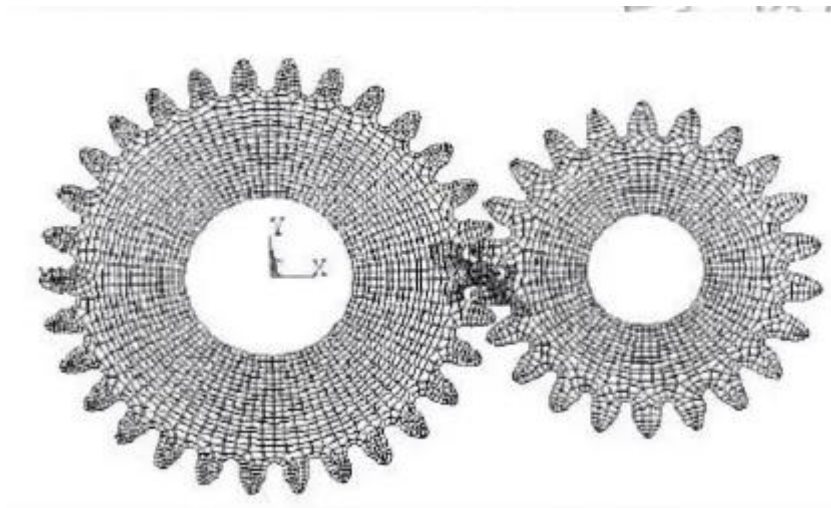


1.工程应用场合

在工程中会遇到大量的接触问题，如齿轮的啮合、法兰联接、机电轴承接触、卡头与卡座、密封、板成形、冲击等等。接触是典型的状态非线性问题，它是一种高度非线性行为



•分析中常常需要确定两个或多个相互接触物体的位移、接触区域的大小和接触面上的应力分布。接触分析存在两大难点：

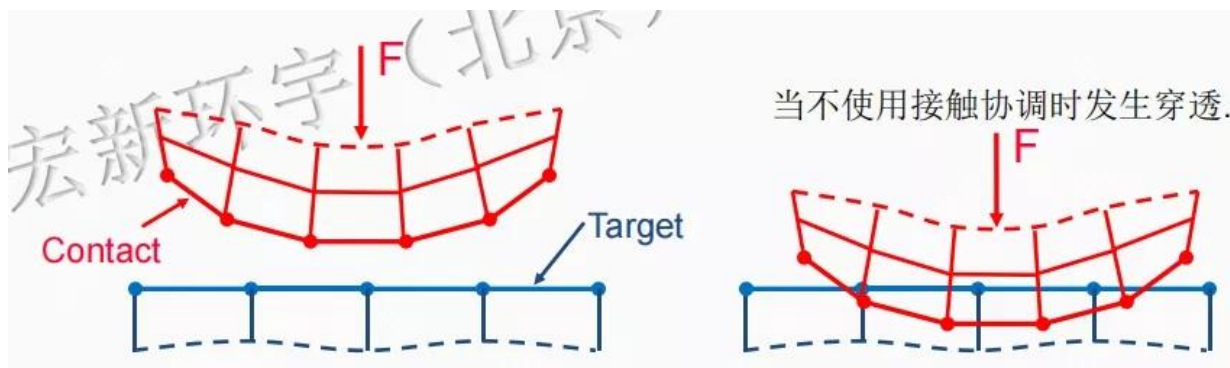
-在求解之前，你不知道接触区域的范围；表面之间是接触还是分开是未知的；表面之间突然接触或突然不接触会导致系统刚度的突然变化。

-大多数接触问题需要计算摩擦。摩擦是与路径有关的现象，摩擦响应还可能是杂乱的，使问题求解难以收敛

2.计算原理

2.1 ANSYS 如何保持接触面的协调?(实际问题的基本要求)

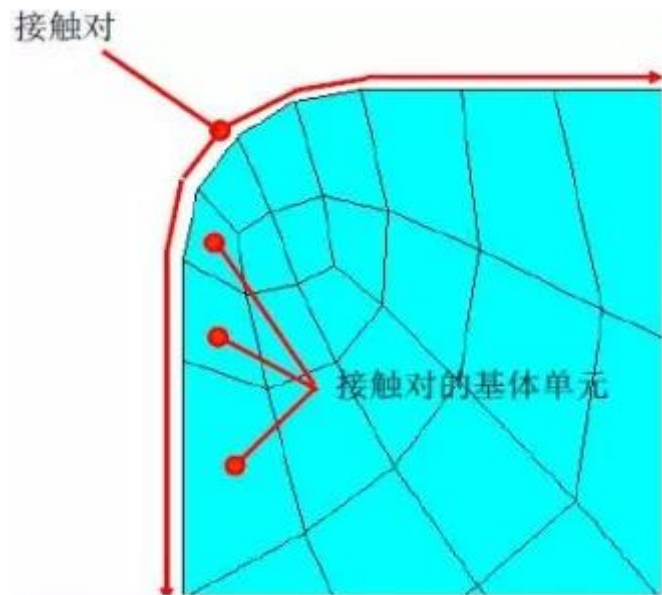
- (1) 当两个物体发生接触时，可以传递载荷；
- (2) 当两个物体分开时，即存在间隙时，不传递载荷；
- (3) 在传递载荷过程中，即两个物体存在接触时，不发生穿透。



2.2 接触对

ANSYS 使用接触对完成接触计算，接触对由接触面和目标面组成，通过接触对实现不同物体之间的载荷传递。

接触计算的计算结果存储在接触单元中。接触单元和目标单元是表面单元，即附着于实体单元上的单元，没有厚度。



2.3 接触面和目标面选择的基本要求

正确合理的选择接触面和目标面，有助于减少穿透，提高其接触计算的收敛性，根据本人的经验和理论要求，要基本遵守下面三个原则

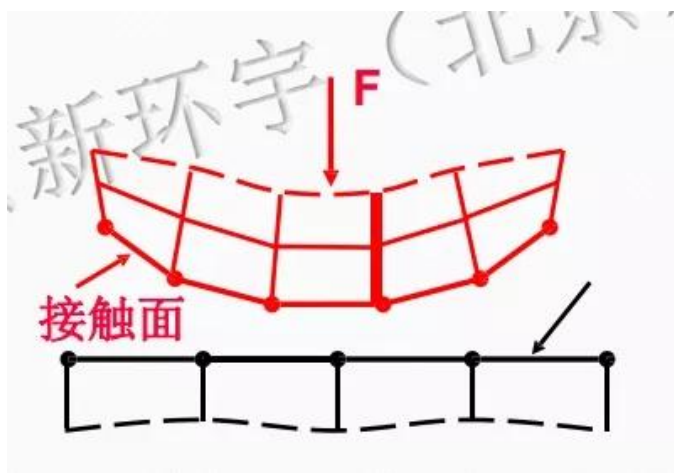
(1) 刚-柔接触。刚体的表面为目标面，柔性体的表面为接触面，这也是程序要求的，如果不按照该要求定义，程序会报错；

(2) 柔-柔接触。网格较密的一侧为接触面，网格相对粗糙的一侧为目标面；

(3) 柔-柔接触。当两个模型的表面的网格密度接近时，建议使用对称接触（双向接触）。

2.4 接触算法

- Workbench 如何保持接触面的协调？
- 现实接触物体并不产生互相穿透。因此，程序必须协调两接触面以避免其有限元模型互相穿透。
 - 当程序阻止互相穿透时，我们称之为强制性接触协调。
 - Workbench 提供几种不同的算法来实现接触面间的协调。



当不使用接触协调时发生穿透.



接触算法



环宇 技术研

ANSYS Workbench 提供的接触算法

- (1) 增强拉格朗日法 (Augmented Lagrange) (法向和切向) ;
- (2) 纯罚函数法 (Pure Penalty) (法向和切向)
- (3) 多点约束法 (MPC) (法向和切向)
- (4) 法向使用纯拉格朗日法，切向使用纯罚函数法
- (5) 纯拉格朗日法 (法向和切向)



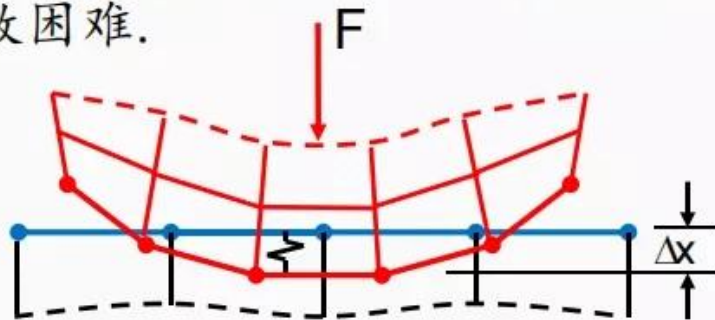
- (1) 纯罚函数算法

增强拉格朗日算法和纯罚函数算法都基于罚函数方程。用一个弹簧施加接触协调条件称为罚函数法，弹簧刚度或接触刚度称为罚参数

该弹簧的变形量 Δx 满足方程:

$$F = k \Delta x$$

接触刚度 (k) 越大，接触表面的侵入越少。然而，若该值太大，会导致收敛困难。



2.4 接触算法 (1) 纯罚函数算法

- *Pure Penalty* 和 *Augmented Lagrange* 方法的区别就是后者加大了接触力（压力）的计算：

罚函数法：
$$F_{normal} = k_{normal} x_{penetration}$$

增强拉格朗日法：
$$F_{normal} = k_{normal} x_{penetration} + \lambda$$

- 因为额外因子 λ ，增强的 *Lagrange* 方法对于接触刚度 k_{normal} 的大小变得不敏感，增强的 *Lagrange* 法是 ANSYS 中采用的缺省算法，然而，在一些分析中，增强的拉格朗日算法可能需要额外的迭代，
- 尤其当变形的网格严重扭曲时。
- 增强拉格朗日法优点：

—与罚函数法相比较少病态，单个接触单元的接触刚度取值可能更合理。

—与单纯的拉格朗日法相比，没有刚度阵零对角元。因此在选择求解器上没有限制，PCG等迭代求解器都可以应用。

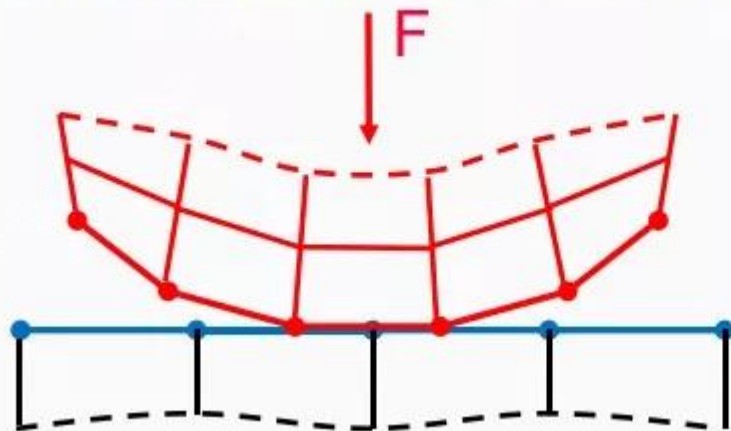
—用户可以自由控制允许的穿透值TOLN。（如果输入了TOLN，而使用罚函数法，则程序忽略它）

(2) 拉格朗日乘子法-Normal Lagrange (ABAQUS称为直接法)

拉格朗日方法增加了额外的自由度(接触压力)来满足接触协调性. 因此, 接触力(接触压力) 作为一额外自由度显示求解, 而不涉及接触刚度和穿透。

$$F_{normal} = DOF$$

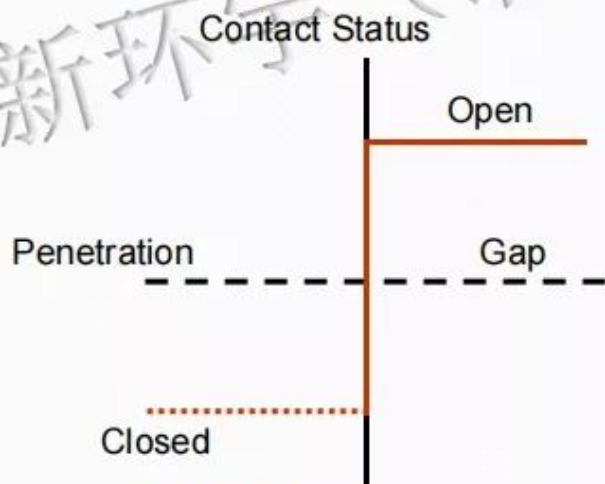
- 用压力自由度得到0或接近0的穿透量
- 不需要法向接触刚度 (零弹性滑动)
- 需要直接求解器, 这要消耗更多的计算代价



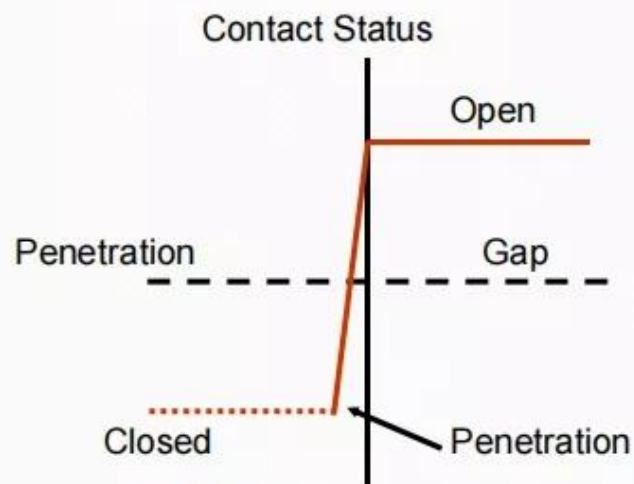
(2) 拉格朗日乘子法-Normal Lagrange (ABAQUS称为直接法)

Lagrange 乘子法可能产生扰动:

- 如果不允许穿透(左图), 接触状态可能是打开的也可能是关闭的, 这使得接触点的状态不确定而导致收敛困难。
- 如果允许有较小的穿透(右图) 或者拉力(图中没有显示)存在, 会使得程序收敛更加容易。



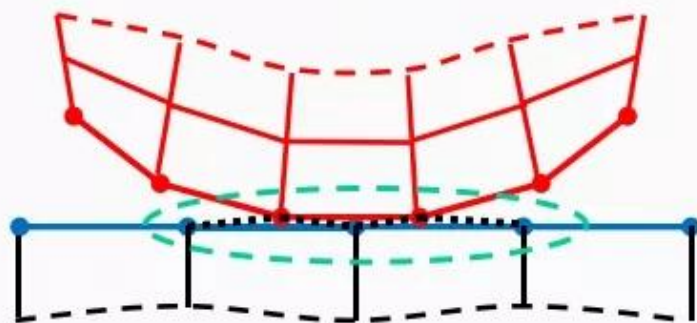
法向拉格朗日法



罚函数法

(3) MPC多点约束算法

- 对于特定的“绑定”和“不分离”两个面间的接触类型，可用多点约束 (MPC) 算法。
 - MPC 内部添加约束方程来“联结”接触面间的位移
 - 这种方法不基于罚函数法或Lagrange乘子法.它是直接有效的关联绑定接触面方式。
 - MPC算法基础的绑定接触也支持大变形效应



2.5 接触刚度

对增强拉格朗日法和罚函数法，需要法向和切向接触刚度。接触面和 目标面之间的渗透量取决于法向刚度。在粘 结接触中的滑动量取决于 切向刚度。较高的刚度值减少渗透量/滑动量 ,但会导致总体刚度矩阵 的病态和收敛困难。 较低的刚度值会导致一定量的渗透/滑动，进而产 生不准确的求解。理想地，使用足够高的刚度以便渗入/滑动量 是少量可接受的，但是足够低的刚度在收敛方面是很好的。

一般情况下，ANSYS 为接触刚度 FKN，FKT，允许渗入量 FTOLN，允许滑动量 SLTO 提供了缺省值。在大多数情 况下，不需要定义这些接触刚度。而且，推荐使用 KEYOPT(10)=2 允许程序自动更新接触刚度

ANSYS Workbench 在接触刚度控制中提供了两个选项：

Interface Treatment	Add Offset, No Ramping
<input type="checkbox"/> Offset	0. m
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Stabilization Damping Factor	0.1

对于接触刚度，ANSYS 经典版提供了两个实常数：法向接触刚度（FKN）

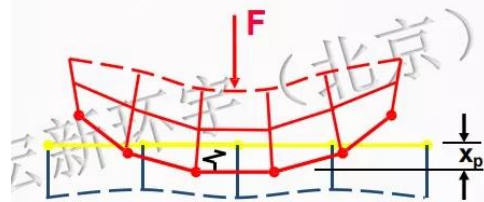
和切向接触刚度(FKT)和两个关键字 KEYOPT(6),KEYOPT(10)控制接触刚度更新。

在 ANSYS Workbench 接触刚度设置中，只能直接设置法向接触度，

而切向接触刚度是通过输入的法向接触刚度间接计算得到。

在接触刚度控制中 ANSYS Workbench 通过一个选项，实现了对两个接触关键字的控制。

- Workbench使用增强型Lagrange法或罚函数法时都需使用法向接触刚度（FKN），产生一个小的穿透量($x_{penetration} > 0$)从而保证数值上的平衡。



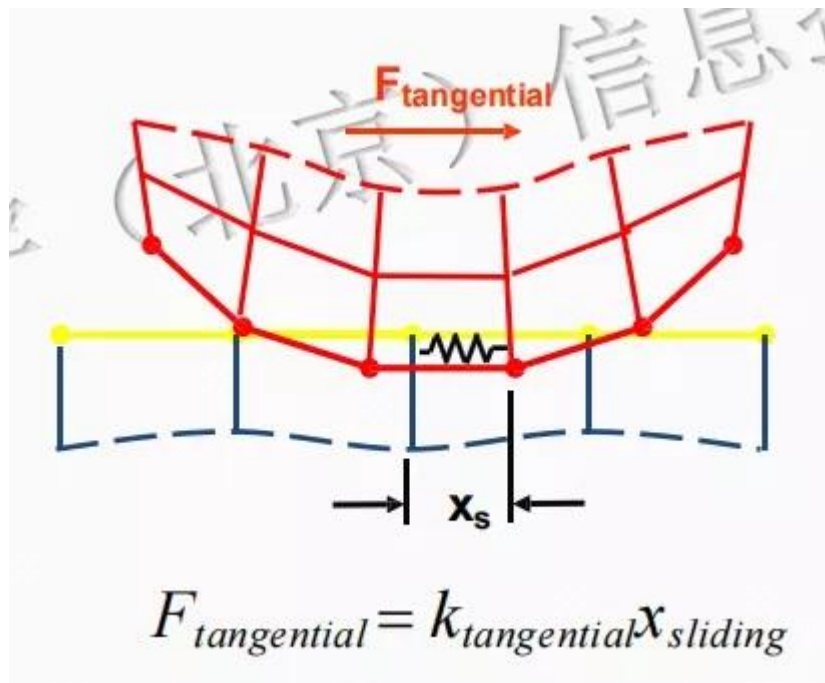
接触“弹簧”产生一个小的变形 x_p
平衡方程如下:

$$F_{normal} = k_{normal} x_{penetration}$$

这里的 k_n 是法向接触刚度.

- 然而实际情况下，两接触体并不互相穿透($x_p = 0$).

- 接触单元不但可以传递法向压力，而且可传递切向摩擦力.
- 接触单元使用切向罚刚度(FKT) 来确保切线方向的接触协调.
- 切向罚刚度和法向罚刚度一样，影响收敛和求解精度



ANSYS 自动定义一个缺省的切向接触刚度，它与 MU 和法向刚度 FKN 成正比。默认的切向刚度对应于默认值 $FKT=1.0$ 。正的 FKT 值是因子，负的 FKT 值是切向刚度的绝对值。

对 $KEYOPT(10)=1$ 或 2 ，或 $KEYOPT(10)=3$ 当法向拉格朗日乘子法和切向惩罚法选项，ANSYS 基于当前接触法向压力 PRES 和最大的允许弹性滑动 SLTO ($FKT=MU*PRES/SLTO$)，更新切向刚度。当 FKT 在每个迭代更新时，实常数 SLTO 用于控制最大的滑动距离。ANSYS 提供缺省的 SLTO 容差值，该值在大多数情况工作良好。你可以覆盖 SLTO 的缺省值（平均接触长度的 1%），通过定义比例因子（用命令输入正值）或绝对值（用命令输入负值）。较大值将增强收敛但损害准确性。基于容差、当前法向压力和摩擦系数，切向接触刚度 FKT 可以自动获得。在某些情况下，用户可以通过定义比例因子（正输入值）或绝对值（负输入值），覆盖 FKT。

- 接触刚度对程序收敛和求解精度的影响最大
 - 较大的刚度可提高求解精度，但使得收敛更加困难
- 必须谨慎定义接触刚度的大小。
 - 最适合的值和具体问题有关。

- 缺省值适用于大多数的接触问题，但是，某些情形下程序提供的缺省值并不适合该问题.

- 可能需要进行一些试验来取得一个即收敛又能保证求解精度的合适的刚度值.

–我们将简要的讨论一下确定一个合适刚度值的小技巧

- 作为专业分析人员，您面临以下挑战:

–使穿透最小以保证求解精度.

- 因此，接触刚度应该非常大.

–然而, 刚度太大却有收敛性困难.

- 模型在接触表面可能来回的振动.

