

# 钢结构构件稳定设计的全新解决方案 IDEA Member

筑信达 张志国

近年来，随着国家经济形势的变化，钢结构的工程应用急剧增加，结构形式也日趋多样化。在各种类型的钢结构设计中，稳定性一直是最突出的问题和难点。根据《钢结构设计标准 GB 50017-2017》（以下简称“新钢标”）第 5.1.6 条规定，钢结构的内力分析可采用一阶弹性分析法、二阶 P- $\Delta$  弹性分析法和直接分析法。对于大跨度空间钢结构的稳定性分析，新钢标推荐采用直接分析法。

以上三种方法的计算精度与适用范围依次提高，直接分析法作为计算精度最高和适用范围最广的钢结构设计方法，早已纳入欧标、美标和中国香港钢结构设计规范，同时逐步代替计算长度法成为主流的钢结构设计方法。直接分析法无需按计算长度法验算钢结构构件的受压稳定承载力，结构设计往往更加安全和经济，但对计算软件的非线性处理方式也提出了更高的要求。

根据新钢标第 5.5.1 条规定，直接分析法应考虑结构的二阶 P- $\Delta$  效应和构件的二阶 P- $\delta$  效应，同时考虑结构和构件的初始缺陷、节点连接刚度和其它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。换言之，直接分析法即考虑初始缺陷的双非线性分析，弹塑性对应材料非线性，P- $\Delta$  和 P- $\delta$  效应对应几何非线性。

## 1 功能概述

IDEA StatiCa Member（以下简称“IDEA Member”）是一款针对钢结构构件设计和分析的有限元软件，支持材料非线性分析（MNA）、特征值屈曲分析（LBA）以及考虑初始缺陷的双非线性稳定性分析（GMNIA）。

- 材料非线性分析（MNA）采用理想弹塑性模型，以构件的最大塑性应变校核强度。
- 特征值屈曲分析（LBA）用于计算构件的弹性临界荷载，也为后续引入初始缺陷提供屈曲模式。
- 双非线性稳定性分析（GMNIA）在引入初始缺陷后同时考虑材料非线性和几何非线性，以构件的最大塑性应变或非线性的收敛性作为构件是否失稳的判断标准。

如图 1 所示，IDEA Member 采用壳单元创建精细化的有限元模型（CBFEM），用户可根据需要布置构件的纵向或横向加劲板，作用于构件上的集中荷载或分布荷载也可以指定作用位置（如工字梁的上翼缘）和作用范围。构件的连接、节点或柱脚设计在 IDEA Connection 完成，用于精确计算节点连接刚度对构件稳定性的影响。关于 IDEA Connection（简称“IDEA”）的更多资料和信息，请参阅《筑信达技术通讯》中刊载的往期文章或登录筑信达官网（[www.cisec.cn](http://www.cisec.cn)）。

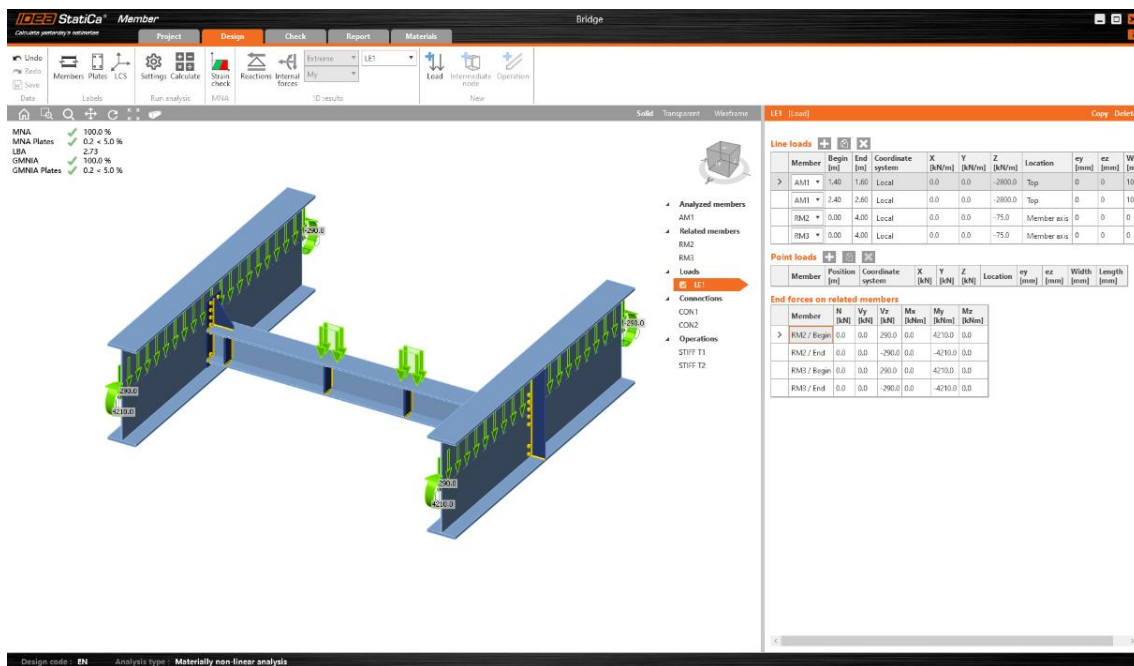


图 1 IDEA Member 操作界面



## 2 操作流程

如前文所述，钢结构设计的直接分析法需要考虑结构的二阶 P- $\Delta$  效应和初始缺陷，但 IDEA Member 只能考虑单个构件和与之相连的部分构件的二阶 P- $\delta$  效应和初始缺陷。因此，用户应先在三维结构计算软件（如 SAP2000、MIDAS、STAAD Pro 等）中完成“考虑结构初始缺陷和二阶 P- $\Delta$  效应”的整体非线性分析，然后选择单个构件及其相连构件导入 IDEA Member。其中，用户选择的单个构件称为“分析构件”，与之相连的构件称为“相关构件”。

如图 2 所示，在 SAP2000 中创建钢框架结构的整体计算模型，定义 P- $\Delta$  效应和初始缺陷并完成非线性分析，然后以首层边梁作为分析构件导入 IDEA Member。IDEA Member 采用壳单元创建分析构件及其节点的精细化有限元模型，但采用梁单元创建相关构件（柱、次梁和其它主梁）主体部分的杆系模型，这种多尺度模型的处理方式可以在保证计算精度的同时尽量减小计算量。

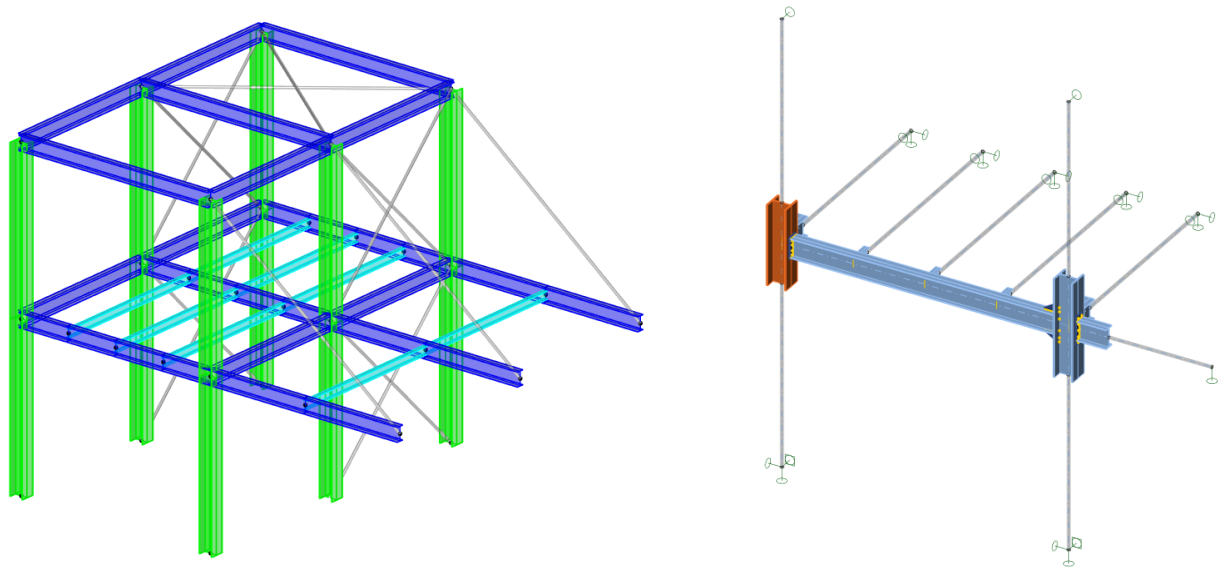


图 2 结构整体模型（SAP2000）和构件局部模型（IDEA Member）

在 IDEA Connection 中完成主次梁节点和梁柱节点的设计，也可以根据需要校核螺栓和焊缝的承载力。针对分析构件的构造措施或几何细节，除纵向和横向加劲板外，IDEA Member 还可以添加开洞、加强构件及其切割、板件切割和通用焊缝等加工操作，如图 3 所示。因此，对于非常规的空腹式构件（如图 4 中的蜂窝梁），IDEA Member 壳单元模型可以更准确地计算翼缘和腹板的应力和应变。

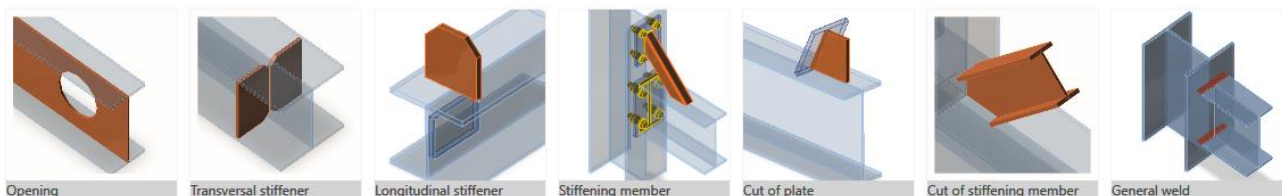


图 3 针对分析构件的加工操作类型

如图 4 所示，由于相关构件采用梁单元建模，IDEA Member 只能基于构件轴线施加线荷载或点荷载，无法指定荷载的作用位置和作用范围。相关构件的远端节点应根据整体计算模型定义相同的支座条件，如：固定铰支座、滑动铰支座或自由端。此外，远端节点自动施加由整体计算模型导入的构件内力，保证分析构件和相关构件的力学平衡。

完成上述全部建模和加载操作后，IDEA Member 依次运行材料非线性分析（MNA）、线性屈曲分析（LBA）和考虑初始缺陷的双非线性稳定性分析（GMNIA）。需要注意的是，以上三种分析类型必须严格按先后顺序运行。这是因为只有材料非线性分析通过强度校核，后续的稳定性分析才有意义；同理，只有先完成线性屈曲分析，后续的双非线性稳定性分析才能引入初始缺陷。

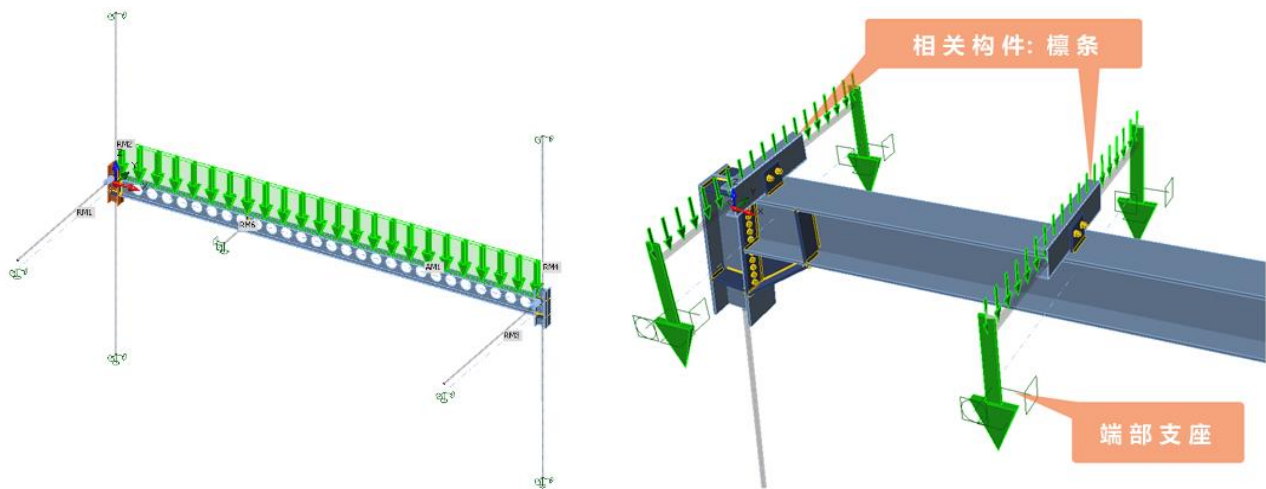


图4 分析构件（左）和相关构件（右）的线荷载

## 2.1 材料非线性分析 (MNA, Materially Nonlinear Analysis)

材料非线性分析采用理想弹塑性本构模型考虑材料的塑性发展和内力重分布，摒弃计算长度法中采用的近似的线弹性分析。因此，构件的强度校核标准并非“材料应力小于屈服强度”，而是“最大塑性应变小于容许值”。IDEA Member 默认的材料塑性应变容许值为 5%，用户可根据需要修改为更严格的数值，如 1% 或 0。

如图 5 所示，虽然在梁柱节点处存在局部塑性区，材料应力等于屈服强度，但由于最大塑性应变小于容许值 5%，故满足强度校核要求。如果最大塑性应变超过容许值，用户先修改设计方案直至通过强度校核，然后再运行线性屈曲分析和双非线性稳定性分析。

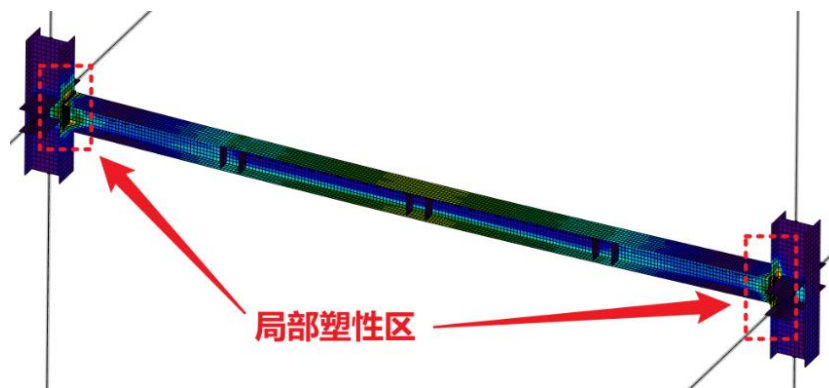


图5 材料非线性分析的等效应力云图

## 2.2 线性屈曲分析 (LBA, Linear Buckling Analysis)

线性屈曲分析（即：特征值屈曲分析）采用线弹性本构模型计算屈曲模态和屈曲荷载，忽略材料的弹塑性和内力重分布。线性屈曲分析作为初步的钢结构稳定性分析，只能提供理想构件的弹性临界荷载，既无法考虑构件的初始曲率和偏心加载，也无法考虑构件可能存在的残余应力。因此，理想构件的弹性临界荷载往往大于实际构件的稳定承载力，前者是后者的上限值，不能直接作为钢结构稳定校核的判别标准。

线性屈曲分析的屈曲模态用于引入构件的初始缺陷，以便完成后续的双非线性稳定性分析。IDEA Member 默认计算前六阶屈曲模态，用户也可以根据需要增加或减少屈曲模态的数量。但建议不要只计算第一阶屈曲模态，以免遗漏可能存在的更不利的构件失稳形式。如图 6 所示，线性屈曲分析的第一阶屈曲模态对应工字梁的弯扭失稳，屈曲因子（2.49）远小于更高阶屈曲模态，故以此引入构件的初始缺陷，缺陷幅值为 13mm。关于不同构件的缺陷幅值的取值，用户应查阅设计规范中的相关规定。



Loads	Shape	Factor	Imperfection amplitude [mm]
LE1	1	2.49	13
	2	9.30	0
	3	13.45	0
	4	13.61	0
	5	13.96	0
	6	14.02	0

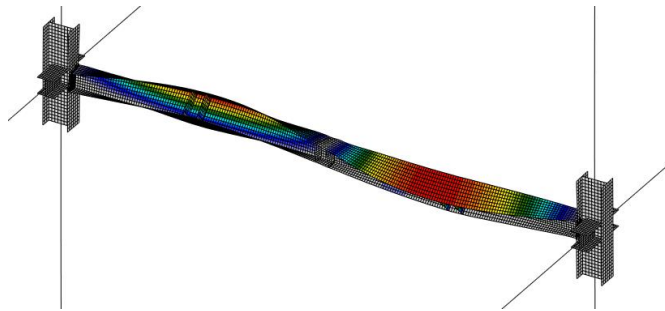


图6 线性屈曲分析的屈曲因子（左）和第一阶屈曲模态（右）

### 2.3 考虑初始缺陷的双非线性稳定性分析

#### (GMNIA, Geometrically and Materially Nonlinear Analysis with Imperfections)

双非线性稳定性分析在引入构件初始缺陷的基础上，同时考虑材料非线性和几何非线性，此处的几何非线性即构件的二阶 P- $\delta$  效应。因此，上述分析方法即钢结构稳定设计的直接分析法，计算难度和计算量都远远高于前述的材料非线性分析。由于在有限元分析中直接考虑材料的弹塑性、构件的初始缺陷和二阶 P- $\delta$  效应，GMNIA 可以完美规避计算长度或稳定系数的繁琐计算，换之以强度校核代替稳定校核。

IDEA Member 采用荷载而非位移控制加载过程，无法输出图 7（左）所示的“荷载-位移”曲线的下降段。在工程实践中，工程师重点关注钢结构构件在设计荷载作用下是否会丧失稳定性，也就是非线性分析能否收敛。因此，GMNIA 采用的稳定校核标准是“设计荷载成功加载至 100% 且满足强度校核要求”。如前文所述，构件的强度校核标准并非“材料应力小于屈服强度”，而是“最大塑性应变小于容许值”。如图 7（右）所示，GMNIA 成功加载至 100% 且最大塑性应变小于 5%，故满足稳定校核要求。

如果设计荷载无法成功加载至 100%（如 80%），表明非线性分析不收敛，构件丧失稳定性。如果设计荷载成功加载至 100% 但不满足强度校核标准，也表明不满足稳定校核标准。对于上述情况，用户应修改设计方案并重新依次运行以上三种分析类型，直至满足稳定校核标准。

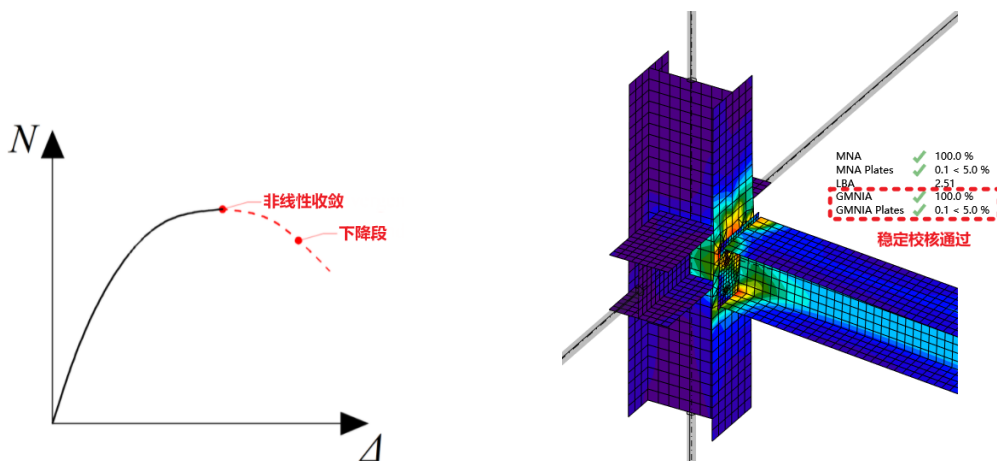


图7 双非线性稳定性分析的荷载-位移曲线（左）和等效应力云图（右）

## 3 总结

本文简要介绍了钢结构构件设计与分析软件 IDEA Member 的主要功能和操作流程。IDEA Member 可以对钢结构构件及其节点创建精细化的有限元模型，也可以自定义荷载的作用位置和作用范围。为了实现钢结构稳定设计的直接分析法，IDEA Member 必须依次完成材料非线性分析、线性屈曲分析和考虑初始缺陷的双非线性稳定性分析。

鉴于篇幅有限，本文无法更加全面具体地介绍 IDEA Member 软件的各个功能细节和应用技巧，感兴趣的读者可以访问筑信达网站（[www.cisec.cn](http://www.cisec.cn)）或拨打筑信达技术热线，也欢迎申请试用软件。