



midas Civil 2010斜拉桥专题—斜拉桥设计专题

Integrated Solution System for Bridge and Civil Structures

目 录

一. 斜拉桥概述..... - 1 -

1.1 斜拉桥跨径布置 - 1 -

1.2 斜拉桥拉索布置 - 1 -

1.3 斜拉桥索塔布置 - 2 -

1.4 斜拉桥主梁布置 - 2 -

二. 斜拉桥调索理论 - 3 -

三. midas Civil中的斜拉桥功能..... - 3 -

3.1 拉索单元模拟 - 4 -

3.2 未知荷载系数法功能 - 5 -

3.3 索力调整功能 - 6 -

3.4 未闭合配合力功能..... - 7 -

四. 斜拉桥分析例题 - 8 -

4.1 斜拉桥概况..... - 8 -

4.2 斜拉桥成桥分析 - 10 -

4.3 斜拉桥倒拆分析 - 14 -

4.4 斜拉桥正装分析 - 15 -

一. 斜拉桥概述

斜拉桥是一种用斜拉索悬吊桥面的桥梁。最早的这种桥梁，其承重索是用藤罗或竹材编制而成，它们可以说是现代斜拉桥的雏形。

1956年，瑞典建成的Stroemsund桥拉开了现代斜拉桥建设的序幕。随后斜拉桥建设如雨后春笋般蓬勃发展，其跨径已经进入以前悬索桥适用的特大跨径范围。

斜拉桥的上部结构是由**梁、索、塔**三个主要部分组成，它是一种桥面体系以加劲梁受压（密索）或受弯（稀索）为主，支承体系以斜索受拉及桥塔受压为主的桥梁。用若干高强度的拉索将主梁斜拉在塔柱上，由于拉索的拉力，使主梁受到一个压力和一个向上的弹性支承的反力，这就使得桥梁的跨越能力大大增强，斜拉桥构造如图1.1所示。



图1.1 斜拉桥示意图

斜拉桥的优点是：梁体尺寸较小，桥梁的跨越能力较大；受桥下净空和桥面标高的限制少；**抗风稳定性比悬索桥好**；不需悬索桥那样的集中锚碇构造；便于悬臂施工等。不足之处是，其属于多次超静定结构，设计计算复杂；拉索与梁、塔的连接构造比较复杂；施工中高空作业较多，且施工控制等技术要求严格。

斜拉桥是半个多世纪以来最富于想象力和构思内涵最丰富而引人注目的桥型，它具有广泛的适应性。一般来说，对于跨度从**200m至700m**左右的桥梁，斜拉桥在技术上和经济上都具有相当优越的竞争能力。

但是随着斜拉桥跨度的增大，将会面临**桥塔过高和斜索过长**等一系列技术问题。另外，必须提到的是，斜拉桥的斜拉索可以说是这种桥梁的生命线，至今国内外已发生过几起通车仅几年，由于**拉索腐蚀严重**而导致全部换索的不幸工程实例。因此如何做好斜拉索的防腐工作，确保其使用寿命，仍是当今桥梁界十分重视的研究课题。

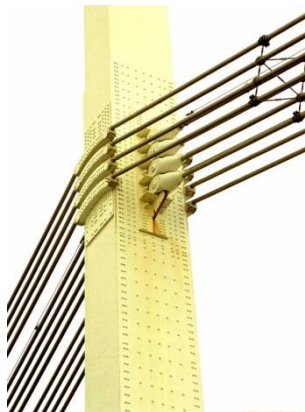


图1.2 斜拉索与主塔锚固端防腐示意图

1.1 斜拉桥跨径布置

当代斜拉桥最典型的孔跨布置形式是双塔三跨式（边跨/中跨=0.4~1）与独塔双跨式（边跨/中跨=1~2），如图1.3和1.4所示。在特殊情况下，斜拉桥也可以布置成独塔单跨式及多塔多跨式。



图1.3 双塔三跨式

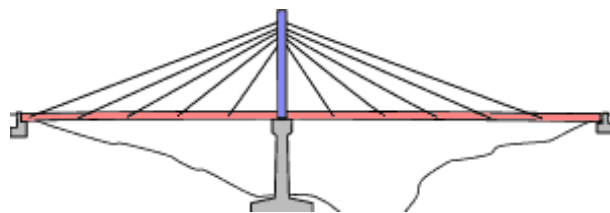


图1.4 独塔双跨式

在跨越宽阔水面时，由于桥梁长度大，必要时也可采用三塔斜拉桥，如湖南洞庭湖大桥（主跨 $2 \times 348\text{m}$ ，如图1.5所示）。由于中间桥塔没有端锚索来有效地限制其变形，三塔斜拉桥的结构柔性会有所增大。在适宜的地形条件下，有时也可采用独塔单跨式斜拉桥，此时边跨跨度很小，甚至没有边跨，如图1.6所示Marian Bridge（the Czech Republic），主跨123.3m。



图1.5 洞庭湖大桥

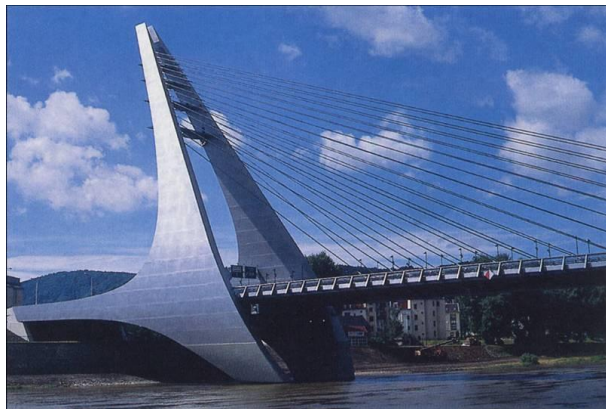


图1.6 捷克Marian桥

1.2 斜拉桥拉索布置

根据斜索在主梁上的间距，有稀索（对于钢梁，间距大约为30~60m，对于混凝土梁，约为15~30m）与密索之分。早期斜拉索采用**稀索**较多，目前则多用密索。**密索**斜拉桥有下述优点：索间距较短，主梁弯矩减小；每索的拉力较小，锚固点的构造简单。每根斜索的截面较小，每索只用一根在工厂制造的外套PE保护管的钢索；斜索更换较容易。



图1.7 拉索为稀索示意图



图1.8 拉索为密索示意图

拉索的空间布置形式，通常分为单索面和双索面，而双索面又分为双平行索面和双斜索面。拉索在平面内的布置形式，有辐射式、竖琴式、扇式和星式，具体如图1.9所示。

- 辐射式：拉索集中在塔顶，斜索倾角大，发挥效力好，钢索用量省。
- 竖琴式：斜索彼此平行，倾角相等，外形简洁美观，但钢索用量大。
- 扇式：特点介于辐射式和竖琴式之间，长大跨径斜拉桥多采用该方式。
- 星式：将索合并锚在梁端，斜索倾角最小，锚固复杂，目前较少采用。

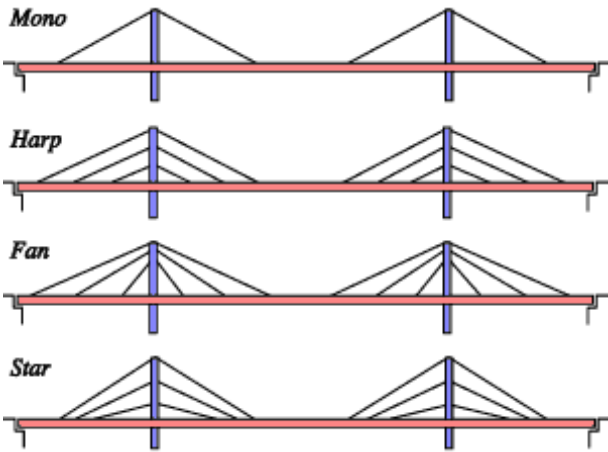


图1.9 拉索按平面内的布置形式分类

1.3 斜拉桥索塔布置

从行车方向看，索塔可做成独柱式、双柱式、门式、A式、倒Y式、宝石式和倒V式等，如图1.10所示。索塔高度：桥面以上塔柱高度与主跨之比H/l，对双塔斜拉桥宜在0.18~0.25，对于独塔斜拉桥宜在0.34~0.45范围内。

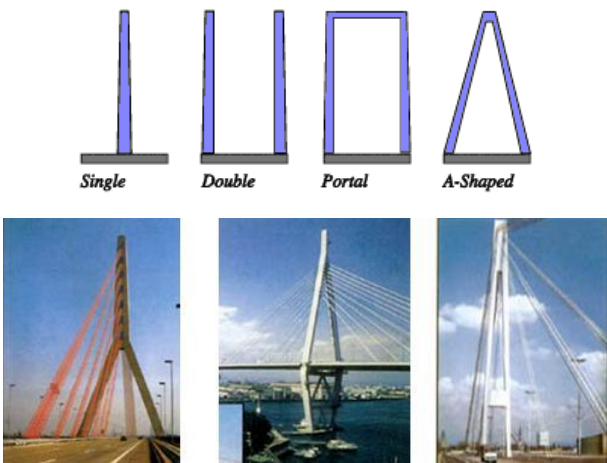


图1.10 主塔的形式种类

1.4 斜拉桥主梁布置

斜拉桥的主梁截面形式根据所用材料（混凝土、钢、或两者）有所不同。一般不用T形截面。如钢梁的常用横截面形式有双主梁、钢箱梁、桁架梁等。双主梁一般采用两根工字形梁，上置钢桥面板，主梁之间用钢横梁连接。

钢箱梁截面的形式多样，有单箱单室、多箱单室、多箱多室等布置（如图1.11所示）。斜拉桥采用钢桁梁则主要是为了满足布置双层桥面（公铁两用）的需要（如图1.12所示）。钢箱梁是钢斜拉桥中最常见的主梁形式，其断面高h/L=1/60~1/120。

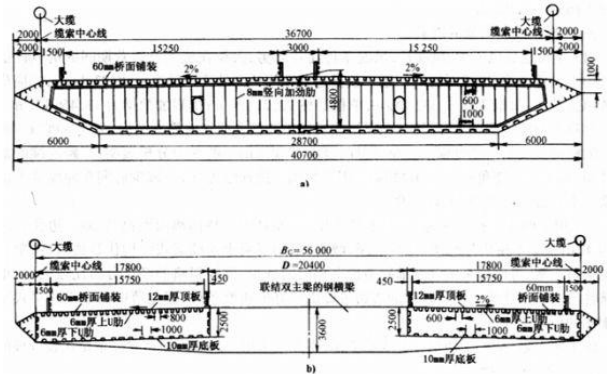


图1.11 钢箱梁断面示意图

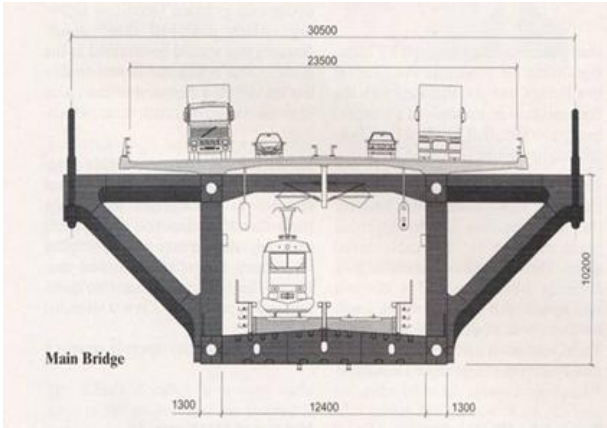


图1.12 公铁两用桥梁断面示意图

二. 斜拉桥调索理论

斜拉桥不仅具有优美的外形,而且具有良好的力学性能,其主要优点在于:恒载作用下,拉索的索力是可以调整的。斜拉桥可以认为是**大跨径的体外预应力结构**。

在力学性能方面,当在恒载作用时,斜拉索的作用并不仅仅是弹性支承,更重要的是它能够通过千斤顶主动地施加平衡外荷载的初张力,正是因为斜拉索的索力是可以调整的,斜拉索才可以改变主梁的受力条件。活载作用下,斜拉索对主梁提供了弹性支承,使主梁相当于弹性支承的连续梁。由此可见,对于斜拉桥而言,**斜拉索的初张力**分析是非常重要的。

张拉斜拉索时,实际上已经将斜拉索脱离出来单独工作,因为斜拉索的张力和结构的其它部分无关,而只与千斤顶有关,因此在张拉斜拉索时,其初张力效应必须采用**隔离体分析**(midas Civil中采用**体外力**来进行模拟)。

确定斜拉索张拉力的方法主要有刚性支承连续梁法、零位移法、倒拆和正装法、无应力状态控制法、内力平衡法和影响矩阵法等,各种方法的原理和适用对象请参考刘士林等编著的公路桥梁设计丛书——《斜拉桥》。

■ 刚性支承连续梁法

刚性支承连续梁法是指成桥状态下,斜拉桥主梁的弯曲内力和刚性支承连续梁的内力状态一致。因此可以非常容易地根据连续梁的支承反力确定斜拉索的初张力。

对于实际施工过程中如何才能达到合理的斜拉索索力分布?如果悬拼过程中一次张拉,则不可能达到刚性支承连续梁的弯矩分布,因为跨中合龙段的弯矩将与一次张拉索力无关,跨中合龙段在自重和二期恒载作用下必然产生比较大的弯矩,要消除这一正弯矩就需要进行**二次调索**。

■ 零位移法

零位移法的出发点是通过索力调整,使成桥状态下主梁和斜拉索的交点的位移为零。对于采用满堂支架一次落架的斜拉桥体系,其结果与刚性支承连续梁法的结果基本一致。

上述两种方法用于确定主跨和边跨对称的单塔斜拉桥的索力是最为有效的,对于主跨和边跨几乎对称的3跨斜拉桥次之,对于主跨和边跨的不对称性较大的斜拉桥,几乎失去了作用(因为这两种方法必然导致比较大的塔根弯矩,失去了索力优化的意义)。

■ 倒拆和正装法

倒拆法是斜拉桥安装计算广泛采用的一种方法,通过倒拆、正装交替计算,确定各施工阶段的安装参数,使结构逐步达到预定的线形和内力状态。

由于**拉索的非线性和混凝土收缩徐变**的影响,倒拆和正装计算中,两

者不闭合,即按照倒拆得到的数据正装,结构偏离成桥的线形和内力状态。

对于倒拆与正装结果不闭合的情况,可以将第一轮倒拆计算,不计混凝土的收缩徐变,而后利用上次倒拆结果进行正装计算,逐阶段考虑混凝土收缩徐变的影响,并将各施工阶段的收缩徐变值存盘,再次进行倒拆计算时采用上一轮正装计算阶段的混凝土收缩和徐变值,如此反复,直到正装和倒拆的计算结果收敛到容许的精度。

■ 无应力状态控制法

无应力状态法分析的基本思路是:**不计斜拉索的非线性和混凝土收缩徐变的影响**,采用完全线性理论对斜拉桥解体,只要保证单元长度和曲率不变,则无论按照何种程序恢复还原后的结构内力和线形将与原结构一致。

■ 内力平衡法

内力平衡法的基本原理是:设计适当或合理的斜拉索初张力,以使结构各控制截面在恒载和活载共同作用下,上翼缘的最大应力和材料允许应力之比等于下翼缘的最大应力和材料允许应力之比。

■ 影响矩阵法

即通过**影响矩阵的方法**对斜拉桥进行索力求解。

三. midas Civil 中的斜拉桥功能

斜拉桥的设计过程与一般梁式桥的设计过程有所不同。对于梁式桥梁结构,如果结构尺寸、材料、二期恒载都确定之后,结构的恒载内力也随之基本确定,无法进行较大的调整。但对于斜拉桥,由于其荷载是由主梁、桥塔和斜拉索分担的,合理地确定各构件分担的比例是十分重要的。因此斜拉桥的设计首先是确定其合理的成桥状态,即**合理的线形和内力状态**,其中起主要调整作用的就是斜拉索的张拉力。

midas Civil程序针对斜拉桥的张拉力确定、施工阶段分析、非线性分析等提供了多种解决方案,下面就一些斜拉桥功能做一些说明。

对于斜拉桥的结构计算原则:

- (1) 对于一般跨径的混凝土斜拉桥结构计算,可按经典结构力学或有限元方法计算;
- (2) 对于跨径较大的斜拉桥,应计入结构几何非线性及材料非线性对结构的影响;
- (3) 斜拉桥为空间结构体系,在静力分析时可将空间结构简化为平面结构进行计算,动力分析应按空间结构计算;
- (4) 在结构计算中,必须计入拉索垂度对结构的非线性影响,可采用拉索换算弹性模量的方法计入其影响;
- (5) 除对结构进行总体计算外,尚应对一些特殊部位进行局部分分析与验算。

斜拉桥常规分析流程

第一步 成桥状态分析

第二步 倒拆施工阶段分析

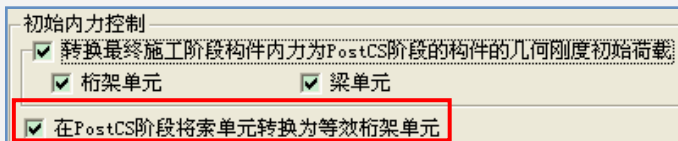
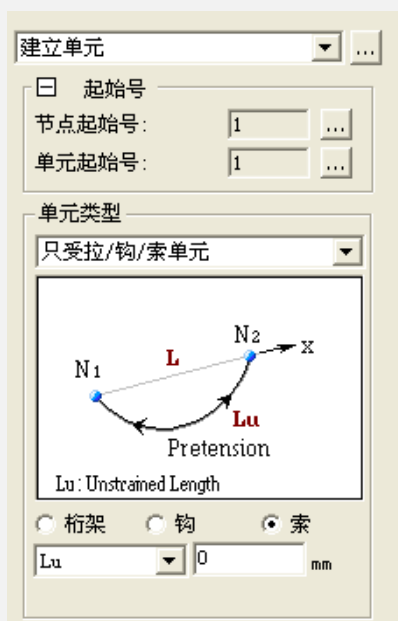
第三步 正装施工阶段分析

第一步: 进行成桥状态分析,即建立成桥模型,考虑结构自重、二期恒载、斜拉索的初拉力(单位力),进行静力线性分析后,利用**“未知荷载系数”**的功能,根据影响矩阵求出满足所设定的约束条件(线形和内力状态)的初拉力系数。此时斜拉索需采用**桁架单元**来模拟,这是因为斜拉桥在成桥状态时拉索的非线性效应可以看作不是很大,而且影响矩阵法的适用前提是荷载效应的线性叠加(荷载组合)成立。

第二步: 利用算得的成桥状态的初拉力(不再是单位力),建立成桥模型并定义倒拆施工阶段,以求出在各施工阶段需要张拉的索力。此时斜拉索采用**只受拉索单元**来模拟,在施工阶段分析控制对话框中选择**“体内力”**。

第三步: 根据倒拆分析得到的各施工阶段拉索的内力,将其按初拉力输入建立正装施工阶段的模型并进行分析。此时斜拉索仍可采用**只受拉索单元**来模拟,但在施工阶段分析控制对话框中选择**“体外力”**。

3.1 拉索单元模拟



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	

几种索单元类型:

- 桁架单元
- 只受拉桁架单元
- 只受拉钩单元
- 只受拉索单元

(恩斯特公式修正的索单元、
大变形的悬索单元)

不同结构中索单元的使用:

- ✚ 悬索桥的主缆和吊杆: 建议使用考虑大变形的悬索单元;
- ✚ 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;
- ✚ 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;
- ✚ 拱桥的吊杆: 建议使用桁架单元或只受拉桁架单元;
- ✚ 系杆拱桥的系杆: 建议使用桁架单元;
- ✚ 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。
- ✚ 进行细部分析时, 对于预应力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为考虑垂度影响的
拉索换算弹性模量

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

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。

3.2 未知荷载系数法功能

结果>未知荷载系数

利用未知荷载系数功能，可以计算出最小误差范围内的能够满足特定约束条件的最佳荷载系数，利用这些荷载系数计算拉索初拉力。指定位移、反力、内力的“0”值以及最大最小值作为约束条件，拉索初拉力作为变量（未知数）来计算。

计算未知荷载系数适用于线性结构体系，为了计算出最佳的索力，必须要输入适当的约束条件。

- (1) 主塔不受或只受较小的弯矩作用； (2) 主塔弯矩均匀分布； (3) 主梁的变形最小；
(4) 最终索力不集中在几根拉索，而是均匀分布在每根拉索上。

■ 未知荷载系数的详细内容

项目名称: 未知荷载系数

荷载组合: VLF

目标函数的类型
☒ 线性 ☐ 平方 ☐ 最大绝对值

未知荷载系数的符号
☐ 负 ☒ 正负 ☐ 正

约束条件

- ☒ M1001
- ☒ M1002
- ☒ M1003
- ☒ M1004
- ☒ M1005
- ☒ M1008
- ☒ M1009
- ☒ M1010
- ☒ M1011
- ☒ M1012

操作: 添加 编辑 删除 表格

	未知	荷载工况	系数	变量的系数
1	☐	自重	1.000	
2	☐	二恒	1.000	
3	☒	T1	未知	1.00
4	☒	T2	未知	1.00
5	☒	T3	未知	1.00
6	☒	T4	未知	1.00

☒ 联立方程方法

操作: 全选 解除选择 求未知荷载系数 确认 取消

未知荷载系数的约束条件

约束名称: M1001

约束类型: 梁单元内力

单元号: 1001

位置
☒ I-端 ☐ 1/4 ☐ 2/4
☐ 3/4 ☐ J-端

内力
☐ Fx ☐ Fy ☐ Fz
☐ Mx ☒ My ☐ Mz

约束条件
☐ 相等 ☒ 不等
☒ 上限: 5000
☒ 下限: -5000

操作: 确认 取消

■ 约束表格

Reaction | Displacement | Truss Force | Beam Force

	Name	Elem	Point	Compo.	Type	Value	(0)	Other	(U)	Upper
1	M1001	1001	2/4 Pos	MY	Inequality				☒	5000
2	M1002	1002	2/4 Pos	MY	Inequality	A	B	C	D	E
3	M1003	1003	2/4 Pos	MY	Inequality	1	M1001	1001	2/4 Pos	MY
4	M1004	1004	2/4 Pos	MY	Inequality	2	M1002	1002	2/4 Pos	MY
5	M1005	1005	2/4 Pos	MY	Inequality	3	M1003	1003	2/4 Pos	MY
6	M1008	1008	2/4 Pos	MY	Inequality	4	M1004	1004	2/4 Pos	MY
7	M1009	1009	2/4 Pos	MY	Inequality	5	M1005	1005	2/4 Pos	MY
8	M1010	1010	2/4 Pos	MY	Inequality	6	M1008	1008	2/4 Pos	MY
9	M1011	1011	2/4 Pos	MY	Inequality	7	M1009	1009	2/4 Pos	MY
10	M1012	1012	2/4 Pos	MY	Inequality	8	M1010	1010	2/4 Pos	MY
					Inequality	9	M1011	1011	2/4 Pos	MY
					Inequality	10	M1012	1012	2/4 Pos	MY

操作: 复制和粘贴

考虑施工阶段的未知荷载系数法:

midas Civil还可考虑施工阶段，计算未知荷载系数。利用此功能可直接计算出，施工过程中每根拉索的拉索控制力。

- 定义正装施工阶段模型。
- 将每个施工阶段的拉索初拉力定义单位初拉力。（注：拉索过程必须单独定义施工阶段）
- 运行分析后，通过未知荷载系数计算，求得符合约束条件的施工过程中的拉索控制力。

注意:

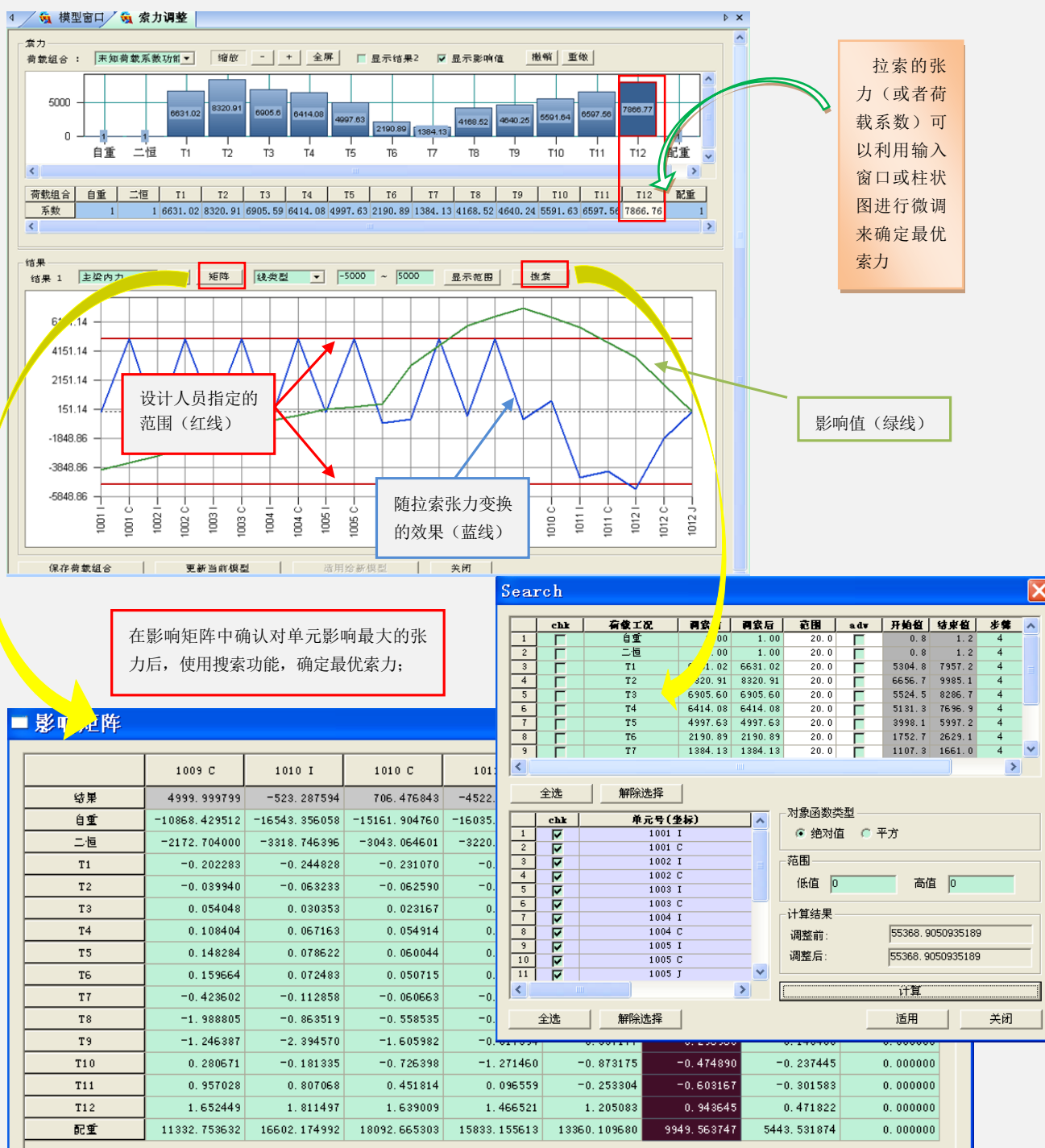
- 对于利用未知荷载系数法求解索力的时候，对于中小模型，可以把单位初拉力定义为1KN，但是对于大跨斜拉桥，建议将初拉力定义为100KN；
- 对于考虑施工阶段的未知荷载系数法，拉索激活的阶段需要单独定义成施工阶段，同时该施工阶段只能有拉索力激活，不能包含其他作用；
- 表格数据可以与Excel的数据进行互换，因此可利用表格的功能，方便地修改约束条件。

3.3 索力调整功能

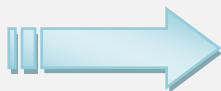
结果>调整索力:

索力的计算非常复杂,过去是依靠设计人员判断以及参考实际经验值来确定拉索张力的。为了使设计人员可以更加便捷地计算拉索的初始张力, midas Civil 提供未知荷载系数功能。不过,由于未知荷载系数的功能提供的张力结果只是能够满足约束条件的解,所以有时无法完全满足技术人员的设计意图。

midas Civil2010中,为了改善未知荷载系数功能,并且使设计过程中的反复调整索力工作尽可能简便,特别开发和提供了索力调整功能。索力调整功能使设计人员可以直接调整索力,并且不需要任何重新分析即可实时查看主梁或者主塔的变形情况,因此可以非常便捷、快速地获得初始张力。



索力调整步骤



3.4 未闭合配合力功能

在斜拉桥设计中，可通过成桥阶段分析得到结构的一些必要数据、拉索的截面和张力的等，除此之外斜拉桥还需要进行施工阶段分析。

根据施工方法的不同，斜拉桥的结构体系会发生显著的变化，施工中有可能会产生比成桥阶段更不利的结果，所以斜拉桥的设计要做施工阶段分析。按施工的顺序进行分析的方法叫施工阶段的**正装分析**（Forward Analysis）。一般通过正装分析验算各个施工阶段的产生应力，检查施工方法的可行性，最终找出最佳的施工方法。

进行正装分析比较困难的是如何输入拉索的初始张力，为了得到初始张力值通常先进行倒拆分析，然后再利用求出的初始张力进行正装分析。采用这种分析方法，工程师普遍会经历的困惑是：**在进行正装分析时可以看出正装和初始平衡状态的索力不闭合。**

除了**混凝土收缩徐变**的影响，合拢段在倒拆分析和正装分析时的结构体系差异，导致正装分析时得到的最终阶段（成桥阶段）的内力与单独做成桥阶段分析（平衡状态分析）的结果有差异。

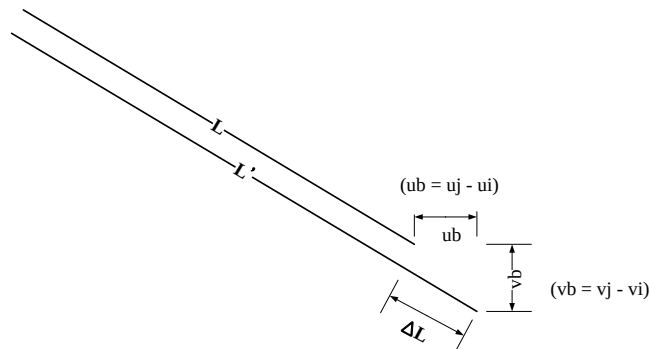
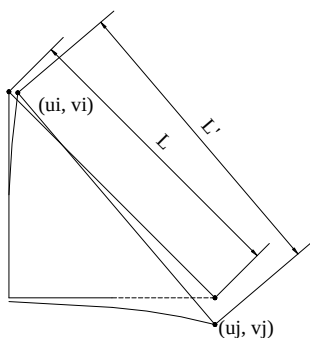
初始平衡状态分析（成桥阶段分析）时，同时考虑了全部结构的自重、索拉力以及二期荷载的影响。但在正装分析时，合拢之前所有阶段的加劲梁会因为自重、索拉力产生变形，合拢时合拢段只受自身的自重影响而不受其它结构的自重和索拉力的影响。如上所述，结构体系的差异导致了初始平衡状态分析（成桥阶段分析）与正装分析的最终阶段的结果产生了差异。

产生上述张力不闭合的原因，大部分是因为工程师没有完全把握索的基本原理或没有适当的分析软件。实际上是不应该产生内力不闭合的，其理由如下：

一、未闭合配合力的计算 - 拉索

首先，在安装拉索的前一阶段，求出拉索两端节点的位移。

利用拉索两端位移，求拉索变形前长度（ L ）与变形后长度（ L' ）之差。根据差值求出相应的拉索附加初拉力（ ΔT ）。把求出的附加初拉力（ ΔT ）和初始平衡状态分析时计算得出的初拉力（ T ）叠加作为施工阶段的控制张力进行施工阶段的正装分析。



（1）从理论上讲，在弹性范围内正装分析和倒拆分析在同一阶段的结果应该相同。

（2）如果在计算时考虑合拢段在合拢时的闭合内力，就能够得出与初始平衡状态分析（成桥阶段分析）相同的结果。

从斜拉索的基本原理上看，倒拆分析就是以初始平衡状态（成桥阶段）为参考计算出索的无应力长，再根据结构体系的变化计算索的长度变化，从而得出索的各阶段张力。一个可行的施工阶段设计，其正装分析同样可以以成桥阶段的张力为基础求出索的无应力长，然后考虑各施工阶段的索长变化得出各施工阶段索的张力。

目前以上理论为基础的程序都是大位移分析为主，其原因是悬臂法施工在安装拉索时的实际长度取值是按实际位移计算的。一般来说新安装的构件会沿着之前安装的构件切线方向安装，进行大位移分析时时，因为切线安装产生的假想位移是很容易求出来的，但是小位移分析要通过考虑假想位移来计算拉索的张力是很难的。MIDAS/Civil能够在小位移分析中考虑假想位移，以无应力长为基础进行正装分析。这种通过无应力长与索长度的关系计算索初拉力的功能叫**未闭合配合力功能**。利用此功能可不必进行倒拆分析，只要进行正装分析就能得到最终理想的设计桥型和内力结果。

未闭合配合力具体包括两部分，一是因为施工过程中产生的结构位移和结构体系的变化而产生的拉索的附加初拉力，二是为使安装合拢段时达到设计的成桥阶段状态合拢段上也会产生附加的内力。进行正装分析时，把计算的拉索与合拢段的未闭合配合力反映在索张力和合拢段闭合内力上，就能使初始平衡状态和施工阶段正装分析的最终阶段的结果相同。

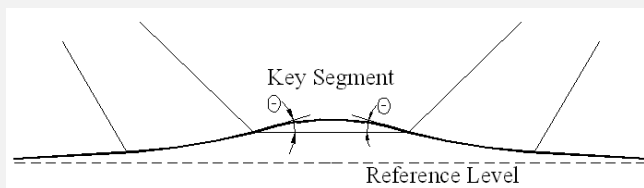
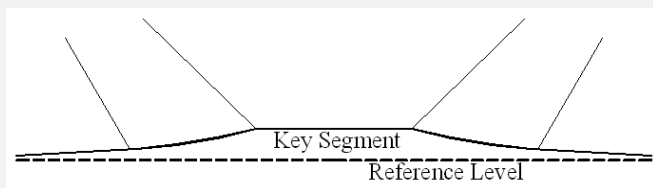
$$L' - L = \Delta L = Vb \cos\theta + Ub \sin\theta$$

$$\Delta T = \frac{EA}{L} \Delta L$$

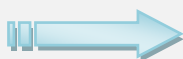
$$T_f = T_i + \Delta T$$

二、未闭合配合力的计算 - 合拢段

三跨连续斜拉桥的中间合拢段合拢时，不会产生内力（只产生自重引起的内力），所以合拢段与两侧桥梁段之间形状是不连续的。为了让合拢段连续地连接在两侧桥梁段上，求出合拢段两端所需的强制变形值，将其换算成能够产生此变形的内力，并将其施加给合拢段后连接在两侧桥梁段上。



分析>施工阶段分析控制数据



☒ 赋予各施工阶段中新激活构件初始切向位移	
☒ 全部	☐ 组
拉索	
☒ 未闭合配合力控制	
拉索	

斜拉桥施工时，最终阶段往往是跨中合拢的施工。跨中合拢的一刹那，结构体系完全转换。需要说明的是，利用成桥模型计算未知荷载系数时，跨中合拢段处于连续状态。但在施工合拢段时，合拢段并非处于连续状态，**即两端的弯矩为0**。按照前面介绍的分析方法，结果会出现不闭合的情况。

通过未闭合配合力的分析方法，可以得到最终合拢后的阶段与成桥目标函数完全闭合的结果。未闭合配合力方法，通过正装模型就可以计算拉索张拉控制力，可以不需要再建立一个倒拆模型来求得施工阶段索力。

未闭合配合力计算原理：激活斜拉索之前，拉索两端节点因前一阶段的荷载，发生的变形。激活拉索时，已输入的体内力还不能把发生变形的节点拉回原位，还需要补一定量的张力，此张力即为**未闭合配合力**。

程序不仅可以计算出，每根斜拉索的未闭合配合力，还可计算出合拢段的未闭合配合力。使最终阶段的内力以及变形结果与成桥目标完全闭合。（注：合拢段的未闭合配合力，其实也没有实际意义。因目前还没有能够对于合拢段预加内力的工具）

四. 斜拉桥分析例题

4.1 斜拉桥概况

本例题中的桥是一座跨度为（70m+125m+70m）**双塔斜拉桥梁**，塔高约60米；

为了计算安装拉索时的控制张拉力，首先要确定在成桥阶段恒载作用下的初始平衡状态，然后再按施工顺序进行施工阶段分析。首先通过倒拆分析计算初张拉力，然后进行正装施工阶段分析。

在本例题将介绍利用**未知荷载系数法**进行调索，同时以成桥状态为基础进行斜拉桥的**倒拆分析**；或采用**未闭合配合力功能**进行正装分析，最后利用上述两种方法求得各施工阶段的索力作为体外力，并考虑收缩徐变效应，进行**斜拉桥的正装**分析模拟。

材料与截面特性:

材料数据

一般
材料号: 1 名称: C400

弹性数据
设计类型: 混凝土
材料类型: ☒ 各向同性 ☐ 各向异性

混凝土
弹性模量: 0.0000e+000 kN/m²
泊松比: 0
线膨胀系数: 0.0000e+000 1/[C]
容重: 0 kN/m³
☐ 使用质量密度: 0 kN/m³/g

钢材
弹性模量: 2.8628e+007 kN/m²
泊松比: 0.18
线膨胀系数: 1.0000e-005 1/[C]
容重: 24.52 kN/m³
☒ 使用质量密度: 2.5 kN/m³/g

塑性数据
塑性材料名称: NONE

热特性值
比热: 0 kcal/kN*[C]
热传导率: 0 kcal/m*hr*[C]

确认 取消 适用

材料数据

一般
材料号: 2 名称: cable

弹性数据
设计类型: 钢材
材料类型: ☒ 各向同性 ☐ 各向异性

钢材
弹性模量: 2.0594e+008 kN/m²
泊松比: 0.3
线膨胀系数: 1.2000e-005 1/[C]
容重: 76.98 kN/m³
☐ 使用质量密度: 7.65 kN/m³/g

混凝土
弹性模量: 0.0000e+000 kN/m²
泊松比: 0
线膨胀系数: 0.0000e+000 1/[C]
容重: 0 kN/m³
☐ 使用质量密度: 0 kN/m³/g

塑性数据
塑性材料名称: NONE

热特性值
比热: 0 kcal/kN*[C]
热传导率: 0 kcal/m*hr*[C]

确认 取消 适用

- 特性值**
- 材料: 3
 - 1: C400
 - 2: cable
 - 3: C350
 - 截面: 4
 - 5: 主塔下部
 - 6: 主塔上部
 - 13: 主梁-B
 - 61: 拉索

截面数据

数据库/用户 数值
截面号: 5 任意截面
名称: 主塔下部 ☒ 焊接组合截面

从SPC导入...

截面特性值

面积	1.75815e+001 m ²
Asy	9.74677e+000 m ²
Asz	7.69329e+000 m ²
Ixx	9.82003e+001 m ⁴
Iyy	5.15584e+001 m ⁴
Izz	6.87713e+001 m ⁴
Cyp	3.0960 m
Cym	2.9040 m
Czp	2.5000 m
Czm	2.5000 m
Qyb	0.0000 m ³
Qzb	0.0000 m ³
Peri:O	2.14359e+001 m
Peri:I	1.34129e+001 m
Cent:y	2.9040 m
Cent:z	2.5000 m
y1	-2.9040 m
z1	2.5000 m

☐ FEM ☒ 方程 ☒ 考虑剪切变形

偏心: 中心 修改偏心...

显示截面特性值... 确认 取消 适用(A)

截面数据

数据库/用户 数值
截面号: 61 实腹圆形截面
名称: 拉索 ☒ 用户 ☐ 数据库 GB-YB

从单角钢数据库中读取数据
数据库名称: GB-YB
截面名称:

D: 0.16 m

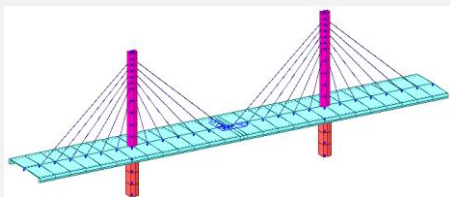
☒ 考虑剪切变形

偏心: 中心 修改偏心...

显示截面特性值... 确认 取消 适用(A)

4.2 斜拉桥成桥分析

结构成桥状态模型



斜拉桥 成桥分析流程

第一步 建立成桥模型

关键点：为了结合未知荷载系数法进行调索，**索结构必须用桁架（线性）单元**进行模拟，这样结构才支持荷载的线性叠加功能。

第二步 定义荷载工况

关键点：将不同的索力定义为不同的荷载工况，作为未知荷载来考虑。

第三步 采用未知荷载系数法进行斜拉桥调索

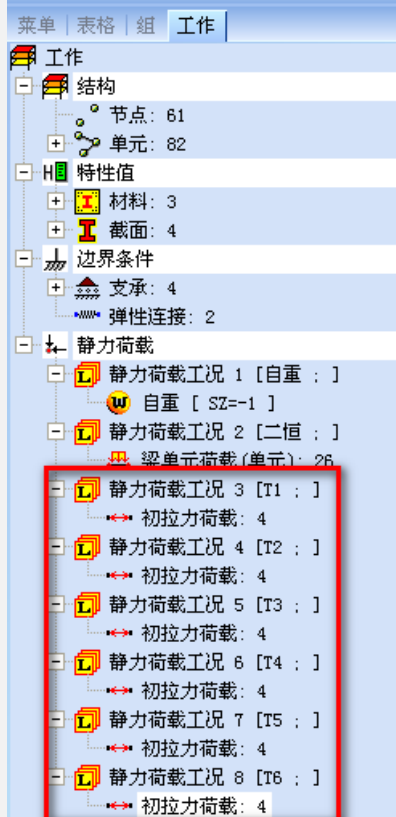
关键点：定义成桥约束条件，求解最优的荷载组合系数（未知荷载系数）

第四步 采用调索功能进行斜拉桥索力微调

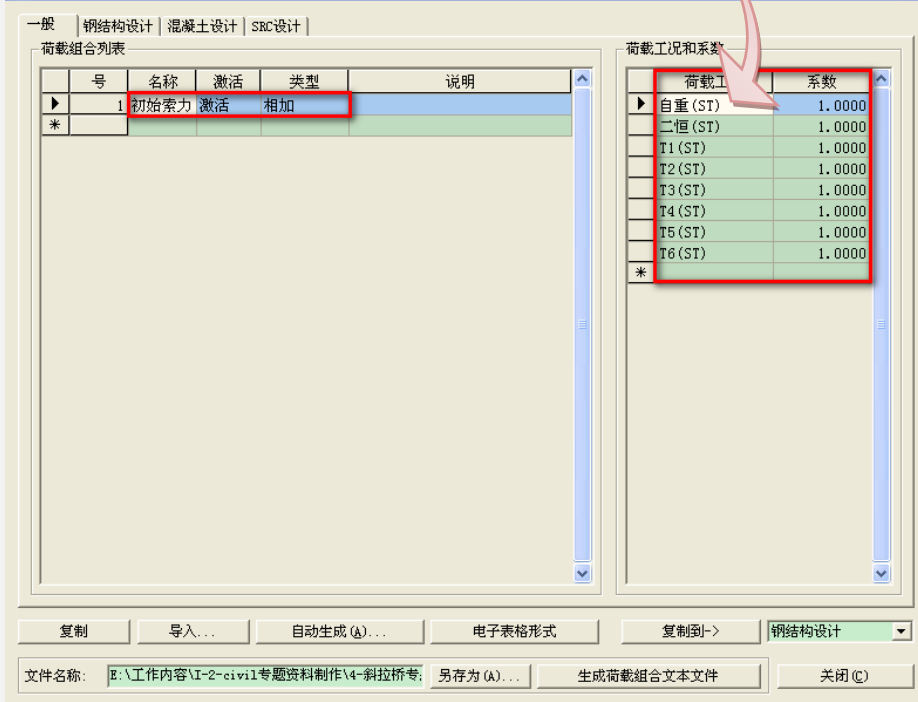
关键点：结合影响矩阵，找出影响效应大的索单元，对此索单元做优先考虑的**微调**（如果调索幅度太大的话，可能会引起其它结构不满足最优化状态）

定义荷载工况及荷载组合

树形菜单



荷载组合



注意点：

对于大跨斜拉桥，利用未知荷载系数法进行调索，**单位初拉力建议取100KN**，不要用1KN。

求解未知荷载系数

未知荷载系数的详细内容

项目名称: 未知荷载系数-调索

荷载组合: 初始索力

目标函数的类型: ☐ 线性 ☒ 平方 ☐ 最大绝对值

未知荷载系数的符号: ☒ 负 ☒ 正负 ☐ 正

约束条件:

- ☒ M1001
- ☒ M1002
- ☒ M1003
- ☒ M1004
- ☒ M1005
- ☒ M1008
- ☒ M1009
- ☒ M1010
- ☒ M1011

	未知	荷载工况	系数	加权系数
1	☐	自重	1.000	
2	☐	二恒	1.000	
3	☒	T1	未知	1.00
4	☒	T2	未知	1.00
5	☒	T3	未知	1.00
6	☒	T4	未知	1.00
7	☒	T5	未知	1.00

联立方程方法:

注意:

为了用优化方法计算未知荷载系数,需要首先对与未知荷载系数有关的荷载工况进行荷载组合,然后指定约束条件和目标函数。所有这些数据收集在一个唯一的且未知的荷载系数组内进行分析。

1、荷载组合

从先前在“结果> 荷载组合”中输入的荷载组合中选择某一荷载组合计算未知荷载系数。用于计算未知荷载系数的荷载组合必须包括要计算未知荷载系数的荷载工况。

程序每个荷载组合最多可以包含150个荷载工况,当要计算的未知荷载系数(即未知荷载工况)的数量大于150个时,可以定义两个荷载组合,然后将这两个荷载组合再进行荷载组合。在未知荷载系数对话框中选择使用荷载组合组合后的荷载组合。

2、目标函数类型

选择形成目标函数的方法,该函数由未知荷载系数组成。

- (1) 线性: (荷载系数绝对值×权重)的总和;
- (2) 平方: (荷载系数×权重)的平方的线性总和;
- (3) 最大绝对值: (荷载系数×权重)的绝对值的最大值;

3、未知荷载数的符号

指定要计算的未知荷载系数的正负号,对于斜拉索调索若出现负值,说明有拉索受压,需要重新求解计算。

- (1) 负: 将计算值的范围限制在负数区内
- (2) 正负: 不限制计算值的范围
- (3) 正: 将计算值的范围限制在正数区内

4、未知

选中要得到未知荷载系数的荷载工况。即定义什么是变量,将荷载工况激活为未知荷载系数时,字符串“未知”即出现在相应荷载工况的系数区内。

5、荷载工况: 作为未知荷载系数使用的荷载工况的名称。

6、系数: 控制荷载工况在目标函数中的相对重要性,自重的系数: 自重的调整系数,一般取1即可。

7、约束条件

输入荷载组合结果要满足的约束,其中包括未知荷载系数。指定约束时,生成约束列表。可以有选择性地使用约束。对桁架或梁单元而言,约束类型是位移,反力及构件内力。对于大跨斜拉桥,在进行未知荷载系数调索时,可能会有很多个约束条件,建议用表格的方法进行约束条件的编辑,因为可以利用表格功能数据与Excel的数据进行互换,非常方便。

定义约束条件

约束表格

Reaction Displacement Truss Force Beam Force

	Name	Elem	Point	Compo.	Type	Value	(0)	Other	(U)	Upper
1	M1001	1001	2/4 Pos	MY	Inequality				☒	5500
2	M1002	1002	2/4 Pos	MY	Inequality				☒	5500
3	M1003	1003	2/4 Pos	MY	Inequality				☒	5500
4	M1004	1004	2/4 Pos	MY	Inequality				☒	5500
5	M1005	1005	2/4 Pos	MY	Inequality				☒	5500
6	M1008	1008	2/4 Pos	MY	Inequality				☒	5500
7	M1009	1009	2/4 Pos	MY	Inequality				☒	5500
8	M1010	1010	2/4 Pos	MY	Inequality				☒	5500
9	M1011	1011	2/4 Pos	MY	Inequality				☒	5500
10	M1012	1012	2/4 Pos	MY	Inequality				☒	5500
11	M12	12	I-end	MY	Inequality				☒	18000

关闭

约束表格

Reaction Displacement Truss Force Beam Force

	Name	Elem	Point	Type	Value	(0)	Other	(U)	Upper
1	桁架28	28	I-end	Inequality				☒	9500
2	桁架29	29	I-end	Inequality				☒	9500
3	桁架30	30	I-end	Inequality				☒	9500
4	桁架31	31	I-end	Inequality				☒	9500
5	桁架32	32	I-end	Inequality				☒	9500
6	桁架33	33	I-end	Inequality				☒	9500
7	桁架34	34	I-end	Inequality				☒	9500
8	桁架35	35	I-end	Inequality				☒	9500
9	桁架36	36	I-end	Inequality				☒	9500
10	桁架39	39	I-end	Inequality				☒	9500
11	桁架40	40	I-end	Inequality				☒	9500
12	桁架41	41	I-end	Inequality				☒	9500
13								☒	

关闭

利用Excel表格功能快速方便地修改边界条件；

复制、粘贴、拖拉这三个是经常用到的数据处理功能。

桁架28	28	I-end	Inequality	0	1	9500	1	5000
桁架29	29	I-end	Inequality	0	1	9500	1	5000
桁架30	30	I-end	Inequality	0	1	9500	1	5000
桁架31	31	I-end	Inequality	0	1	9500	1	5000
桁架32	32	I-end	Inequality	0	1	9500	1	5000
桁架33	33	I-end	Inequality	0	1	9500	1	5000
桁架34	34	I-end	Inequality	0	1	9500	1	5000
桁架35	35	I-end	Inequality	0	1	9500	1	5000
桁架36	36	I-end	Inequality	0	1	9500	1	5000
桁架39	39	I-end	Inequality	0	1	9500	1	5000
桁架40	40	I-end	Inequality	0	1	9500	1	5000
桁架41	41	I-end	Inequality	0	1	9500	1	5000

M1001	1001	2/4 Pos	MY	Inequality	0	1	5500	1	-5500
M1002	1002	2/4 Pos	MY	Inequality	0	1	5500	1	-5500
M1003	1003	2/4 Pos	MY	Inequality	0	1	5500	1	-5500
M1004	1004	2/4 Pos	MY	Inequality	0	1	5500	1	-5500
M1005	1005	2/4 Pos	MY	Inequality	0	1	5500	1	-5500
M1008	1008	2/4 Pos	MY	Inequality	0	1	5500	1	-5500
M1009	1009	2/4 Pos	MY	Inequality	0	1	5500	1	-5500
M1010	1010	2/4 Pos	MY	Inequality	0	1	5500	1	-5500
M1011	1011	2/4 Pos	MY	Inequality	0	1	5500	1	-5500
M1012	1012	2/4 Pos	MY	Inequality	0	1	5500	1	-5500
M12	12	I-end	MY	Inequality	0	1	18000	1	-18000
M13	13	I-end	MY	Inequality	0	1	18000	1	-18000
M14	14	I-end	MY	Inequality	0	1	18000	1	-18000
M15	15	I-end	MY	Inequality	0	1	18000	1	-18000
M16	16	J-end	MY	Inequality	0	1	18000	1	-18000
M17	17	J-end	MY	Inequality	0	1	30000	1	-30000
M18	18	J-end	MY	Inequality	0	1	30000	1	-30000

查看分析结果

求得的未知荷载系数

影响矩阵

■ 未知荷载系数结果

	自重	二恒	T1	T2	T3	T4	T5	T6
系数	1.000	1.000	56.987	84.502	53.812	38.280	40.723	50.380
约束条件	M1001	M1002	M12	M13	M14	M15	M16	M17
数值	1757.821	4500.000	-3446.037	-3113.104	-2780.171	-2480.531	-2401.858	-2275.014
上限	4500.000	4500.000	4000.000	4000.000	4000.000	4000.000	4000.000	4000.000
下限	-4500.000	-4500.000	-4000.000	-4000.000	-4000.000	-4000.000	-4000.000	-4000.000

■ 未知荷载系数结果

	约束条件	M1001	M1002	M1003	M1004	M1005	M1008	M1009
上限		5500.000	5500.000	5500.000	5500.000	5500.000	5500.000	5500.000
下限		-5500.000	-5500.000	-5500.000	-5500.000	-5500.000	-5500.000	-5500.000
数值		1883.586	2333.336	3842.288	4599.959	1320.933	1753.971	5499.999
自重	1.000	38973.386843	28440.768480	13724.420026	-99.231236	-12436.847658	-10073.749861	552.545601
二恒	1.000	7675.787921	5617.346656	2718.311485	-17.547168	-2461.523104	-1996.807510	112.074292
T1	67.065	-394.939037	-88.522557	72.831815	118.445873	92.109923	78.406355	145.702541
T2	76.736	-274.790907	-184.654830	32.321977	114.798656	108.105606	97.627596	115.518774
T3	76.551	-50.966763	-178.874394	-136.326681	54.294844	114.011937	107.640839	44.471814
T4	55.463	43.591351	-20.624774	-171.093454	-128.466190	76.329977	73.437334	-138.834154
T5	51.177	54.163284	33.796829	-22.554283	-164.929852	-91.658697	-92.356824	-171.317922
T6	55.879	27.193436	26.647900	19.941440	-11.215454	-116.753507	-116.535539	-13.196309

生成未知荷载系数组合

荷载组合

一般 | 钢结构设计 | 混凝土设计 | SRC设计 |

荷载组合列表

号	名称	激活	类型	说明
1	初始索力	激活	相加	
2	OK组合	激活	相加	
3	对比	激活	相加	
*				

荷载工况和系数

荷载工况	系数
自重 (ST)	1.0000
二恒 (ST)	1.0000
T1 (ST)	56.9868
T2 (ST)	84.5018
T3 (ST)	53.8118
T4 (ST)	38.2801
T5 (ST)	40.7227
T6 (ST)	50.3803
*	

利用未知荷载系数法调索注意点:

(1) 对于未知荷载系数法求解索力, **要善于利用表格的功能**, 因为对于中小跨径的拱桥或者斜拉桥, 约束条件不多, 这时候一个一个修改起来还比较方便, 但是对于大跨径的拱桥或者斜拉桥, 约束条件少则几十个, 多则上百个, 这样再逐个修改约束条件, 会花费大量的时间, 这个尤其需要注意。

(2) 对于约束条件的设定, 对于斜拉桥, 一般比较关心主塔的偏位及主梁的内力与位移, 即**成桥线形**。针对吊杆拱桥的初始平衡状态分析, 一般比较关心主梁的节点的位移及吊杆的内力;

(3) 当用未知荷载系数求解出一组索力, 可以根据设计要求, 结合**“调索索力”**功能进行索力微调。

4.3 斜拉桥倒拆分析

斜拉桥 倒拆分析流程

第一步 建立倒拆施工阶段模拟模型

关键点：将调索成功的成桥索力（单位荷载*组合系数）作为体内力赋予给相应的索结构，然后对结构进行倒拆模拟。



第二步 得出倒拆的各施工阶段的索力

倒拆分析

- 施工阶段：9
- + 成桥 [0 天(s)]
 - + 拆二期恒载 [0 天(s)]
 - + 拆合龙段 [0 天(s)]
 - + 拆索1 [0 天(s)]
 - + 拆索2 [0 天(s)]
 - + 拆索3 [0 天(s)]
 - + 拆索4 [0 天(s)]
 - + 拆索5 [0 天(s)]
 - + 拆索6 [0 天(s)]

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

☐ 设置施工阶段接续分析

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)

时间依存效果

☒ 徐变和收缩
 类型：
☐ 徐变 ☐ 收缩 ☒ 徐变和收缩

徐变

徐变分析时的收敛控制
 迭代次数： 收敛误差：

☐ 使用用户定义的徐变系数
☐ 徐变分析加载时间步数
☒ 自动分割时间

T: 时间间隔	T>10	2	T>100	5
	T>1000	7	T>5000	10
	T>10000	20		

☒ 钢束预应力损失(徐变和收缩)
☐ 考虑钢筋的约束效果

☒ 抗压强度的变化
☒ 钢束预应力损失(弹性收缩)

非线性分析

荷载步数：
 每个荷载步内最大迭代次数：

收敛标准：
☐ 能量标准 ☒ 位移标准 ☐ 内力标准

索初始力控制

☒ 体内力 ☐ 体外力

杆系输出结果

☐ 杆系内力最大值+同时发生的其他内力值
☒ 输出联合截面各位置的分析结果

从施工阶段分析结果的“CS:恒荷载”工况中分离出荷载工况(CS:施工荷载)
 荷载工况：

分离出的“CS:施工荷载”的荷载类型：

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
☐ 在施工阶段中适用初始内力

☐ 赋予各施工阶段中新激活构件初始切向位移
☒ 全部 ☐ 组

☐ 未闭合配合力控制

☐ 考虑后张法端部锚固区应力传递长度内局部应力变化
☒ 线性内插 ☐ 常量: 应力 *

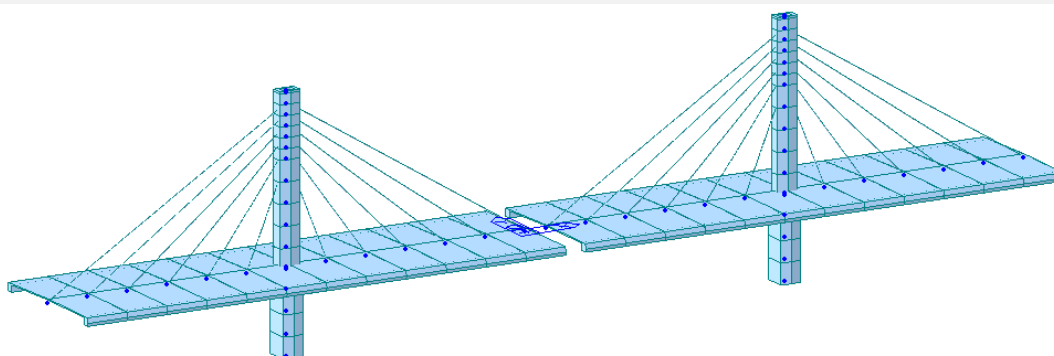
截面特性值变化

☐ 常量 ☒ 钢束引起的变化

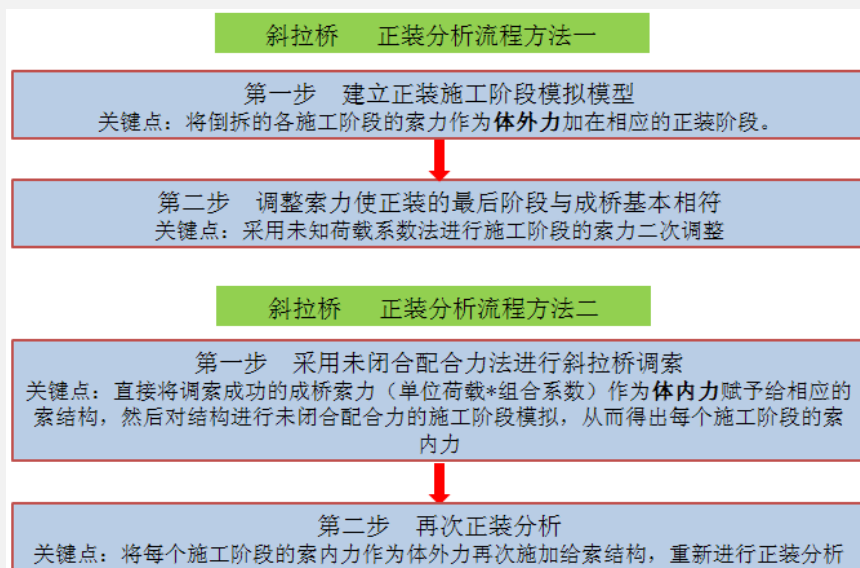
☐ 保存当前阶段的成果(梁/桁架)

施工阶段持续时间为0，不考虑收缩徐变；

下图为拆合龙段后的结构示意图，此时查看在该施工阶段结束时，在CS合计作用，拉索1（即最外侧两对拉索）的索力值即可。同理，对于拉索2的索力，在拆拉索1的施工阶段结束时，查看即可；以此类推，得到所有拉索的索力值。



4.4 斜拉桥正装分析



方法一：利用考虑施工阶段未知荷载系数进行二次调索：

(1) 建立分析模型, 定义正装施工阶段, 在完成二期恒载的阶段定义后, 定义调索的施工阶段, 在此阶段中, 只激活相对应的单位索力, 尤其需注意一点, 不能有任何其他荷载、结构、边界激活, 要不会影响未知荷载系数求解的结果。

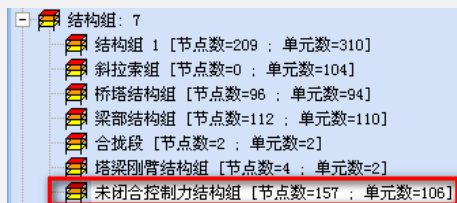
(2) 完成施工阶段分析控制数据, 需注意把索力定义成**体外力**。

(3) 完成分析后, 在结果中定义未知荷载系数项目组, 选择**最终施工阶段**为目标状态, 而后选择未知变量, 及定义各种约束条件, 建议用表格功能进行定义。

(4) 最后进行未知荷载系数的求解, 求出二次调索需要的调整索力大小。

方法二：结合未闭合配合力进行求解

定义未闭合配合力结构组



定义施工阶段分析控制数据

查看结果

