

直接分析法在单层网壳结构中的应用

筑信达 郑翔

《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)新增了考虑 P- Δ 效应、P- δ 效应、结构初始缺陷、构件初始缺陷的直接分析设计法^[1]。该方法在分析模型建立和构件设计上与传统 03 钢规的一阶分析方法均有较大差别。本文将简述直接分析法的基本原理,并通过一个算例,介绍直接分析法在单层网壳中的应用。同时与一阶分析法进行比较,发现直接分析法与一阶分析法在设计结果上存在一些差异。综合分析导致差异的原因,对直接分析法应用于单层网壳结构提出一些建议。

1. 设计方法

1.1 一阶分析法

传统的一阶分析法的设计过程主要分为两个步骤:首先建立不考虑结构初始缺陷和构件初始缺陷的结构力学模型,求解结构在恒、活、风、地震作用等各工况作用下的内力、位移并进行对应的荷载效应组合;最后基于承载能力极限状态的荷载组合,对构件进行校核,当抗力大于荷载效应时,即可认为结构满足规范要求^[1]。

由于结构一阶弹性分析不考虑几何非线性和材料非线性的影响。P- Δ 效应、P- δ 效应、结构和构件的初始缺陷以及材料的塑性行为对结构的影响均在构件设计阶段主要通过:计算长度系数 μ , 轴心受压稳定系数 ϕ 以及 β_{mx} 和 β_{tx} 等一系列参数来考虑。

由一阶分析方法的基本假定可知,结构内力计算时并不考虑几何非线性和材料非线性的影响,而计算构件承载能力极限状态时已经考虑了几何非线性和材料非线性的影响。按一阶弹性分析确定的构件内力并不是构件达到极限状态时的实际内力,即结构的内力计算模式与构件承载力计算模式并不一致。

基于计算长度系数的一阶分析法在结构形式复杂的空间结构中存在明显的局限性。对于复杂的空间结构,《空间网格结构技术规程》JGJ-2010 要求,除验算构件稳定承载力以外,还需要补充验算结构的整体稳定性,以考虑构件稳定承载力与结构整体稳定性的关系。以单层网壳结构为例,计算单层网壳构件稳定承载力时,其杆件平面外计算长度系数取 1.6;同时还需要补充考虑几何非线性的结构整体稳定性分析^[5]。

1.2 直接分析法

直接分析设计法应考虑二阶 P- Δ 和 P- δ 效应,需同时考虑结构和构件的初始缺陷和其他对结构稳定性有显著影响的因素,允许材料的弹塑性发展和内力重分布,获得各种荷载设计值(作用)下的内力和标准值(作用)下位移,同时不需要按计算长度法进行构件受压稳定承载力验算。

当直接分析不考虑材料弹塑性发展时,结构分析应限于第一个塑性铰的形成,对应的荷载水平不应低于荷载设计值,不允许进行内力重分布。该方法又称为:二阶 P- Δ - δ 弹性分析,是直接分析法的一种特例,该方法不考虑材料非线性,只考虑几何非线性,以第一塑性铰为准则,不允许进行内力重分布。

本文算例即采用不考虑材料弹塑性发展的直接分析,即二阶 P- Δ - δ 弹性分析。

直接分析法主要需考虑 3 个因素:

1) 结构整体初始缺陷

对于多高层框架结构,可通过在每层施加假想水平力或者初始侧移来实现。对于层概念不明显的空间结构,可采用以最低阶整体屈曲模态为结构整体初始缺陷形态的施加方法。通过控制最大变形值控制缺陷程度。

2) 构件初始缺陷

为考虑构件的初始弯曲以及残余应力等的影响,新钢标要求对构件施加构件初始缺陷。

3) 非线性分析

分析中需要考虑结构的几何非线性,即二阶 P- Δ 和 P- δ 效应,根据变形后的状态建立受力平衡方程,结构响应不能线性叠加,所以构件的设计内力不能线性组合各个单工况下的荷载效应,而是将各个荷载组合指定为非线性工况来直接求解。

SAP2000 v20 之后的版本已全面实现新钢标的直接分析设计法,以便捷实现新钢标的相关要求。同时,也保留了一阶分析法等传统设计方法,工程师可根据工程需要选择设计方法。

2.算例

2.1 模型概况

本算例为空心焊接球单层凯威特型球面网壳，跨径为 30m，矢高为 5m。结构平面布置和立面布置如图 1 和图 2 所示。

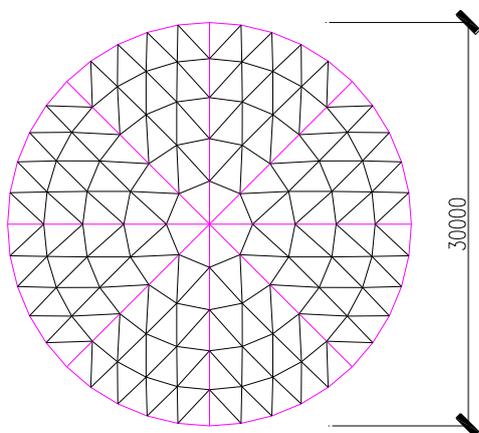


图 1 结构平面布置图

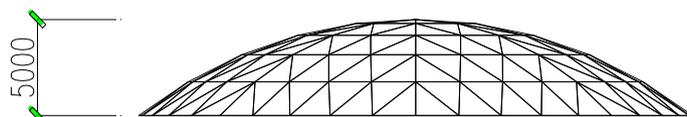


图 2 结构立面布置图

结构自重由程序自动考虑，另外考虑网壳屋面恒荷载为 1.0kN/m^2 ，活荷载为 0.5kN/m^2 ，换算后的风荷载按面荷载考虑 0.54kN/m^2 。

由于反应谱法不适用于非线性分析，本案例暂不考虑地震作用。选用杆件截面如表 1 所示，材料为 Q235B，采用焊接截面。

表 1 杆件截面

截面编号	截面规格
1	P180X6 (图 1 粉红色杆件)
2	P133x4.5 (图 1 黑色杆件)

应用 SAP2000 v22 建立结构计算模型，所有杆件采用框架单元模拟，每根杆件剖分为 4 个等长单元，采用固定铰支座，如图 3 所示。

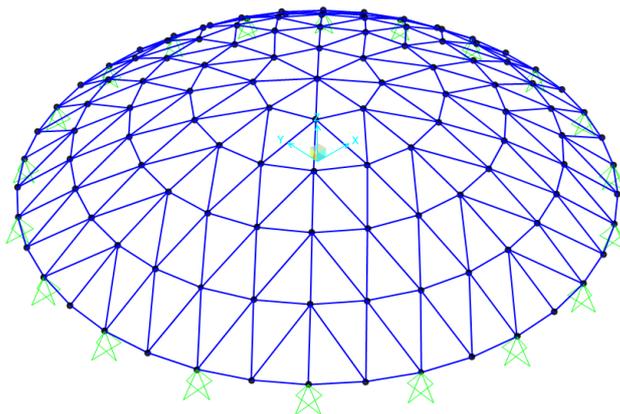


图 3 网壳计算模型

2.2 施加结构和构件的初始缺陷

通常，结构的整体初始几何缺陷的最大值可根据施工验收规范所规定的最大允许安装偏差取值，按最低阶屈曲模态分布，但由于不同的结构形式对缺陷的敏感程度不同，所以各规范可根据各自结构体系的特点规定其整体缺陷值，根据现行行业标准《空间网格结构技术规程》JGJ 7-2010 规定：网壳缺陷最大计算值可按网壳跨度的 $1/300$ 取值。

本案例为球面网壳，参考《网格规程》4.3.3 条：球面网壳的全过程分析可按满跨均布荷载进行。当网壳受恒载和活载作

用时，其稳定性承载力以恒载与活载的标准组合来衡量。因此，本案例采用 1.0DL+1.0LL 的标准组合作为基本荷载状态，对结构进行特征值屈曲分析。表 2 给出了前 5 阶屈曲特征值，图 4 所示为第 1 阶屈曲模态。

表 2 前 5 阶屈曲特征值

屈曲阶数	屈曲特征值
1	28.29
2	28.34
3	28.34
4	28.34
5	28.52

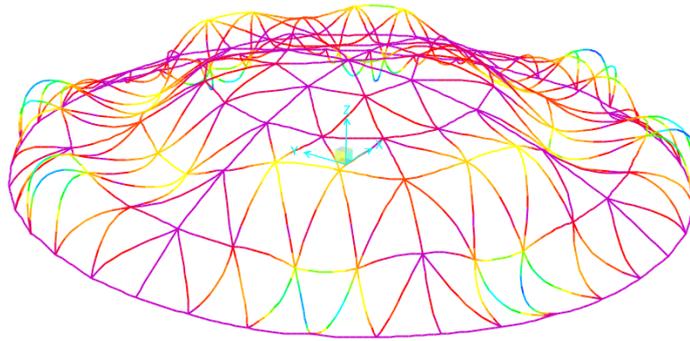


图 4 第 1 阶屈曲模态

根据结构整体初始缺陷的定义，控制最大变形的位移值为 $30000/300=100\text{mm}$ ，其余节点按比例调整，设置命令：【分析】>【修改未变形几何】，弹出的输入界面设置如图 5。通过该命令实现按第一阶屈曲模态施加结构的初始缺陷。



图 5 施加结构初始缺陷

在 SAP2000 中，构件的初始缺陷并未直接在分析过程中考虑，而是在设计验算阶段，按新钢标要求计算构件综合缺陷代表值产生的附加弯矩，从而调整设计弯矩。由于本案例的杆件截面为焊接截面，杆件截面类型属于 b 类，故构件综合初始缺陷 $e_0/1$ 按照 1/350 考虑。图 6 是 SAP2000 设计细节中显示的杆件附加弯矩的计算结果。

Moment Modification	Factored Mf	Amplified Mamp1	Imperfect. e0/1	Additional Ma = e0*Nk	Adjusted Mamp1+Ma	Design Mdesign
Major Bending	-948965.5	-948965.5	1/350.	818632.9	-1767598.4	-1767598.4
Minor Bending	266434.6	266434.6	1/350.	818632.9	266434.6	266434.6

图 6 考虑构件初始缺陷

本案例由于是网壳结构，各杆件的跨中不存在集中力，而绝大部分杆件的控制截面均位于杆件两端，因此无论是 P-δ 效应还是构件初始缺陷，对杆件的最终应力比影响都不大。



2.3 非线性分析

由于直接分析法需要考虑结构和构件的二阶效应，应采用非线性分析。需要把所有的荷载组合指定为非线性工况且考虑 P-Delta 效应，相关设置见图 7。

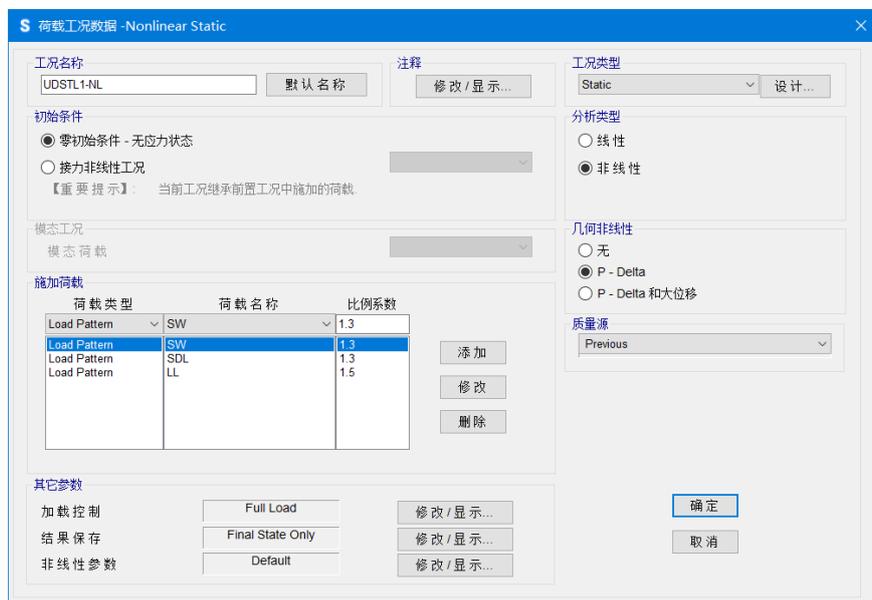


图 7 非线性工况设置

表 3 给出了本算例的主要工况组合。

表 3 工况组合

序号	恒载分项系数	活载分项系数	风载分项系数
UDSTL1	1.3	1.5	-
UDSTL3	1.3	-	1.5
UDSTL7	1.3	1.5	0.9
UDSTL11	1.3	1.05	1.5
UDSTL13	1	1.05	1.5

3. 两种方法设计结果对比

本案例分别建立了“一阶分析法”与“直接分析法”计算模型。表 4 为两种设计方法计算模型的参数对比。

表 4 两种方法计算模型的参数设置

设计方法	结构整体初始缺陷	P-Δ 效应	构件初始缺陷	P-δ	计算长度系数	稳定系数	设计弯矩
一阶分析法	无	无	无	无	1.0、1.6 (面内、面外)	附录 D	分析弯矩
直接分析法	最低阶屈曲模态	非线性分析	假想等效弯矩	杆件细分	1.0	1.0	分析弯矩+假想等效弯矩

对于一阶分析法的模型，不考虑结构和构件的初始缺陷。根据《网络规程》，所有杆件在网壳平面外的计算长度系数取为 1.6，平面内计算长度系数取为 1.0。对于直接分析法模型，按前述方法施加了结构整体初始缺陷，考虑几何非线性分析，程序自动考虑构件初始缺陷，并取计算长度系数和稳定系数均为 1.0。

经计算，得到两个模型的应力比结果（如图 8、9 所示）。同时，将图 8 和图 9 中显示了应力比的杆件根据编号进行整理，得到图 10（其中图例的“1 阶”表示的是 1 阶分析法相应的各杆件应力比，“直接 model01”表示的是以第一阶屈曲模态施加

接下来，我们采用不同的屈曲模态（分别使用第 1、2、3、4、5 阶屈曲模态）来施加结构的整体缺陷，并采用直接分析法进行结构分析，得到各杆件的应力比。将一阶分析法与 5 种直接分析法的应力比大于 0.4 的杆件根据编号进行整理，得到图 11。

由图 11 可知：当采用直接分析法时，结构整体初始缺陷的分布对于杆件应力比影响很大。同一位置处的杆件，当采用不同的初始缺陷时，其应力比甚至可以从 0.2 变化到 0.68。这说明：这类单层网壳结构对结构初始缺陷非常敏感；若采用直接分析法设计这类结构，初始缺陷的选择非常重要，仅采用第 1 阶屈曲模态作为结构的整体缺陷可能不一定合适。

针对本例的模型，分别以第 1、2、3、4、5 阶屈曲模态施加结构的整体缺陷，以 1.0DL+1.0LL 工况为基准，进行考虑几何非线性的荷载-位移全过程分析，整理结果，得到图 12。

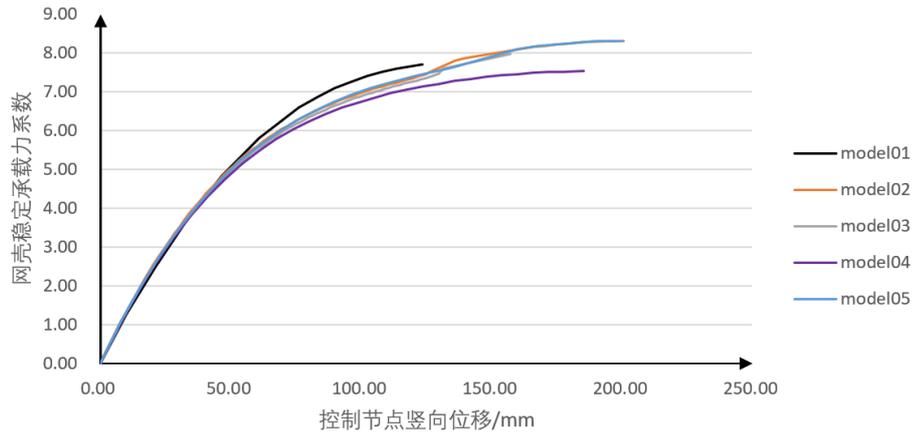


图 12 网壳稳定承载力系数图（1.0DL+1.0LL 工况，model0x 表示第 x 阶屈曲模态施加初始缺陷）

从图 12 可知，采用常规的一阶分析法+整体稳定性验算，按前 5 阶屈曲模态施加初始缺陷的模型得到的稳定承载力系数比较接近，在 7.5~8.3 之间。再结合图 11 可知，即使对应不同结构初始缺陷算得的网壳稳定承载力很接近，其采用直接分析法得到的各杆件应力比大小及应力比分布趋势也有不小的差异；再次说明了结构初始缺陷的不同形态，对直接分析法得到的杆件应力比大小和应力比分布趋势的影响很大。

5.小结

本文通过具体算例，介绍了直接分析法在单层网壳结构中的应用，通过与一阶分析法的比较，笔者总结了以下观点：

1) 对于同一个结构模型，采用不同的分析方法进行结构设计时，不仅得到的各杆件的应力比可能不一样，各杆件应力比的分布趋势也可能不一样。当采用直接分析法时，屈曲模态相对变形大的杆件，对应着更大的结构初始缺陷，其应力比可能会也较大。

2) 单层网壳结构对结构初始缺陷非常敏感，即使对应不同结构初始缺陷算得的网壳稳定承载力很接近，其采用直接分析法得到的各杆件应力比大小及应力比分布趋势也有不小的差异。说明结构初始缺陷的差异，对直接分析法得到的杆件应力比大小和应力比分布趋势的影响很大。

采用直接分析法进行网壳结构设计时，应综合考虑以上因素的影响。

参考资料

- [1] 钢结构设计标准：GB 50017 -2017[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2017.
- [2] 汪明，王立军，余海群，等. 直接分析法在空间结构中的应用[J]. 施工技术，2016，45（增）：373-378.
- [3] 杨律磊，王慧，张谨，等. 钢结构直接分析法在设计软件中的应用[J]. 建筑结构，2019，49（1）：36-42.
- [4] Computers & Structures Inc. SAP2000 v22.0.0 联机帮助文档“中国 2018 规范钢框架设计技术报告”.
- [5] 空间网架结构技术规程：JGJ7 -2010[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2010.