





布局线 段类型	里程 cm	标高 Z cm	纵坡 百分比
1 Initial Station, Elevation Z and Grade	0.	0.	0.
2 Constant At New Grade to Station	16400.	278.8	1.7
3 Circular to New Grade at Station	93400.	740.7441	-0.5
4 Constant at Previous Grade to End	134000.	537.7441	-0.5

图 3 布局线竖向参数

该桥小里程侧桥塔高 95m，大里程侧桥塔高 155m，桥塔为变壁厚矩形单箱单室结构。在 CSiBridge 可采用变截面框架单元来模拟桥塔沿高度方向的属性变化。通过 dxf 导入桥塔各节段截面，定义相邻两截面之间的变化形式，即可完成整个桥塔的变截面设置。



图 4 主塔变截面设置

### 3 确定优化目标及可调变量

一般悬索桥在最优成桥状态下主缆线形接近悬链线，因此设置主缆初始线形为悬链线，以此状态建立初始模型。因结构关于顺桥向中心线对称，故可以将同一对称结构指定到一个组中，减少优化数量。进行荷载优化之前，我们需要确定是优化目标，即达到优化目标时，悬索桥就达到相应的最优成桥状态。依据悬索桥特点，因此我们可以设置以下优化目标：

- 优化前后，吊杆竖直；
- 优化前后，主跨矢高不变。
- 优化前后，两侧主塔柱索鞍位置不变
- 优化前后，主梁标高不变

根据上述原则，可以确定优化的目标约束条件为：索鞍节点和中央扣中间节点顺桥向和竖向位移  $3 \times 2 = 6$  对、各吊杆顶点顺桥向位移 64 对、加劲梁各支点竖向位移 67 对，共 137 对约束。

另外一个需要确定的是可调变量，通过调整可调变量达到我们所需要的成桥状态。这里可调变量主要有：

- 各主缆分段的无应力长度
- 各个吊杆的无应力长度
- 支座及主塔高度

相应的可以确定可调变量为：各主缆分段的无应力长度（包括左右两侧连接锚碇的主缆） $66 + 2 = 68$  对、各吊杆的无应力长度 65 对、支座高度 2 对、索塔高度 2 对，共 137 对变量；

### 4 荷载工况设置

CSiBridge 进行优化前，需要给可调变量指定一个初始的荷载值，一般取单位荷载，此时该指定荷载的

比例系数默认为 1。然后软件会对可调变量进行迭代优化，优化完成后，软件会给出最终的比例系数，该比例系数乘以初始荷载值，就为杆件优化后的最终荷载值。本悬索桥共设置了 137 对可调变量，需要分别指定 137 个组，然后对 137 组可调变量指定单位应变。

悬索桥为非线性结构，结构刚度与荷载值相关。因此在计算优化索力时需要考虑恒载对结构刚度的影响，软件通过考虑恒载刚度来形成影响矩阵。

首先需要定义一个非线性静力工况：**一次成桥**，考虑结构自重及二期恒载，同时考虑 p- $\Delta$  和大位移效应。为了便于后面的索力优化，我们先去除中央扣锁，即在**一次成桥**工况后再添加一个非线性静立工况-**去除扣锁-大位移**，去除三对中央扣锁。

然后再定义一个非线性阶段施工工况：**内力调整-大位移**，继承**去除扣锁-大位移**工况的刚度矩阵，以**去除扣锁-大位移**工况的结束状态为初始状态，进行分析。在阶段定义中，添加一个施工阶段，分别将 137 组可调变量的单位应变荷载添加到一个施工阶段中。勾选 p- $\Delta$  和大位移效应，完成**内力调整-大位移**工况设置。

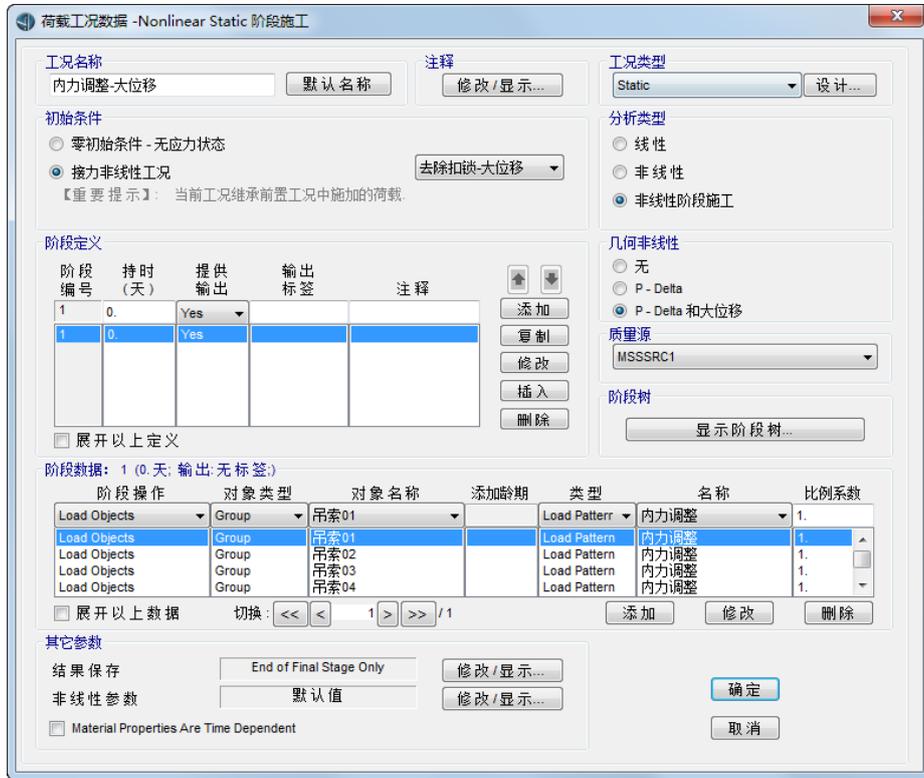


图 5 内力调整-大位移工况

## 5 荷载优化器设置

在荷载优化器界面，选择荷载工况(load case)为**内力调整-大位移**。在 Load Assignment (可调变量) 窗口软件会自动导入该工况下的各阶段操作。如下图所示，显示总变量为 137 个。红色选框 1 中的三个参数主要控制迭代计算，其中 Max Iterations 表示最大迭代次数，如果计算达到最大迭代数依旧没有收敛，软件会停止迭代计算；Accel Factor 对于线性优化问题该参数应设置为单位 1，对于非线性优化问题，如果结果计算收敛时间较长，可以设置为一个大于 1 的值，如果计算难以收敛，可将设置为一个小于 1 的值。Rel Conv Tel 表示相对容差。在该索力优化中，以上参数均保持默认设置即可较好的收敛。

在 Load Assignment (可调变量) 窗口 (即红色选框 2 中的) 的相关参数，需要用户注意的为表格后面的四个参数，这里以吊杆 1 为例进行简要说明。Scale Factor 表示初始荷载的放大系数，与工况设置中的比例系数是对应的，这里保持默认系数 1 即可；Variable 表示该参数是否可以变化，这里吊杆 1 为可调变量，故设置参数为 Variable，如果用户想指定吊杆 1 轴力不变，可以将该参数设置为 Fixed。Relative Cost 和

Perturbation Factor 为可选参数,进行优化时 Relative Cost 与 Scale Factor 相乘后作用于影响矩阵; Perturbation Factor 为影响矩阵的增量系数,对于非线性无法收敛时,可尝试改小该参数,这里均保持默认值即可。

在 Goals and limits (优化目标) 窗口,输入前文所述的优化目标约束条件。以索鞍处节点 1974 为例简要说明相关参数意义。Type 表示,优化目标的类型,可以选择为节点位移、节点反力、框架内力等。优化前后需要保证索鞍节点在顺桥向和竖向节点位置不变,因此在 Type 选项中选择节点位移 (Joint Displacement),然后在 Component 选项卡中选择顺桥向位移 U1,在 Sense 选项卡中选择判定标准为“=”,Target Value 目标值即节点位移设置为 0。Relative Benefit 为可选参数,该系数越大对应优化参数的计算误差越小,这里保持默认值 1。Absolute Tolerance 表示计算的收敛容差,要保证索鞍优化前后顺桥向位移不变,容差设置为  $10^{-6}$ 。

按照上述方式约束索鞍节点和中央扣中间节点顺桥向和竖向节点位移、各吊杆顶点顺桥向位移、加劲梁各支点竖直位移,共 137 个节点约束 (对称结构只需约束一侧节点,另一侧节点会自动调整一致)。定义完成之后即可进行索力优化。

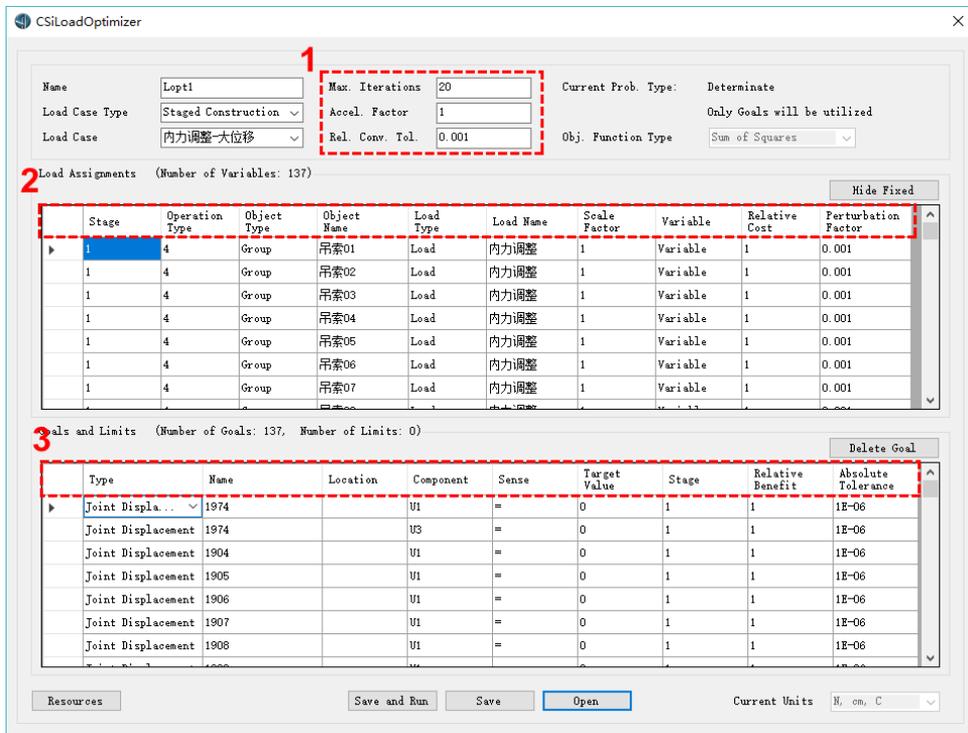


图 6 优化器设置

## 6 结果分析

根据计算量的不同,优化时间长短也不同,该悬索桥整个优化过程大概十五分钟左右。优化完成后软件会自动生成一个优化荷载工况,默认名称为优化工况名称加上后缀\_Lopt1,这里生成的荷载优化的默认名称为:内力调整-大位移\_Lopt1。在比例系数一栏中,系数由之前的 1 全部变成不同的数值,该系数乘以之前施加的单位应变,即为需要对相应的构件施加的荷载,使结构达到最优的成桥状态。

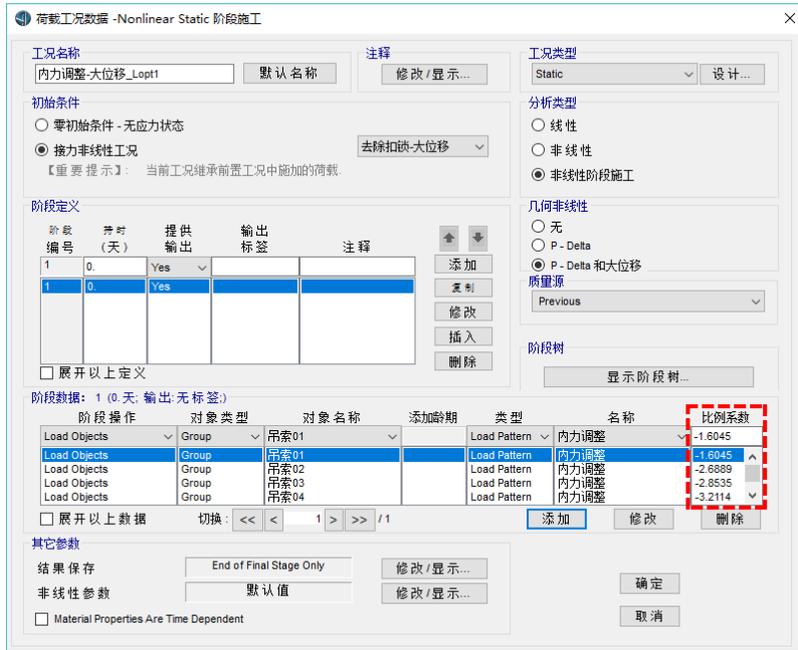


图 7 优化结果

为了便于优化，优化前曾拆除了中央扣，此时须添加中央扣锁。重新定义一个非线性阶段施工工况，继承非线性优化工况**内力调整-大位移\_Lopt1**的计算结果，勾选 p- $\Delta$  和大位移效应，在阶段操作中激活中央扣，运行该工况即为所求的最优成桥状态。运行完成后，可以查看中央扣节点的竖向位移为 0.0004m，与未进行优化前，即一次成桥状态下中央扣节点位移 6.65m 相差巨大。

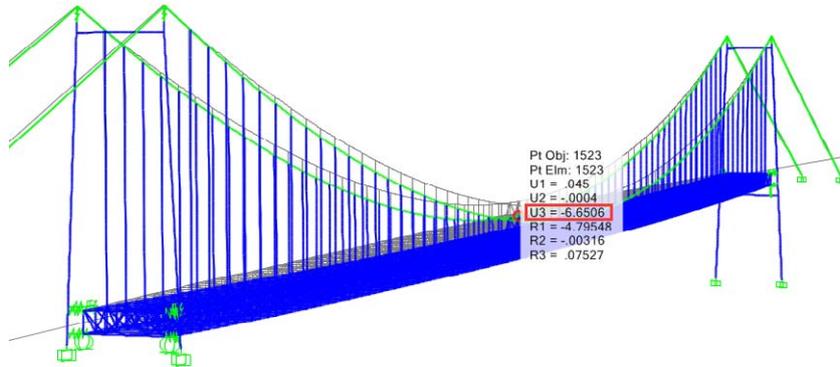


图 8 优化前中央锁扣竖向位移

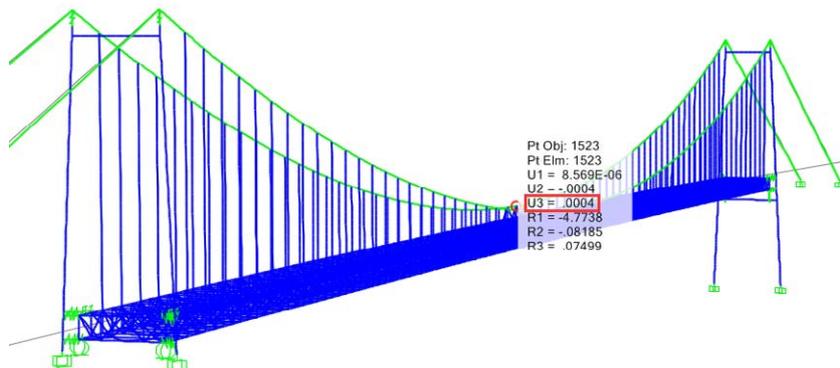


图 9 优化后中央锁扣竖向位移

为校核 CSiBridge 计算结果的可靠性，我们将悬索桥每个吊杆的轴力以及主缆的轴力采用表格输出，

并与原设计单位提供的设计结果相比较。绘制图形如下所示。

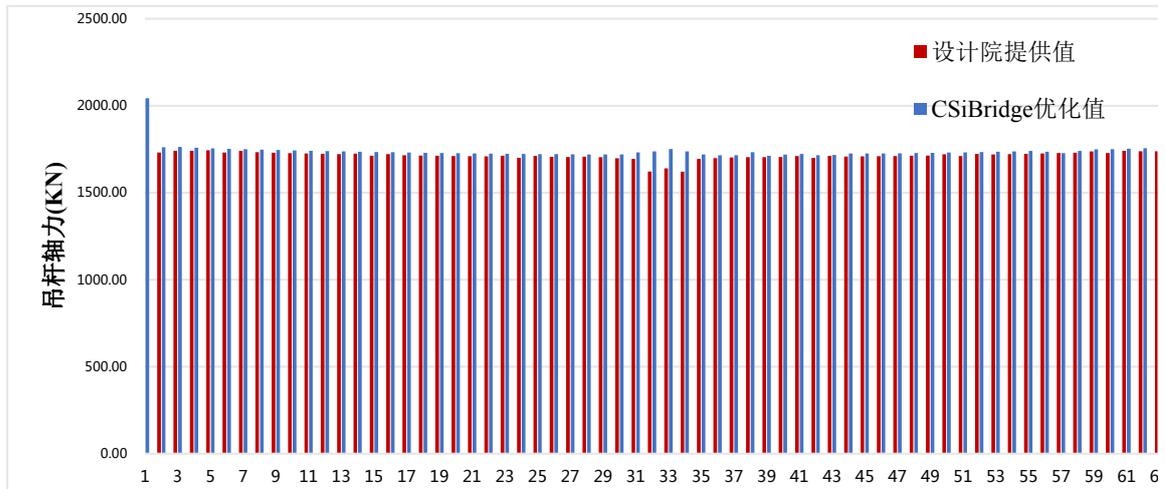


图 10 最优成桥状态下各吊索轴力图

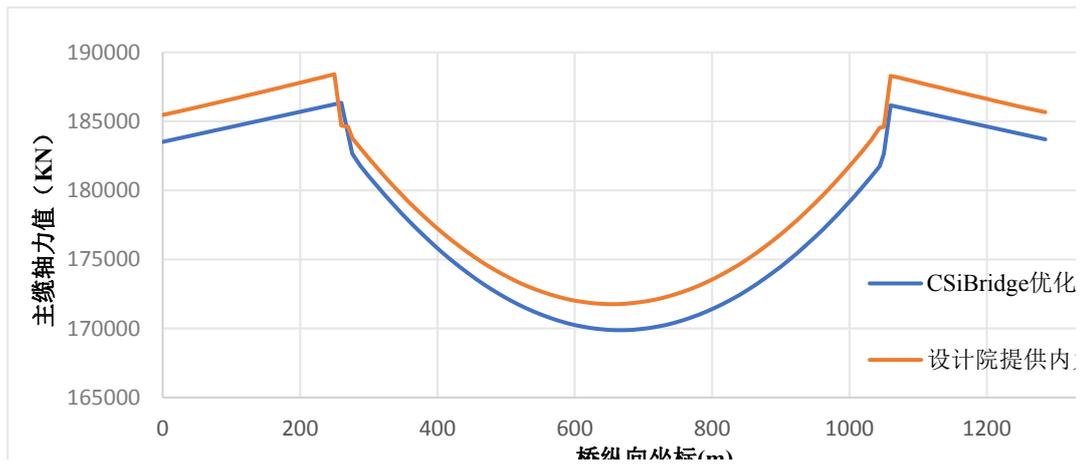


图 11 最优成桥状态下主缆拉力分布图

通过上述图表可知，采用 CSiBridge 优化后的悬索桥主缆内力及吊索轴力与原设计单位提供的的设计结果较为一致，最大误差不超过 5%，满足工程需求。

## 7 小结

CSiBridge 基于影响矩阵的悬索桥索力优化方法。首先在恒载和假定初始索力的作用下，形成悬索桥的初始刚度。然后在初始刚度基础上得到悬索桥的影响矩阵。最后基于影响矩阵迭代更新索力，直至收敛，得到悬索桥理想索力和合理成桥线形。

软件基于对象的建模方式能有效提高建模效率，采用影响矩阵的方法进行索力优化便于工程师理解及操作，计算结果具有较高精度，满足工程应用。针对此类需要进行构件内力优化的桥梁，CSiBridge 提供了一个高效解决方案。