

# 某张弦梁结构的分析设计

## ——SAP2000

### 目录

## CONTENTS

- 01 概述
- 02 几何建模
- 03 施加荷载
- 04 运行分析

# 01

## 概述

- ① 张弦梁结构的特点及组成
- ② 案例模型介绍
- ③ 索的模拟方式

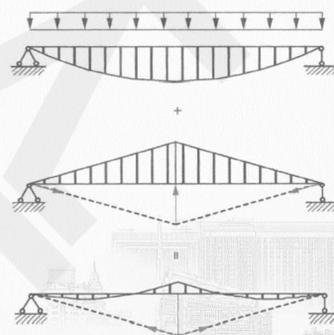
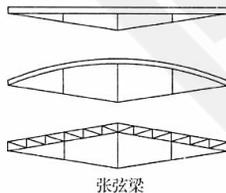
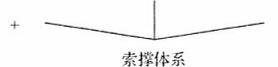
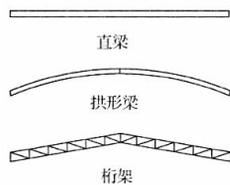
筑信达



## 01 张弦梁结构的组成特点

### 结构组成

- 一般由三类基本构件组成：承受压弯的上弦刚性构件、承受拉力的下弦索和连接二者的受压撑杆，形成自平衡的受力体系。



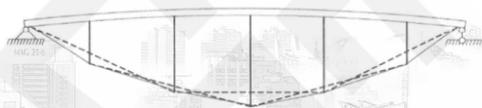
筑信达



## 01张弦梁结构的组成特点

### 撑杆的布置特点

- 相邻撑杆之间索的线形为外凸型
- 撑杆的布置位置一般依据荷载的分布形式确定。
  - 如荷载沿梁（两端简支）水平跨度均匀分布，其梁弯矩呈抛物线变化，撑杆高度按照抛物线布置应较佳；
  - 如果梁的某一位置承受较大集中力，就可以在该处设置撑杆，以平衡集中荷载；
  - 如果有多个集中力，可设置多个撑杆，且撑杆高度按照其弯矩幅值的比例计算；



(a) 张弦梁撑杆的一般布置原则



(b) 在固定集中力作用位置布置撑杆

筑信达



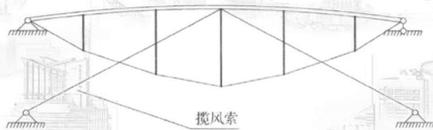
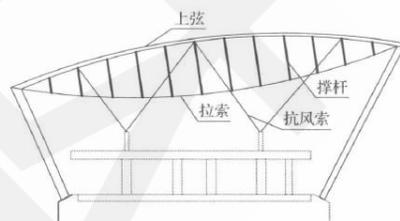
## 01张弦梁结构的组成特点

### 抗风问题

张弦梁常采用自重较小，在风吸力作用下下弦拉索可能会受压而退出工作，影响结构的安全性。

#### 一般处理措施

- 用揽风索拉住张弦梁中的上弦刚性梁
- 加大张弦梁自重的做法或采用重型屋盖以平衡风吸力的作用



张弦梁结构的抗风措施

筑信达



# 01 张弦梁结构的组成特点

## 结构布置

张弦梁上弦杆:

- 可以采用实腹式截面（圆形、矩形钢管、H形钢等）构件
- 组合式截面（平面桁架、倒三角形、梯形或矩形截面立体桁架）构件等

撑杆也有多种布置形式:

- 平面内经常是上下两端铰接的单撑杆，也可以是V形撑杆等多种形式
- 在平面外也有单撑杆、多撑杆并列、V形布置等多种形式

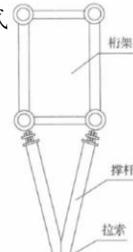


(a) 铰接单撑杆：撑杆两端铰接，拉索与撑杆固定连接

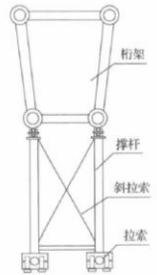


(b) V形撑杆，拉索与撑杆可以采用滑移节点

A. 在张弦梁平面内撑杆的布置形式



(a) 三角形布置的撑杆



(b) 矩形布置的撑杆

B. 在张弦梁平面外撑杆的布置形式

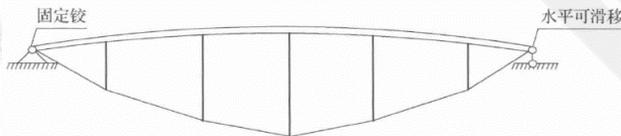


# 01 张弦梁结构的组成特点

## 一般支座条件

张弦梁结构是一个自平衡受力体系。

- 拉索张力与上弦刚性构件通过撑杆相互平衡，拉索不需要外部锚固结构等。
- 张弦梁在索施工张拉过程中不能完全约束其支座的水平自由度，在使用阶段也宜采用一端固定、另一端滑移的支座形式。
- 滑动支座设计也可以释放或减轻使用期间的温度效应。



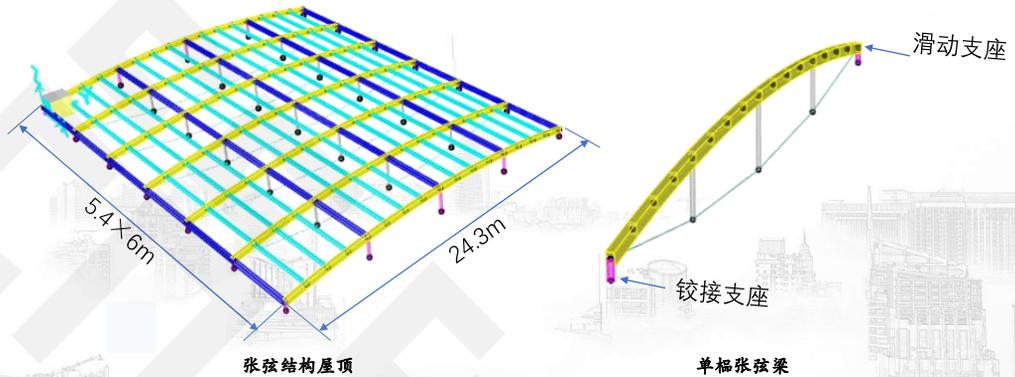
张弦梁结构的边界条件





## 02 案例模型

工程概况：某工业厂房屋顶采用张弦梁结构，横向宽度为 $5.4 \times 6\text{m}$ ，张弦梁跨度为 $24.3\text{m}$ 。其中张弦梁弦杆采用 $400 \times 250$ 的矩形钢管、撑杆为 $\phi 159 \times 6$ 的圆钢管，材性均为Q235。索采用 $\phi 46.0$  fpk1570钢绞线。



讯信达



## 02 案例模型

### ① 恒载

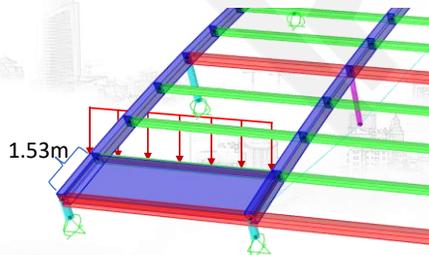
- 结构自重+附加荷载
- 附加恒载按 $1.0\text{kN/m}^2$ 考虑，折算为施加在横梁上的线荷载。

DL(附加):  $1.0 \times 1.53 = 1.53 \text{ KN/m}$ ，取 $1.6 \text{ KN/m}$

### ② 活载

- 屋面活载按 $0.5\text{kN/m}^2$ 考虑，这里折算为施加在横梁上的线荷载，

LL:  $0.5 \times 1.53 = 0.765$ ，取 $0.8 \text{ KN/m}$



讯信达



## 02 案例模型

### ③ 风荷载

基本风压 $\omega_0=0.5\text{KN/m}^2$ ，按照A类地面粗糙度，取屋顶最高点15m计算风压高度系数

$\mu_z=1.14$ ，风振系数取 $\beta_z=1.9$ ，

体型系数分两个区域考虑，风荷载标准值：

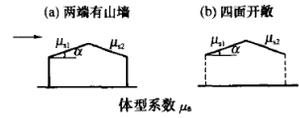
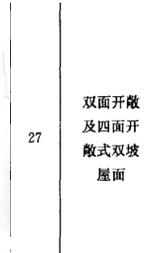
$$\omega_{k1} = \beta_z \mu_s \mu_z \omega_0 = 1.9 * 1.14 * (-1.3) * 0.5 = -1.4079$$

$$\omega_{k2} = \beta_z \mu_s \mu_z \omega_0 = 1.9 * 1.14 * (-0.7) * 0.5 = -0.7581$$

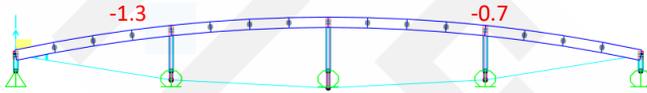
折算成线荷载后：

$$F_{k1} = -1.4079 * 1.53 = -2.1541, \text{取}-2.2$$

$$F_{k2} = 0.7581 * 1.53 = 1.1599, \text{取}-1.2$$



$\alpha$	$\mu_{s1}$	$\mu_{s2}$
$\leq 10^\circ$	-1.3	-0.7
$30^\circ$	+1.6	+0.4



筑信达



## 02 案例模型

承载力极限状态的荷载组合如下图所示

序号1	荷载组合
1	1.0DL+1.5LL+1.0PS
2	1.0DL+1.5WL+1.0PS
3	1.0DL+1.5LL+0.9WL+1.0PS
4	1.0DL+1.05LL+1.5WL+1.0PS

表中：DL-恒载；LL-活载；WL-风载；PS-预应力；地震作用需要在整体模型中考虑，本模型中不涉及

筑信达



## 03 索的模拟方式

索的特点如下：

- ① 索只能承受拉力，不能承受压力和弯矩；
- ② 索是线弹性材料（设计时）；
- ③ 索为柔性构件，几何非线性问题突出；



筑信达



## 03 索的模拟方式

### ◇ 框架单元(frame)

需对框架做属性修正，不考虑框架的抗弯能力；

需剖分单元以保证计算精度；

非线性分析时，需要勾选几何非线性，才能考虑索的非线性；

### ◇ 悬链线单元(cable)

索单元仅能承受拉力，无法承受压力及弯矩；

悬链线单元自动考虑几何非线性（P-Delta 和大位移效应）；



- ◆ 对于较细较短的索，结构刚度较大，索的自重对索自身及结构的工作性能影响不大，可采用框架单元模拟；
- ◆ 对于较粗或较长的索，结构非常柔或支座位移很大时，索的自重可能对索自身或结构的工作性能影响较大，宜采用悬链线单元。

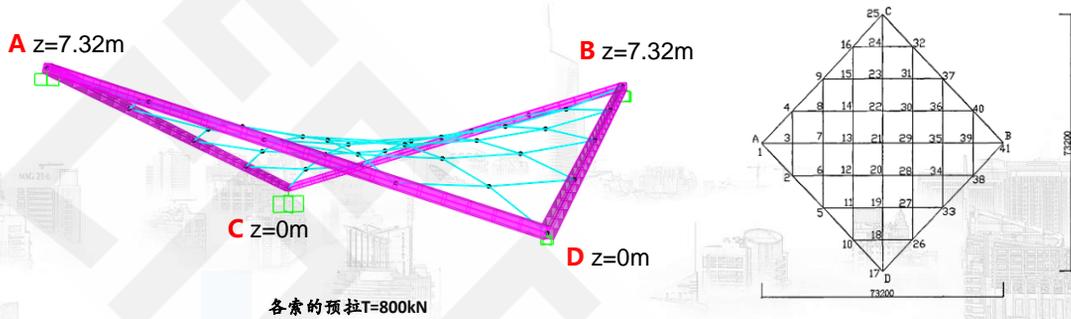
筑信达



## 03 索的模拟方式

### 框架单元vs索单元

比较案例：菱形索网中索均锚固在刚性边界上的，各索的预拉 $T=800\text{kN}$ 。控制点A、B点标高为 $7.32\text{m}$ ，控制点C、D点标高为 $0\text{m}$ 。



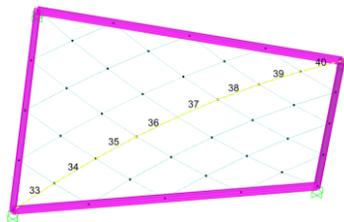
筑信达



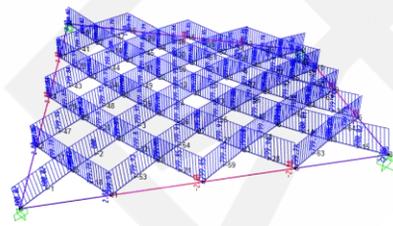
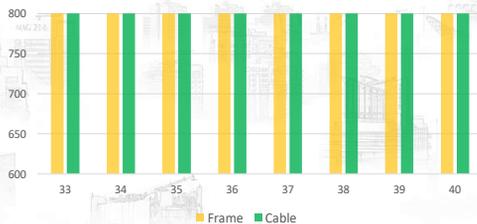
## 03 索的模拟方式

### 结果比较

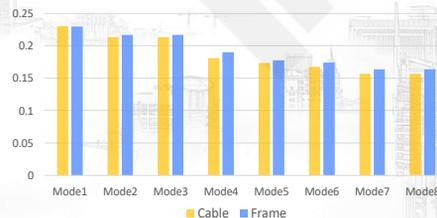
#### 索单元模型VS框架单元模型



索张力分布图



张拉后周期对比



筑信达

# 02

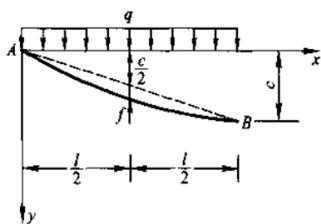
## 几何建模

- ① 索的初始几何信息的定义
- ② 整体模型的建立
- ③ 边界条件的指定



### 01 索初始几何信息的定义

索的轴力、索长、索形态等信息相互关联，计算时需要确定索的初始状态，作为计算的初始态。索初始几何信息用于定义索的零状态。



单悬索为例：沿悬索跨度分布的均布荷载

$$F_H \frac{d^2 y}{dx^2} + q(x) = 0$$

其中：

- q(x)为作用于悬索的竖向分布荷载；
- $F_H$ 为悬索张力的水平分量（即水平张力）；
- y(x)为悬索线形的函数表达式。
- f为跨中垂度

$$y = \frac{q}{2F_H} x(l-x) + \frac{c}{l} x$$

悬索跨中垂度f与水平张力 $F_H$ 之间的关系

$$F_H = \frac{ql^2}{8f}$$

悬索中各点张力 $F_T$ 与悬索线形之间的关系

$$F_T = F_H \sqrt{1 + (dy/dx)^2}$$

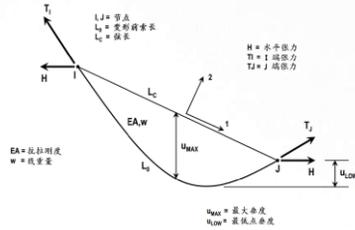
悬索长度s与悬索线形之间的关系

$$s = \int_A^B ds = \int_0^l \sqrt{1 + (dy/dx)^2} dx$$

在水平张力 $F_H$ 、跨中垂度f、悬索张力 $F_T$ 或悬索长度s任一参数已知的情况下，即可确定唯一的悬索线形



# 01 索初始几何信息的定义



对象参数

对象类型: Cable

索类型: Cable - Undeformed Length

截面属性: CAB1

起点: (0, -6000, 6000)

终点: (4000, -6000, 0)

分段选项:  单个对象

分节点坐标 (变形前)

Pl.	X	Y	Z	Sag	Distance	Rel. Dist.
0	-9	-6	0	0	0	0
1	-6.625	-6	5.8125	0	0.4183	0.0625
2	-9.25	-6	5.835	0	0.8385	0.125
3	-7.875	-6	5.4375	0	1.2578	0.1875
4	-7.5	-6	5.25	0	1.6771	0.25
5	-7.125	-6	5.0625	0	2.0963	0.3125
6	-6.75	-6	4.875	0	2.5156	0.375
7	-6.375	-6	4.6875	0	2.9348	0.4375
8	-6	-6	4.5	0	3.3541	0.5

索类型:

- Cable - Minimum Tension At I-End
- Cable - Minimum Tension At J-End
- Cable - Tension At L-End
- Cable - Tension At J-End
- Cable - Horizontal Tension Component
- Cable - Maximum Vertical Sag
- Cable - Low-Point Vertical Sag
- Cable - Undeformed Length
- Cable - Relative Undeformed Length

【初始几何信息】中描述索初始状态的方式虽然很多，但是其最本质的控制量是无应力索长



# 01 索初始几何信息的定义

5 编辑索的几何数据

对象参数

对象类型: Cable

索类型: Cable - Tension At J-End

截面属性: CAB1

起点: (0, -6000, 6000)

终点: (4000, -6000, 0)

分节点坐标 (变形前)

Pl.	X	Y	Z	Sag	Distance	Rel. Dist.
0	0	-6000	6000	0	0	0
1	250	-6000	5925	0	450.6939	0.0625
2	500	-6000	5250	0	901.3878	0.125
3	750	-6000	4875	0	1352.0817	0.1875
4	1000	-6000	4500	0	1802.7756	0.25
5	1250	-6000	4125	0	2253.4695	0.3125
6	1500	-6000	3750	0	2704.1635	0.375
7	1750	-6000	3375	0	3154.8574	0.4375
8	2000	-6000	3000	0	3605.5513	0.5

通过 J-端张力定义

5 编辑索的几何数据

对象参数

对象类型: Cable

索类型: Cable - Maximum Vertical Sag

截面属性: CAB1

起点: (0, -6000, 6000)

终点: (4000, -6000, 0)

分节点坐标 (变形前)

Pl.	X	Y	Z	Sag	Distance	Rel. Dist.
0	0	-6000	6000	0	0	0
1	250	-6000	5925	0	450.6939	0.0625
2	500	-6000	5250	0	901.3878	0.125
3	750	-6000	4875	0	1352.0817	0.1875
4	1000	-6000	4500	0	1802.7756	0.25
5	1250	-6000	4125	0	2253.4695	0.3125
6	1500	-6000	3750	0	2704.1635	0.375
7	1750	-6000	3375	0	3154.8574	0.4375
8	2000	-6000	3000	0	3605.5513	0.5

通过最大垂度定义

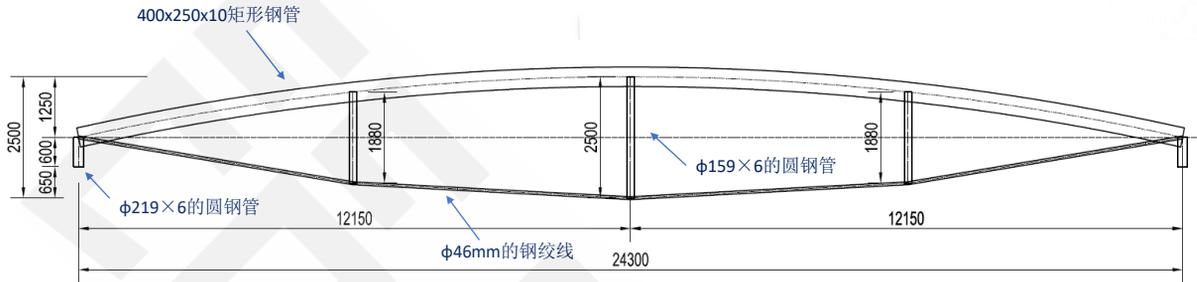




## 02 整体模型的建立

### 单榀张弦梁

张弦梁跨度为24.3m。其中张弦梁弦杆采用400x250的矩形钢管、撑杆为 $\phi 159 \times 6$ 的圆钢管，材性均为Q235。索采用 $\phi 46.1$ ，fpk-1570钢绞线。



单榀张弦梁尺寸布置

讯信达



## 02 整体模型的建立

### 单榀张弦梁

#### 建立轴网信息

轴网数据

坐标系名称: GLOBAL

X向轴网

编号	坐标 (m)	线类型	可见	标签位置	颜色
0		Primary	Yes	终点	
	5.4	Primary	Yes	终点	

Y向轴网

编号	坐标 (m)	线类型	可见	标签位置	颜色
0		Primary	Yes	起点	
	12.15	Primary	Yes	起点	
	24.3	Primary	Yes	起点	

Z向轴网

编号	坐标 (m)	线类型	可见	标签位置	颜色
	-0.6	Primary	Yes	终点	
	0	Primary	Yes	终点	
	1.25	Primary	Yes	终点	

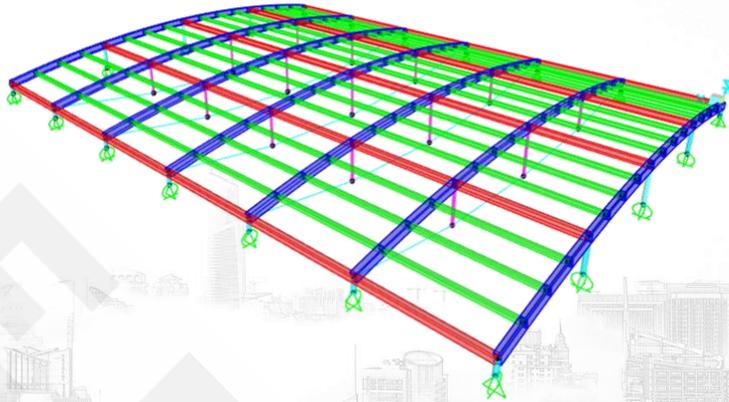
讯信达



## 02 整体模型的建立

主要涉及操作:

- ◇ 带属性复制
- ◇ 线性复制
- ◇ 拉伸操作
- ◇ 节点拉伸成框架
- ◇ 指定支座条件



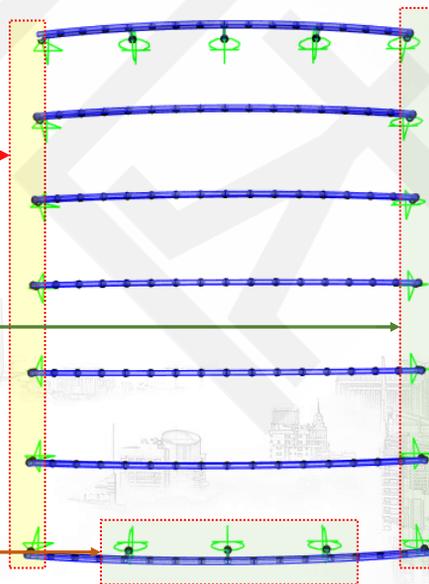
筑信达



## 03 边界条件的指定

边界条件:

- ◇ 固定铰接
- ◇ 滑动支座
- ◇ 仅释放横向约束
- ◇ 释放横向和纵向约束



筑信达

# 03

## 施加荷载

- ① 常规荷载的施加
- ② 索力的施加
- ③ 张弦梁结构的找形
- ④ 工况组合

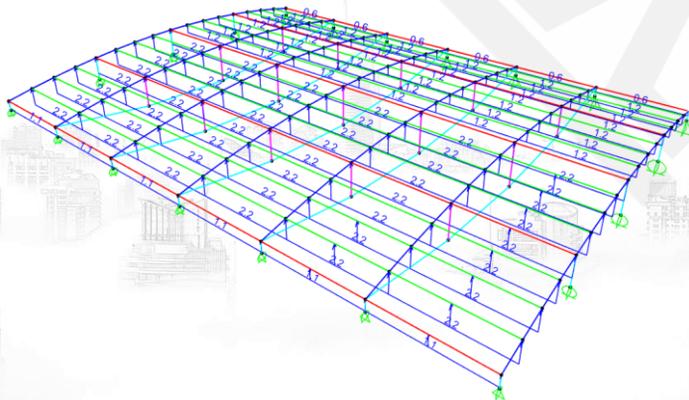
筑信达



### 01 常规荷载的施加

结构作用有恒荷载和活荷载、风荷载和温度荷载。

- 恒荷载按照结构自重+横梁上的 $1.6\text{KN/m}$ 附加荷载，
- 活荷载施加在横梁上按 $0.8\text{KN/m}$ 的大小考虑。
- 风荷载主要考虑风吸力，施加在横梁上分别按 $-2.2\text{KN/m}$ 、 $-1.2\text{KN/m}$ 的大小考虑。



筑信达



## 02 索力的施加

### (1) 温度荷载

温度等效荷载计算公式：

$$F = A \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

温度荷载在索单元内产生轴向热应变。此应变是材料的热膨胀系数和单元温度变化的乘积。

### (2) 应变(或变形荷载)

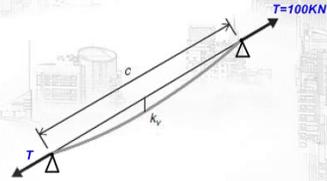
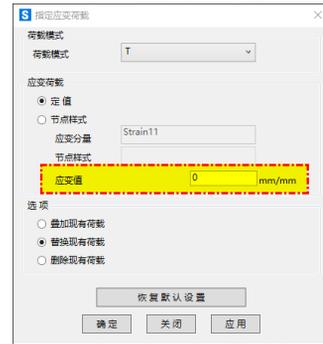
应变等效荷载计算公式：

$$F = A \cdot E \cdot \varepsilon$$

轴向应变与变形荷载改变索单元的长度。变形荷载为在长度方向的总改变量，而应变荷载为单位长度的改变量。

### (3) 目标力工况

直接指定索力大小，由程序会迭代计算求解出达到期望索力对应的索的变形量。



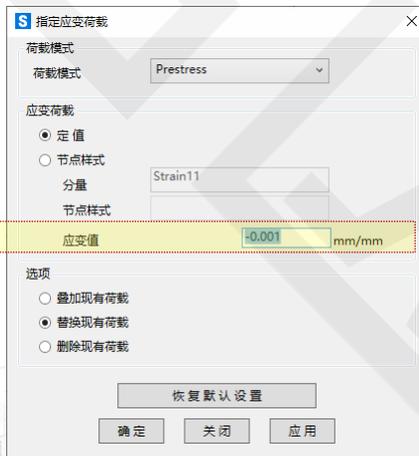
讯信达



## 02 索力的施加

应变等效荷载计算公式：

$$F = A \cdot E \cdot \varepsilon$$

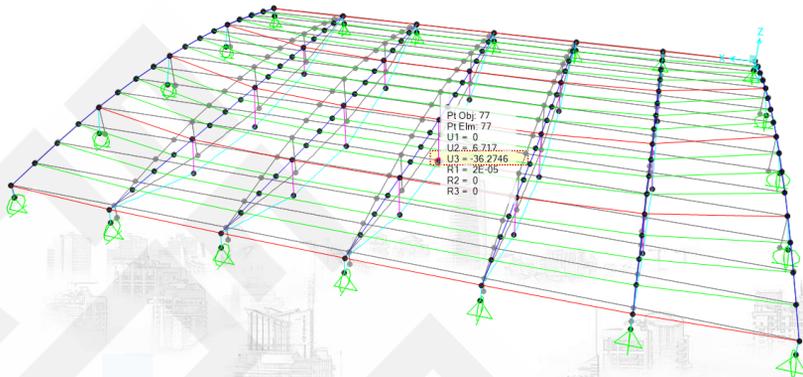


应变为正值意味着索放松，单元垂度变大索拉力减少。应变负值意味着将索拉紧，索力增加。

讯信达



### 03 张弦梁结构的找形



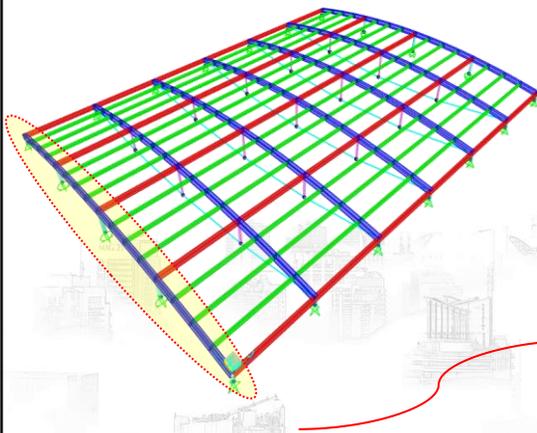
未做索力优化前，考虑结构的自重+附加恒荷载（8.1KN/m）跨中点的最大竖向位移为36.274mm。

讯信达



### 03 张弦梁结构的找形

结构的目标状态：在施加索力后使该张弦梁在Dead+附加恒载作用下的**竖向位移接近0**。

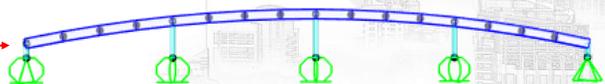


控制目标：各个撑杆底部的节点位移接近零

对应为节点11  $U_3$ 方向位移接近0，且撑杆保持竖直

可调变量：各段索的索力是可以随意变化的

对应为索 1、2、3、4 的**应变荷载**是任意的

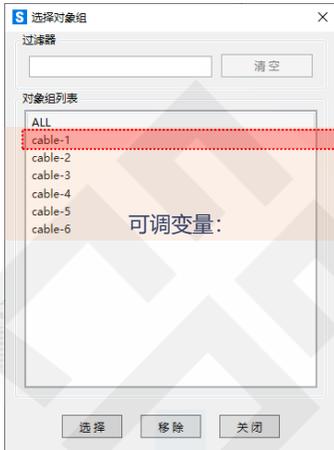


讯信达



## 03 张弦梁结构的找形

结构左右完全对称，为方便找形对结构进行分组



控制目标:

控制节点33、55、77的竖向位移U3  
 控制节点28、50、72的水平位移U2

讯信达



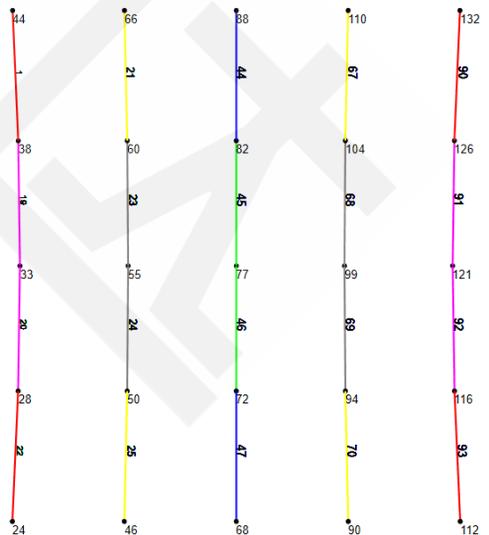
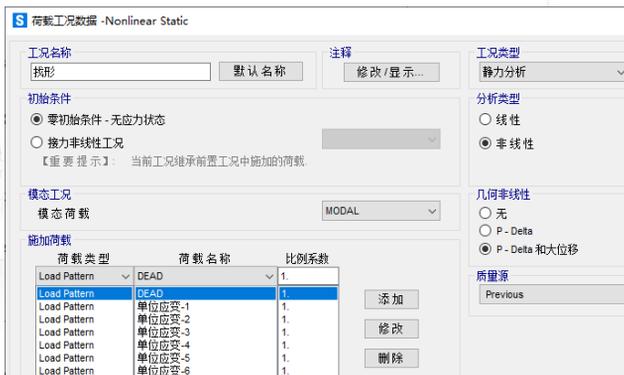
## 03 张弦梁结构的找形

操作步骤

1. 定义荷载模式，分别对六组索指定单位应变荷载

单位应变-1	Other	0
单位应变-2	Other	0
单位应变-3	Other	0
单位应变-4	Other	0
单位应变-5	Other	0
单位应变-6	Other	0

2. 定义工况，将恒载和单位应变荷载指定到一个非线性工况中



讯信达



# 03 张弦梁结构的找形

## 3. 荷载优化器，定义可变量和控制目标

可变量：索力是可以随意变化的

对应为索组 1、2、3、4、5、6 的  
应变荷载是任意的

控制目标：各个撑杆底部的节点位移

控制节点中撑杆的竖向位移U3  
控制节点中撑杆的水平位移U2

CSiLoadOptimizer

Name: Lopt1    Max. Iterations: 10    Current Prob. Type: Determinate

Load Case Type: Nonlinear Static    Accel. Factor: 1    Only Goals will be utilized

Load Case: 找形    Rel. Conv. Tol.: 0.001    Obj. Function Type: Sum of Squares

Load Assignments (Number of Variables: 6)

Load Type	Load Name	Scale Factor	Variable	Relative Cost	Perturbation Factor
Load	DEAD	1	Fixed	1	0.001
Load	单位应变-1	1	Variable	1	0.001
Load	单位应变-2	1	Variable	1	0.001
Load	单位应变-3	1	Variable	1	0.001
Load	单位应变-4	1	Variable	1	0.001
Load	单位应变-5	1	Variable	1	0.001
Load	单位应变-6	1	Variable	1	0.001

Goals and Limits (Number of Goals: 6, Number of Limits: 0)

Type	Name	Location	Component	Sense	Target Value	Relative Benefit	Absolute Tolerance
Joint Displa...	33		U3	=	0	1	0.0001
Joint Displacement	55		U3	=	0	1	0.0001
Joint Displacement	77		U3	=	0	1	0.0001
Joint Displacement	28		U2	=	-0.0003	1	0.0001
Joint Displacement	50		U2	=	-0.0003	1	0.0001
Joint Displacement	72		U2	=	-0.0003	1	0.0001



# 03 单楹张弦梁结构的找形

结果：优化工况 \_Lopt1

荷载工况数据 - Nonlinear Static

工况名称: 找形\_Lopt1    默认名称    修改/显示...

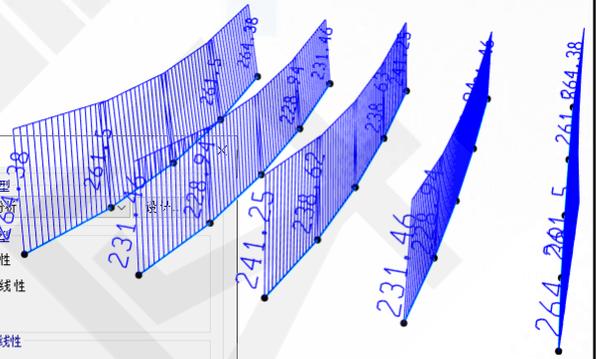
初始条件:  零初始条件 - 无应力状态

模态工况: 模态荷载    MODAL

荷载类型	荷载名称	比例系数
Load Pattern	DEAD	1
Load Pattern	单位应变-1	-0.9097
Load Pattern	单位应变-2	-0.8965
Load Pattern	单位应变-3	-0.7911
Load Pattern	单位应变-4	-0.788
Load Pattern	单位应变-5	-0.8239
Load Pattern	单位应变-6	-0.8234

其它参数: 加载控制: Full Load    结果保存: Final State Only    非线性参数: Default

确定    取消

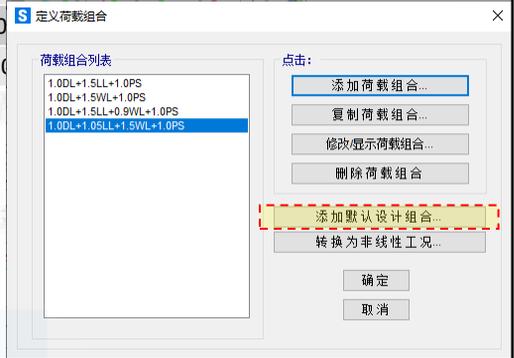




## 04 工况组合

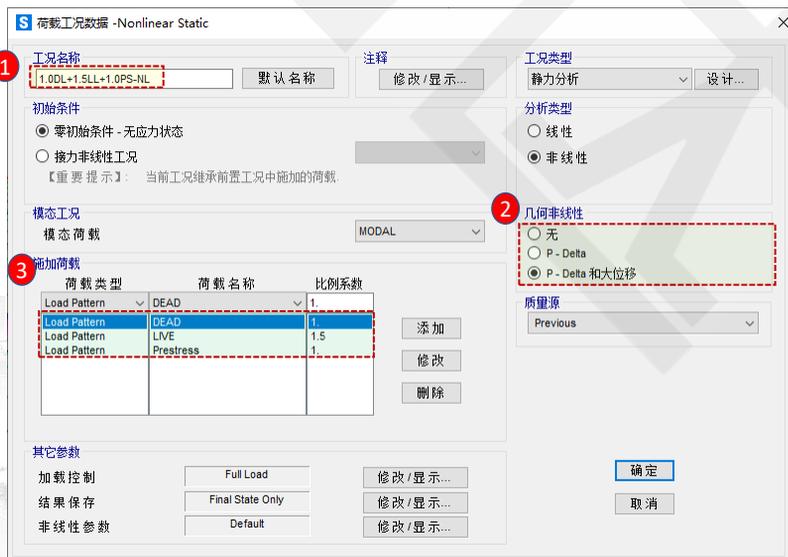
一般而言，索结构工作状态的分析必须按荷载组合进行非线性计算，不能按工况计算后叠加组合效应，需按正常使用和承载能力极限状态的荷载组合值分别进行计算。

序号1	荷载组合
1	1.0DL+1.5LL+1.0PS
2	1.0DL+1.5WL+1.0PS
3	1.0DL+1.5LL+0.9WL+1.0
4	1.0DL+1.05LL+1.5WL+1.0



## 04 工况组合

### 非线性工况



# 04

## 结构分析与结果查看

- ① 查看结构的模态与周期
- ② 图形显示
- ③ 表格显示

筑信达

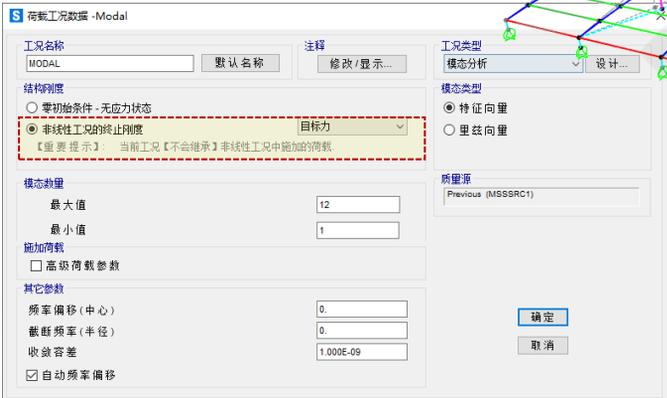
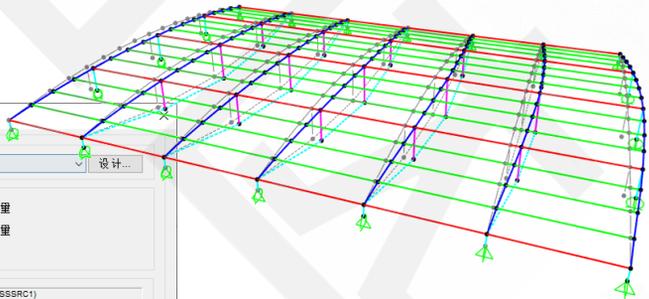


### 结构的周期和模态

#### 模态工况

模态工况需要继承索力张拉后的工况

Deformed Shape (MODAL) - Mode 1; T = 0.31136; f = 3.21168



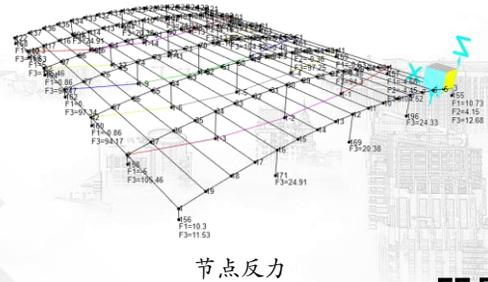
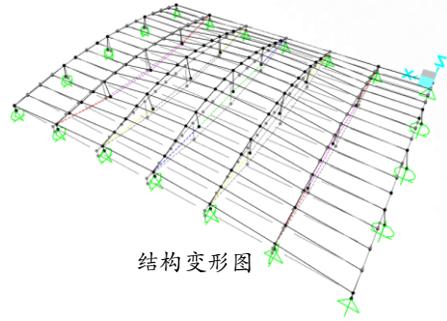
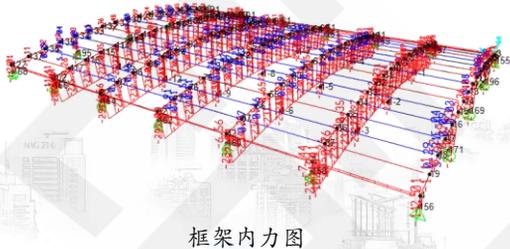
筑信达



# 结构的变形及内力

## 输出方式

- 图形显示：变形图、内力图/隔离体图、节点反力



讯信达



# 结构的变形及内力

## 输出方式

- 表格输出：节点位移、构件内力、节点反力

Element Forces - Frames

文件(F) 视图(V) 编辑(E) 格式-过滤-排序(M) 选择(S) 选项(O)

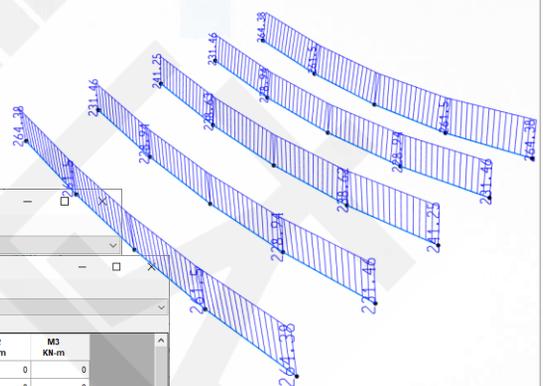
单位: 见注释  
过滤器:

Frame Text

Frame Text	Joint Text	OutputCase	CaseType Text	StepType Text	F1 KN	F2 KN	F3 KN	M1 KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
19										
20										
21	156	目标力	NonStatic	Last Step	11.501	4.05	12.739	0	0	0
22	156	目标力	NonStatic	Last Step	10.862	0	11.5	0	0	0
23	157	目标力	NonStatic	Last Step	-5.22	-0.378	100.397	0	0	0
24	158	目标力	NonStatic	Last Step	-6.029	0	100.491	0	0	0
25	159	目标力	NonStatic	Last Step	-1.823	-2.123	97.107	0	0	0
44	160	目标力	NonStatic	Last Step	-2.274	0	97.544	0	0	0
45	161	目标力	NonStatic	Last Step	5.583E-11	-3.098	96.582	0	0	0
46	162	目标力	NonStatic	Last Step	3.954E-11	0	97.22	0	0	0
47	163	目标力	NonStatic	Last Step	1.823	-2.123	97.107	0	0	0
67	164	目标力	NonStatic	Last Step	2.274	0	97.544	0	0	0
68	165	目标力	NonStatic	Last Step	5.22	-0.378	100.397	0	0	0
	166	目标力	NonStatic	Last Step	6.029	0	100.491	0	0	0
	167	目标力	NonStatic	Last Step	-11.501	4.05	12.739	0	0	0
	168	目标力	NonStatic	Last Step	-10.862	0	11.5	0	0	0
	169	目标力	NonStatic	Last Step	0	0	21.634	0	0	0

切换 << >> / 20

添加表格 完成



讯信达

# Thanks



在线支持  
[support.cisec.cn](http://support.cisec.cn)



网络课堂  
[www.cisec.cn](http://www.cisec.cn)



视频教程  
[www.cisec.cn](http://www.cisec.cn)



知识库  
[wiki.cisec.cn](http://wiki.cisec.cn)

讯信达



 [cisec68924600](https://www.cisec.cn)