接触力学 · 点接触与线接触 · 点蚀 · 技术参考文档 · 公开

赫兹接触 应力

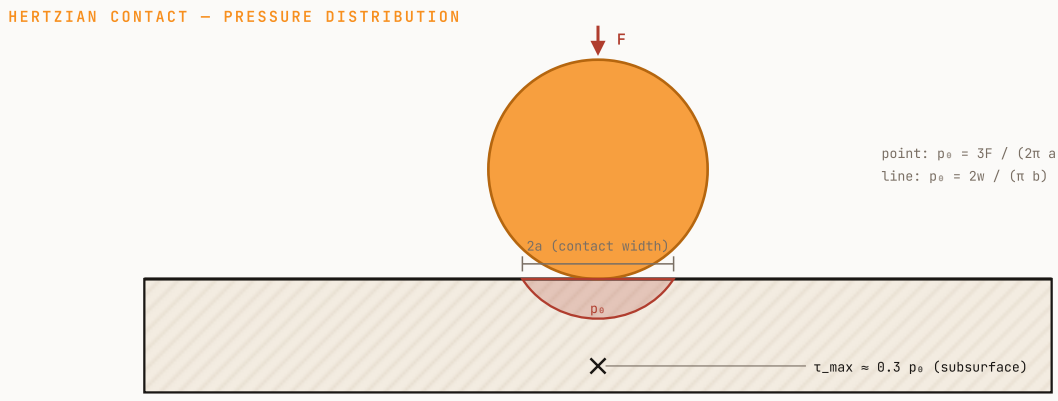
曲面物体之间的接触应力——点接触与线接触计算公式、综合弹性模量与综合曲率半径、引发点蚀的次表层切应力，以及许用值。

修订	发布	负责	附件
1.0	June 2026	Ideambox 工程团队	PDF 参考资料

摘要

当曲面物体相互接触时——滚珠与滚道、齿轮轮齿与配对齿、凸轮与从动件、车轮与钢轨——接触面积非常小，因此局部（赫兹）应力远高于按名义载荷估算的数值。最大接触压力以及它在表面以下产生的切应力，是限制滚动元件承载能力的关键。

第 1 节介绍赫兹接触。第 2 节为点接触（球体/滚珠）。第 3 节为线接触（圆柱/滚子）。第 4 节为综合弹性模量与综合曲率半径。第 5 节讨论次表层切应力与许用应力。第 6 节为设计要点与检查清单。



两个曲面物体只在极小的区域内接触，因此局部压力极大且高度集中。最大接触压力 P_0 及其在次表层产生的切应力，决定了轴承、齿轮和凸轮的点蚀寿命。

目录

1. 什么是赫兹接触
2. 点接触（球体/滚珠）
3. 线接触（圆柱/滚子）
4. 综合弹性模量与综合曲率半径
5. 次表层切应力与许用应力
6. 设计要点与检查清单

1. 什么是赫兹接触

两个非共形曲面相互压紧时，会发生弹性变形，形成一个很小的接触区——圆形（点接触）或窄条形（线接触）。接触区内的压力呈**半椭圆分布**，在中心处达到最大值 $\mathbf{p_0}$。由于接触面积极小，p_0 非常大，而最大切应力位于表面略**下方**——滚动接触疲劳（点蚀/剥落）正是从这里萌生的。

p_0	最大（中心）接触压力——需要校核的数值
点接触	球对平面 / 球在滚道内 / 球对球 → 半径为 a 的圆形接触区
线接触	圆柱对平面 / 滚子在滚道内 → 半宽为 b 的条形接触区，单位长度载荷为 w
E*	综合（当量）弹性模量，综合两个物体的弹性
R*	综合（相对）曲率半径，综合两个物体的曲率

2. 点接触（球体/滚珠）

对于两个球体（或球对平面，$R_2 \to \infty$）：

- 接触半径 `a = (3 F R* / 4 E*)^{1/3}`
- 最大接触压力 $p_0 = 3\ F\ /\ (2\ \pi\ a^2)$（= 平均压力的 1.5 倍）

p_0 仅随载荷的**立方根**增大，因此载荷加倍时最大压力只升高约 26%——但半径减小时它会迅速升高，这就是小滚珠和尖锐凸度承受高应力的原因。

3. 线接触（圆柱/滚子）

对于两个平行圆柱，单位长度载荷 `w = F / L`：

- 接触半宽 `b = √(4 w R* / (π E*))`
- 最大接触压力 `p₀ = 2 w / (π b) = √(w E* / (π R*))`

线接触使载荷沿滚子长度分布，因此在相同总载荷下，其 p_0 低于点接触——这就是同尺寸滚子轴承比球轴承承载能力更高的原因。注意**边缘载荷**：不对中会使 w 集中在滚子两端，因此滚子要做凸度修形。

4. 综合弹性模量与综合曲率半径

两个接触物体共同承担变形，按下式合成：

- $1/E^* = (1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2$
- $1/R^* = 1/R_1 \pm 1/R_2$ ——两个凸面接触取 **+**；凸体位于凹面内（滚珠在滚道内）取 **−**，此时 R^* 较大，应力降低。

因此，位于贴合滚道沟槽中的滚珠，其应力远低于同一滚珠压在平面上的情况。钢对钢：$E^* \approx 113$ GPa（$E = 207$ GPa，$\nu = 0.3$）。

5. 次表层切应力与许用应力

- **最大切应力**约为 **0.30 · p_0**，位于表面以下约 **0.48 a**（点接触）或 **0.78 b**（线接触）处。滚动疲劳裂纹在此萌生，并向表面扩展形成点蚀坑。
- **静态极限（压痕）：**对于淬硬轴承钢，p_0 ≈ 4000–4200 MPa 左右开始产生永久压痕——这是额定静载荷 C_0 的依据。
- **循环极限（点蚀）：**远低于静态极限；渗碳淬火的齿轮/轴承接触面，长寿命设计的接触应力一般取约 1300–1700 MPa（依据 ISO 6336 / 轴承 L10）。

工况	P_0 参考极限
淬硬轴承钢，静态（压痕）	~4000–4200 MPa
渗碳淬火齿面，长寿命	~1300–1700 MPa
整体淬火钢，中等循环次数	~1000–1400 MPa

以上数值仅供参考——实际寿命请按 ISO 6336（齿轮）或轴承 L10 额定寿命计算。

6. 设计要点与检查清单

- **降低 p_0**：增大综合曲率半径（凸度修形、贴合沟槽），改为线接触，或减小载荷。
- **提高极限**：采用更硬、更纯净的钢（渗碳淬火、低夹杂物），并保证良好的 EHL 油膜（完整油膜可大幅延长点蚀寿命）。
- **注意次表层纯净度**——位于最大切应力深度处的夹杂物是裂纹核心；轴承钢正因如此要进行真空脱气。
- **检查清单：**求 E* 和 R* → 计算 a/b 和 p_0（点接触或线接触）→ 与该材料和寿命对应的静态极限（压痕）和循环极限（点蚀）比较 → 若偏高，则增加凸度/贴合度、进行硬化或改善润滑。可配合*轴承*、*齿轮*和*疲劳*参考资料使用。

This document is also a web page, kept up to date:
https://ideambox.com/zh-hans/downloads/hertz-contact-stress/

Designing something that needs this? ideambox.com/contact