

MIDAS/Civil 悬索桥分析功能使用说明

资料制作日期：2006-8-9

对应软件版本：Civil 2006

1. 使用MIDAS/Civil分析悬索桥的基本操作步骤

- A. 定义主缆、主塔、主梁、吊杆等构件的材料和截面特性；
- B. 打开主菜单“模型/结构建模助手/悬索桥”，输入相应参数（各参数意义请参考联机帮助的说明以及下文的一些内容）；
- C. 将建模助手的数据另存为“*.wzd”文件，以便以后修改或确认；
- D. 运行建模助手后，程序会提供几何刚度初始荷载数据和初始单元内力数据，并自动生成“自重”的荷载工况；
- E. 对模型根据实际状况，对单元、边界条件和荷载进行一些必要的编辑后，将主缆上的各节点定义为更新节点组，将塔顶节点和跨中最低点定义为垂点组；
- F. 定义悬索桥分析控制数据后运行。运行过程中需确认是否最终收敛。运行完了后程序会提供平衡单元节点内力数据；
- G. 删除悬索桥分析控制数据，将所有结构、边界条件和荷载都定义为相应的结构组、边界组和荷载组，定义一个一次成桥的施工阶段，在施工阶段对话框中选择“考虑非线性分析/独立模型”，并勾选“包含平衡单元节点内力”；
- H. 运行分析后查看该施工阶段的位移是否接近于0以及一些构件的内力是否与几何刚度初始荷载表格或者平衡单元节点内力表格的数据相同；
- I. 各项结果都满足要求后即可进行倒拆施工阶段分析或者成桥状态的各种分析；
- J. 详细计算原理请参考技术资料《用MIDAS做悬索桥分析》。

2. 建模助手中选择三维和不选择三维的区别？

- A. 选择三维就是指按空间双索面来计算悬索桥，需要输入桥面的宽度，输入的桥面系荷载将由两个索面来承担；
- B. 不选择三维时，程序将给建立单索面的空间模型，不需输入桥面的宽度，输入的桥面系荷载将由单索面来承担。

3. 建模助手中主梁和主塔的材料、截面以及重量是如何考虑的？

- A. 因为索单元必须考虑自重，因此建模助手分析中对于主缆和吊杆的自重，程序会自动考虑；
- B. 但在建模助手中主梁和主塔的材料和截面并不介入分析，程序只是根据输入的几何数据，给建立几何模型，以便进行下一步的悬索桥精密分析。即，程序不会根据定

义的主梁的材料和截面自动计算自重并参与分析，用户需要根据成桥状态时的桥面系荷载（如，主梁自重、二期恒载等），在建模助手对话框中按线荷载或节点荷载来具体输入；

- C. 之后在进行悬索桥精密分析时，对于主梁的自重则将根据材料的容重以及截面面积来计算，对于二期恒载用户可按梁单元荷载等形式进行定义；
- D. 注意：建模助手中输入的桥面系荷载值须等于悬索桥精密分析时考虑的各荷载工况对于桥面系作用的荷载总和（例如等于按主梁自重计算的线荷载加上二期恒载梁单元线荷载）。

4. 为什么靠近主塔处的两根吊杆的初始内力比别的吊杆大？

- A. 在建模助手中，对于输入的桥面系荷载（线荷载）是由吊杆来承担的。各吊杆承受的荷载大致是线荷载与吊杆间距的乘积（如果单索面承受荷载的话）；
- B. 在主塔处由于没有吊杆，与主塔处相邻的吊杆需要承受的荷载为线荷载与 1.5 倍的吊杆间距的乘积，因此会较大；
- C. 如果成桥的结构在主塔与主梁的连接处，主塔对主梁有支承作用，则上述方法求出的主塔处吊杆的初始内力是不合理的；
- D. 此时可以在建模助手中通过勾选“加劲梁端到塔墩中心线的距离”，输入 G1 和 G2 的值（吊杆到主塔距离的 1/2）来处理。但在进行悬索桥精密分析前，需要用户建立该处的主梁单元，并对主塔和主梁的支承关系进行定义；
- E. 除了方法 d)，还可以通过按点荷载的方式输入桥面系荷载的方式来处理（勾选建模助手对话框中“桥面系>单位重量>详细…”）。对于吊杆间距不等或者边跨最外侧吊杆受力大小要调整时，使用此方法更容易实现一些。

5. 悬索桥分析控制中的“主缆内力水平分量”有什么意义，如何使用？

- A. 对于地锚式悬索桥桥面系的荷载确定后，主缆内力的水平分量理论上是一定的。但根据桥梁的实际情况，对于主梁吊装连接后施加的二期恒载，主梁也会承受一部分弯矩，这时主缆上的水平分量会发生一些变化；
- B. 对于自锚式悬索桥，桥面系的荷载一部分是由主缆承担，一部分是由主梁承担的。因此根据主缆和主梁的荷载分配比率，自锚式悬索桥的成桥状态可以有很多不同的解；
- C. 设计人员可以通过调整悬索桥分析控制中的“主缆内力水平分量”，来参与确定主缆和主梁所承受荷载的比率；
- D. 在第一步悬索桥建模助手对话框输入所有参数后，点击右下角的“实际形状”或者“更新或重画”的话，下端会显示当前结构的主缆内力水平分量。在悬索桥分析控

制中输入的主缆内力水平分量需是在结构合理受力状态范围内的值，可参考第一步中显示的结果取值，不能随便输入。

6. 运行悬索桥分析控制后，在分析信息中会显示类似下面信息，其具体代表什么意义？

```
NONLINEAR STATIC LOADCASE :      1
INCREMENT NO. :      1  ITERATION NO. :      1    DISPL. NORM : 0.100E+01
INCREMENT NO. :      1  ITERATION NO. :      2    DISPL. NORM : 0.361E+00
INCREMENT NO. :      1  ITERATION NO. :      3    DISPL. NORM : 0.156E+00
INCREMENT NO. :      1  ITERATION NO. :      4    DISPL. NORM : 0.734E-01
INCREMENT NO. :      1  ITERATION NO. :      5    DISPL. NORM : 0.353E-01
INCREMENT NO. :      1  ITERATION NO. :      6    DISPL. NORM : 0.176E-01
INCREMENT NO. :      1  ITERATION NO. :      7    DISPL. NORM : 0.844E-02
ITERATION NO :      2  CONVERGENCE RATIO : 0.43322E+00
.....
```

- A. “INCREMENT NO. : 1” :是指荷载增幅步数。
- B. “ITERATION NO. : 1” :是指每荷载步内的迭代次数，1 表示第 1 次迭代计算, 2 表示第 2 次迭代计算。
- C. “DISPL. NORM” :是指收敛计算中在每个荷载步骤下的位移收敛的“范数”，程序默认的收敛控制参数为：迭代次数为 30 次，收敛标准范数为 0.01，上面数据中迭代第 7 次时计算范数为 0.844e-02 小于 0.01, 所以结束了第 2 次迭代计算 (ITERATION NO : 2)。
- D. “ITERATION NO : 2” :是指第 2 次迭代计算，迭代次数在悬索桥分析控制对话框中输入，默认为 5。
- E. “CONVERGENCE RATIO” :是根据更新的节点坐标、索的张力、平衡内力计算的不平衡内力引起的位移的收敛范数，其控制范数在悬索桥分析控制对话框中输入，默认为 1e-05。最终迭代次数(默认为 5)中计算范数小于 1e-05 即表示收敛了，但是一般在最终迭代次数中的计算范数小于 1e-02 时，可以认为结果收敛了。一般来说随着计算 CONVERGENCE RATIO 值应该逐渐变小，当逐渐变大时可认为没有收敛。
- F. 每个迭代次数内的每荷载增步中的收敛控制参数，当在分析>非线性分析控制中设定了控制参数时，遵循设定的参数，没有设定参数时如上面 a 中所述默认为迭代次数为 30 次，收敛标准范数为 0.01。分析>非线性分析可设也可不设。
- G. 在悬索桥分析控制中选择的荷载，最好放在同一个荷载工况内。

7. 通过建模助手求到的平衡状态中，塔底有较大弯矩时，应如何解决？

- A. 需在第二步悬索桥分析之前，对模型进行处理。即，将主塔顶的节点和该处主缆的节点使用上下两个节点模拟。两个节点间使用弹性连接或刚性连接，只约束竖向的位移（根据情况也可约束面外方向的变形）；
- B. 该处主缆的节点坐标不要加入到更新节点组中；
- C. 进行完悬索桥分析得到平衡内力等数据后，在进行施工阶段或者成桥状态分析时，再将该处两个点的约束按最终状况模拟。

8. 不通过建模助手，如何计算初始平衡状态？

- A. 进行非线性分析之后，不断更新节点坐标和索单元初拉力（定义索单元时输入的）来求平衡状态；
- B. 程序对相应荷载工况进行非线性分析，会产生位移和内力，之后会将该内力作为索单元的初拉力（单元表格中）更新。
- C. 更新节点坐标是将原坐标和发生的位移的和作为新的节点坐标。如果悬索桥的索面是竖直的则只更新 Z 坐标，如果是空间的，还需更新 Y 坐标。
- D. 由于第一步计算时变形较大，故第一步时一般不更新节点坐标，从第二步开始更新；
- E. 定义索单元时输入的初拉力不会进行迭加，而作为外荷载输入的初拉力会进行迭加，此为两者最大差异。

9. 对于初始荷载的说明

在“荷载/初始荷载”中，分为大位移和小位移两项，其内又分为几何刚度初始荷载、平衡单元节点内力、初始荷载控制数据、初始单元内力共 4 项内容。其作用分别如下：

● 大位移/几何刚度初始荷载

描述当前荷载作用之前的结构的初始状态。可由悬索桥建模助手自动计算给出结构的初始平衡状态。

用户输入几何刚度初始荷载进行非线性分析时，不需定义相应的荷载工况，程序会自动在内部考虑相应荷载和内力，使其达到平衡，因此此时位移为 0。如果用户又定义了荷载工况，则荷载相当于双重考虑，此时不仅会发生位移，而且内力也会增加 1 倍左右。

几何刚度初始荷载的概念，可以说是为了描述一个有一定初始内力和刚度的、位移为 0 的成桥状态。此时有新的荷载参与作用时，我们可以通过分析得到新的作用引起的位移和内力，注意：其中内力结果包含成桥状态的内力。

因此，在进行悬索桥倒拆分析时，不需定义自重，但在钝化构件的同时，需要在索的吊杆连接位置输入与构件重量相同的反向节点荷载。

对于几何刚度初始荷载的几点附加说明如下：

- A. 静力线性分析：不起作用。因此如果使用索单元建模，且没有初始单元内力数据的话，分析时会发生奇异；
- B. 静力非线性分析：根据几何刚度初始荷载考虑结构的初始状态。根据不同荷载工况，几何刚度会发生变化。另外，不同荷载工况作用效应的算术迭加不成立；
- C. 施工阶段非线性分析（独立模型，不考虑平衡内力）：大位移分析，即几何刚度根据不同施工阶段荷载的作用发生变化，且考虑索单元节点坐标变化引起的影响（索单元）；
- D. 施工阶段非线性分析（独立模型，考虑平衡内力）：几何刚度初始荷载不起作用，“初始荷载/平衡内力”发生作用；
- E. 施工阶段非线性分析（独立模型，考虑平衡内力，但未输入平衡内力，输入了几何刚度初始荷载）：几何刚度初始荷载不起作用，对施加的荷载工况进行静力非线性分析。下个阶段中也一样，但前一阶段的荷载和本阶段的荷载相当于一同作用并对其进行分析；
- F. 移动荷载分析：程序会自动将索单元转换为等效桁架单元进行线性分析，其几何刚度将利用“小位移/初始单元内力”来确定。

● 大位移/平衡单元节点内力

该功能只适用于施工阶段分析中选择非线性分析的独立模型，并且勾选了“包含平衡单元节点内力”选项时的情形。

进行斜拉桥或悬索桥逆施工阶段分析时，通过计算由张拉力和恒载导致的成桥状态的节点力和构件内力，可以考虑在相应成桥荷载作用下，位移为 0 的状态。即，提前使结构存在与外力相平衡的内力，从而使结构不发生变形。（考虑平衡单元节点内力后进行非线性分析时，位移量会趋近于 0）

因此，需要定义自重等的荷载工况。在倒拆分析时，只要钝化构件即可，不需加反向的节点荷载。

考虑平衡节点内力时，程序会根据外力和平衡节点内力的差（不平衡力）进行计算。相同时位移为 0，例如悬索桥分析正常结束之后的状态。进行倒拆分析时，由于钝化了荷载或结构，外力会小于平衡内力，程序会根据新的不平衡力重新进行计算。

与几何刚度初始荷载的方式的差异，可以说是平衡单元节点内力的方式可以考虑加劲梁的内力。对于地锚式悬索桥，加劲梁的内力很小，所以两种方式都适用。但对于自锚式悬索桥，加劲梁的内力很重要，因此不宜适用几何刚度初始荷载的方式。

● 小位移/初始荷载控制数据

进行线性分析时，将输入的初始单元内力添加给指定的荷载工况。如果不添加，则在分析时只考虑初始单元内力引起的几何刚度，在相应荷载工况的内力结果中，不包含初始单元内力。

另外，考虑平衡单元节点内力时，对于悬索桥，通过悬索桥分析控制，程序自动提供平衡单元节点内力的数据；对于斜拉桥，则可以通过在“初始荷载控制数据”中勾选“初始内力组合”，并将要考虑的荷载工况全部添加之后进行静力分析，即可在“结果/分析结果表格/平衡单元节点内力”中得到相应数据，将其复制到“大位移/平衡单元节点内力”即可。

● 小位移/初始单元内力

只适用于线性分析或动力分析，其作用与几何刚度初始荷载相同。即通过形成几何刚度来影响结构的总体刚度，但其刚度并不随作用荷载的变化而变化。可以说是为了对于一个非线性结构进行线性分析而需要的功能，比如对于悬索桥进行特征值分析或者移动荷载分析等。

另外，在进行时程分析时，如果要考虑自重等静力荷载作用下的初始状态时，需要将静力荷载另行定义为一种时变荷载。利用这里的初始单元内力功能，可以使构件在进行时程分析时就处于相应的初始状态，而不需再将静力荷载定义为时变荷载了。

10. 初始荷载控制数据一是否给单元添加初始荷载？

- A. 非线性分析时，初始的几何刚度（几何刚度初始荷载）的影响将反映到内力中去，因此不需要给单元添加初始荷载；
- B. 线性分析时，使用“初始单元内力”计算的几何刚度只对刚度有影响，并不会反映到内力中去。若要将其考虑为内力，需给单元添加初始荷载。

11. 如何得到施工阶段过程中，各构件的结构效应？

- A. 建立成桥模型；
- B. 定义倒拆分析的施工阶段；
- C. 在施工阶段分析控制对话框中勾选“考虑构件平衡内力”后进行倒拆分析。

12. 悬索桥施工过程中的鞍座顶推如何模拟？

- A. 模拟起来不是很方便。需使用程序提供的弹性连接、刚性连接等功能来模拟。

13. 对于悬索桥如何考虑温度作用？

- A. 可以把温度作用同样作为一个施工阶段加在最后一个阶段上。但对升温和降温需建立不同的模型进行分析后分别查看结果。此时对于温度进行的是非线性分析，有可能出现不容易收敛的情况。
- B. 也可将温度作用定义为一般的荷载工况（不是施工阶段荷载工况）。这样程序在进行完施工阶段分析后，会利用几何刚度初始荷载形成结构的几何刚度，并对这种状态的结构进行温度作用的分析。此时对于索单元是将其转换为等效桁架单元来计算

的。

14. 如何得到恒载作用下的结构效应以及恒载+活载（或动力荷载）的组合效应？

有两种方法：可以定义一个空的荷载工况，将初始内力添加到该荷载工况中。进行完移动荷载分析（动力分析）后，将该荷载工况与移动荷载工况进行组合。另一种方法是定义施工阶段的方法，步骤如下：

- A. 将通过建模助手得到的成桥模型只定义一个施工阶段（即成桥阶段），选择施工阶段分析控制的非线性分析并勾选考虑平衡内力。（此时几何刚度初始荷载不发生作用，是为了保存成桥状态的构件内力，以便与活载计算结果组合）
- B. 输入“小位移/初始单元内力”，定义移动荷载后进行分析。（因为是施工阶段非线性分析的独立模型，对于 PostCS 状态进行静力分析时，不是利用最后阶段的内力计算几何刚度。因此需另行输入初始单元内力，以用来计算 PostCS 状态的几何刚度。）
- C. 分析前需把自重、二期恒载等的荷载类型（定义静力荷载工况时）定义为施工阶段荷载。（因为对于移动荷载工况，程序会自动将索单元转换为等效桁架单元进行线性分析。但对于其它荷载工况，程序还是按索单元计算，因此有可能出现不收敛的情况。而且由于对于自重、二期恒载的效应已经包含在了成桥状态的内力中，因此将其设为施工阶段荷载，以便对于 PostCS 状态不再分析计算）
- D. 在 PostCS 定义一个 CS: 合计的组合，再定义一个合计与移动荷载的组合。

15. 如何对悬索桥进行屈曲分析？

- A. 悬索桥的屈曲分析可考虑两部分荷载。即，成桥时的恒载和对于成桥状态（初始状态）作用的其它荷载（风载、移动荷载等）。其稳定系数的意义应该是成桥时作用的恒载不变，此时其它荷载作用多少倍时结构发生屈曲；
- B. MIDAS/Civil 目前提供两种屈曲分析功能，线弹性屈曲分析和几何非线性的屈曲分析；
- C. 进行线弹性屈曲分析，在“分析/屈曲分析控制”对话框中，添加成桥后的荷载工况后进行分析即可。此时对于恒载的作用效应，程序会根据与成桥状态对应的初始单元内力来考虑，因此注意不要将恒载也添加进去；
- D. 进行几何非线性的屈曲分析，需进行几何非线性分析。即在“分析/非线性分析控制”中，将要考虑的其它荷载工况添加到非线性分析荷载工况中，并定义荷载加载步骤数量和系数。此时对于恒载的作用效应，程序会根据与成桥状态对应的几何刚度初始荷载来考虑，因此注意不要将恒载也添加进去。几何非线性分析后，可以使

用“结果/阶段步骤时程图形”来查看荷载系数与位移的变化曲线，并通过判断曲线斜率的突变点以及与其对应的荷载系数求出稳定系数。