

小表面藏大乾坤：破解粗糙表面“接触态”精准计算难题

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/40749.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

小表面藏大乾坤：破解粗糙表面“接触态”精准计算难题。精密制造里的隐形战场

在高铁齿轮箱、航空发动机、精密机床等高端装备中，两个金属零件看似紧密贴合，但在微观尺度下，真实接触的只是表面那些凹凸不平的微凸体峰顶。这个真实接触面积的大小，直接决定了装配体的刚度、密封性、磨损速度和服役寿命。然而，精确计算真实接触面积一直是固体力学和摩擦学领域中的老大难。

重庆交通大学钱骥团队在ENGINEERING Structure and Civil Engineering期刊发表题为A computational method for equivalent area distribution characterized by the normal contact behavior of two rough surfaces的研究论文。研究组提出了一种基于等效分形维数换算的对数形式接触面积分布模型，精准解决了双粗糙表面接触中传统模型无法准确表征大尺寸微凸体主导作用的难题，为高端制造领域的精密接触力学分析提供了更可靠的理论工具。

看不见的粗糙与算不准的模型

传统分形接触模型（如经典的M-B模型）虽然成功将分形几何引入表面形貌描述，但其核心假设存在一个简化陷阱：它将两个真实粗糙表面的接触，粗暴地等效为一个粗糙面与一个理想刚性平面的接触。更棘手的是，传统模型中用于描述接触点面积分布的幂律函数，在实际计算中常出现拟合失效，尤其在处理决定整体性能的大尺寸微凸体时，误差会急剧放大。这种理论与现实的脱节，导致现有模型在精密仪表、超精密加工等需要高保真预测的工程场景中，预测精度大打折扣，难以精准指导工艺优化。

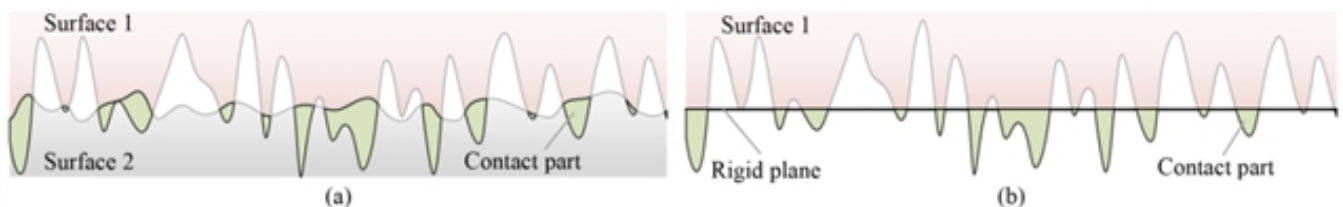


图1. 两个接触粗糙表面模型：（a）面-面接触；（b）面-平面接触。

两个表面的接触，交给一个等效面来算

针对上述挑战，研究组的核心突破在于构建了一套等效面积分布计算方法。首先，他们抛弃了失效的传统函数，提出一个含待定参数的对数形式累积函数 $N = \dots \cdot \ln(aL/a) + 1$ 。该函数在全数值区间内拟合效果优异，均方根误差远低于传统函数，完美解决了大区间拟合失效问题。

最巧妙的创新在于等效分形维数的提出。通过1000组对照实验发现，双粗糙表面的整体接触行为，并非简单叠加，而是由分形维数更小（即表面更粗糙）的那一方主导。基于此，研究组推导出一个三阶转换矩阵，能将两个表面的分形维数，精准换算成一个等效分形维数，最终得到优化后的面积分布函数：

$$n(a) = \begin{cases} e^{4.32 \times [1 - D_{1,S-S} - D_{1,S-S}^2]} \cdot N'_{\lambda}/a, & |D_{1,S-S} - D_{2,S-S}| \leq 0.2 \\ e^{4.32 \times \min(D_{1,S-S}, D_{2,S-S}) - 9.60} \cdot N'_{\lambda}/a, & |D_{1,S-S} - D_{2,S-S}| > 0.2. \end{cases}$$

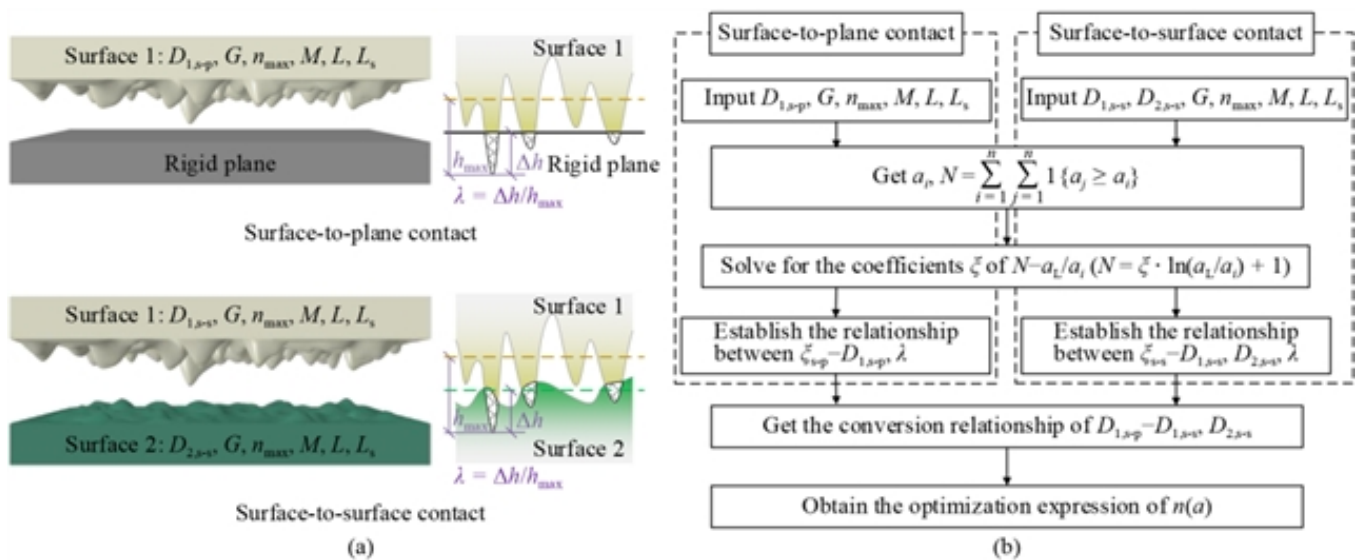


图2. 单一和双重粗糙表面的接触案例及计算过程：（a）接触案例；（b）计算过程。

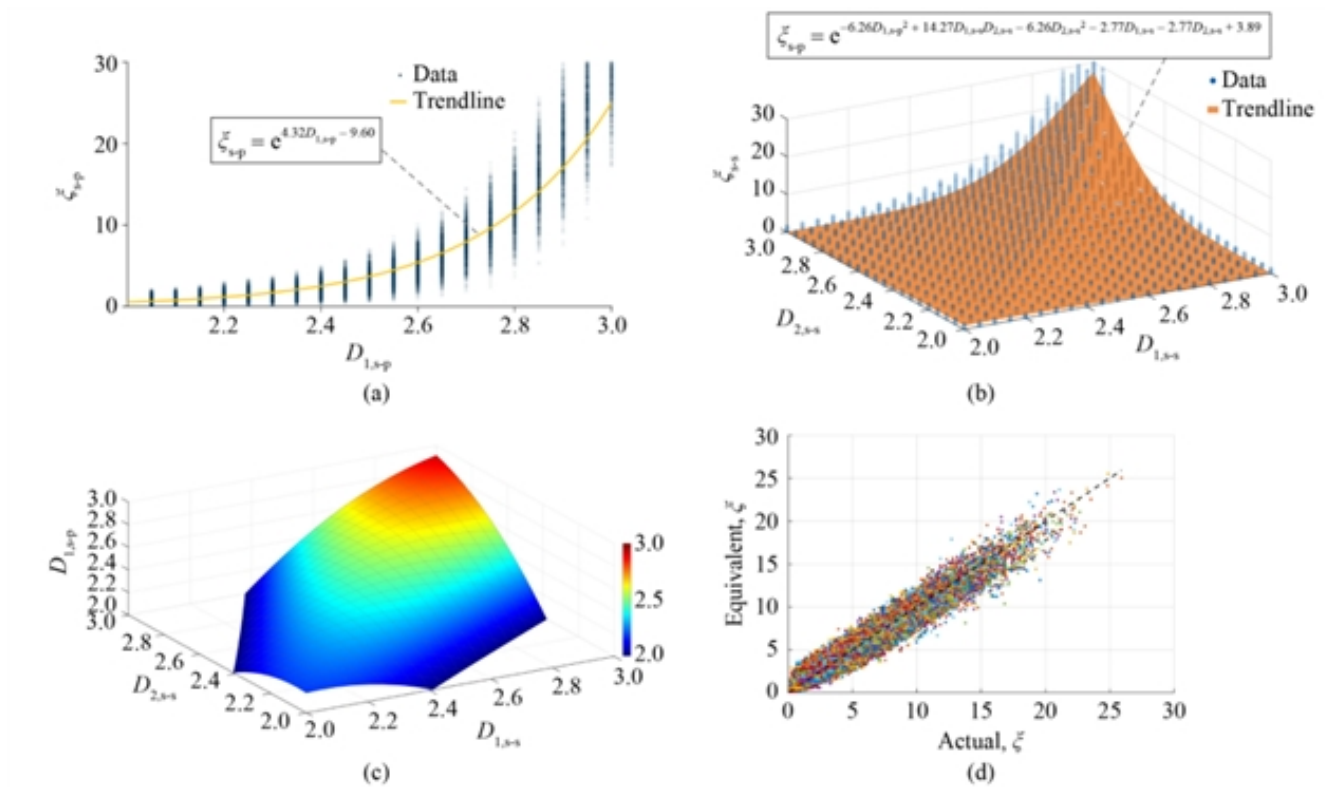


图3. 两种接触类型的多组结果及转换关系：（a）单一粗糙表面；（b）双粗糙表面；（c）分形维数的转换关系；（d）数据验证。

从算得准到造得精

理论的价值在于应用。研究组以锚具系统这一典型工程结构为试金石。实测表明，未经等效的传统模型均方根误差高达1.2386，而本文等效模型误差骤降至0.3175，精度提升近4倍！文章提出的等效分形维数方法，为精密装配中的接触界面分析提供了更可靠的理论工具，在摩擦学优化和密封设计等工程实践中具有直接的应用价值。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：<https://journal.hep.com.cn/fsce/EN/10.1007/s11709-026-1286-8>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：钱骥等 来源：《工程·结构与土木工程》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发