



midas Civil 2010专题培训—悬索桥专题

Integrated Solution System for Bridge and Civil Structures

目 录

一. 悬索桥概述..... - 1 -

1.1 桥塔..... - 1 -

1.2 锚碇..... - 1 -

1.3 主缆..... - 1 -

1.4 吊索..... - 1 -

1.5 加劲梁..... - 2 -

1.6 鞍座..... - 2 -

1.7 悬索桥的垂跨比 - 2 -

二. midas Civil中的悬索桥功能..... - 2 -

2.1 悬索桥建模助手功能 - 2 -

2.2 悬索桥分析功能 - 2 -

2.3 索单元模拟..... - 2 -

三. 悬索桥建模分析例题..... - 5 -

3.1 桥梁概况 - 5 -

3.2 悬索桥建模助手自动生成初始平衡状态..... - 7 -

3.3 悬索桥分析得到修改模型的精确平衡状态..... - 9 -

3.4 悬索桥倒拆分析 - 10 -

3.5 悬索桥正装模拟+成桥分析 - 11 -

四. 关于悬索桥分析的说明 - 12 -

一. 悬索桥概述

悬索桥是指以主缆索受拉为主要承重构件的桥梁结构，其结构构造（如图1.1所示）包括基础、桥塔、锚碇、主缆索、吊索、加劲梁及桥面结构等。在桥梁设计时，当需要桥梁跨度在600m及以上时，总是首选悬索桥这一经典桥型。主要原因是以高强钢丝作为主要受拉结构的悬索桥具有跨越能力大、受力合理、最能发挥材料强度和造价经济等特点，同时还以其整体造型流畅美观和施工安全便捷等优势而倍受推崇。

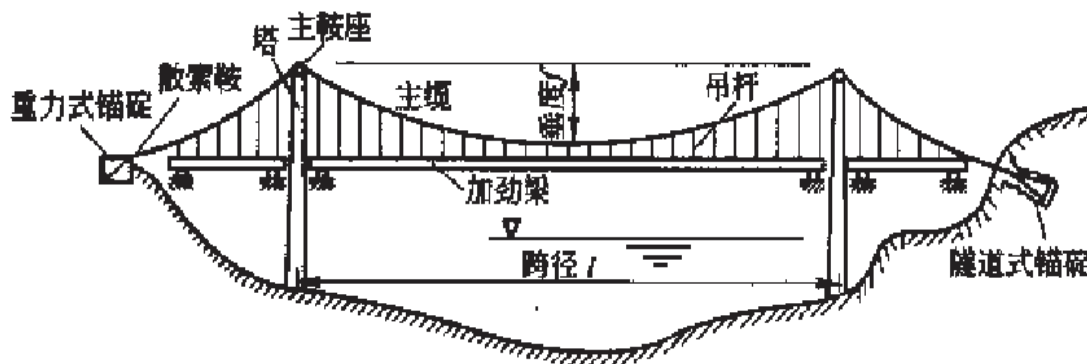


图1.1 悬索桥的构造示意图

1.1 桥塔

桥塔是支承主缆的重要构件，悬索桥上的车辆活载和恒载（包括桥面、加劲梁、吊索、主缆及其附件）都将通过主缆传给塔身及其基础。此外，桥塔还要经受风力和地震力的作用。

桥塔一般设计为柔性结构，其腹杆的组合形式，在塔的美观设计中起着重要作用。按其腹杆的组合形式可分为：a) 桁架式；b) 刚架式；c) 混合式等三种，如图1.2所示。

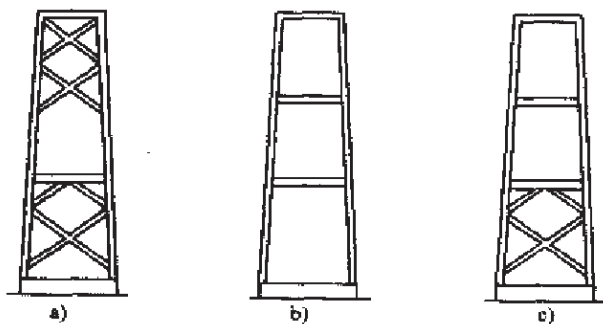


图1.2 桥塔示意图

a) 桁架式 b) 刚架式 c) 混合式

1.2 锚碇

锚碇是主缆的锚固体，它将主缆中的拉力传递给地基基础，具体构造如图1.3所示。

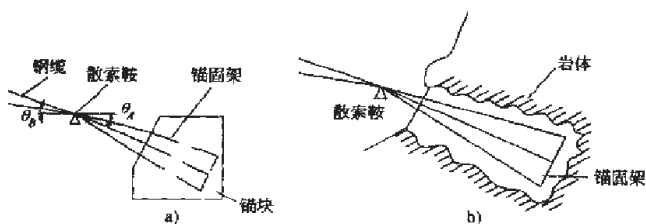


图1.3 锚碇构造

a) 重力式锚碇 b) 隧道式锚碇

悬索桥按其主缆的锚固方式分自锚式和地锚式两种。前者是将主缆直接锚在加劲梁上，必须先架梁，后挂缆，故只适用于小跨径悬索桥；后者是当前大跨径悬索桥上广泛采用的形式，也就是所称的“锚碇”。锚碇一般由锚碇基础、锚块、锚锭架及固定装置等部分组成。锚碇基础可以是扩大基础、沉井基础、桩基础及隧道。

1.3 主缆

主缆是悬索桥的主要承重构件，除承受自身恒载外，它本身还要通过索夹和吊索承受活载和加劲梁（包括桥面构造）的恒载。现在常用平行钢丝主缆，它是由高强镀锌平行钢丝束组成的，为便于施工安装和锚固，主缆被分成束股（如图1.4所示）编制架设，并在两端锚碇处分别锚固，主缆的其余区段则挤紧成规则的圆形，然后缠以软质钢丝捆扎并进行外部涂装防腐。

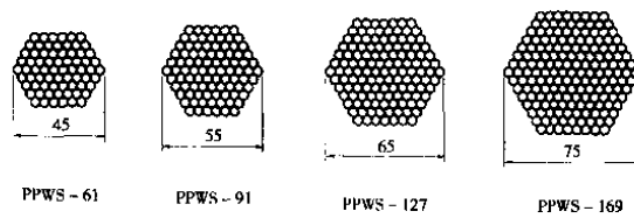


图1.4 预制束股常用截面 (cm)

1.4 吊索

吊索又称吊杆，是将加劲梁竖向力向主缆传递的局部受力构件。

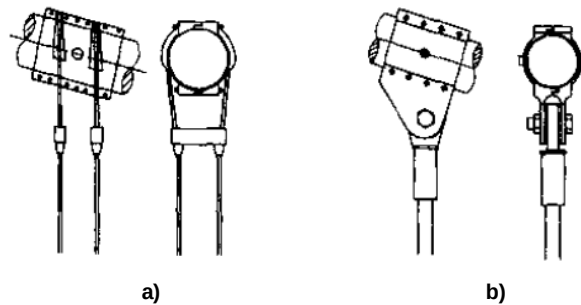


图1.5 吊索与索夹联结的方式

a) 骑跨式 b) 销接式

其下端通过锚头与梁体两侧的吊索点联接，上端通过索夹与主缆联接。从立面布置上有常规的竖直吊索和英式斜向吊索两种形式。与索夹的联接方式有骑跨式和销接式两种，如图1.5所示。

1.5 加劲梁

加劲梁是提供桥面和防止桥面发生过大的局部挠曲和扭曲的部件。

悬索桥的加劲梁多采用钢结构而少采用混凝土结构。根据所收集的统计资料来看，全世界已经建成的悬索桥中，采用混凝土加劲梁且主跨径在200m以上的只有两座，一座是1964年建在加拿大的赫得逊·霍普河谷上，单跨跨长207m，另一座是1995年在我国建成的汕头海湾大桥，它是一座跨径为154m+452m+154m三跨双铰式悬索桥。除此之外，所有其他悬索桥上的加劲梁均采用钢箱梁或钢桁架结构，而混凝土加劲梁至今仍处于一种停滞状态。

1.6 鞍座

鞍座是支承主缆的重要构件，通过它可以使主缆中的拉力传到塔顶或锚碇的支架处。鞍座结构主要由鞍槽、座体和底板三大部分组成，如图1.6所示。鞍座常采用全铸或铸焊组合方式制造，由于其结构尺寸及重量大，通常在纵向分成两节或三节铸造及施工吊装，但须拼合后整体进行机械加工。

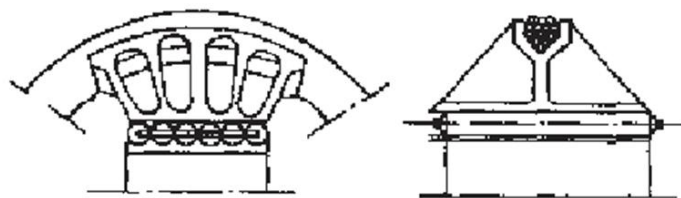


图1.6 塔顶主鞍座

1.7 悬索桥的垂跨比

悬索桥的垂跨比(f/L)是指中跨主缆的矢高 f 与其跨长 L 之比。从力学分析得知，垂跨比变大，主缆中的拉力就变小，相应地，用钢量便减少，但这样桥塔需要增高，而且加劲梁容易挠曲，因此，工程设计中需要通过多个方案的比较后，从中选出最优的垂跨比。

二. midas Civil 中的悬索桥功能

悬索桥与一般中小跨径桥梁的区别就是悬索桥的自重和大部分施工荷载主要由主缆来承担。特别是成桥后在恒载作用下主缆和吊杆的张力、桥形应与设计目标一致。悬索桥的主缆是变形性很大的承重构件，施工过程中主缆和加劲梁的几何形状变化非常大，所以进行悬索桥设计时，要做逆施工阶段分析（倒拆分析），为了做考虑几何非线性的倒拆分析还需要做自重荷载下的初始平衡状态分析。

悬索桥在加劲梁的自重作用下产生变形后达到平衡状态，在满足设计要求的垂度和跨径条件下，计算主缆的坐标和张力的分析一般称为初始平衡状态分析。这是对运营阶段进行线性、非线性分析的前提条件，所以应尽量使初始平衡状态分析结果与设计条件一致。

悬索桥的初始平衡状态分析是以悬索桥的基本假定为基础，利用节线法来计算空缆线形的过程。节线法是利用加劲梁、吊杆自重作用下产生的内力平衡条件来计算主缆的坐标和张力的方法。此方法是悬索桥（广安大桥、永宗大桥、日本明石海峡大桥）广泛应用的方法。除了节线法之外，还有利用弹性悬链线确定空缆线形的方法和考虑加劲梁、主缆、主塔体系来决定整体结构形状的精确分析的方法。midas Civil软件不仅能做节线法分析，而且还能对整体结构体系做精确的初始平衡状态分析。

2.1 悬索桥建模助手功能

采用节线法得到初始平衡状态。该方法采用了日本Ohtsuki博士使用的计算索平衡状态方程式，是利用桥梁自重和主缆张力的平衡方程计算主缆坐标和主缆张力的方法。其基本假定如下：

- (1) 吊杆仅在横桥向倾斜，垂直于顺桥向。
- (2) 主缆张力沿顺桥向分量在全跨相同。
- (3) 假定主缆与吊杆的连接节点之间的索呈直线形状，而非抛物线形状。
- (4) 主缆两端坐标、跨中垂度、吊杆在加劲梁上的吊点位置、加劲梁的恒荷载等为已知量。

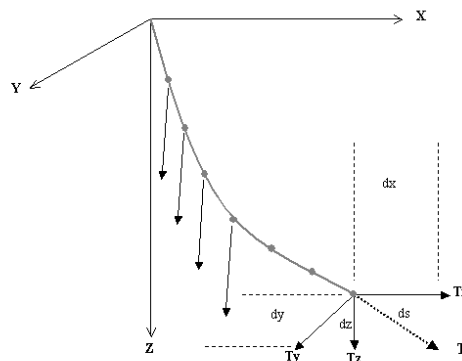


图1.7 吊杆间主缆的张力分布示意图

2.2 悬索桥分析功能

通过节线法确定的主缆初始线形因为基本假定（假定2：张力沿顺桥向分量在全跨相同）的假设，可能与主缆的最终实际线形有所差异。所以需要以节线法确定的初始线形为基础，使用悬链线索单元做更精确的分析。

首先把主缆两端的锚固点、主塔底部、吊杆下端均按固结处理，然后建立由弹性悬链线主缆和吊杆形成的空缆模型。通过节线法计算的主缆两端坐标和无应力长作为弹性悬链线的已知参数。无应力长 L_0 是以主缆两端坐标为基础计算而得，主缆的水平张力 T_x 也是通过节线法来计算，也是已知参数。初始平衡状态的精确分析分析流程图参见资料《悬索桥分析》。

2.3 索单元模拟

在midas Civil中，对于索结构，可用以下几种单元模拟：

- 1) 桁架单元；
- 2) 只受拉桁架单元；
- 3) 钩单元，具有一定初始间隙，只有当两节点之间的位移达到初始间隙之后，单元才开始承受拉力；
- 4) 索单元，在线性分析时，索单元转换为等效桁架单元，作几何非线性分析时，该单元转化为弹性悬索单元；

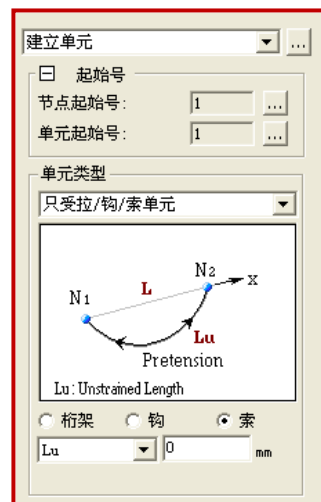


图1.8 索单元的选择

索单元的不同分析方式:

1) 静力线性分析:

按考虑恩斯特公式修正的等效桁架单元进行分析

2) 静力非线性分析 (设置非线性分析控制):

按考虑大变形的悬索单元进行分析

3) 施工阶段考虑时间依存性效果 (线性):

按考虑恩斯特公式修正的等效桁架单元进行分析

4) 施工阶段考虑非线性分析:

按考虑大变形的悬索单元进行分析

5) 移动荷载分析或支座沉降分析:

按桁架单元 (或考虑成桥时的几何刚度) 进行线性分析

初始内力控制

☒ 转换最终施工阶段构件内力为PostCS阶段的构件的几何刚度初始荷载

☒ 桁架单元 ☒ 梁单元

☒ 在PostCS阶段将索单元转换为等效桁架单元

成桥状态荷载工况	不勾选“在PostCS...”	勾选“在PostCS...”	备注
移动荷载	按桁架单元考虑 (线性叠加)	考虑成桥状态的索单元 和梁单元的几何刚度	
支座沉降	同上	同上	
动力分析 (特征值分析等)	同上	同上	
温度荷载	按等效桁架单元考虑, 基于恩斯特公式进行 反复迭代计算	同上	
其它静力荷载	按等效桁架单元考虑, 基于恩斯特公式进行 反复迭代计算	同上	

不同结构中索单元的使用:

- 1) 悬索桥的主缆和吊杆: 建议使用考虑大变形的悬索单元;
- 2) 大跨斜拉桥的斜拉索: 对于近千米或者超过千米的斜拉桥建议使用考虑大变形的索单元;
- 3) 中小跨斜拉桥的斜拉索: 建议使用考虑恩斯特公式修正的等效桁架单元;
- 4) 拱桥的吊杆: 建议使用桁架单元或只受拉桁架单元;
- 5) 系杆拱桥的系杆: 建议使用桁架单元;
- 6) 体内预应力或体外预应力的钢索 (钢束): 与索单元无关, 使用预应力荷载功能按荷载来模拟即可;
- 7) 进行细部分析时: 对于钢束可以按桁架单元来模拟;

5.1.3 拉索换算弹性模量按下式计算:

$$E = \frac{E_0}{1 + \frac{(\gamma S \cos \alpha)^2}{12\sigma^3}} \quad (5.1.3)$$

E为考虑垂度影响的拉索换算弹性模量

式中: E ——考虑垂度影响的拉索换算弹性模量(kPa);

E_0 ——拉索弹性模量(kPa);

γ ——拉索换算容重(kN/m³),

$\gamma = \frac{\text{每米拉索及防护结构材料重力(kN/m)}}{\text{拉索截面积(m}^2\text{)}}$

S ——拉索长度(m);

α ——拉索与水平线的夹角(°);

σ ——拉索应力(kPa)。

恩斯特公式, 由德国著名学者 H.-J.Ernst 提出。公式表明: 选用高强度的材料, 提高拉索的工作应力, 采用轻而有效的拉索防护手段, 使拉索每延米的重量不致过多增加, 均有助于提高拉索刚度, 降低其非线性影响。

midas Civil中几种概念对比（一）

概念	无应力索长Lu	平衡单元节点内力	几何刚度初始荷载	初始单元内力
适用分析	大位移分析	大位移分析	大位移分析	小位移分析
有几何刚度?	有	有	有	有
有内力效应?	有	有	没有	没有
适用阶段	CS, PostCS	CS	CS, PostCS	CS, PostCS
考虑优先级	低 (3)	高 (1)	中 (2)	—
备注		做了悬索桥精确平衡状态分析可以给出, 或者也可以手动输入; 同时仅适用施工阶段独立模型	只能考虑轴力影响	

midas Civil中几种概念对比（二）

概念	索单元	考虑Ernst修正的等效桁架单元	等效桁架单元	桁架单元
几何刚度修正?	是	是	否	否
适用分析?	成桥非线性	施工阶段, 成桥线性	成桥线性	成桥线性
初始内力控制 ☒ 转换最终施工阶段构件内力为PostCS阶段的构件的几何刚度初始荷载 ☒ 桁架单元 ☒ 梁单元 ☒ 在PostCS阶段将索单元转换为等效桁架单元				
是否需要勾选	—	未勾选“将索单元转化为等效桁架单元”	勾选“将索单元转化为等效桁架单元”	—
刚度取值	只要是成桥的几何非线性, 都会不断更新索刚度值;	(1) 除了移动, 支沉, 特征值, 反应谱分析外的静力分析都是考虑修正的; (2) 注意只对不同荷载工况的最终内力作修正; E为考虑垂度影响的拉索换算弹性模量 $E = \frac{E_0}{1 + \frac{(YScosa)^2}{12\sigma^3}}$	(1) 考虑不同荷载的组合问题, 需要统一刚度值; (2) 所有荷载都是取用一个刚度, 即: $E_{eq} = \frac{E_0}{1 + \frac{w^2 l_H^2 E_0 A}{12 T^3}}$	成桥移动, 支沉降, 特征值(动力分析);
是否使用初始单元内力	否	若有初始单元内力时, 则不作修正, 大家统一用初始单元内力;	若有初始单元内力时, 则不作修正, 大家统一用初始单元内力;	是

三. 悬索桥建模分析例题

3.1 桥梁概况

本例题为3跨**自锚式悬索桥**，跨径为 $112.5\text{m}+300\text{m}+112.5\text{m}=525\text{m}$ ，边跨吊杆间距为 $9@12.5\text{m}$ ，中跨吊杆间距为 $24@12.5\text{m}$ ；横桥向悬索距离为 14m 。

该桥加劲梁自重为 95.58kN/m ，桥面二期为 26.5kN/m ，故桥面系恒载为 122.08kN/m 。

悬索桥的详细信息，请参见建模助手对话框。材料和截面信息参考下图。



材料数据

一般
材料号: 1 名称: 主缆

弹性数据
设计类型: 钢材
钢材: 规范: JTG04 (S) 数据库: Strand1860
混凝土: 规范: 数据库: 数据库:
材料类型: ☒ 各向同性 ☐ 各向异性

钢材
弹性模量: $1.9500\text{e}+008$ kN/m^2
泊松比: 0.3
线膨胀系数: $1.2000\text{e}-005$ $1/^\circ\text{C}$
容重: 78.5 kN/m^3
☐ 使用质量密度: 8.005 $\text{kN/m}^3/\text{g}$

材料数据

一般
材料号: 2 名称: 吊索

弹性数据
设计类型: 钢材
钢材: 规范: JTG04 (S) 数据库: Strand1860
混凝土: 规范: 数据库: 数据库:
材料类型: ☒ 各向同性 ☐ 各向异性

钢材
弹性模量: $1.9500\text{e}+008$ kN/m^2
泊松比: 0.3
线膨胀系数: $1.2000\text{e}-005$ $1/^\circ\text{C}$
容重: 78.5 kN/m^3
☐ 使用质量密度: 8.005 $\text{kN/m}^3/\text{g}$

材料数据

一般
材料号: 3 名称: 加劲梁

弹性数据
设计类型: 钢材
钢材: 规范: GB03 (S) 数据库: Q345
混凝土: 规范: 数据库: 数据库:
材料类型: ☒ 各向同性 ☐ 各向异性

钢材
弹性模量: $2.0600\text{e}+008$ kN/m^2
泊松比: 0.3
线膨胀系数: $1.2000\text{e}-005$ $1/^\circ\text{C}$
容重: 76.98 kN/m^3
☐ 使用质量密度: 7.85 $\text{kN/m}^3/\text{g}$

材料数据

一般
材料号: 4 名称: 塔

弹性数据
设计类型: 钢材
钢材: 规范: GB03 (S) 数据库: Q345
混凝土: 规范: 数据库: 数据库:
材料类型: ☒ 各向同性 ☐ 各向异性

钢材
弹性模量: $2.0600\text{e}+008$ kN/m^2
泊松比: 0.3
线膨胀系数: $1.2000\text{e}-005$ $1/^\circ\text{C}$
容重: 76.98 kN/m^3
☐ 使用质量密度: 7.85 $\text{kN/m}^3/\text{g}$

截面数据

数据库/用户 |

截面号: 1

名称: 主缆

实腹圆形截面

截面:

☒ 焊接组合截面

从单角钢数据库中读取数据

数据库名称: GB-YB

截面名称:

D: 0.23 m

☒ 考虑剪切变形

偏心: 中心

修改偏心...

显示截面特性值... 确定 取消 适用(A)

截面数据

数据库/用户 |

截面号: 2

名称: 吊索

实腹圆形截面

截面:

☒ 焊接组合截面

从单角钢数据库中读取数据

数据库名称: GB-YB

截面名称:

D: 0.05 m

☒ 考虑剪切变形

偏心: 中心

修改偏心...

显示截面特性值... 确定 取消 适用(A)



截面数据

数据库/用户 |

截面号: 3

名称: 加劲梁

箱型截面

截面:

☒ 焊接组合截面

从单角钢数据库中读取数据

数据库名称: GB-YB

截面名称:

H: 1.6 m

B: 14 m

tw: 0.04 m

t.f1: 0.04 m

C: 0 m

t.f2: 0 m

☒ 考虑剪切变形

偏心: 中心

修改偏心...

显示截面特性值... 确定 取消 适用(A)

截面数据

数据库/用户 |

截面号: 4

名称: 塔

箱型截面

截面:

☒ 焊接组合截面

从单角钢数据库中读取数据

数据库名称: GB-YB

截面名称:

H: 2.3 m

B: 2 m

tw: 0.09 m

t.f1: 0.09 m

C: 0 m

t.f2: 0 m

☒ 考虑剪切变形

偏心: 中心

修改偏心...

显示截面特性值... 确定 取消 适用(A)

3.2 悬索桥建模助手自动生成初始平衡状态

悬索桥建模助手流程

第一步
创建新模型，并保存模型；
定义主缆、主塔、主梁、吊杆等构件的材料和截面特性

第二步
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说明）；
将建模助手的数据另存为“*.wzd”文件，以便以后修改或确认；

第三步
建模助手数据文件输入完成后，点击确定，程序自动计算，并生成初始平衡状态模型（程序会提供悬索单元和吊杆单元的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，以及成桥的几何非线性分析控制对话框）

悬索桥建模助手

节点坐标和塔墩高度

☒ 三维 单位 : m

	X	Y	Z
A	12.5	0	27
A1	12.5	0	27
B	125	0	93.5
C	275	0	33.5
D	425	0	93.5
E	537.5	0	27
E1	537.5	0	27
H1			
H2			
高度	93.5		93.5

☐ 非对称桥梁

吊杆间距 (m)

	左跨	中间跨	右跨
间距	9@12.5	24@12.5	9@12.5

特性值

主缆	边缆	标准吊杆	端部吊杆	加劲梁	塔墩
1	1	2: 吊索	2: 吊索	3: 加劲梁	4: 塔

桥面系

宽度 (w)	单位重量	高度 (h)
14	122.08	0

☒ 加劲梁端到塔墩中心线的距离

距离 (m)	距离 (m)
G1: 6.25	G3: 6.25
G2: 6.25	G4: 6.25

桥面坡度

☒ 坡面 ☐ 坐标值

左跨坡度 (%)	中间跨圆弧水平距离 (m)	右跨坡度 (%)
0	0	0

视图选项

☒ X-Z平面 ☐ 截面大样 ☐ 实际形状

更新和重画

横向内力

12124.3 kN

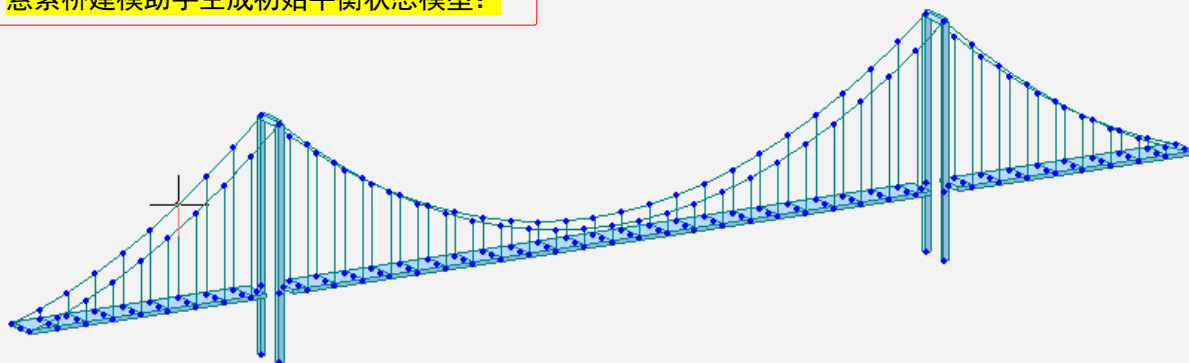
定义三维模型悬索横向距离

定义桥面系荷载（包括加劲梁自重和桥面铺装等桥面系恒载）

对于非标准悬索桥，可以通过此处来定义桥面系荷载。

在塔梁连接的位置，通过赋予加劲梁端到塔墩中心线的距离，从而将桥面系荷载合理分配给边吊杆和索塔（通常取索塔到塔边吊杆间距的一半）。

悬索桥建模助手生成初始平衡状态模型:



单元	荷载方向	初始荷载 (kN)
141	轴向	764.8865
142	轴向	764.5987
143	轴向	764.5027
144	轴向	764.5987
145	轴向	764.8865
146	轴向	765.3663
147	轴向	766.0383
148	轴向	766.9027
149	轴向	767.9597
150	轴向	769.2101
151	轴向	770.6539
152	轴向	772.2919
153	轴向	774.1245
154	轴向	776.1524
155	轴向	775.8868
156	轴向	773.5952
157	轴向	771.4995
158	轴向	769.5988
159	轴向	767.8925
160	轴向	766.3800
161	轴向	765.0607
162	轴向	763.9342

几何刚度初始荷载

初始单元内力

菜单	表格	组	工作
工作			
分析控制数据			
非线性分析数据 [类型=几何非线性]			
初始内力 (大位移)			
几何刚度初始荷载 [单元=162]			
初始内力 (小位移)			
初始单元内力 [单元=162]			
结构			
节点: 217			
单元: 214			
只受拉单元: 162			
梁单元: 52			
H 特性值			
材料: 4			
截面: 4			
边界条件			
支撑: 8			
刚性连接: 39			
静力荷载			
静力荷载工况 1 [自重; 自重]			
自重 [SZ=-1]			
其它荷载			

类型	单元	轴力-i (kN)	剪力(y)-i (kN)	剪力(z)-i (kN)	扭矩-i (kN*m)	弯矩(y)-i (kN*m)	弯矩(z)-i (kN*m)	轴力-j (kN)	剪力(y)-j (kN)
桁架	142	7.6460e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.6460e+002	0.0000e+000
桁架	143	7.6450e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.6450e+002	0.0000e+000
桁架	144	7.6460e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.6460e+002	0.0000e+000
桁架	145	7.6489e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.6489e+002	0.0000e+000
桁架	146	7.6537e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.6537e+002	0.0000e+000
桁架	147	7.6604e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.6604e+002	0.0000e+000
桁架	148	7.6690e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.6690e+002	0.0000e+000
桁架	149	7.6796e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.6796e+002	0.0000e+000
桁架	150	7.6921e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.6921e+002	0.0000e+000
桁架	151	7.7065e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.7065e+002	0.0000e+000
桁架	152	7.7229e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.7229e+002	0.0000e+000
桁架	153	7.7412e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.7412e+002	0.0000e+000
桁架	154	7.7615e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.7615e+002	0.0000e+000
桁架	155	7.7589e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.7589e+002	0.0000e+000
桁架	156	7.7360e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.7360e+002	0.0000e+000
桁架	157	7.7150e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.7150e+002	0.0000e+000
桁架	158	7.6960e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.6960e+002	0.0000e+000
桁架	159	7.6789e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.6789e+002	0.0000e+000
桁架	160	7.6638e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.6638e+002	0.0000e+000
桁架	161	7.6506e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.6506e+002	0.0000e+000
桁架	162	7.6393e+002	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	0.0000e+000	7.6393e+002	0.0000e+000

3.3 悬索桥分析得到修改模型的精确平衡状态

悬索桥分析流程

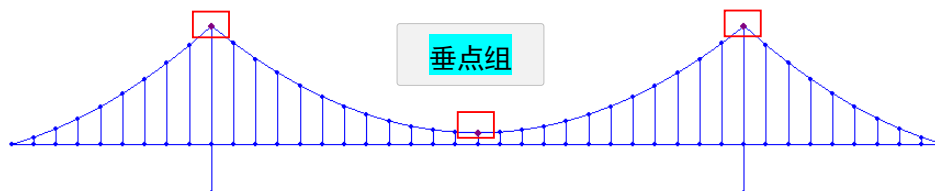
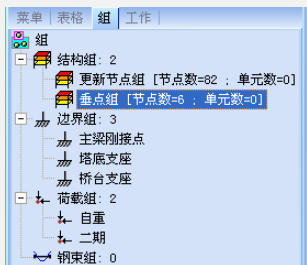
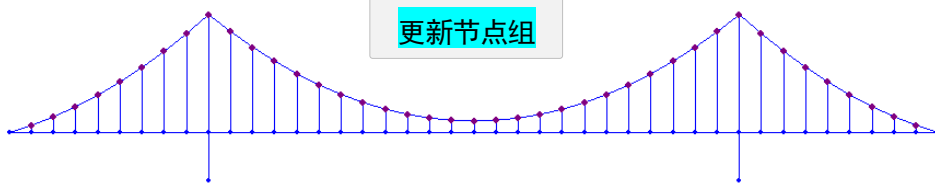
第一步
在初始平衡状态模型上删除“几何非线性分析控制”对话框

第二步
修改初始模型至成桥状态，并定义二期恒载

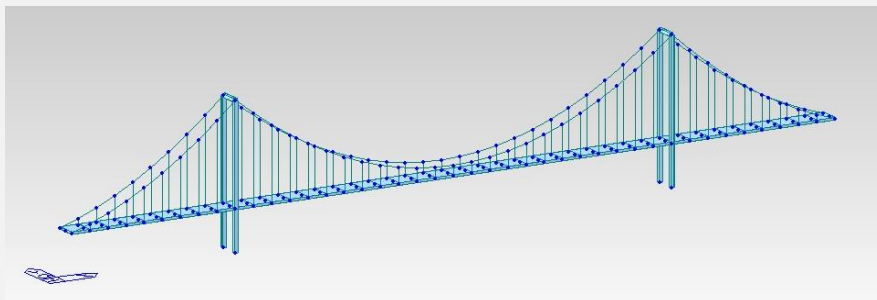
第三步
定义悬索桥分析控制对话框，选择更新节点组和垂点组
(垂点组中的节点必须存在于更新节点组)

第四步
运行悬索桥分析，程序自动进行精确平衡状态求解，更新节点坐标，并且
大变形中的“几何刚度初始荷载”和“节点平衡单元内力”，以及小变形
中的“初始单元内力”

定义节点组
与垂点组



修改成三跨自锚式悬索桥；将加劲梁靠近塔支撑处连接起来，并且修改此处的加劲梁和桥塔边界，另外再将桥台位置处边界修改成桥边界。



生成平衡单元节点内力

树形菜单

菜单 | 表格 | 组 | 工作

工作

分析控制数据

悬索桥分析数据 [Nt=5 ; 误差=1e-04]

初内力大小 (大位移)

几何刚度初始荷载 [单元=214]

平衡单元节点和构件内力 [单元=214]

初内力大小 (小位移)

初内力单元力 [单元=214]

结构

节点: 215

单元: 214

特性值

材料: 4

截面: 4

边界条件

支承: 6

刚性连接: 43

静力荷载

静力荷载工况 1 [自重 : 自重]

自重 [SZ=1]

梁单元荷载 (单元): 42

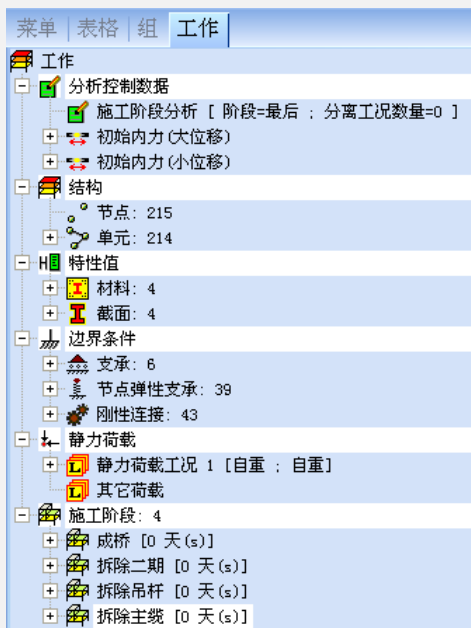
其它荷载

模型窗口

平衡单元节点内力

	类型	单元	Fx-i (kN)	Fy-i (kN)	Fz-i (kN)	Mx-i (kN·m)	My-i (kN·m)	Mz-i (kN·m)	Fx-j (kN)	Fy-j (kN)	Fz-j (kN)
梁	194	2.3460e+004	-6.6724e-009	-4.2363e+001	5.0771e-007	6.6130e+002	-8.4331e-008	-2.3460e+004	6.6724e-009	4.2363e+001	
梁	195	2.3460e+004	2.9019e-009	-5.1570e+001	5.7083e-007	1.1908e+003	-1.2733e-007	-2.3460e+004	-2.9019e-009	5.1570e+001	
梁	196	2.4231e+004	-2.3489e-009	4.4736e+001	6.2557e-008	3.1766e+003	7.4656e-007	-2.4231e+004	2.3489e-009	-4.4736e+001	
梁	197	2.4231e+004	-1.3898e-008	4.5564e+001	4.5437e-008	2.6174e+003	7.0091e-007	-2.4231e+004	1.3898e-008	-4.5564e+001	
梁	198	2.4231e+004	-5.8190e-009	4.4781e+001	4.0499e-008	2.0478e+003	5.3298e-007	-2.4231e+004	5.8190e-009	-4.4781e+001	
梁	199	2.4231e+004	-1.3885e-008	4.3756e+001	-7.4016e-009	1.4881e+003	4.6524e-007	-2.4231e+004	1.3885e-008	-4.3756e+001	
梁	200	2.4231e+004	-7.3221e-009	4.2660e+001	2.0218e-009	9.4112e+002	3.0732e-007	-2.4231e+004	7.3221e-009	-4.2660e+001	
梁	201	2.4231e+004	-6.5313e-009	4.1559e+001	-1.3997e-008	4.0787e+002	1.8509e-007	-2.4231e+004	6.5313e-009	-4.1559e+001	
梁	202	2.4231e+004	-1.1541e-008	4.0473e+001	-2.9387e-008	-1.1162e+002	9.9174e-008	-2.4231e+004	1.1541e-008	-4.0473e+001	
梁	203	2.4231e+004	-1.1885e-008	3.9405e+001	-5.0866e-008	-6.1754e+002	-1.3478e-008	-2.4231e+004	1.1885e-008	-3.9405e+001	
梁	204	2.4231e+004	-7.3442e-009	3.8357e+001	-4.3859e-008	-1.1101e+003	-1.5630e-007	-2.4231e+004	7.3442e-009	-3.8357e+001	
梁	205	2.2085e+004	5.2774e+000	-2.1613e+001	6.4196e-003	-6.8557e-007	-2.3451e+002	-2.2085e+004	-5.2774e+000	2.1613e+001	
梁	206	2.5565e+004	5.2172e-009	3.6402e+002	1.6793e-008	2.1078e+003	-6.7113e-008	-2.5565e+004	-5.2172e-009	-3.6402e+002	
梁	207	5.2774e+000	-8.2350e-009	1.1397e-009	-4.1273e-007	-6.9793e+002	6.4196e-003	5.2774e+000	8.2350e-009	-1.1397e-009	
梁	208	2.2085e+004	-5.2774e+000	-2.1613e+001	-6.4184e-003	1.3854e-007	2.3451e+002	-2.2085e+004	5.2774e+000	2.1613e+001	
梁	209	2.5565e+004	5.2382e-009	3.6402e+002	1.6793e-008	2.1078e+003	-6.7396e-008	-2.5565e+004	-5.2382e-009	-3.6402e+002	
梁	210	2.2085e+004	5.2774e+000	2.1613e+001	-6.4194e-003	5.5749e-007	-2.3451e+002	-2.2085e+004	-5.2774e+000	-2.1613e+001	
梁	211	2.5565e+004	5.2738e-009	-3.6402e+002	-1.3526e-008	-2.1078e+003	-7.0051e-008	-2.5565e+004	-5.2738e-009	3.6402e+002	
梁	212	5.2774e+000	4.9921e-008	-2.8165e-009	2.7619e-007	-6.9793e+002	-6.4193e-003	-5.2774e+000	-4.9921e-008	2.8165e-009	
梁	213	2.2085e+004	-5.2774e+000	2.1613e+001	6.4186e-003	1.6775e-008	2.3451e+002	-2.2085e+004	5.2774e+000	-2.1613e+001	
梁	214	2.5565e+004	5.3989e-009	-3.6402e+002	-1.3526e-008	-2.1078e+003	-7.1739e-008	-2.5565e+004	-5.3989e-009	3.6402e+002	

3.4 悬索桥倒拆分析



施工阶段分析控制数据

最终施工阶段

☒ 最后施工阶段 ☐ 其他施工阶段 威桥

☐ 设置施工阶段连续分析 选择重新开始的阶段...

分析选项

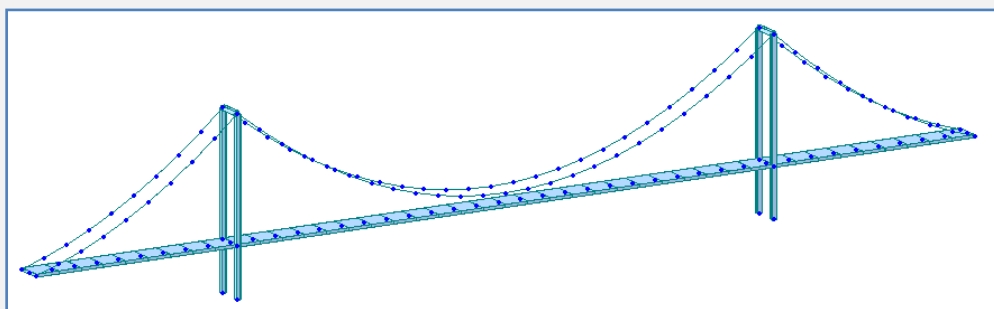
☒ 考虑非线性分析 ☐ 独立模型 ☐ 累加模型

☒ 包含平衡单元节点内力

☐ 只考虑P-Delta效应

☐ 考虑时间依存效果(累加模型)

进行倒拆模拟，一次成桥、拆除二期铺装、拆除吊杆（同时加劲梁施加临时满堂），得到空缆线形。



拆除吊杆后模型：

倒拆分析中出现问题:

```

CONSTRUCTION STAGE RESULTS SAVED TO FN.CAS FILE

ENTRY PHASE FOR RENUMBERING
ENTRY NUMBERING_EQN
ENTRY FORM_STIFF_MASS_LOAD
THE INDIVIDUAL ELEMENT STIFFNESS AND LOAD MATRICES WILL NOW BE FORMED.
ELEMENT NO. : 136 OF 136
ENTRY SOLUTION PHASE
ENTRY LOAD_BLOCK
TOTAL NUMBER OF VALID DOFS IN MODEL : 508
ENTRY ASSM_STIFF_LOAD ( FORM GLOBAL EQUILIBRIUM EQUATIONS IN BLOCKS )

ENTRY STATIC ANALYSIS FOR NONLINEAR.

LOADCASE NO. : 1 ITERATION NO. : 1
WARNING : NODE NO. 88 DY DOF MAY BE SINGULAR.
WARNING : EQUATION NO. 143
WARNING : NODE NO. 88 DZ DOF MAY BE SINGULAR.

```

如果在定义好倒拆分析的模型后, 进行分析, 运行过程中出现如左图的信息, 注意是在loadcase1中出现节点位移不正常的信息。这说明是在成桥阶段分析中出问题了, 但是我们这个做的施工阶段倒拆, 并未涉及成桥阶段分析, 关键问题就出在loadcase 1荷载工况的类型上, 只要把荷载类型定义成施工阶段荷载即可。

静力荷载工况

名称:	自重	添加(A)
类型:	施工阶段荷载 (CS)	编辑(M)
说明:	自重	删除(D)

号	名称	类型	说明
1	自重	施工阶段荷载 (CS)	自重

名称:	自重	添加(A)
类型:	恒荷载 (D)	编辑(M)
说明:	自重	删除(D)

号	名称	类型	说明
1	自重	恒荷载 (D)	自重

3.5 悬索桥正装模拟+成桥分析

树形菜单

菜单	表格	组	工作
工作			
分析控制数据			
移动荷载分析数据			
施工阶段分析 [阶段=最后; 分离工况数量=0]			
初始内力 (大位移)			
初始内力 (小位移)			
结构			
节点: 215			
单元: 214			
H 特性值			
材料: 4			
截面: 4			
边界条件			
支承: 6			
节点弹性支承: 39			
刚性连接: 43			
静力荷载			
静力荷载工况 1 [自重; 自重]			
静力荷载工况 2 [二期恒载;]			
其它荷载			
移动荷载分析			
移动荷载规范 [China]			
车道: 3			
车辆: 1			
移动荷载工况: 1			
施工阶段: 4			
加劲梁和桥塔 [0 天(s)]			
上主缆 [0 天(s)]			
上吊杆 [0 天(s)]			
上二期 [0 天(s)]			

移动荷载分析控制数据

荷载控制选项	
加载位置:	☒ 影响线加载 ☐ 所有点
生成影响点	
☒ 每个线单元上影响线点数量:	3
☐ 点之间距离:	0 m
计算位置	
板单元:	☐ 内力 (中心) ☒ 内力 (中心+节点)
	☐ 应力
杆系单元:	☐ 内力 (最大值) ☒ 内力 (最大值+当前其他内力)
	☒ 应力
计算选项	
☒ 反力	☒ 全部 ☐ 组:
☒ 位移	☒ 全部 ☐ 组:
☒ 内力	☒ 全部 ☐ 组:
☒ 桥梁等级 (JTG B01-2003) ☒ 公路I级 ☐ 公路II级	
冲击系数	
规范类型:	JTG D60-2004
结构基频方法:	用户输入
f [Hz] 0.35	

$$E_{eff} = \frac{E_0}{1 + \frac{w^2 l_H^2 E_0 A}{12 T^3}}$$

定义移动荷载工况。

如果在施工阶段分析控制中, 勾选了“将索单元转化为等效桁架单元”, 则在成桥中做移动荷载分析时, 利用最终施工阶段的索的内力计算索单元的等效刚度 E_{eff} ; 如果未勾选, 则按桁架单元考计算。

四. 关于悬索桥分析的说明

1、建模助手的功能

使用简化方法计算获得索的**水平张力和主缆的初始形状**，利用悬索单元的柔度矩阵重新进行迭代分析。当获得了所有主缆单元的无应力长之后，则构成由主缆和吊杆组成的索的体系，即主缆两端、索塔墩底部、吊杆下端均按固接处理。当将无应力索长赋予悬索单元时，将产生不平衡力引起结构变形，然后通过坐标的变化判断收敛与否，当不收敛时则更新坐标重新计算无应力索长直至收敛，建模助手分析结束。

2、悬索桥分析控制

以建模助手生成的主缆坐标、无应力索长、水平张力为基础进行悬索桥整体结构的初始平衡状态分析。

对于地锚式悬索桥，其通过建模助手建立的模型，若小范围地调整加劲梁，对索的无应力长度和主缆坐标影响不是很大，因此一般来说直接采用建模助手的结果即可，当需要做精密的分析时也可采用悬索桥分析控制功能进行第二阶段分析。

而自锚式悬索桥，由于其加劲梁受较大轴力的作用，加劲梁端部和索塔墩锚固位置会发生较大变化，即主缆体系将发生变化，所以从严格意义来说建模助手获得的索体系和无应力长与实际并不相符。**因此必须对整体结构重新进行精密分析**。其过程如下：将主缆和吊杆的力按静力荷载加载到由索塔墩和加劲梁组成的杆系结构上，计算加劲梁和索塔墩的初始内力，并将其作用在整体结构上。通过反复计算直至收敛，获得整体结构的初始平衡状态。具体参考MIDAS主页技术资料《自锚式悬索桥的计算》。

3、对于初始荷载的说明

从671版本开始，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：

(1) 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。

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：

- 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；
- 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；
- 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）；
- 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；**
- 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；
- 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。

(2) 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”选项时的情况。

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。（但由于平衡单元节点内力的结果是通过成桥状态进行线性分析而得到的，因此考虑平衡单元节点内力后进行非线性分析时，会发生一些位移，但位移量会很小）

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。

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，因此不能适用几何刚度初始荷载的方式。**

(3) 小位移/初始荷载控制数据

在进行线性分析时，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。

(4) 小位移/初始单元内力

只适用于线性分析，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。

4、初始荷载控制数据一是否给单元添加初始荷载？

非线性分析时，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；

线性分析时，几何刚度初始荷载只对几何刚度有影响，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。

5、如何得到恒载作用下的结构效应以及恒载+活载的组合效应？

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：

(1) 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“平衡单元节点内力”。（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）；

(2) 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，以用来得到PostCS状态的几何刚度）。

(3) 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。（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**）

（4）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。

6、如何得到施工阶段过程中，各构件的结构效应？

即利用**倒拆分析**，得到施工阶段过程中，各构件的结构效应：

- （1）建立成桥模型
- （2）定义倒拆分析的施工阶段
- （3）在施工阶段分析控制对话框中勾选“考虑构件平衡单元节点内力”后进行倒拆分析；

7、对于悬索桥如何考虑温度作用？

（1）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 and 降温需建立不同的模型进行分析后分别查看结果。同时需注意：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**。

（2）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**。

8、使用MIDAS/Civil分析悬索桥的基本操作步骤？

- （1）定义主缆、主塔、主梁、吊杆等构件的材料和截面特性；
- （2）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中的内容）；
- （3）将建模助手的数据另存为“*.wzd”文件，以便以后修改或确认；
- （4）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；
- （5）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**；
- （6）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；
- （7）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”；
- （8）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；
- （9）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；

9、建模助手中选择三维和不勾选三维的区别？

- （1）勾选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；
- （2）不勾选三维时，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。

10、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？

- （1）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；
- （2）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；

（3）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；

（4）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）。

11、为什么靠近主塔处的两根吊杆的初始内力比别的吊杆大？

（1）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）；

（2）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；

（3）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**；

（4）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；

（5）除了上述方法，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。

12、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？

（1）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；

（2）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；

（3）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；

（4）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。

13、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
```

.....

- (1) “INCREMENT NO.: 1”：是指**荷载增幅步数**。
- (2) “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。
- (3) “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）。
- (4) “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。
- (5) “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。
- (6) 每个迭代次数内的每荷载增幅中的收敛控制参数，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（1）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。
- (7) **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。**

14、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？

- (1) 需在进行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）；
- (2) 该处主缆的节点坐标不要加入到更新节点组中；
- (3) 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。

15、不通过建模助手，如何计算初始平衡状态？

- (1) 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；
- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) 由于第一步计算时变形较大，故不第一步时一般不更新节点坐标，从第二步开始更新；
- (5) **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。**

16、如何对悬索桥进行屈曲分析？

- (1) 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；
- (2) 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；
- (3) 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；
- (4) 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。