

支架试验台装配体接触计算及疲劳分析

丁峻宏¹ 陈忠强² 王惠¹

1. 上海超级计算中心, 上海 201203; 2. 煤炭科学院上海分院 上海 200030

摘 要: 介绍了有限元软件中的接触模拟方法以及多点约束算法的特点和应用, 然后针对某大型复杂支架试验台结构计算, 利用 Altair 公司的 HyperMesh 软件进行装配体所包含各零部件的三维网格划分, 建模重点还包括模拟零部件间的不同边界条件的处理, 整个仿真模型反映了不同特点的接触特性设置以及其他形式的联接特性的创建。最终利用 CAE 求解器完成了指定工况下的结构强度计算和疲劳计算, 并对不同算法得到的计算结果进行了对比和分析。

关键词: 接触, 装配, 结构分析, 疲劳, HyperMesh

1 引言

接触现象在现代工业制造领域中随处可见, 通常来说, 只要存在两个以上的物体相互作用就需要用到接触分析, 它已经成为现代 CAE 分析的一个重要组成部分。在包含接触的非线性分析中, 当接触区域随载荷历史变化的时候, 求解是极具挑战性的问题。对两个物体之间接触关系的模拟和处理能力对于一个 CAE 分析软件来说非常关键, 可以说, 接触分析能力已经成为判断软件非线性能力不可或缺的一个最重要指标。

装配体的分析模拟^[1]是现代结构设计过程中重要的一环。这一结合 CAD 和 CAE 的技术使得人们不仅可以提前设计和验证多个零部件间的装配关系, 还可以精确的预测多零部件装配体的整体结构性能, 从而综合全面地对复杂结构进行评估。

本文针对某支架试验台的结构强度计算和疲劳分析问题, 综合运用了 HyperMesh 软件和其他一些 CAE 求解器进行建模和分析, 旨在通过整个仿真过程, 表明了多种接触算法的综合运用在解决大规模装配体结构计算时的一些思路 and 实现手段。

2 有限元方法中接触问题处理

2.1 算法分类

在有限元分析中, 为了阻止两个物体接触表面相互穿过, 这两个表面间必须建立一种接触关系^[2], 否则这两个表面将在求解过程中相互穿过。在这种情况下, 对于接触类型和接触算法等问题的分析和选择就显得更为重要了。在接触区域控制的接触类型设定中, 可以模拟多种接触类型:

(1) 固结 (Bonded), 即完全绑定, 无摩擦也无滑动。

(2) 不分离 (No separation), 和固结类似, 不过在小范围内允许无摩擦的滑动。

(3)无摩擦 (Frictionless)，部件之间摩擦系数为 0，允许法相分离。

(4)粗糙 (Rough)，与无摩擦类型相似，只是部件之间不允许接触滑动。

(5)有摩擦的 (Frictional)，部件之间会因摩擦系数而产生剪切力。

接触关系分为法向关系与切向关系，其中关键是法向关系的处理，需要研究接触力的传递和两接触面间穿透两个方面的问题。

结构分析 CAE 求解器中一般都包括几种接触算法^[4]，如罚函数法(Pure Penalty Method)、拉格朗日乘子法(Lagrange Multiplier Method)、增广拉格朗日法(Augmented Lagrangian Method)、MPC 多点约束算法(Multipoint Constraint Method)等，这些接触算法适用于不同分析问题，正确使用这些算法可以有效的帮助用户解决接触数值计算中出现的过约束、穿透量控制、接触力平衡和接触应力计算精度等棘手的问题。

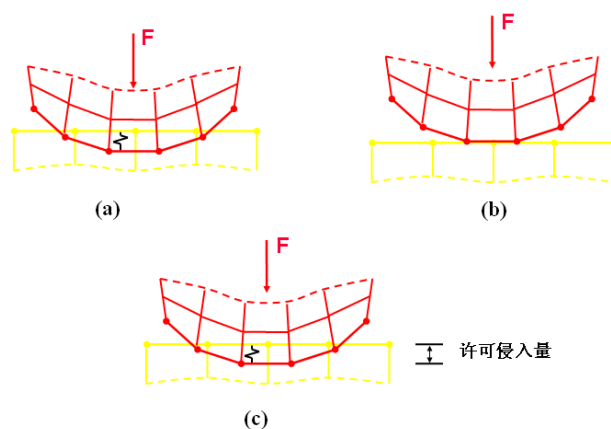


图 1 接触算法图示

2.2 罚函数

如图 1-a 所示，罚函数是通过接触刚度在接触力与接触面间的穿透值（接触位移）间建立力与位移的线性关系：

$$F_{con} = k_{con} \cdot \Delta_{con} \quad (1)$$

式中 k_{con} 指的就是接触刚度，由实常数 FKN 来定义；穿透（间隙） Δ_{con} 用来定义不同物体中节点间的距离。

上述力与位移的接触关系可以很容易地合并入整个结构的平衡方程组 $[K] \cdot \{X\} = \{F\}$ 中去，而并不改变总刚矩阵 $[K]$ 。

接触刚度越大，则穿透就越小，理论上 k_{con} 趋向无穷大时， Δ_{con} 趋近于零。但是在程序计算中，接触刚度不可能为无穷大，否则矩阵病态会导致收敛困难，因此穿透量也就不可能真实为零，而只能是个接近于零的有限值。

接触刚度的收敛性要求和穿透太大产生的计算误差总会是一对矛盾。

2.3 拉格朗日乘子法

拉格朗日乘子法不需要定义人为的接触刚度去满足接触面间不可穿透的条件，可以直接实现穿透为零的真实接触条件，见图 1-b，这是罚函数法所不可能实现的。

在拉格朗日乘子法中，不是采用力与位移的关系来求接触力，而是把接触力作为一个独立自由度。这就是说要直接求解接触力（或者接触压力）：

$$[K] \cdot \{X\} = \{F\} + \{F_{con}\} \quad (2)$$

在当前的机器精度下利用罚函数方法来实现零穿透是不现实的，因此，将有限的力/压力定义为一个独立的 DOF（也即拉格朗日乘子）就可以避免了这些问题。

但是在拉格朗日乘子法也会遇到一个问题，当接触状态发生急剧变化时，会出现振颤（Chattering），出现折衷问题时，往往又会影响问题的收敛。目前程序一般利用最大允许穿透量和最大允许拉伸力这两个实常数来综合控制。

2.4 增广拉格朗日算法

增广拉格朗日算法是为了找到精确的拉格朗日乘子而对罚函数修正项进行反复迭代。与罚函数的方法相比，拉格朗日方法不易引起病态条件，对接触刚度的灵敏度较小。

$$F_{con} = k_{con} \cdot \Delta_{con} + \lambda \quad (3)$$

首先将启动与罚函数相同的 Newton-Raphson 迭代，而对最大允许穿透量的控制则采用与拉格朗日乘子法相同的实常数来实现。尽管需要更多的迭代，但 λ 项的使用将使得穿透量 Δ_{con} 不会超过最大允许数值（见图 1-c）。这种对穿透的控制将无需以提高接触刚度为代价。因此，这种扩展拉格朗日法是不停更新接触刚度的罚函数法，这种更新不断重复，直到计算的穿透值小于允许值为止。

2.5 MPC 多点约束算法

这种算法适用于面对面、点对面的接触单元。使用该方法时，程序会根据接触运动建立 MPC(Multi-point constraints)方程，以处理节点自由度的耦合关系。如与粘结接触结合使用，MPC 方法可简化下列形式的接触装配和运动约束：固-固装配、壳-壳装配、壳-固装配、梁-固装配、刚性面约束以及任意面的载荷分布。

内部 MPC 方法可以克服传统接触算法和其他多点约束工具的缺点，例如：接触面节点的自由度被消去；可以减小系统方程求解的波前大小；不需要输入接触刚度；对于小变形问题，它代表真实的线性接触行为；求解系统方程时不需要平衡迭代；对于大变形问题，MPC 方程在每个平衡迭代中不断进行更新，克服了传统约束方程只适用于小应变的限制条件。

3 应用实例

3.1 装配体建模

支架试验台对应各零部件的三维实体模型确定之后，按照零部件特征对其进行近似分类，

共分成 28 个零件组。利用有限元前处理软件 HyperMesh, 可以方便快捷地建立和组织各结构零件的有限元模型, 总体模型单元总数在 140 万, 节点数约 45 万, 见图 2。其中销类零件采用六面体单元来划分, 其余大型零件由于内部构造复杂, 故采用四面体单元来划分。

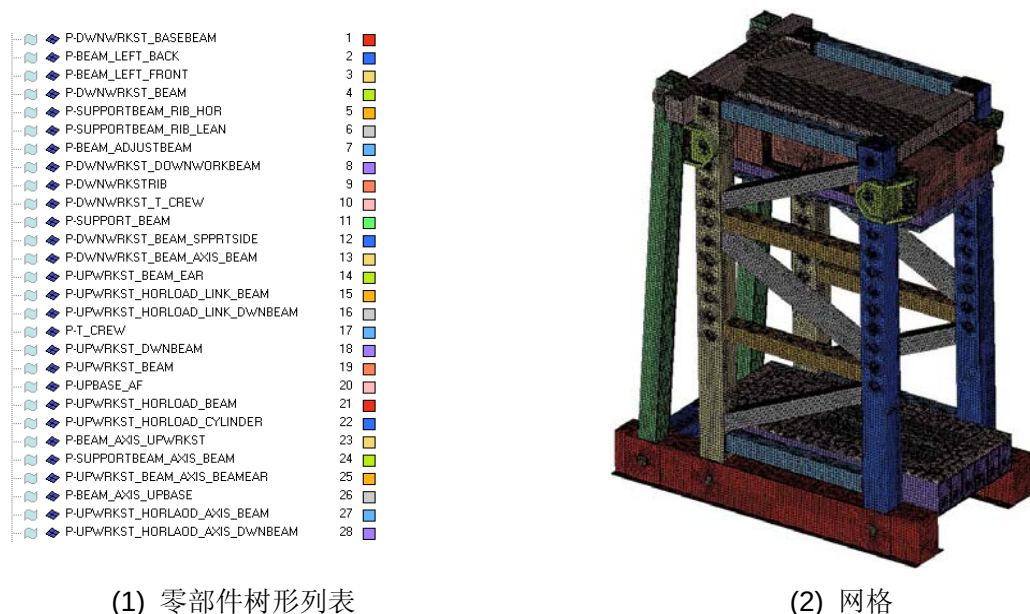


图 2 利用 HyperMesh 建立的支架试验台计算模型

在此次支架试验台整体有限元装配模型的建立过程中, 在零部件接触部位, 运用了以下一些主要处理手段:

(1)销类零件串起了支架试验台的主体结构, 零部件的装配在 CAE 中需要进行“接触”分析来模拟。对于重点关注销轴联接部位的接触, 采用增广拉格朗日算法; 对于远离重点关注部位的销轴联接接触, 则采用内部多点约束(MPC)算法。不管采用何种算法, 都需要利用图 3 所示的 Contact Wizard(接触向导)来建立多个部位的接触设置^[3]。

(2)相邻零部件接触面几何尺寸大小不等, 同时各自网格划分又十分复杂, 但是由于静态结构分析时接触状态比较稳定, 因此处理此处的网格不连续, 有几种方法: 一是节点自由度重合; 二是也可以采用 MPC 接触模拟; 三是将一个区域的已选节点与另一个区域的已选单元通过约束方程“系”在一起, 可利用 HyperMesh 主面板中的 **ANALYSIS->ENTITY SETS** 功能, 快速建立节点集和单元集以实现命令流快速设置。

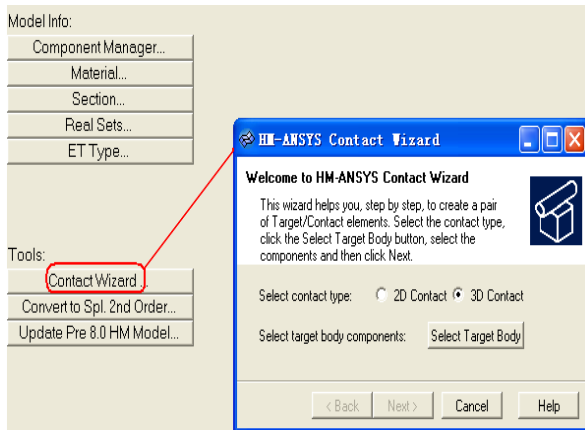


图3 HyperMesh 中接触建模之 Contact Wizard

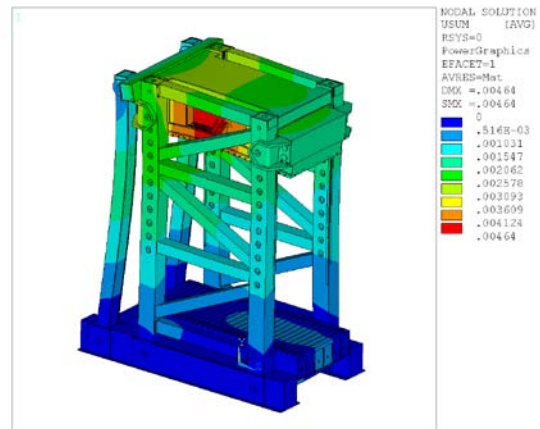


图4 支架试验台整体变形云图

3.2 计算和分析

试验台所受外载，主要是作用在上下工作台面部分区域，且根据工况不同进行分类组合。通过经静态结构计算，得到了支架试验台包含各零部件在不同受力工况下结构变形和应力的分布情况。结合计算结果云图，总得来看有以下一些认识：

(1) 图4显示的是整体结构在某一工况下的整体变形，从中可以看出，位移的连续性得到了很好的体现。整个装配体的最大变形出现在上工作台面承受载荷的局部区域。

(2) 从销轴类零件的受力情况来看，将上下工作台与四根立柱联接起来的8根销轴受力相对较大；在最大应力出现的销轴环状剪切区域附近，相邻的工作台和立柱上的联接孔边缘也会出现局部区域应力较高的现象，见图5。

(3) 使用 MPC 接触算法时，整个模型求解速度比增广 Lagrange 算法快；使用增广 Lagrange 算法时，环状接触区域将随着工作压力的增加，从初始接触区域逐步扩展，局部区域计算得到的局部应力水平比 MPC 接触算法得到的数值高，见图6。

(4) 将结构分析计算结果导入疲劳分析软件中进行寿命评估，如图7所示，固定上工作台的销轴和立柱等零件的联接局部区域寿命相对低一些，这在应力分析结果中也同样表现为数值较大区域，但是除此之外的其他部位和其他零部件的寿命从数值来看都可视为无限寿命。

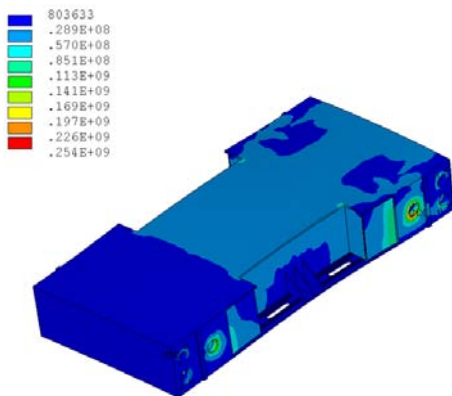


图5 上横梁中等效应力分布云图（MPC 算法）

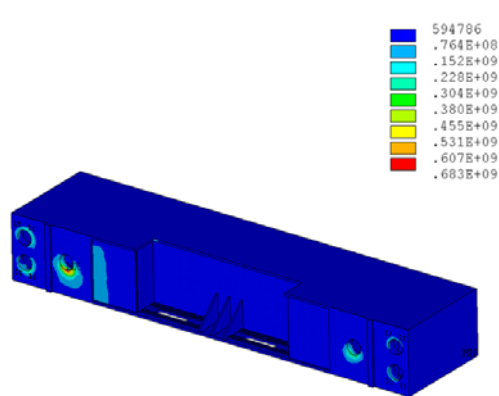


图6 上横梁中等效应力分布云图（增广 Lagrange 算法）

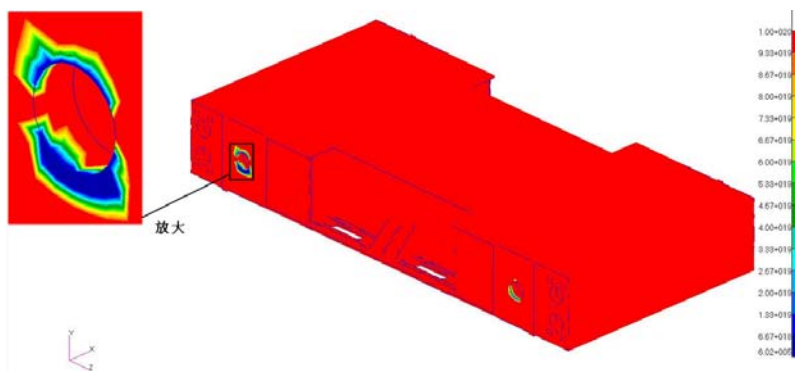


图7 上工作台疲劳寿命分布云图

5 结论

(1) 对于工程中日益增多的大型复杂装配体结构计算来说,零件多而且网格划分工作量大,利用 HyperMesh 软件可以快速有效地进行复杂结构网格划分、模型数据组织管理以及力学边界和载荷等结构计算求解设定。此外,针对有限元软件推出的接触向导模块的使用,有助于接触关系的快速准确定义。

(2) 针对接触问题的求解,使用罚函数算法或者增广 Lagrange 算法时,迭代步多、计算时间相对较长且不易收敛;而对于 MPC 算法,它可以有效解决不协调网格之间的连接问题,在接触状态稳定和结构变形有限的条件下,非常有利于工程设计中装配体复杂接触问题的模拟。

6 参考文献

- [1] 郭丽敏, 张娅, 崔文勇. TA280 型往复式空气压缩机结构动态特性分析[J]. 北京化工大学学报, 2008,35(6): 90-92.
- [2] Sheldon Imaoka. Contact Analysis Tips[EB/OL]. http://ansys.net/sheldon_tips/. 2009./Contact Analysis Tips.pdf
- [3] HyperMesh 9.0 User's Manual[M].

作者简介:

丁峻宏(1977-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为复杂系统数值仿真与高性能计算.
E-mail: junhong_ding@hotmail.com.