

DOI:10.7652/xjtuxb201411020

一种改进的粗糙表面法向弹塑性接触解析模型

徐超, 王东

(西北工业大学航天学院, 710072, 西安)

摘要: 针对现有各种粗糙表面接触模型存在的不足,提出一种改进的粗糙表面法向弹塑性接触解析模型,该模型同时考虑了微凸体完全弹性、弹塑性和完全塑性 3 种变形状态。对完全弹性和完全塑性变形阶段,采用经典弹性接触和塑性接触力学公式进行建模;对混合弹塑性变形阶段,提出一种利用低阶椭圆曲线插值进行解析建模的方法。进一步,利用概率统计分析方法建立了粗糙表面法向弹塑性接触模型。将该模型与公开文献中的其他模型进行了对比,结果表明:该模型能够描述出微凸体接触状态变量随法向接近量单调、连续和光滑的变化过程,并且能够对粗糙表面法向弹塑性接触行为进行建模;模型的预测结果和基于有限元结果的经验模型的预测结果接近。

关键词: 机械工程;粗糙表面;微凸体;弹塑性接触;椭圆曲线

中图分类号: O343.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)11-0115-07

An Improved Analytical Model for Normal Elastic-Plastic Contact of Rough Surfaces

XU Chao, WANG Dong

(School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: An improved analytical model for elastic-plastic contact in the normal direction of rough surfaces is developed. The problem can be considered in three separated phases: the elastic phase, the mixed elastic-plastic phase, and the fully plastic phase. In the elastic phase, Hertz's elastic contact formulations are used; in the fully plastic phase, classic fully plastic contact assumptions are used; and for the mixed elastic-plastic phase, the contact behavior is approximated by an elliptic curve interpolation. The contact model of the rough surfaces is then formulated using probability and statistics theory. The developed model is compared with other classical models. It is shown that the proposed model can describe the monotonic, smooth and continuous changing relationship of asperity's contact state variables with the normal contact displacement. The proposed model can model the contact behavior of the rough surface and agrees well with the finite-element based rough surface contact model.

Keywords: mechanical engineering; rough surface; asperity; elastic-plastic contact; elliptical curve

工程中任何接触表面都不是绝对光滑的。发生接触时,接触界面上存在着复杂的多尺度、多物理场和非线性的物理行为,而对界面进行直接的实验测量又存在着很多困难,因此,粗糙表面的接触问题一直是颇具挑战性的科学问题^[1-2]。

Greenwood 和 Williamson 假设接触表面分布着许多高度服从指定随机概率分布的等曲率球截状微凸体,且认为各微凸体之间的变形互不影响,利用

经典赫兹接触力学公式描述了单个微凸体与刚性光滑表面的接触规律,进而采用概率统计分析的方法建立了一个粗糙表面与光滑平面法向接触的力学模型^[3](称为 GW 模型)。GW 模型首先建立了基于微凸体随机分布假设和统计分析进行粗糙表面接触力学建模的方法框架。Greenwood 和 Tripp 进一步分析了两个粗糙表面的接触问题,指出服从高斯分布的两个粗糙表面的接触模型可以简化为一个等效粗糙表面与光滑平面的接触模型^[4]。但是,这些工作都局限于表面微凸体发生弹性接触的假定。

实际工程表面由于受载接触面积小,随着法向接近量的增大,微凸体必然会经历从完全弹性变形到部分区域出现塑性变形、以至发生完全塑性变形的演化过程。从连续介质力学的观点看,在演化过程中微凸体的接触状态变量的变化都是连续的和光滑的。从整个粗糙表面上看,在给定的法向接近量下,微凸体可能处于完全弹性、弹塑性变形或者完全塑性变形的状态。Chang 等人针对 GW 模型仅考虑弹性接触变形的不足,建立了考虑微凸体同时具有弹性和塑性变形的粗糙表面接触模型^[5](称为 CEB 模型)。CEB 模型仅考虑微凸体的完全弹性或完全塑性变形状态,没有考虑两者之间的弹塑性过渡状态,因而给出的接触载荷与法向接近量之间的关系在临界屈服点处并不连续。Zhao 等人对 CEB 模型进行了修正,提出了包含弹性、弹塑性和塑性 3 种变形状态的接触模型(称为 ZMC 模型)^[6]。该模型利用插值方法建立弹塑性变形状态下实际接触面积、平均接触压力与法向接近量之间的关系,但平均接触压力的变化在临界点处却不光滑。赵永武等进一步对 ZMC 模型进行改进,提出采用三次样板函数对接触状态的变化过程进行插值,给出了一种在临界点满足连续性和光滑性要求的法向接触模型^[7]。类似地,Brake 采用 Hermit 多项式对弹塑性变形阶段接触变量的变化过程进行插值,也获得了一种满足光滑性和连续性条件的粗糙表面接触模型^[8]。但是,由于样条函数和 Hermit 多项式的阶次较高,插值获得的弹塑性阶段平均接触压力与法向接近量之间的关系曲线会出现振荡,使得接触状态的变化过程并非是非单调的。

针对上述不足,本文通过引入一种新的低阶插值函数来对微凸体弹塑性变形阶段接触状态变量与法向接近量之间的变化关系进行建模,实现接触状态演化过程的单调、连续和光滑改变,并进一步利用概率统计分析的方法导出了一种改进的粗糙表面法

向接触模型。将本文建立的模型与经典模型进行了对比,验证了本文模型的有效性。

1 微凸体接触模型

文献[4]指出,表面服从高斯分布的两个粗糙表面的接触模型可以用一个等效粗糙表面与一个光滑平面的接触模型来代替,因此这里只考虑一个粗糙表面与一个光滑平面的接触问题。仍采用 GW 模型的基本假设^[3],即:①表面分布着很多顶端为球截状的微凸体;②每个微凸体的顶端半径相同;③微凸体的峰高随机变化且服从高斯分布;④不考虑微凸体之间的变形耦合。

图 1 给出了单个微凸体与刚性光滑平面接触的示意图。图中: R 为微凸体顶端半径; ω 为法向接近量; d 为光滑平面与微凸体平均高度参考平面之间的距离; z 为微凸体高度,且有 $z = \omega + d$; N 为总的法向接触载荷。根据赫兹接触力学理论,随着法向接近量的增大,微凸体将从完全弹性变形状态逐步演化到弹塑性变形状态,直至转化为完全塑性变形状态。下面分别考虑这 3 种状态下接触状态变量与法向接近量之间的关系。在以下的推导中,分别用下角标 e、ep 和 p 表示完全弹性变形阶段、弹塑性变形阶段和完全塑性变形阶段。

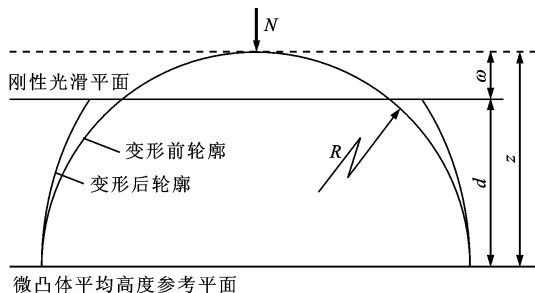


图 1 单个微凸体与刚性光滑表面接触示意图

1.1 完全弹性变形阶段

当接触载荷不太大或 ω 足够小时,微凸体发生弹性变形,这个阶段接触状态与 ω 之间的关系可以用赫兹弹性接触理论描述^[9]。

发生接触时,接触面积 A_e 与 ω 之间的关系为

$$A_e = \pi R \omega \quad (1)$$

法向接触载荷 N_e 与 ω 之间的关系为

$$N_e = \frac{4}{3} E^* R^{1/2} \omega^{3/2} \quad (2)$$

式中: E^* 为等效弹性模量, $E^* = E/(1 - \mu^2)$, 其中 E 为微凸体的弹性模量, μ 为泊松比。

由接触载荷和实际接触面积,可以得到接触面

的平均接触压力

$$P_e = \frac{4E^*}{3\pi} \left(\frac{\omega}{R} \right)^{1/2} \quad (3)$$

随着法向接近量的增加,微凸体将首先在部分区域出现塑性变形。文献[5]给出的与初始屈服点对应的临界法向接近量

$$\omega_1 = \left(\frac{3\pi kH}{4E^*} \right)^2 R \quad (4)$$

式中: k 为平均接触压力系数,已经证明当 $k=0.4$ 时,微凸体出现初始屈服^[10]; H 为材料的接触硬度。当 $\omega < \omega_1$ 时,认为微凸体发生弹性接触;当 $\omega \geq \omega_1$ 时,认为微凸体发生弹塑性或塑性接触。

根据式(3)和式(4),平均接触压力又可表示为

$$P_e = kH \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^{1/2} \quad (5)$$

1.2 完全塑性变形阶段

当接触载荷很大或 ω 足够大时,微凸体发生完全塑性变形,此时接触压力在整个接触面上都是均匀的,且等于材料的接触硬度值^[9],即

$$P_p = H \quad (6)$$

实际接触面积 A_p 可根据 Abbott 等的理论^[11]给出

$$A_p = 2\pi R\omega \quad (7)$$

因此,这个阶段的接触载荷

$$N_p = A_p P_p = 2\pi R H \omega \quad (8)$$

采用精细有限元模型进行数值模拟的结果已经验证了上述结论的正确性,由此给出的发生完全塑性接触时法向接近量的临界值 ω_2 为^[12-13]

$$\omega_2 = 110\omega_1 \quad (9)$$

因此,当 $\omega \geq \omega_2$ 时,认为微凸体处于完全塑性变形状态;当 $\omega_2 > \omega \geq \omega_1$ 时,微凸体中既存在弹性变形,也存在塑性变形,处于混合弹塑性变形状态。

1.3 弹塑性变形阶段

根据接触力学理论,当法向接近量增大到初始屈服临界点 ω_1 时,微凸体发生塑性屈服,此时塑性变形仅发生在接触体内部,其周围被体积较大的弹性变形区域所包围;随着法向接触载荷增大,塑性变形区逐步从内部向表面演化,最终当达到完全塑性变形临界点 ω_2 后,整个接触体处于完全塑性变形状态,接触面上接触压力处处相同,都为 H 。从连续介质力学的观点看,这个过程是连续、光滑和单调的^[6]。因此,实际接触面积和平均接触压力与法向接近量的关系在 2 个临界点处分别应满足

$$\left. \begin{aligned} A_{ep}(\omega_1) &= A_e(\omega_1); & A'_{ep}(\omega_1) &= A'_e(\omega_1) \\ P_{ep}(\omega_1) &= P_e(\omega_1); & P'_{ep}(\omega_1) &= P'_e(\omega_1) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} A_{ep}(\omega_2) &= A_p(\omega_2); & A'_{ep}(\omega_2) &= A'_p(\omega_2) \\ P_{ep}(\omega_2) &= P_p(\omega_2); & P'_{ep}(\omega_2) &= P'_p(\omega_2) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ZMC 模型采用插值方法将完全弹性变形阶段和完全塑性变形阶段联系起来,但其给出的平均接触压力与法向接近量间为对数关系,不能保证临界点处的光滑性。文献[7]和文献[8]对此进行了改进,实现了接触状态变量变化的连续和光滑,但是下面将说明,其采用高次插值函数所导出的弹塑性变形阶段的平均接触压力的变化并不是单调的。

(1)文献[7]的方法。赵永武等人采用三次样板函数插值建立的弹塑性变形阶段微凸体实际接触面积和平均接触压力随法向接近量的变化关系为^[7]

$$\left. \begin{aligned} A_{ep} &= A_e(\omega) + [A_p(\omega) - A_e(\omega)]f(\omega) \\ P_{ep} &= P_e(\omega) + [P_p(\omega) - P_e(\omega)]f(\omega) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中的样板函数形式为

$$f(\omega) = -2 \left(\frac{\omega - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \right)^3 + 3 \left(\frac{\omega - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \right)^2 \quad (13)$$

利用临界点处的连续性和光滑性条件可得

$$A_{ep} = \pi R \omega \left[1 - 2 \left(\frac{\omega - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \right)^3 + 3 \left(\frac{\omega - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \right)^2 \right] \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{ep} &= kH \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^{1/2} + \left[H - kH \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^{1/2} \right] \cdot \\ &\quad \left[-2 \left(\frac{\omega - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \right)^3 + 3 \left(\frac{\omega - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \right)^2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

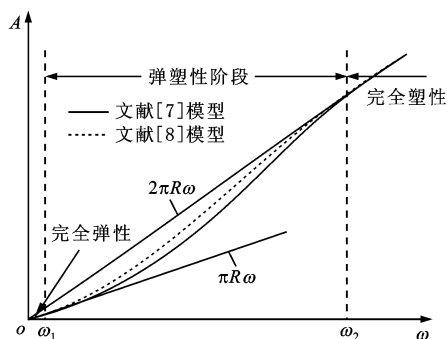
(2)文献[8]的方法。类似地,Brake 采用 Hermit 插值方法给出的弹塑性阶段接触面积和平均接触压力与法向接近量的关系为^[8]

$$A_{ep} = \pi R \left\{ \omega + \left(\frac{\omega - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \right)^2 \left[\omega_2 - \frac{\omega_2 + \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} (\omega - \omega_2) \right] \right\} \quad (16)$$

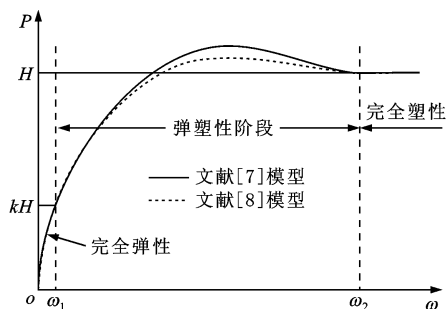
$$\left. \begin{aligned} P_{ep} &= \frac{kH}{2\omega_1} (\omega + \omega_1) + \frac{H(\omega - \omega_1)^2}{2\omega_1 (\omega_2 - \omega_1)^3} \cdot \\ &\quad [6\omega_1\omega_2 - 3\omega_1\omega_2k - 2\omega_2^2k + \omega_1^2k - 2\omega_1^2 + \\ &\quad (-4\omega_1 + 3\omega_1k + \omega_2k)\omega] \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

以 ω 为自变量,将式(14)~式(17)绘制于图 2 中。由图 2 可知,2 个模型都能实现接触状态的连续和光滑变化。然而,如图 2b 所示,模型给出的平均接触压力与法向接近量的关系在弹塑性阶段出现了非单调变化,甚至在部分区间超过了发生完全塑性变形时的平均接触压力值,这与接触过程中平均接触压力逐渐单调增大、最终达到常数值的情况不符。一般而言,多项式插值函数的幂次越高,插值结果的振荡就越明显,而由式(15)和式(17)可知,文献[7]和文献[8]中插值所导出的平均接触压力与

法向接近量之间的最高幂次分别为 3.5 和 3, 因此, 采用高次多项式插值正是导致平均接触压力的插值结果出现振荡的原因。



(a) 实际接触面积随法向接近量的变化关系



(b) 平均接触压力随法向接近量的变化关系

图2 文献[7]和文献[8]中给出的微凸体接触模型

(3) 本文的改进方法。针对上述不足, 为了使微凸体弹塑性变形阶段平均接触压力的变化连续、光滑和单调, 本文尝试利用阶次较低的椭圆曲线来对弹塑性阶段平均接触压力的变化进行建模。

如图3所示, 这里选取椭圆曲线的短半轴与过 ω_2 的垂线重合, 且在区间 $[\omega_1, \omega_2]$ 具有以下性质: ①曲线形状是上凸的; ②曲线是单调变化的; ③曲线斜率能够从 $+\infty$ 变化到 0。通过这样的选取, 椭圆曲线在临界点 ω_2 处函数值为 H , 斜率为 0, 因此自然能够保证在此临界点 ω_2 处的光滑和连续。使用的椭圆曲线为单调函数, 只需要利用临界点 ω_1 处的连续性和光滑性条件, 即可求解该曲线, 从而获得弹塑性变形阶段平均接触压力的变化关系。

选取的椭圆曲线方程可表示为

$$\frac{(\omega - \omega_2)^2}{a^2} + \frac{(P_{ep} - b)^2}{(H - b)^2} = 1 \quad (18)$$

式中: a 为椭圆曲线长半轴长度; $(H - b)$ 为椭圆曲线短半轴长度; b 为椭圆中心相对 ω 轴的偏移量。

根据式(5), 可求得临界点 ω_1 处的平均接触压力及其斜率

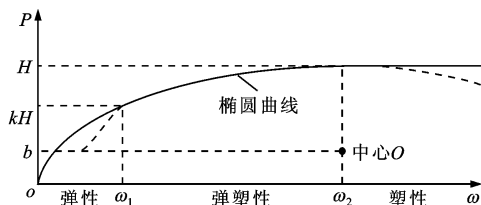


图3 利用椭圆曲线插值得到的平均接触压力示意图

$$\left. \begin{aligned} P_{ep} &= kH \\ P'_{ep} &= \frac{kH}{2\omega_1} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

根据连续和光滑性条件, 有

$$\left. \begin{aligned} \frac{(\omega_1 - \omega_2)^2}{a^2} + \frac{(kH - b)^2}{(H - b)^2} &= 1 \\ \frac{\omega_1 - \omega_2}{a^2} + \frac{(kH - b)}{(H - b)^2} \frac{kH}{2\omega_1} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

据此, 可以求解出

$$\left. \begin{aligned} a &= \left(\frac{2\omega_1(\omega_2 - \omega_1)(rk - k + 1)}{(2k - 2 - rk)k} \right)^{1/2} \\ b &= \frac{k^2 - 1 - rk^2}{2k - 2 - rk} H; \quad r = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2\omega_1} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

将 a, b 带回椭圆曲线方程中, 可以得到弹塑性变形阶段平均接触压力与法向接近量的关系为

$$\begin{aligned} P_{ep} &= H \left(1 - \frac{k^2 - 1 - rk^2}{2k - 2 - rk} \right) \left\{ 1 - \right. \\ &\quad \left. (\omega - \omega_2)^2 \left[\frac{2\omega_1(\omega_2 - \omega_1)(rk - k + 1)}{(2k - 2 - rk)k} \right]^{-1} \right\}^{1/2} + \\ &\quad \frac{k^2 - 1 - rk^2}{2k - 2 - rk} H \end{aligned} \quad (22)$$

弹塑性变形阶段的实际接触面积 A_{ep} 仍采用文献[8]中利用 Hermit 插值法给出的式(16)。

2 粗糙表面接触模型

假设微凸体峰高服从高斯分布, 即

$$\varphi(z) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right) \quad (23)$$

式中: σ 表示微凸体高度高斯分布的方差。

粗糙表面的实际接触面积、总接触载荷和平均接触应力是所有接触微凸体上的接触面积、接触载荷和平均接触应力之和。采用 GW 模型建模中提出的概率统计分析的方法, 在给定的法向接近量下, 分别对完全弹性、弹塑性变形和完全塑性变形的微凸体进行积分再求和, 可得到整个粗糙表面的接触状态变量

$$\left. \begin{aligned}
 A &= n_c \int_d^{d+\omega_1} A_e(\omega) \varphi(z) dz + \\
 &\quad n_c \int_{d+\omega_1}^{d+\omega_2} A_{ep}(\omega) \varphi(z) dz + n_c \int_{d+\omega_2}^{\infty} A_p(\omega) \varphi(z) dz \\
 N &= n_c \int_d^{d+\omega_1} N_e(\omega) \varphi(z) dz + \\
 &\quad n_c \int_{d+\omega_1}^{d+\omega_2} N_{ep}(\omega) \varphi(z) dz + n_c \int_{d+\omega_2}^{\infty} N_p(\omega) \varphi(z) dz \\
 P &= n_c \int_d^{d+\omega_1} P_e(\omega) \varphi(z) dz + \\
 &\quad n_c \int_{d+\omega_1}^{d+\omega_2} P_{ep}(\omega) \varphi(z) dz + n_c \int_{d+\omega_2}^{\infty} P_p(\omega) \varphi(z) dz
 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

式中: A 为粗糙表面的实际接触面积; N 为粗糙表面的总接触载荷; P 为粗糙表面的平均接触压力; n_c 为粗糙表面上的微凸体数量。

3 模型验证

3.1 归一化接触状态变量

为了将本文模型与其他相关模型进行对比,采用正则化方法对相关参数进行归一化处理。

法向接近量的归一化

$$\omega^* = \frac{\omega}{\omega_1} \quad (25)$$

微凸体接触状态变量的归一化

$$\left. \begin{aligned}
 P^* &= \frac{P_q}{H} \\
 A^* &= \frac{A_q}{\pi R \omega_1} \\
 N^* &= N_q \left(\frac{4}{3} E^* R^{1/2} \omega_1^{3/2} \right)^{-1}
 \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

式中: $q=e, ep, p$ 。

粗糙表面接触状态变量的归一化

$$\left. \begin{aligned}
 P^* &= \frac{P}{H n_c} \\
 A^* &= \frac{A}{\pi R \omega_1 n_c} \\
 N^* &= N \left(\frac{4}{3} E^* R^{1/2} \omega_1^{3/2} n_c \right)^{-1}
 \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

3.2 单个微凸体接触模型验证

为验证本文提出的改进模型,将本文的模型分别与经典 GW、CEB、KE 和 ZMC 模型,以及文献[7]和文献[8]的改进模型进行对比,结果如图 4 所示。

由图 4a、4b 可知:因为 GW 模型没有考虑塑性变形,所以给出的实际接触面积小于其他考虑了塑性变形的模型给出的面积;因为 CEB 模型仅考虑了弹性和塑性变形,所以在归一化法向接近量区间[1,

110]内给出的实际接触面积大于其他模型给出的面积。对于实际接触面积与法向接近量的关系而言,ZMC 模型与文献[7]模型给出的结果相同,本文模型与文献[8]模型给出的结果相同,由于它们都同时考虑了 3 种变形状态,所以给出的实际接触面积预测结果较为一致。由图 4c~4f 可知:由于未考虑塑性变形,GW 模型预测的平均接触压力远大于其他模型预测的压力;CEB 模型在临界点 ω_1 处的平均接触压力存在阶跃(从 kH 变化到 $3kH/2$);ZMC 模型的平均接触压力在塑性临界点 ω_2 处的斜率是不连续的;文献[7]、文献[8]和本文的模型都能保证 2 个临界点处接触状态的连续和光滑变化。然而,对比文献[7]和文献[8]的模型可知,只有本文模型给出的平均接触压力的结果在归一化法向接近量区间[1,110]内是单调的,文献[7]和文献[8]模型在此区间内的局部极值甚至远远超过了 GW 模型的预测结果。此外,图 4 中还列出了基于有限元数值模拟结果拟合得到的 KE 模型的结果。有限元弹塑性接触非线性分析可以更好地描述接触过程。在弹塑性变形阶段,本文模型和 KE 模型给出的平均接触压力的变化规律较为接近,显示出符合物理实际的单调变化过程。在归一化法向接近量大于 110 后,本文模型、ZMC 模型、文献[7]和文献[8]模型给出的结果都是一致的,这是因为在这一阶段它们都采用了相同的模型形式。因此,本文提出的微凸体接触模型能考虑完全弹性、弹塑性和完全塑性 3 种变形状态,较之其他模型能够更好地模拟出接触状态连续、光滑和单调的变化规律。

3.3 本文粗糙表面接触模型的验证

图 5 给出了本文粗糙表面接触模型与其他相关模型的对比。由图 5 可知,随着法向接近量增大,光滑平面和微凸体平均高度参考平面间的距离减小,实际接触面积、平均接触压力和总法向接触载荷都增大,各种模型的预测规律基本一致。特别是当平均接触距离较大时,法向接近量较小,微凸体主要发生弹性接触,各种模型的预测结果非常一致。随着法向接近量增大,微凸体发生塑性接触的数量增多,各种模型预测的接触状态变量随平均接触距离变化的关系出现了差别。对于实际接触面积,由于本文模型和文献[8]模型采用了相同的插值方法,所以预测结果一致,并和基于有限元结果的 KE 模型预测结果较为接近;对于平均接触压力,文献[7]和文献[8]模型在法向接近量很大时,预测的平均接触压力很小,而本文模型和 KE 模型的结果较为接近,预测

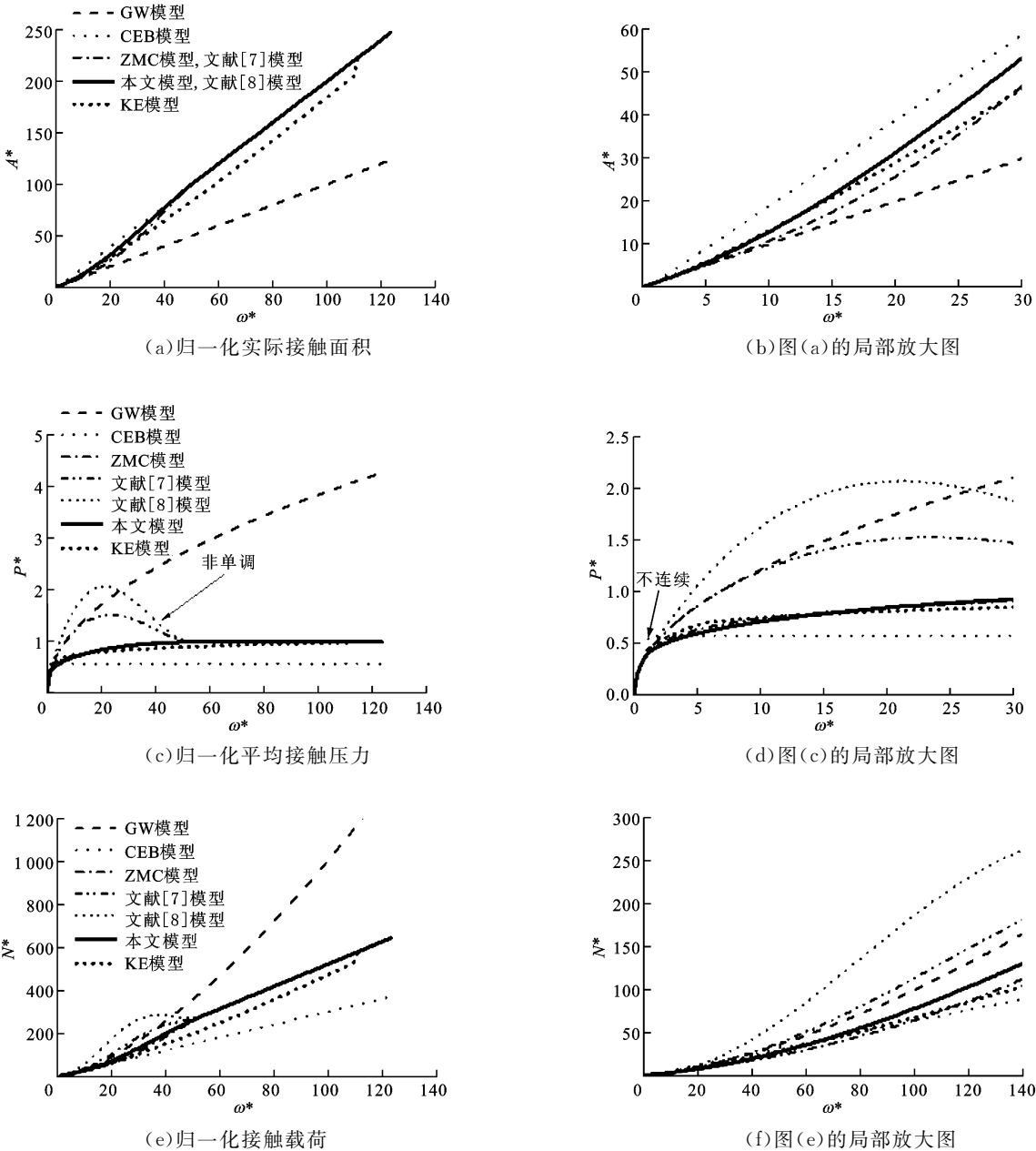


图 4 单个微凸体接触模型的计算结果对比

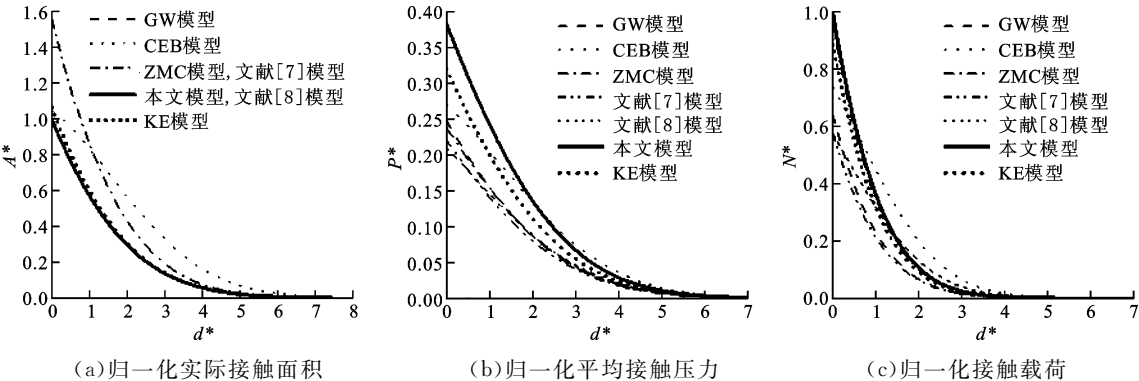


图 5 粗糙表面法向接触模型的计算结果对比

的平均接触压力值均较大;对于法向接触载荷和平均接触距离的关系,本文模型、ZMC 模型和 KE 模型给出了较为接近的结果,且曲线斜率都随平均接触距离的减小而增大,表明法向接触刚度随法向接近量的增大而增大。综上,相较于其他模型,本文模型与基于有限元仿真结果的 KE 模型更为接近,但 KE 模型是一种数值拟合模型,而本文模型是解析的,形式更简单。

4 结 论

本文提出了一种改进的粗糙表面法向弹塑性接触模型。该模型同时考虑了完全弹性、弹塑性和完全塑性 3 种变形状态,对完全弹性和完全塑性变形阶段分别采用经典弹性接触和塑性接触的解析公式进行建模,对弹塑性变形阶段采用椭圆曲线插值的方法进行建模。进一步,利用概率统计分析的方法建立了粗糙表面法向接触模型。通过与文献中的其他相关模型进行对比,可得到以下结果。

(1)本文模型描述的微凸体法向接触时接触状态量随法向接近量的变化过程是单调的、连续的和光滑的,克服了 ZMC 模型、文献[7]模型和文献[8]模型的不足。

(2)本文模型能够描述粗糙表面的法向接触行为,预测接触状态变量随法向接近量的变化规律。

(3)本文模型预测的粗糙表面接触状态的变化规律与其他经典模型接近,其中与基于有限元结果的 KE 模型更为接近,而本文模型是解析的,形式简单。

参考文献:

[1] 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.
LI Huiguang, LIU Heng, YU Lie. Contact stiffness of rough mechanical joint surface [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(6): 69-74.

[2] CARBONE G, BOTTIGLIONE F. Contact mechanics of rough surfaces: a comparison between theories [J]. Mecanica, 2011, 46(3): 557-565.

[3] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P. Contact of nominally flat surfaces [J]. Proc R Soc London, 1966, 295 (1442): 300-319.

[4] GREENWOOD J A, TRIPP J H. The contact of two nominally flat rough surfaces [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1970, 185 (1): 625-633.

[5] CHANG W, ETSION I, BOGY D B. An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces [J]. Journal of Tribology, 1987, 109(2): 257-263.

[6] ZHAO Y W, MAIETTA D M, CHANG L. An asperity micro contact model incorporating the transition from elastic deformation to fully plastic flow [J]. Journal of Tribology, 2000, 122(1): 86-93.

[7] 赵永武, 吕彦明, 蒋建忠. 新的粗糙表面弹塑性接触模型 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(3): 95-101.
ZHAO Yongwu, LÜ Yanming, JIANG Jianzhong. New elastic-plastic model for the contact of rough surface [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43 (3): 95-101.

[8] BRAKE M. An analytical elastic-perfectly plastic contact model [J]. International Journal of Solids and Structures, 2012, 49(22): 3129-3141.

[9] JOHNSON K L. Contact mechanics [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1995: 84-106.

[10] TABOR D. The hardness of metals [M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 1951: 44-66.

[11] ABBOTT E J, FIRE STONE F A. Specifying surface quality: a method based on accurate measurement and comparison [J]. Mechanical Engineers, 1933, 55: 569-572.

[12] KOGUT L, ETSION I. A finite element based elastic-plastic model for the contact of rough surfaces [J]. Tribology Transactions, 2003, 46(3): 383-390.

[13] WADWALKAR S, JACKSON R, KOGUT L. A study of the elastic-plastic deformation of heavily deformed spherical contacts [J]. Journal of Engineering Tribology, 2010, 224(10): 1091-1102.

(编辑 葛赵青)