

切向接触刚度测量方法的理论改进

刘意¹, 刘恒¹, 易均¹, 王为民²

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 东方汽轮机有限公司, 618000, 四川德阳)

摘要: 为了能够准确测量接触界面的切向刚度, 采用典型的两粗糙体接触系统, 对比分析了切向接触刚度的传统测量值和标准定义值, 发现了两者存在较大差别的本质原因是切向载荷施加面的偏移使接触系统整体发生弯曲, 以及所考察的相对切向位移包含了粗糙体自身的变形. 针对传统测量方法的不足, 提出了一种计算切向接触刚度的新方法, 将接触系统等效成一个接触界面和一个与系统相同大小的无界面块体, 由刚度的等效原理间接计算出切向接触刚度. 从典型算例中可以看出, 由新方法得到的切向接触刚度值比传统测量值更接近标准定义值, 因此验证了新方法的优越性和可行性.

关键词: 界面; 测量; 切向接触刚度; 等效

中图分类号: TH113; TH117 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)01-0066-04

Theoretical Modification for the Measurement Method of Shear Contact Stiffness

LIU Yi¹, LIU Heng¹, YI Jun¹, WANG Weimin²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Dongfang Turbine CO. Ltd., Deyang, Sichuan 618000, China)

Abstract: To measure interfacial shear stiffness precisely, typical two-rough-body contact system is considered to analyze the traditional measured value and standard-defined value respectively. The essentiality of the significant differences between the two values is revealed-the offset of shear loading surface leads to the overall bending of contact system; the investigated relative shear displacement contains the deformation of rough body. Aiming at the weakness of the traditional measurement, a new method is proposed to evaluate shear contact stiffness. The contact system is equivalent to a contact interface and a non-interface block with the same size. Following the principle of stiffness equivalence, shear contact stiffness is calculated indirectly. The newly calculated shear contact stiffness gets closer to the standard-defined value than the traditional measured one, thus the superiority and experimental feasibility are verified.

Keywords: interface; measurement; shear contact stiffness; equivalence

接触界面广泛存在于各种工程实际的组合结构之中, 其切向接触刚度的研究一直被广泛关注. 目前, 相关的理论研究主要沿解析和数值两条路展开: ① Reese、Olofsson 和 Sevostianov 等人^[1-3] 在

Greenwood-Williamson 模型^[4] 的基础上, 对球体、椭球体等简单几何体进行了切向接触分析, 成为目前研究粗糙面切向接触性能的常用方法, 但由于这些研究都是假设接触的一方为刚性光滑平面, 和工

收稿日期: 2011-05-24. 作者简介: 刘意(1986—), 男, 博士生; 刘恒(通信作者), 男, 副教授. 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB707700); 国家自然科学基金资助项目(51075315); 国家科技重大专项资助项目(2010ZX04014-015); 云南省科技计划资助项目(20110429).

网络出版时间: 2011-11-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20111110.0835.001.html>

程实际存在较大差异,因此限制了它们的适用性;② Brizmera 等人^[5]利用有限元方法分析了弹塑性球体与平面之间的切向接触问题,但没有考虑到接触表面形貌以及接触体塑性的影响. 这些理论研究虽然有局限性,但无疑深化了人们对界面切向接触问题的认识.

从实验测量的角度,界面切向接触的研究不仅要揭示其一般机理,还要测得准确的切向接触刚度. 传统的测量方法大都建立在 Berthoud 等人^[6]实验的基础上,即逐步施加切向载荷,然后通过考察两接触体的相对切向位移来获得切向接触刚度,其实验值与标准定义值的一致性这类方法准确与否的重要标志. 为此,本文采用典型的两粗糙体接触系统,在理论上对比分析了传统测量和标准定义下的切向接触刚度,发现了传统方法的不足及其诱发原因,进而对接触系统进行刚度等效,提出了计算切向接触刚度的新方法,并分析了该方法相对于传统方法的优势. 最后,通过算例验证了这种新方法用于实际测量的可行性,从而为更加准确地测量切向接触刚度提供了参考.

1 传统切向接触刚度测量方法

1.1 传统切向接触刚度测量方法的不足

图 1 是一个典型的两粗糙体(粗糙体指的是表面凸出体及其下层材料)接触系统. 通过考察 P_t 作用下的 x_t ,可得出该系统的标准切向接触刚度

$$K_t = - \frac{dP_t}{dx_t} \tag{1}$$

然而在实际测量 K_t 的过程中,由于粗糙均值面是虚拟的,使得切向载荷无法施加其上,而且两均值面的距离较小(微米级),以至于很难标记这 2 个面之间的相对切向位移,为便于测量,传统实验采用了如图 2a 所示的方法^[6].

图 2a 中的粗糙体 1 与基座之间、粗糙体 2 与基座之间均通过环氧树脂粘合剂粘接,法向载荷施加

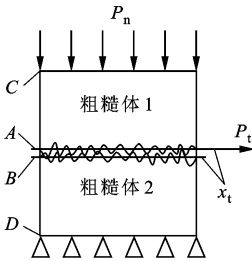
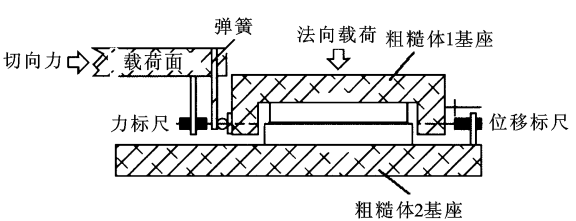
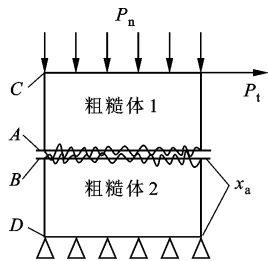


图 1 两粗糙体接触系统



(a)传统实验装置图



(b)传统实验示意图

x_a : A、D 间的相对切向位移

图 2 切向接触刚度的传统测量试验及其装置示意图

在粗糙体 1 基座上,切向力通过粘合剂施加在粗糙体 1 的上表面,但位移标尺与粗糙体 2 基座是一个整体,其标记的实际上是粗糙体 1 与粗糙体 2 基座之间的相对切向位移. 将 P_t 和 x_a 代入式(1),可以得出应用切向接触刚度 K_a .

显然, K_t 与 K_a 在理论上存在差异,为研究这一差异,并考虑粗糙体尺寸的影响,本文利用有限元方法对图 3 所示的 2 种切向接触刚度计算模型进行了分析,其结果如图 4 所示. 其中,模型为理想弹塑性材料,且两粗糙体尺寸完全相同,粗糙面上的尖点服从高斯分布,模型参数如表 1 所示. 由图 4 可以看出, K_a 比 K_t 小得多,因此传统的切向接触刚度测量方法在理论上存在明显的不足.

1.2 传统测量方法存在不足的原因

传统测量方法在切向接触刚度标准定义的基础上改变了 2 点:①将切向载荷施加面从 A 面移至 C 面;②所考察的相对切向位移由 x_t 变为 x_a . 本文将

表 1 两粗糙体的接触系统模型参数

弹性模量/GPa	200
屈服极限/MPa	500
泊松比	0.3
密度/kg·m ⁻³	7 800
粗糙度/ μm	0.8
凸峰密度/mm ⁻²	3 025
P_n /MPa	300
P_t /MPa	0~32
摩擦系数	0.1

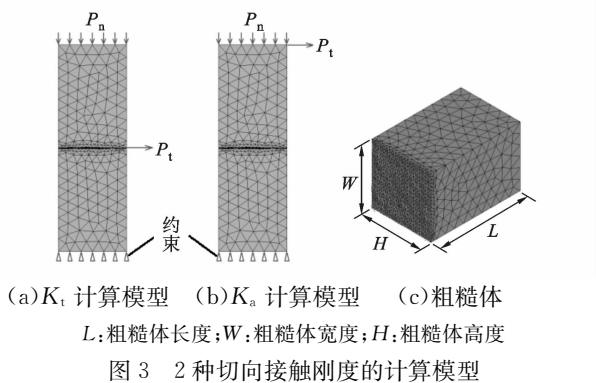


图 3 2 种切向接触刚度的计算模型

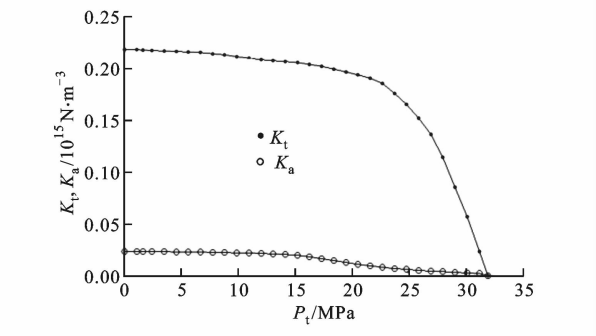


图 4 2 种切向接触刚度的对比曲线

从这 2 个方面研究传统测量方法存在的不足.

图 5 给出了 2 种计算模型在 $P_n=300\text{ MPa}$ 、 $P_t=32\text{ MPa}$ 时的应力 σ 变形情况. 从图 5 所示的计算模型的应力变形中可以看出: ① K_t 计算模型在 P_t 为 32 MPa 的条件下, 两接触面发生了一定错动, 这属于典型的由切向载荷造成的界面滑移现象; ② K_a 计算模型在 P_t 为 32 MPa 时, 两接触面不仅发生了一定错动, 而且整体模型产生了一定弯曲. 这是因为施加切向加载之后, 粗糙体 1 受到的法向反力 P'_n 与 P_n 相互抵消, 而 P_t 与摩擦力 f 之间产生了一个力偶 (见图 6), 该力偶使得粗糙体 1 发生了顺时针翻转, 随后 P_n 的作用方向发生了偏斜, 使得整体模型受到偏压而产生弯曲; ③ K_t 、 K_a 计算模型的 σ 分别为 $5.7\sim 661.8\text{ MPa}$ 和 $38\sim 558.3\text{ MPa}$, 这 2 种情况的最大值都超过了屈服极限值 (500 MPa).

图 7 给出了 2 种计算模型在整个切向加载过程中 x_t 、 x_a 的变化情况. 由图 7 可以看出, x_a 明显大于 x_t , 这是由于在施加 P_t 后, x_a 不仅包含了 x_t , 而且还包含了粗糙体 2 自身的切向位移, 因此使得 x_a 比 x_t 大得多, 也使 K_a 比 K_t 小得多 (见图 4).

传统的切向接触刚度测量方法在理论上存在不足的原因: ①切向载荷施加面的偏移使得接触系统整体发生弯曲; ②所考察的 x_a 包含了粗糙体 2 自身的切向位移, 使得计算结果不准确. 另外, 该模型中接触体的长宽比为 $2:1$, 这种情况在实际测量中是

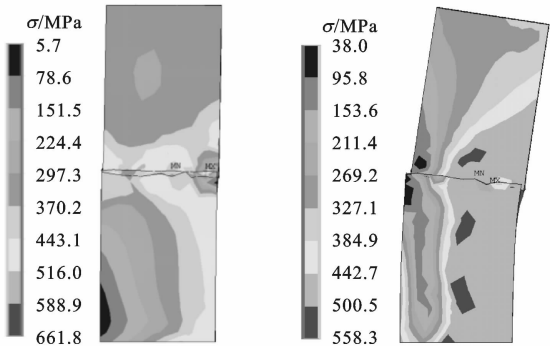


图 5 2 种计算模型的应力分布

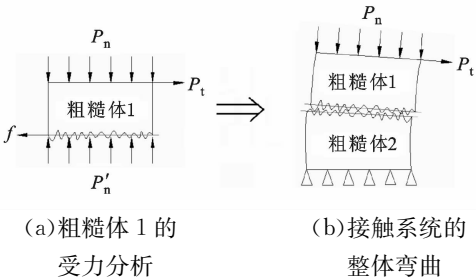


图 6 切向加载时接触系统的相关分析状况

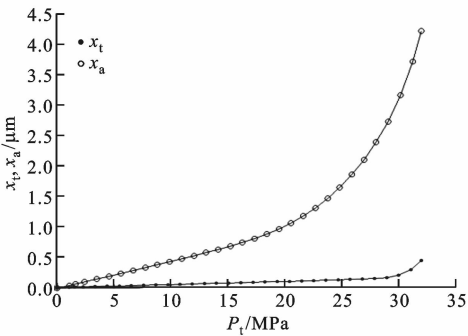


图 7 2 种相对切向位移的对比曲线

可能存在的, 但选取该比例的接触体模型是为了在满足实际测量的条件下, 突出 K_a 与 K_t 的本质差别.

2 切向接触刚度测量的理论改进

由切向接触刚度的对比分析可知, 传统实验虽然可操作性强, 但其测量结果不够准确, 于是本文在保留传统方法优点的基础上, 采用等效刚度的思想, 间接地获得较为准确的切向接触刚度.

2.1 计算切向接触刚度的新方法

仍以典型的两粗糙体接触系统为例, 其整体的切向刚度 K_w 可以等效为一个与其等大小的无界面块体的切向刚度 K_b , 以及接触界面的切向刚度 K_c . (见图 8), 本文将 K_c 称为等效切向接触刚度.

将 x_w 、 x_b 代入式 (1) 替换 x_t , 即可计算得出

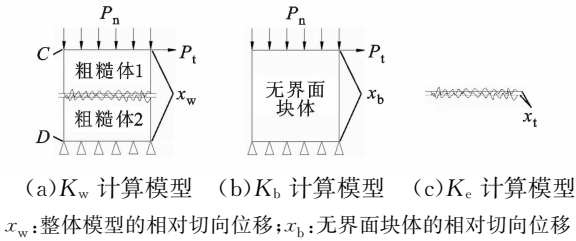


图 8 接触系统的动力等效状况

K_w 、 K_b ,然后根据 K_w 、 K_b 、 K_e 的串联关系得出

$$1/K_w = 1/K_b + 1/K_e \quad (2)$$

$$K_e = K_b K_w / (K_b - K_w) \quad (3)$$

为在 K_w 中去除 K_b 的影响以获得 K_e ,实际上就是在系统的切向刚度中削减其整体弯曲带来的影响,将不含弯曲效应的切向接触刚度保留下来。

2.2 新方法的可行性验证

为验证新方法应用于实际测量的可行性,本文仍利用有限元方法建立了如图 9 所示的模型,并将计算后的 K_e 与 K_t 、 K_a 进行了对比,其结果如图 10 所示。从图 10 中可以看出,等效切向接触刚度明显比应用切向接触刚度更接近标准切向接触刚度,这是因为 K_e 不仅削减了接触系统的弯曲效应,而且考察的是两粗糙均值面之间的相对切向位移。需要指出的是,改进之后的 K_e 没有和 K_t 完全重合,这可能是因为 K_e 、 K_t 计算模型的接触状态不同所导致的,因此还有待做进一步的研究。

从整体的改进效果上看,新方法在理论上是可

行的,并可以方便地用于实际测量。首先,按照传统的测量方法测出载荷作用面与约束作用面之间的相对切向位移,以得到整体切向刚度。然后,测量与原系统等大小的无界面块体的刚度。最后,通过刚度等效的关系获得等效切向接触刚度。这种建立在刚度等效基础上的新测量方法,不仅保留了传统测量方法的优点,而且在理论上更接近标准切向接触刚度,从而达到了改进传统测量方法的目的。

3 结 论

本文对传统的切向接触刚度测量方法进行了理论研究,找到其中存在的问题,并从测量理论方面提出了切向接触刚度的新计算方法,主要结论如下。

(1)传统测量切向接触刚度的方法在理论上与标准定义的切向接触刚度存在较大差距。

(2)传统测量方法存在不足的原因,一方面在于切向加载面的偏移使得接触系统整体受到法向偏压而产生弯曲;另一方面,其所考察的相对切向位移因包含了粗糙体自身的变形,而导致计算出的切向接触刚度变小。

(3)计算切向接触刚度的新方法从理论上克服了传统方法的 2 个弊端,该方法的可行性验证为更加准确地测量切向接触刚度提供了依据。

参考文献:

[1] JONES R E. A Greenwood-Williamson model of small-scale friction [J]. Journal of Applied Mechanics, 2007, 74: 31-40.

[2] OLOFSSON U, HAGMAN L A. A model for microslip between flat surfaces based on deformation of ellipsoidal elastic bodies [J]. Tribology International, 1997(30): 599-603.

[3] SEVOSTIANOV I, KACHANOV M. Normal and tangential compliances of interface of rough surfaces with contacts of elliptic shape [J]. International Journal of Solids and Structures, 2008(45): 2723-2736.

[4] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P. Contact of nominally flat surfaces [J]. Proceedings of the Royal Society of London: Series A, 1966, 295(1442): 300-319.

[5] 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.

[6] BERTHOUD P, BAUMBERGER T. Shear stiffness of a solid-solid multicontact interface [J]. Proceedings, Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1998, 454 (1974): 1615-1634. (编辑 管咏梅)

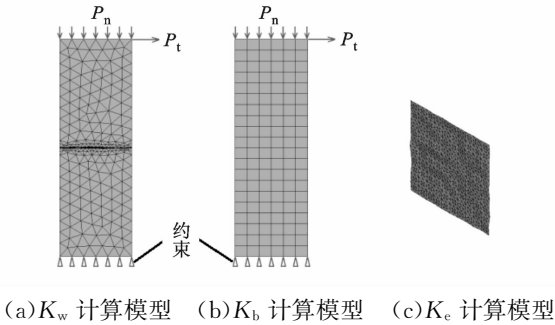


图 9 等效切向接触刚度的计算模型

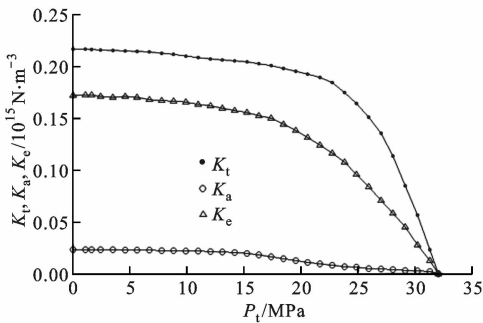


图 10 3 种切向接触刚度的对比曲线