



SAP2000 稳定分析流程介绍

筑信达 吴文博

空间结构在体育场馆、车站、厂房等建筑中有着广泛的应用，但空间结构的稳定问题一直是困扰结构工程师的难题之一。SAP2000 在稳定分析方面一直是广大用户的强大助臂，但用户在使用过程中可能会对分析流程不熟悉，或者经常遇到一些使用问题，本文将通过对 SAP2000 稳定分析流程的介绍对一些常见问题进行阐述。

目前空间结构的稳定分析主要以《空间网格结构设计规程》(JGJ7-2010) 作为设计依据，规范中全过程分析主要有以下三个步骤：

- 1) 施加初始几何缺陷
- 2) 指定杆件非线性属性
- 3) 求取结构极限荷载

现对以上过程在 SAP2000 中的实现进行介绍。

1 施加初始几何缺陷

依据规范要求，进行网壳全过程分析时，应考虑初始几何缺陷（即初始曲面形状的安装偏差）的影响，初始几何缺陷可采用结构最低阶屈曲模态，其缺陷最大值可按网壳跨度的 1/300 取值。因此，用户需要首先定义屈曲工况即 buckling 工况，如图 1 所示。

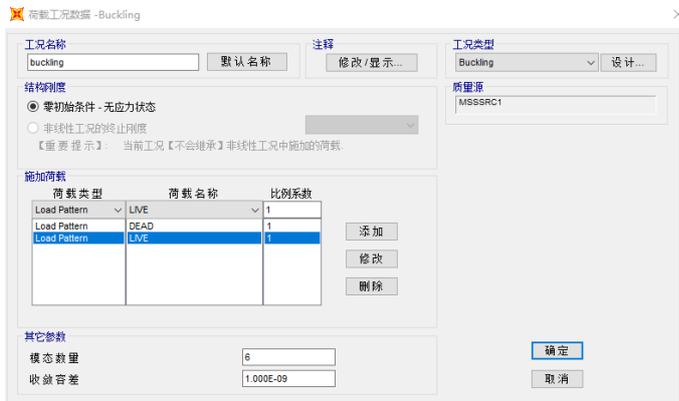


图 1 屈曲工况定义



图 2 初始几何缺陷施加

其中荷载模式一般情况下可选择 1.0DEAD+1.0LIVE，当然用户也可以根据实际工程情况采用其他的荷载模式或比例系数。而屈曲模态的数量应以找到**整体**的最低阶屈曲模态为准，如求得的屈曲模态都是局部屈曲，应适当增加屈曲模态的数量。同时，还有可能发生屈曲因子为负值的情况，出现此类情况并非程序运行出错，只是表明：如果荷载反向，结构更易出现屈曲。通常负的屈曲因子没有太大的实际意义，不可作为施加缺陷的依据，应忽略。

计算得到合理的屈曲模态后，可以通过运行>修改为变形几何命令直接施加初始几何缺陷。如图 2 所用，用户需要选择模态缩放法，并选择对应的屈曲工况，输入整体最低阶屈曲对应的模态号，最大位移值需要输入跨度的 1/300。另外用户可以选择某一坐标系和坐标轴，便于控制缺陷的方向，同时用户还可以选择部分节点进行缺陷的施加，例如一些下部为混凝土上部为钢屋盖的整体结构模型，可以只选择钢结构部分施加初始几何缺陷。

2 指定杆件非线性属性

在 SAP2000 中，杆件的非线性属性主要是以铰的形式施加，而铰又可分为塑性铰和纤维铰两种。其中默认的塑性铰是依据美国规范 ASCE41 中相关表格定义的，较为常用有 M3 铰（多用于梁）、PMM 铰（多用于柱）和 P 铰（多用于支撑）三





种，而依照空间结构中杆件的受力状态来判断的话，P 铰和 PMM 铰更为适用一些。

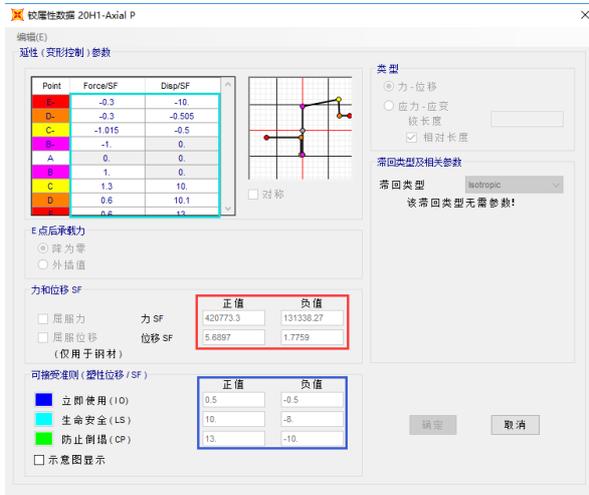


图 3 默认 P 铰

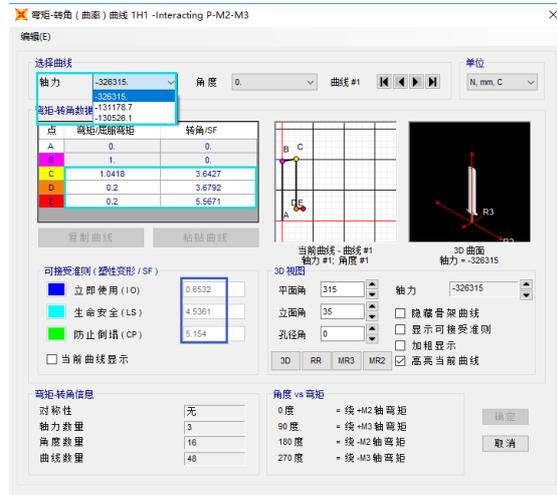


图 4 默认 PMM 铰

用户可以选中构件后，通过指定>框架>铰命令指定相关的塑性铰。但是，ASCE41 规范中，P 铰仅可用于 H 型钢、矩形或圆形钢管截面，PMM 铰仅可用于 H 型钢和矩形钢管截面，因此，超出此范围时，纤维铰将是更方便的选择。限于篇幅，纤维铰的定义过程不再做细致描述，具体可参考筑信达网络课堂“弹塑性分析操作流程”中关于纤维铰部分的讲解。

3 求取结构极限荷载

在 SAP2000 中可使用非线性静力工况求取结构的极限荷载，工况定义如下图。

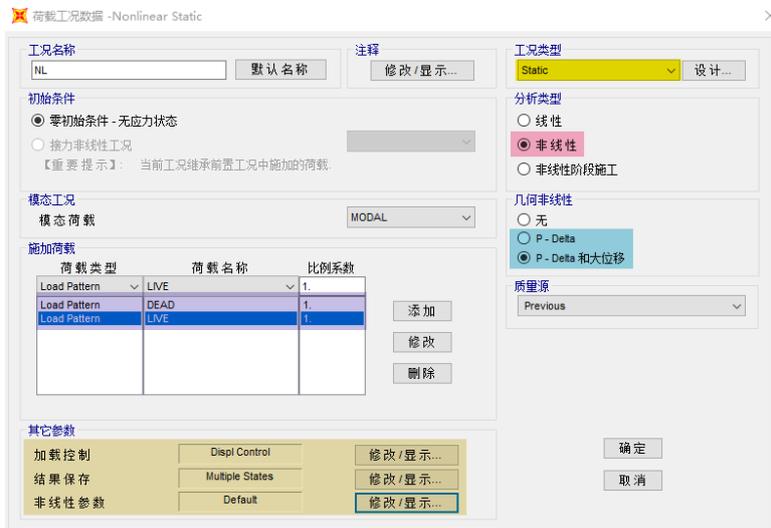


图 5 非线性静力工况定义

现对工况中的相关参数进行介绍：

3.1 几何非线性

在 SAP2000 中几何非线性有三个选项：无、P-Delta、P-Delta 和大位移。对稳定分析而言，P-Delta 是必选的，但是大位移效应则可视结构情况而定。一般情况下，对于包含索、膜或可能存在跳跃失稳的结构宜选用大位移。但应注意的是，如果考虑了大位移效应，可能会出现进行弹性全过程分析时得到的极限荷载会大于屈曲荷载。补充原因





3.2 加载控制



图 6 加载控制

加载选项有**荷载控制**和**位移控制**两种方式。其中荷载控制通常用于荷载分布形式以及大小已知的情况，适合常规的静力分析；而位移控制通常用于荷载分布已知，但是荷载大小未知的情况，适合失稳或推覆分析。

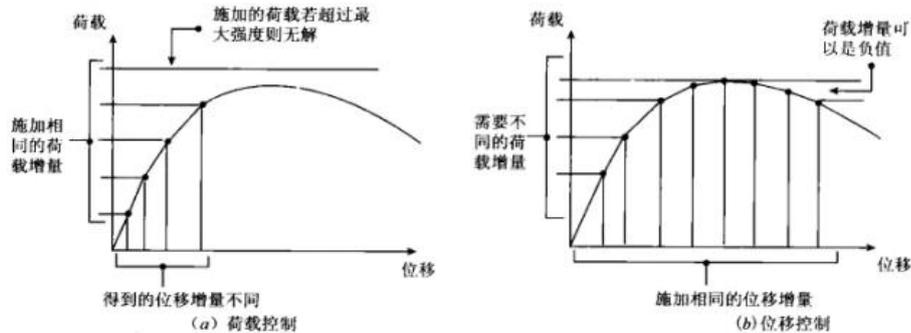


图 7 荷载控制与位移控制

显然，位移控制更易于得到荷载位移曲线的下降段，进而更加容易确定极限荷载的大小，因此更适合稳定分析。如果采用荷载控制的话，则可能造成分析不收敛，进而无法确定极限荷载。

位移类型有**共轭位移**与**监测位移**两种方式。在知识库文章[监测位移 VS 共轭位移](#)中通过算例介绍了两种监测方式的差异，若分析收敛难以达到期望的位移目标，用户可尝试选择荷载工况使用共轭位移控制，共轭位移控制是结构中所有位移的加权平均值，每个位移自由度按施加其上的荷载进行加权，可以说这是所施加荷载做功的一种度量。但是有可能监测点实际位移与目标位移相差很多。

采用监测位移，其位移目标值可以在分析终止时得到精确满足，但是只有监测位移单调变化时，分析才会收敛，一旦监测位移出现“先增后减”的情况，分析将不再收敛。若无法选择一个在加载过程中单调增加的位移分量，则用户需要将分析分成两个或多个工况，在不同的工况中改变所监控节点的位移。对此，在 SAP2000 v20 之后的版本，用户可以在附加控制位移选项中添加多个节点位移进行监测，当这些节点中任意一个达到目标值时，分析中止。

位移分量可以选择节点位移或广义位移两种方式。对于稳定分析而言，一般采用节点方式，自由度通常为 U3 方向，监测节点一般可选为预估位移最大处的节点标签。

3.3 结果保存

对于稳定分析，结果保存的保存方式应采用多个状态，否则无法绘制出力-位移曲线。状态数量的最小值会决定分析初始的分析步长，而状态数量的最大值控制着显著事件（例如构件屈服或屈曲）的数目。状态数量的最小值不宜过小，数量过小将没有足够的点来描述整条曲线，如果对失稳的过程比

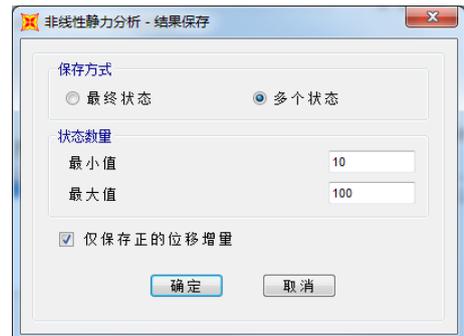


图 8 结果保存



较关心的话，宜增加状态数量的最大值。但一般来讲，结果保存的数量多少，对分析的收敛性等的影响不大。

3.4 非线性参数

最大总步数与最大空步数。最大总步数是为了控制分析时间，当分析达到最大总步数时，分析将中止。而空步数通常由于当前分析步长下分析不收敛，将会形成一个空步，并将以当前步长的一半进行下一次分析，过大的空步数可能是由灾难性的失效或数值敏感导致，当分析达到最大空步数时，分析将中止。若用户不希望分析由于空步而结束，则设置此值等于最大总步数。

迭代 (Use Iteration) 与 ETE (事件到事件) 求解。在 SAP2000V20 版本之后，用户可以选择使用迭代或者 ETE 方法进行求解，当然也可以同时使用迭代和 ETE 方法进行求解。如果用户选择了迭代方法，用户有两种迭代方法可以选择，即常刚度迭代法和 NR 迭代法。常刚度迭代的单步迭代速度快，但迭代效率较 NR 迭代低。用户可以将常刚度迭代数或 NR 迭代数设为零来关闭对应的迭代方法。程序默认的迭代数值可适用于绝大多数情况。

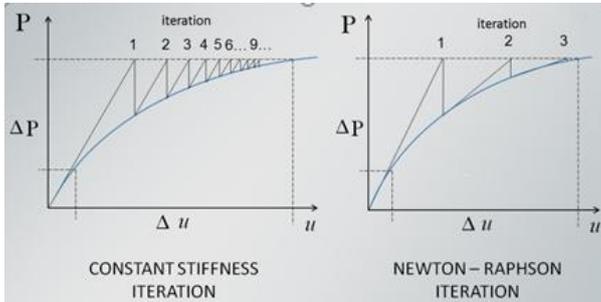


图 9 常刚度迭代与 NR 迭代



图 10 非线性参数选项

ETE 求解方法是使用事件凝聚容差用来将事件聚合在一起，从而减少求解时间。当一个较屈服或移至力-位移（弯矩-转动）曲线的另一段时，触发一个事件，程序会判定若其他的较是否接近这个较的状态，如果两个较的状态在事件凝聚容差内，这些较将被视为到达了事件。但是这将会导致力的不平衡，不平衡力将会带入到下一次分析，避免产生累计误差，因此更小的容差可以增加准确性，但是会增加分析时间。默认的事件凝聚容差和最大事件步数适用于大多数情况。由于 ETE 求解方法有着良好的收敛性，当分析无法收敛时，可尝试关闭迭代方法，仅使用 ETE 求解方法。

用户可以通过运行日志查看分析的当前状态。

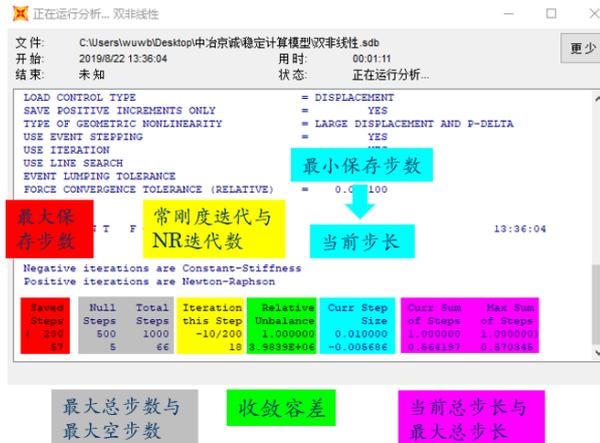


图 11 非线性分析运行日志

3.5 结果查看

用户可以通过显示>绘图函数命令查看结构的极限荷载。通常情况下，我们可以通过查看 STEP（步数）与基底反力 Z 的曲线确定极限荷载。



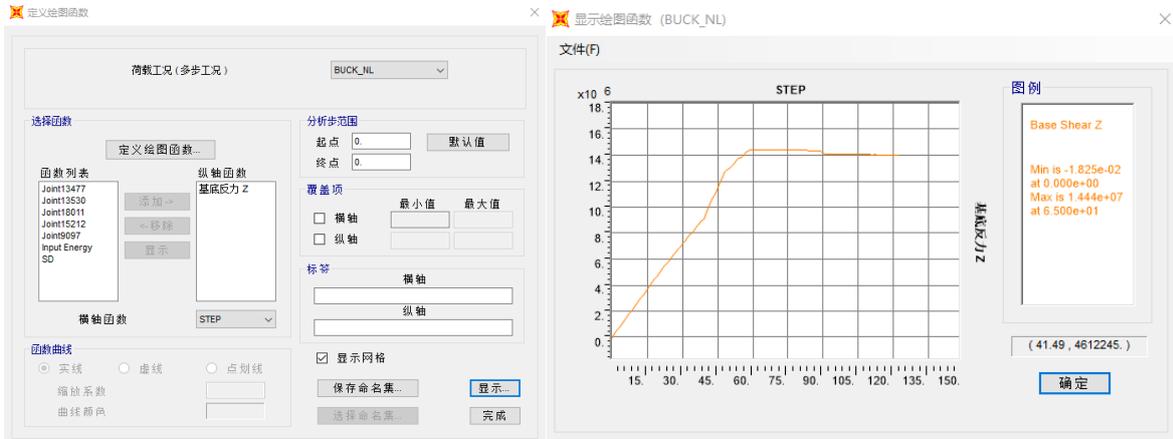


图 12 非线性工况的反力-步数曲线

如果用户希望获取反力-节点位移曲线来确定极限荷载，需要略加注意。在相同工况下，不同的节点的反力-节点位移曲线可能是完全不同的。我们以一工程实例中两个节点的反力-节点位移曲线为例，观察此现象。



图 13 节点 9097 反力-节点位移曲线图



图 14 节点 13530 反力-节点位移曲线

虽然两条曲线获取的极限荷载是相同的，但是由于两个节点的反力-节点位移曲线差异是如此之大，以致于用户怀疑程序是否真正的获取到了极限荷载，甚至怀疑程序计算是否正确。其实真正的原因在于 9097 节点的位移处于“单调增加”状态，而 13530 节点的位移则处于“先增后减”状态，即节点发生了回退，我们可以通过节点位移-步数曲线观察到这一点。

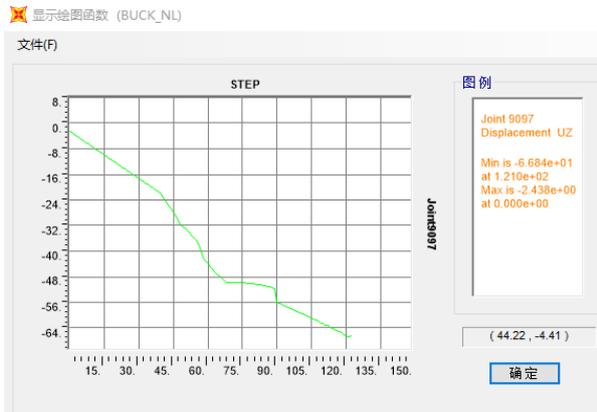


图 15 节点 9097 的节点位移-步数曲线

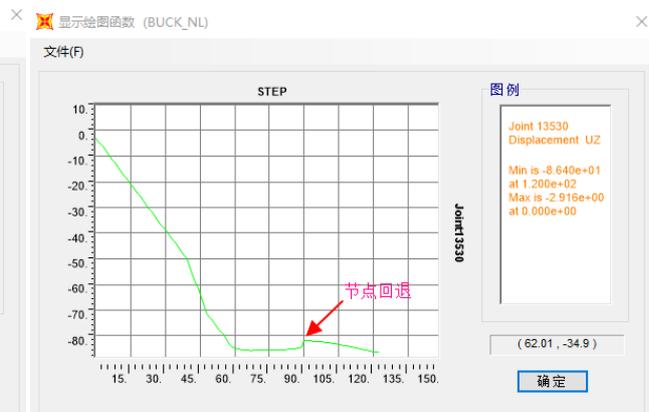


图 16 节点 13530 的节点位移-步数曲线

至于节点位移发生回退的现象是比较普遍的，特别是当模型中未考虑材料非线性的情况下，我们可以通过下面的组观观察到节点位移回退的现象。

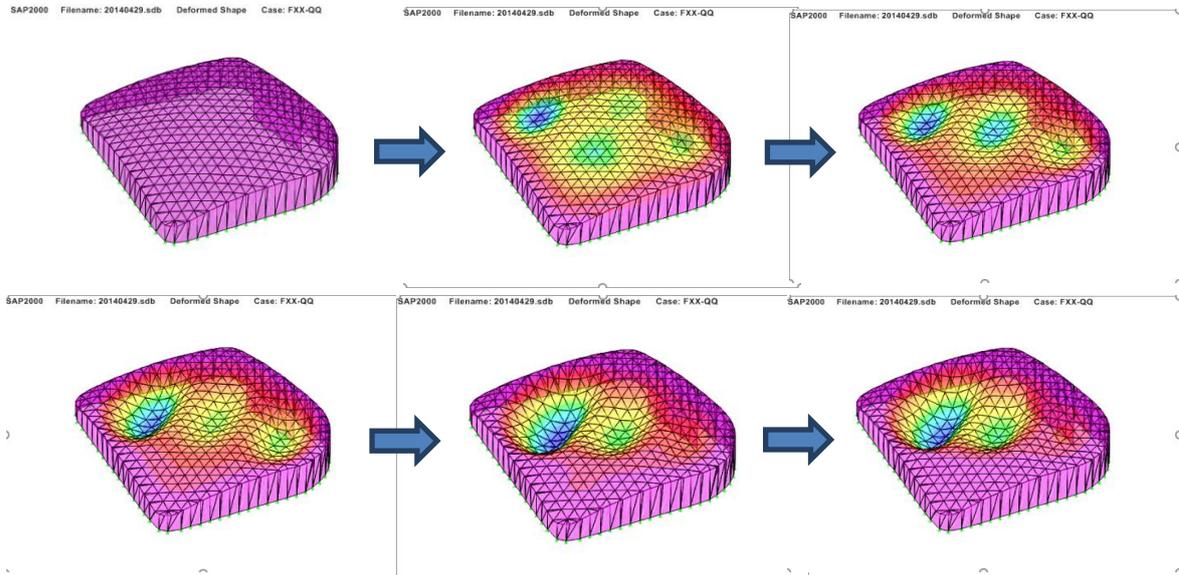


图 17 结构变形全过程

从图中可以看出，结构的变形可以很明显的分为左、中、右三个区域，其中左边区域的变形是持续增加的，如果在左边区域选择监测点将会得到非常理想的曲线，类似图 15 中的 9097 节点；右边区域的变形是呈现出先增加后减小的一个过程，是比较明显的回退过程；而中间区域则更加复杂，经历了增加—减小—再增加的过程，过程中出现了明显的回退，类似图 16 中 13530 节点的位移变化。因此，如果想获取到一条“合理”的反力-节点位移曲线，首先应找到一个节点位移处于单调增加状态的节点，虽然选择哪个点并不影响极限荷载的大小。

4 小结

1. 用户可通过修改未变形几何命令施加初始几何缺陷，但是应该注意屈曲模式的选择，尽量选取最低阶整体屈曲模式。
2. 用户在指定杆件材料非线性时，应尽量根据杆件的受力形态选择对应的铰属性。
3. 用户可采用基于位移加载的非线性静力工况来获取结构的极限荷载，用户应对程序中的各个参数有所了解，合理的参数调整是保证分析的收敛性和准确性的关键。
4. 在查看结构极限荷载时，建议查看反力-步数曲线，如果想查看反力-节点位移曲线的话，应注意选取的节点的位移应保持“单调递增”，避免出现回退的情况。