

# 索单元应用的几个常见问题

筑信达 吕良

索通过轴向拉伸来抵抗外荷作用，可以充分地利用钢材的强度，减轻结构自重。随着对结构跨度及空间的要求不断提高及高强度钢材的发展，索结构越来越广泛的应用于工程项目当中。SAP2000 中自带索单元，可以对索结构进行高效准确的模拟。但是很多工程师对索单元不熟悉，有时把索单元和框架单元混为一谈，导致分析出错。本文将讨论索单元应用时的几个常见问题，希望能帮助读者更好地理解索单元的相关特性。

## 1 索的初始形态

在 SAP2000 或 CSiBridge 中采用索单元绘制构件时，需要定义索的初始几何信息，该初始几何信息包含了索两端张力、垂度、索变形前长度等信息，如图 1 所示。该窗口“索类型”中有多种方式定义索的初始状态，这几种方式有何区别？另外，通过该对话框得到的是索的何种状态？对于后续分析有什么影响？



图 1 索的初始几何信息-指定最大垂度

### 1.1 索类型

在索的边界条件已确定的条件下，索端张力、索的水平张力、跨中垂度、或悬索长度等任一个参数确定，即可确定唯一的索线形，对于该部分的内容可参考文章《[单悬索的基本理论与 SAP2000 应用](#)》。因此在描述索的状态时可通过上述变量中的任意一个来确定索的初始几何信息，对应程序“索类型”中 Cable-Tension At i-End、Cable-Horizontal Tension Component、Cable-Maximum Vertical Sag 等方式。当其中的一个变量确定，其余的变量也就都确定了。

由于外荷载或是边界条件的改变，索端张力、变形后长度、最大垂度等都会发生改变。但是无论荷载形式或边界条件如何变化，索的无应力长度（索不受力状态下的长度）是不变的。因此【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。图 1 中索的初始形态是通过索的最大垂度来定义，最大垂度为 0.0472mm，此时对应的无应力索长为 5800mm；而图 2 中是通过 i 端张力来定义索的初始形态，将其 i 端索力设为 4582.8608KN 时，其对应的无应力索长也为 5800mm。这两种方式定义的索状态本质是相同的，可以统一的理解为定义的无应力索长为 5800mm。也可以直接指定无应力索长 5800mm，效果一样。



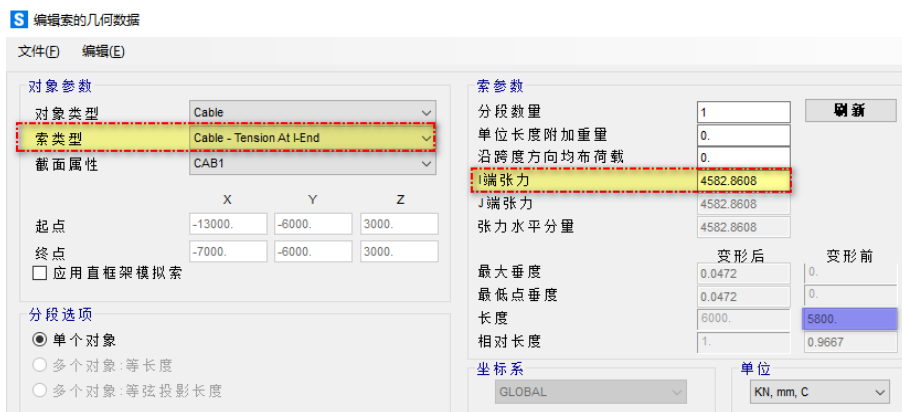


图2 索的初始几何信息-指定索端张力

## 1.2 索的初始状态

【初始几何信息】窗口里计算的索的形状并不发生在任何工况中，且计算的索力也不是直接作用在结构上。通过【初始几何信息】是定义索的初始形态，索的最终状态与外荷载及结构变形相关。以下通过两个模型来说明上述问题。

图3中两个结构索两端的距离均为6m，索的初始几何信息均按照图1来定义，此时索的无应力长度为5.8m。不同的是，左侧结构索直接与支座连接，右侧结构索与3m高的立柱相连接，将重力工况设为非线性工况，运行分析查看重力工况下杆件的轴力。

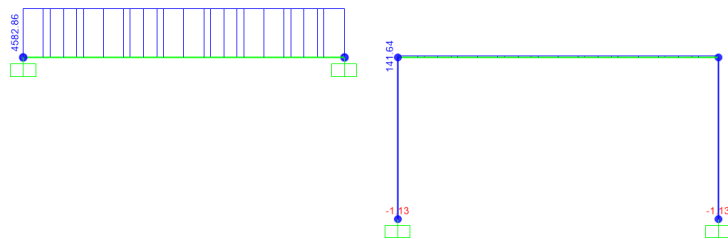


图3 单索结构模型轴力图

将图1【初始几何信息】窗口中索的状态与图3中左侧模型相比较，可以发现这两个状态下索两端位置不变，索的无应力长度相同，两端的轴力均为4582.86kN。如果将该索在重力工况下各个剖分点的坐标导出，会发现剖分点的坐标与【初始几何信息】中索变形后控制点的坐标也是相同的。即表明【初始几何信息】窗口中计算的状态即为索端固定，在重力荷载作用下的状态。

在实际工程项目中，索两端一般不会同时锚固于支座上，至少会有一端与其它构件相连。由于索的张力作用，结构会产生相应的协调变形，变形后索锚固端的空间位置会发生变化。当索的两端位置发生变化后，索的受力及变形就需要重新计算，整个索的状态也就改变了。如图3右侧模型，该模型在自重条件下柱顶会产生位移，导致索的长度缩短。索的真实轴力仅为141.64 kN，与【初始几何信息】窗口中的索轴力相差巨大。

虽然上述两个结构的无应力索长相同，但是索的状态与结构的边界条件和受力状态都是相关的。【初始几何信息】中仅定义了索的无应力索长，并没有确定索的真实的边界条件和荷载条件。因此在对索结构分析时，需要注意区分索的初始几何形态与索在结构中的实际受力状态的区别，避免概念错误。

## 2 目标力工况与常规工况

目标力荷载是一个特殊的荷载类型，用户可以为构件指定一个期望的目标力，程序会通过迭代计算求解出达到该期望目标力所对应的变形，使构件在该变形下达到指定的目标力。与其他类型荷载不同，目标力荷载并不是增量荷载，而是由用户指定索单元在荷载工况结束或阶段施工完成后单元的轴力值。依据单元的初始内力，由程序迭代计算出的变形可以是正的、负的、或者零，但最终将使对应的单元达到指定的目标力。

现在通过图5-1中的模型A和模型B来说明该问题。两个模型均为立柱被单根拉索锚固，其模型参数相同，仅索的无应力长度(变形前长度)不同。模型A的无应力索长为等于弦长为7211.1026mm，模型B的无应力索长小于弦长，为7000mm。

现在分别计算结构在重力工况（图 4-1）和目标力工况（图 4-2）两种状态下的柱顶的变形和索端拉力，其结果如图 5-1 和图 5-2 所示。

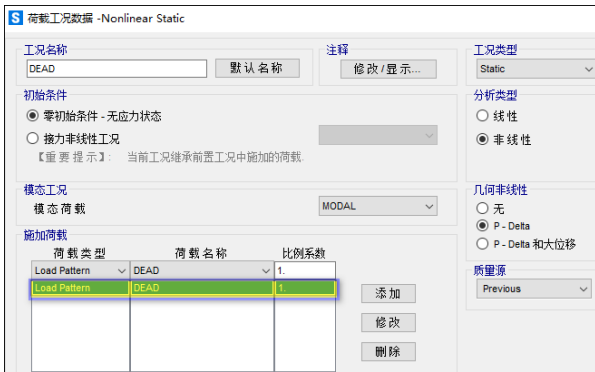


图 4-1 重力工况

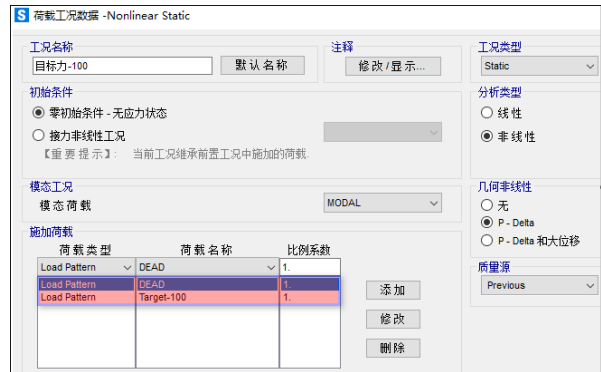


图 4-2 目标力工况

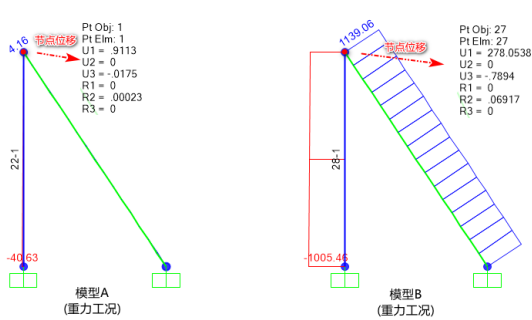


图 5-1 重力工况

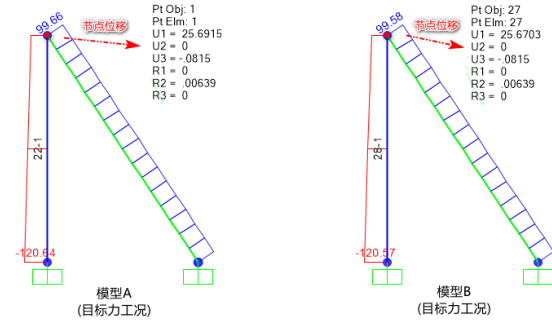


图 5-2 目标力工况

表 1 计算结果

工况	索弦长 (mm)	无应力索长 (mm)	工况	柱顶 x 方向位移 (mm)	索端张力 (KN)
模型 A	7211.1026	7211.1026	重力工况	0.9113	4.16
			目标力工况	25.6703	99.66
模型 B	7211.1026	7000.0000	重力工况	278.0523	1139.06
			目标力工况	25.6703	99.58

将两个工况的结果整理如表 1 所示，可以看到在重力工况下模型 A 柱顶端位移较小，x 方向仅为 0.9113mm，对应的索端张力为 4.16KN，而模型 B 柱顶 x 方向位移为 278.0538mm，对应的索端张力为 1139.06KN，两个模型的索在重力工况下状态差异很大。而在目标力工况下，虽然索初始状态差异较大，但是运行分析后顶端位移均为 25.6703mm，两个索的索力均接近 100KN，两者状态相同，均达到了指定的目标力状态。

迭代计算时，对于模型 A 中的索，程序是将索长度给缩短了，使其缩短后索力正好增加到目标索力 100KN，而模型 B 在迭代计算时，程序是将索长度伸长了，伸长后使其索力正好减小到目标索力 100KN，最终两者均达到指定的目标力。

需要注意的是目标力荷载只在非线性静力分析和阶段施工工况起作用。对于其他荷载工况，目标力荷载没有任何效果。

### 3 目标索力的求解

对于索单元，我们建议通过目标力荷载来施加预拉力。但如果目标力荷载无法收敛，该如何处理呢？一般来讲，目标力的数值要合理，对于复杂结构常需要多次调整来达到目标力。另外，还可使用“荷载优化器”来调整索力。以下是详细介绍。

以图 6 中张弦梁结构为例，在索安装完毕后对索两端进行对称张拉，索端控制张拉力设置为 300KN。现在需要在重力工况下为下侧索指定 300KN 的张拉力。

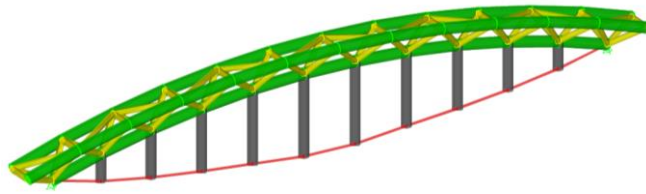


图 6 张弦梁结构视图

### 3.1 目标力工况

对于该问题可采用目标力工况来求解。这里对下侧所有的索均指定了 300KN 目标力，但是运行分析完毕后，程序弹出警告信息如图 7-1 所示。

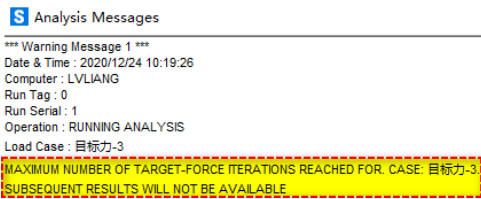


图 7-1 分析警告信息



图 7-2 目标力迭代控制参数

由该警告信息可以看出，程序达到了最大迭代数但是依旧没有迭代出合理结果。造成该问题的原因可能是迭代次数少，或迭代数量足够多但是计算不收敛。在定义目标力工况窗口“非线性参数”一栏中，如图 7-2 所示，可以看到迭代次数为 200，对于本例而言一般来说迭代数是足够了，因此报错原因应是迭代不收敛。

由于目标力并不是具体的荷载值，该荷载值需要由程序内部迭代计算，表示的是索在非线性工况结束或施工阶段完工后的受力状态，因此指定的目标力状态必须是合理的。如设置的目标力状态不合理，程序将无法迭代出目标力。对于上述张弦梁结构在真实条件下每一段索的索力是不同的，跨中的索力和边支点附近的索力差异可能很大。但本例设置的收敛容差仅为 0.01，即每段索的索力被限制在  $300 \times (1 \pm 0.01)$ KN 范围内，使跨中附近的索力与边支点附近的索力差异很小，与真实情况不符合。因此程序难以迭代出目标力结果。

解决这个问题有两种思路，一个是将收敛容差改大，使得各个索的索力可以有较大的差异，以接近索力的真实分布情况。这里保持索的目标力为 300KN，将收敛容差调整为 0.1，程序即可求解出满足要求的目标索力，如图 8-1 所示。

第二种思路是不调整收敛容差，调整目标力大小，使目标力与索力的真实分布比较吻合，在合理的误差范围内程序也可以迭代出较好的结果。图 8-2 中的模型，该模型仅对边支点索端指定了 300KN 的目标力，其它索不做处理，并保持收敛容差不变，程序迭代结果如图 8-2 所示。

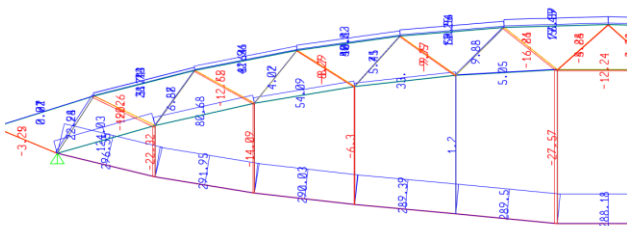


图 8-1 调整收敛容差

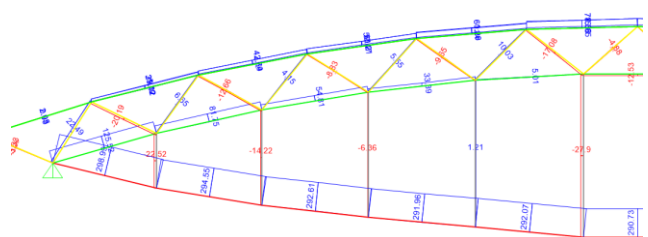


图 8-2 指定支座位置目标力

当结构比较复杂无法一次迭代出所需的目标力时，可先调整迭代误差，计算出一个接近所需目标力且符合真实分布的状态。然后依据该状态重新指定各个索的目标索力，调整收敛容差，求解出新的目标力状态。如果新状态的目标力与所需目标力依旧有差别，重复上述过程，再次调整目标力及收敛容差，直到结果满足要求。一般经过若干次调整就可以达到所需的目标力。

### 3.2 荷载优化器

当需要通过调整索力使结构最终达到特定的状态时，也可采用 SAP2000 中的荷载优化器通过“找形”的方式来实现。荷载优化器是将结构的最终态的某些信息设为优化目标，通过调整变量（如索力）使结构达到所需的状态。命令路径为【工



具>CSiLoadOptimizer】。

对于上述的张弦梁结构。希望结构达到的最终状态为：支座端张力为 300KN，吊杆下端节点沿张弦梁轴向的位移为 0（对于该结构索张拉完成后，一般竖直吊杆的水平位移也比较小，可以近似认为该值为 0）。在达到该状态时各段索的索力是可以随意调整的。因此可调整的变量即为每一段索的张力。此时可以将支座端的索力及吊杆下端节点的水平位移作为结构的优化目标，而其它段索的索力作为可调整的变量，通过荷载优化器找出满足优化目标的各段索力值，荷载优化器的定义参数如图 9 所示。

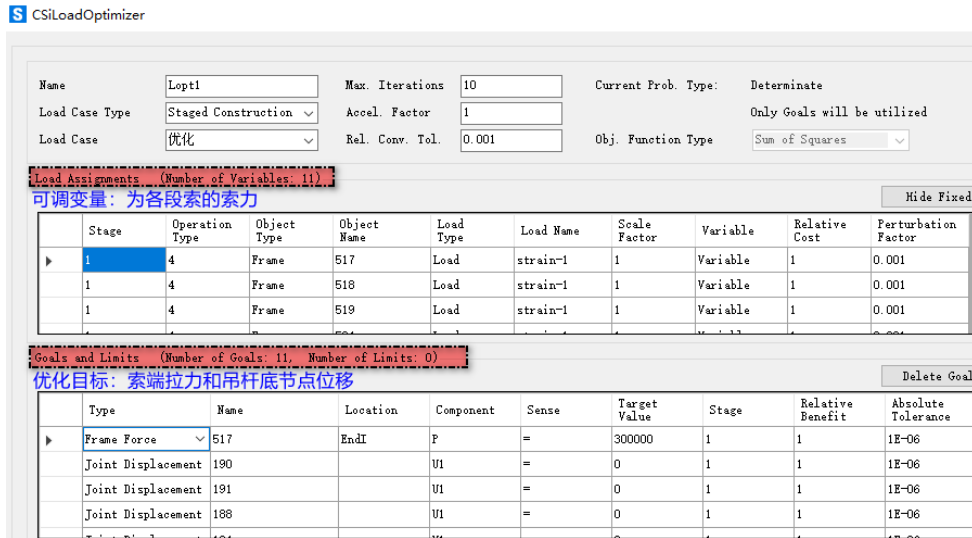


图 9 荷载优化器的设置

采用荷载优化器计算出的结果如图 10 所示，可以看到由程序迭代计算出的索端张拉为 300KN，各个吊杆底端的 x 方向的位移基本接近 0，满足目标状态的要求。由于结构受力平衡、变形协调，其余段求解出的索力也是符合真实条件的，对比目标力的求解结果，两者最终达到的效果基本一致。

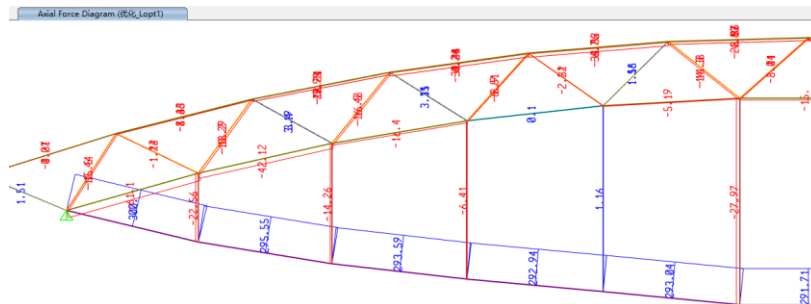


图 10 荷载优化器的索力优化结果

## 4 小结

索与常规框架不同，在分析时我们需要注意索的初始形态和荷载状态的区别。SAP2000 中在绘制索时定义的是索的初始状态信息，其核心是确定索的无应力长度。索的荷载状态与索的无应力长度、外荷载及边界条件相关。当期望索达到指定的索力时，可通过目标工况求解，但是需要注意目标力的合理性。另外，对于特定状态下的索力也可以通过荷载优化器采用找形的思路来求解。在了解索单元的基本特性后，结合 SAP2000 中提供的各种分析方法与工具，已足够处理工程上常见的索结构问题。限于知识和经验，本文也可能存在不足，望读者批评指正。

关于索单元及目标工况更为详细的介绍用户可以查看软件自带的《CSI 分析参考手册》。

## 参考资料

- [1] Computers & Structures Inc., 北京筑信达工程咨询有限公司. CSI 分析参考手册. 2019.
- [2] 沈世钊. 悬索结构设计[M]. 中国建筑工业出版社. 2006.