65(3): 235-247.
- [15] 王庆朋, 张力, 尚会超, 等. 考虑应变硬化的混合弹塑性接触模型 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(2): 132-137.
WANG Qingpeng, ZHANG Li, SHANG Huichao, et al. Mixed elastic-plastic contact model considering strain hardening [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(2): 132-137.

(编辑 苗凌)

(上接第 114 页)

- [13] ZHU C, QIN G, ZHANG J. Implicit Chebyshev spectral element method for acoustics wave equations [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2011, 47(2): 184-194.
- [14] ZHANG R, QIN G, ZHU C. Spectral element method for acoustic propagation problems based on linearized Euler equations [J]. Journal of Computational Acoustics, 2009, 17(4): 383-402.
- [15] RIBNER H S. The generation of sound by turbulent jets [J]. Advances in Applied Mechanics, 1964, 8: 103-182.
- [16] PAPAGEORGAKOPOULOS J, TSANGARIS S. A numerical method for predicting acoustical wave propagation in open spaces [J/OL]. [2016-04-06]. <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2011/174031/abs/>.
- [17] CLAYTON R, ENGQUIST B. Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations [J]. Bulletin of Seismological Society of America, 1977, 67(6): 1529-1540.
- [18] 张荣欣, 秦国良. 用切比雪夫谱元方法求解均匀流场中的声传播问题 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(7): 120-124.
ZHANG Rongxin, QIN Guoliang. Chebychev spectral elements method for acoustic propagation problem in a uniform mean flow [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(7): 120-124.
- [19] LEE D J, KOO S O. Numerical study of sound generation due to a spinning vortex pair [J]. AIAA Journal, 1995, 33(1): 20-26.
- [20] 朱昌允, 秦国良, 徐忠. 谱元方法求解波动方程及影响其数值精度的相关因素 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(1): 56-59.
ZHU Changyun, QIN Guoliang, XU Zhong. Implicit spectral element method for wave equation and some factors influencing numerical accuracy [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(1): 56-59.

(编辑 赵炜 荆树蓉)