

# Parametric Design of Scroll-shaped Pylon of Single Tower Cable-stayed Bridge

Zheng Shi<sup>1</sup>, Zhijuan Bai<sup>1</sup>, Wu Xing<sup>2,\*</sup>, Wang Kai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd, Shanghai, People's Republic of China

<sup>2</sup>CCCC First Highway Consultants Co., Ltd, Xi'an, People's Republic of China

## Email address:

354846946@qq.com (Zheng Shi), 420650452@qq.com (Wu Xing)

\*Corresponding author

## To cite this article:

Zheng Shi, Zhijuan Bai, Wu Xing, Wang Kai. (2024). Parametric Design of Scroll-shaped Pylon of Single Tower Cable-stayed Bridge.

*Journal Title*, 12(5), 127-137. <https://doi.org/10.11648/j.sd.20241205.14>

**Received:** 8 September 2024; **Accepted:** 25 October 2024; **Published:** 31 October 2024

**Abstract:** Using single-tower cable-stayed bridge as example, this article introduces the design and construction process of a cable-stayed bridge with a scroll-shaped tower, as well as the optimization process and detailed design process of the steel structure of the scroll-shaped part of the bridge pylon. Based on Rhino+Grasshopper software, parametric design was used to design the bridge tower's shape while ensuring the balance of tower strength, stiffness, and stability. The shape was designed as close to the original landscape plan as possible, and the following work was conducted: (1) Determination of the the pylon's overall proportion, based on Golden Section principle, including the size of three main elliptical sections at the top, bottom, and waist, as well as the determination of the circular arc transition in the middle, the pylon shape match perfectly with the landscape plan; (2) The shape of the tower crown is found by the golden section ratio plus helix, and the structure of the tower crown adopts double shell. The structural calculation shows that the strength and stiffness of the double shell meet the requirements when the inner and outer layers are 10~12mm thick and the ring stiffening +1 circle and 20 vertical stiffening every 1.5m; (3) To find the shape of the pylon's turned edge, according to the shape of the rotary rising edge from the original model, by constructing the parameter of the control point, and generating the integral shape, adjusting the parameter until the shape meets the original pylon model. (4) After the concrete scroll edge and the main tower bottom are cast together, the stress distribution of the tower foundation scroll edge under permanent load, live load, and overall temperature rise and fall conditions is analyzed, and the proportion of its force sharing with the main tower is calculated, calculation shows that the main force of the flange is compression, which is consistent with the main tower structure. Only under the most unfavorable conditions with the maximum bending moment, there is a small tensile stress in the flange.

**Keywords:** Cable Stayed Bridge, Scroll-shaped Pylon, Turned Edge, Pylon Crown, Turned Edge at Pylon Bottom, Temperature Stress, Parametric Design

---

## 某独塔斜拉桥卷轴形桥塔的参数化设计

施政<sup>1</sup>, 白志娟<sup>1</sup>, 武星<sup>2,\*</sup>, 王凯<sup>2</sup>

<sup>1</sup>同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海市, 中国

<sup>2</sup>中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安, 中国

## 邮箱

354846946@qq.com (施政), 420650452@qq.com (武星)

**摘要:** 以某独塔斜拉桥为例, 介绍了一种卷轴式造型的斜拉桥桥塔的造型过程, 以及对桥塔的卷轴造型部分的钢结构的施工图优化、深化设计的过程。在造型尽量贴合最初景观方案的前提下, 基于Rhino+Grasshopper采用参数化方法对桥塔的造型进行设计建模, 并对卷边、塔冠等装饰性构件进行了结构计算与设计: (1) 以黄金分割比例为原则, 确定

塔身整体比例，对塔顶、塔底、腰部三个主要椭圆截面尺寸进行拟定，以及中间的圆弧过渡方式的确定,建模后的塔柱形态与效果图完美匹配；(2)塔冠造型利用黄金分割比例加螺旋线的方式找形，塔冠结构构造采用双层壳体，结构计算表明当内外层板厚10~12mm、每1.5m做环向加劲+1圈20道竖向加劲时，双层壳体强度、刚度满足要求；(3)为了生成主塔整体的卷边造型，研究卷边螺旋线上升的运动规律，基于黄金分割比例构造控制点参数，生成整体形态，通过与效果图比对、拟合，调整基础参数至最优解；(4)在砼卷边与主塔底部混凝土整体浇筑之后,对塔底砼卷边在恒载、活载、整体升降温工况下的应力分布进行分析，并计算其与主塔的受力分担比例，计算表明卷边受力以受压为主,与主塔结构一致，仅在弯矩最大的最不利工况下，卷边有微小拉应力。

**关键词：**斜拉桥，卷轴型主塔，卷边造型，塔冠，塔底砼卷边，温度应力，参数化设计

1. 引言

随着城市的发展,对于城市景观桥梁的造型独特性以及美观性的要求逐年增加[5]。对于独塔斜拉桥而言,拉索与桥塔形成的整体,作为全桥的景观焦点,意味着桥塔的造型十分重要且必须独特。为了实现桥塔造型,同时保证桥梁的安全,需针对性设计桥塔构造。本文结合某独塔斜拉桥工程,使用参数化设计工具进行造型控制 and 设计,达到了预期的景观效果。

2. 工程概况

工程位于某快速路工程线路上,桥型为独塔斜拉桥+空间扭索面,主桥跨径40+150+150+40m,结构体系为全漂浮体系,塔高148m,梁下净空约18m,空间扭索面富有张力。塔侧有独特的卷边造型,从塔底开始向上螺旋上升,如卷起的画布、卷轴,卷边至塔顶形成向上飞出的动势,造型富有张力。



图1 斜拉桥鸟瞰透视图。



图2 斜拉桥车行透视图。

3. 总体方案

3.1. 主塔方案

主塔的结构方案比选如下

纯钢塔与钢、混组合结构塔比选

(1) 纯钢塔

优势：施工速度快，构造相对简单；

劣势：钢结构受压未充分发挥性能，考虑受压稳定需多做加劲肋[9]，用钢量偏大，造价较高，塔壁板较厚。

(2) 组合结构塔

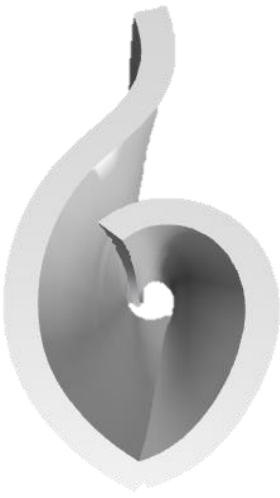
优势：砼抗压承载力好，加上钢塔壁约束成为钢管混凝土形式，能充分发挥材料的特性，符合主塔受压的形式。

劣势：构造复杂，施工复杂(速度慢)，钢-砼组合结构带来的剪力键、穿钢筋数量众多。

本项目由于工期紧，景观要求高，同时兼顾抗震设计因素，因此主梁以上主塔选择纯钢塔方案。而主梁以下的主塔由于接触河水，采用钢筋混凝土结构。

3.2. 结构与卷边装饰结合的做法比选

如何实现兼顾卷边造型效果，并同时保持主塔的结构功能(强度、刚度、稳定性)，是主塔形态设计的主要矛盾点，也是设计应主要解决的问题。从效果图出发，取横截面得到的最初断面，类似耳廓、阿基米德螺线：



a. 景观方案模型断面

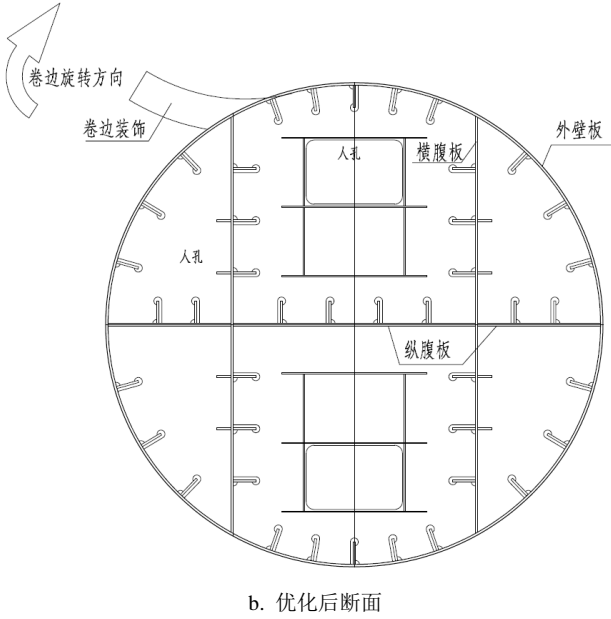


图3 桥塔断面的方案选型和优化。

该断面的问题在于：(1)结构不闭合；(2)塔壁板存在弯扭，难以施工；根据主塔以承受轴压为主的受力特点，进行了以下优化：

(1)主塔做成闭合的椭圆型截面，椭圆的长短轴在不断变化，顶底大、中间窄，为小蛮腰型；

(2)依靠卷边装饰，表达旋转、渐变的效果  
因此根据卷边表达的效果，有以下两种方案：

方案1：圆筒+外卷边(部分突出，无卷入效果)，闭合圆筒结构本身就随塔外形做渐变，卷边的表现仅依靠部分焊接外做钢板，优点是施工较为简便，缺点是内卷的效果无法做出，与效果图有少许差异，且焊缝部分暴露在外，需后期打磨。

方案2：偏小的内圆筒+卷边外壳(有卷入效果)，其中内圆筒为半径不变的正圆形直通塔顶，壁板与卷入板之间形成空腔，做出卷入的效果。优点是能充分表现效果图的卷边效果，缺点是施工难度极高，空腔内部空间小且无用，外壳与内壳部分位置焊接困难。且由于外壳空腔导致塔身断面尺寸变大，影响塔整体的纤细比例效果。

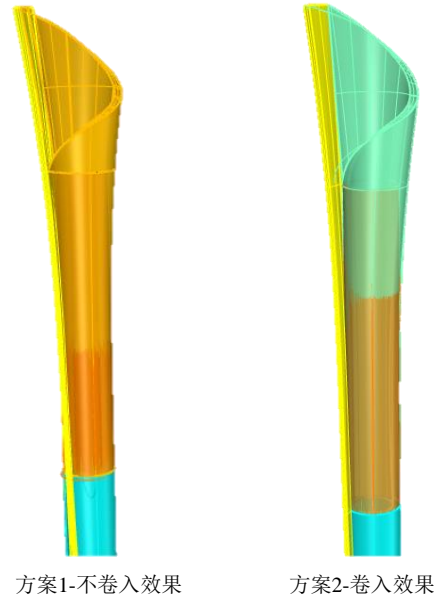


图4 卷边顶部卷入和不卷入的方案比选。

经过综合评价，选择了方案1-不卷入，主要优势为构造简单，施工方便，整体比例好，与原效果图差距不明显。

### 3.3. 主塔塔身整体比例控制

全塔基于黄金分割的比例为原则，进行设计。首先将正立面、侧立面的圆弧线，从下至上按黄金分割做好后，从低到高取7个控制断面放样(Loft)形成塔身，断面分别为塔底、主梁底、主梁顶、下塔中、腰部、塔冠底、塔冠顶，将主塔划分为6段。

从断面上看，主塔下段为椭圆，中间为圆，上段又开花变为椭圆，最细位置在整体塔高1.618H的黄金分割处，即H高度处；腰部最细处椭圆长短轴为3mx3m(正圆)，开花根部椭圆长短轴9mx6m，塔冠根部椭圆长短轴均为4.25mx4.25m，塔冠顶部椭圆6.5x7.1m(实际被螺旋线切割)。

塔的正立面(长轴方向)、侧立面(短轴方向)边线均采用腰部上段圆弧、腰部下段圆弧拟合，圆弧分别经过上述7个断面的控制点；两段圆弧在腰部(3mx3m)处相切，切线方向为竖直向下。

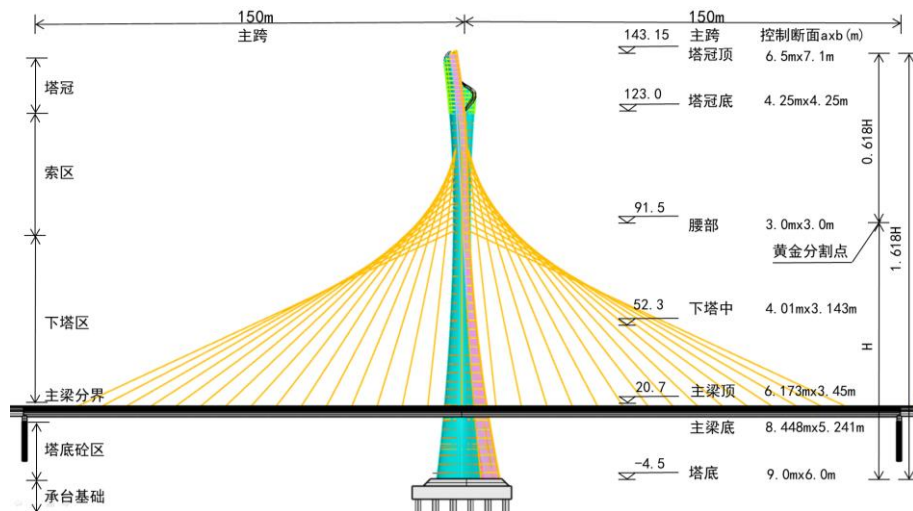


图5 桥塔总体立面布置图(单位: m)。



### 3.4. 卷边的外形与结构设计

卷边要跟着塔旋转上升, 并且随着塔身断面上下放大、腰部收缩, 较为复杂, 因此卷边建模采用Rhino犀牛软件+Grasshopper [1, 2] (下文简称GH)参数化生成, 主要流程如下:

- (1)找出卷边定位点上升、扭转形态的参数化表达式;
- (2)定位点与椭圆相切圆弧得到外壁板和内壁板;
- (3)作卷边内侧倒角。具体流程图如下

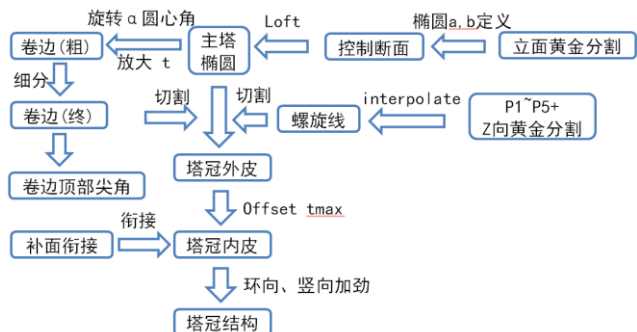


图6 卷边与塔冠建模流程图。

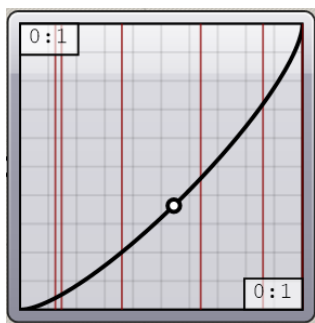


图7 Graph Mapper的 Conic曲线控制扭转。

(1)首先要定义卷边的扭转角 $\alpha$ 与其标高 $h$ 的函数关系 $\alpha=f(h)$ , 为表达出原景观模型先慢后快的感觉, 通过GH中Graph Mapper的Conic曲线[3], 将标高归一化输入(按百分比), 拉扯出不均匀性, 再输出, 得到控制截面的转角序列 $\alpha_1 \sim \alpha_n$ ; 然后卷边要顺从于主塔本身随着高度 $h$ 的放大、收缩的大比例关系, 此比例关系引入椭圆放大系数 $k=f(h)$ 实现,  $k$ 取值在1.54(塔底)~1.11(塔顶)之间, 要符合黄金分割原则, 得到各控制标高处的塔身断面向外的放大(scale)值序列 $k_1 \sim k_n$ ; 卷边外壁板线终点 $B_1$ 在断面椭圆放大了 $k$ 倍的椭圆上, 外壁板与主塔切点 $A_1$ 在主塔断面椭圆上, 两者坐标均根据椭圆参数化方程得到:

$$B_1(k \cdot a \cos(\alpha), k \cdot b \sin(\alpha)) \quad (1)$$

$$A_1(k \cdot a \cos(\alpha + \alpha_0), k \cdot b \sin(\alpha + \alpha_0)) \quad (2)$$

式中,  $A_1$ 的圆心角 $\alpha_0 = B_1$ 的圆心角, 其中扭转角 $\alpha$ 的初值 $\alpha_0 = 23.6^\circ$ 为定值, 此角度数值通过与效果图模型对比取得。得到坐标后, 按照SED的圆弧法则[3](S为起点 $B_1$ 、E为终点 $A_1$ 、D为终点与椭圆相切的向量方向), 得到外壁曲线。

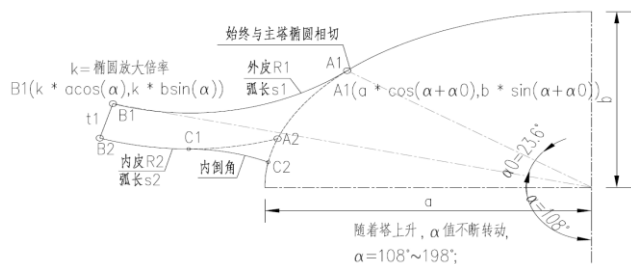


图8 卷边断面定位点示意, 其中 $\alpha$ 为扭转角,  $k$ 为椭圆放大倍率,  $a$ 、 $b$ 为椭圆长、短轴。

(2)外壁曲线统一Loft(放样)得到外壁曲面后, 定义卷边体的厚度 $t$ 与高度 $h$ 的函数关系 $t=f(h)$ , 也是顺从塔身比例中间小, 顶底大, 外壁曲线 $A_1B_1$ 按照各处的厚度偏移得到内壁曲线 $A_2B_2$ , 与塔壁相交得到交点 $A_2$ , 再放样得到内曲面;

(3)内倒角弧线的生成, 要满足塔底根部厚度足够, 要满足塔中上部分的卷边内壁板与塔壁不产生锐角的交角, 而内壁线一直在扭转, 与塔壁线交角一直在变化, 因此按卷边内弧取点+切向、主塔椭圆取点, 按SED圆弧线法则控制, 弧线起点 $C_1$ 按比例值在内壁板上取(比例值0.5~0.3),  $C_1$ 处切向取椭圆切线, 终点 $C_2$ 按比例值在塔外壁板 $A_1-A_2$ 弧段上取(比例值1.3~0.0), 根据SED法则(起点+起点切向+终点)生成弧线, 各线Loft(放样)形成内倒角弧面。

卷边最初的7个控制断面与椭圆一致, 分别为(见总体立面布置图): 1塔底-2主梁底面-3主梁顶面-4下塔中-5塔腰部-6塔冠底-7塔冠顶; 然后若仅据此生成卷边, 在断面之间的部分Loft(放样)精度不够, 因此在相邻截面之间进行细分4个截面, 再重生成卷边, 得到曲面精度足够贴合主塔使用。

卷边的顶部尖角向上顶起, 采用延伸卷边线1.1m的方式完成。

卷边的内部加劲结构: 具体如下

(1)卷边隔板: 椭圆主塔3m一道隔板处对齐设置卷边加劲隔板 $8 \times 150$ , 将大隔板之间细分4段做环向加劲板 $6 \times 80$ 。

(2)卷边竖向加劲板, 按加劲肋间距不超0.6m控制, 尺寸 $6 \times 80$ ; 内外壁之间设 $L40 \times 4$ 角钢, 做成折线桁架形状, 提高卷边刚度[7]。

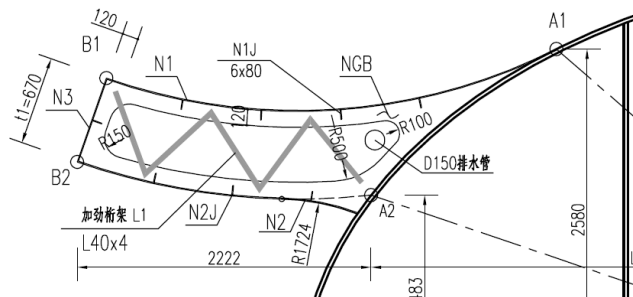


图9 位于主塔横隔板处的卷边结构断面。

### 3.5. 塔冠造型设计

塔冠主要表现塔顶景观造型, 形状类似花苞、书卷, 是具有一定厚度的圆筒, 并被螺旋线裁切。塔冠的形态, 首先有主塔向上延伸的椭圆筒, 再找出边缘的旋转一周约

360度的螺旋线，该线切割椭圆筒而得到此造型；侧面延续从下方升起的卷边直到最高点。

根据旋转造型，取转动角度 $\theta$ 为驱动参数，将螺旋线上升的速度比率与黄金分割相关联，得到基本原则为：按每旋转90度就取1个控制点，得到顶P0 ( $\theta=144^\circ$ ),

P1( $\theta=90^\circ$ ), P2( $\theta=0^\circ$ ), P3( $\theta=-90^\circ$ ), P4( $\theta=-135^\circ$ ), 底P5( $\theta=-171^\circ$ )，共5个控制点，相邻点的竖向距离，互相产生黄金分割的比例(见下图示),下方点P4,P5角度需人为调整，控制与卷边的关系，需留一点缝隙排水但又不可太大缝隙。

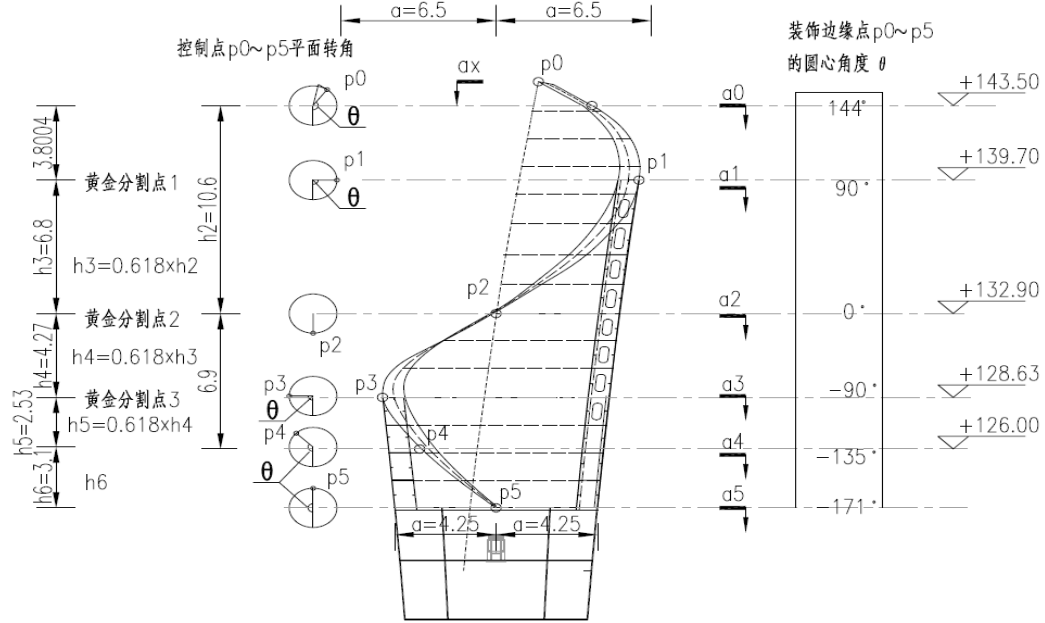


图10 塔冠黄金比例分析图。

用此5点插值拟合得到3阶样条线，用此线分割塔冠外皮，之后再卷边外侧与椭圆相切位置的连线分割，选取需要的外皮之后，向内偏移，厚度取卷边在塔顶的厚度；

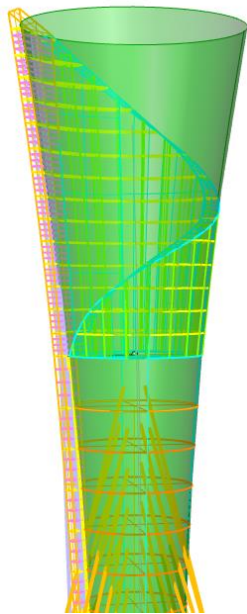


图11 初始圆柱体用螺旋线分割。

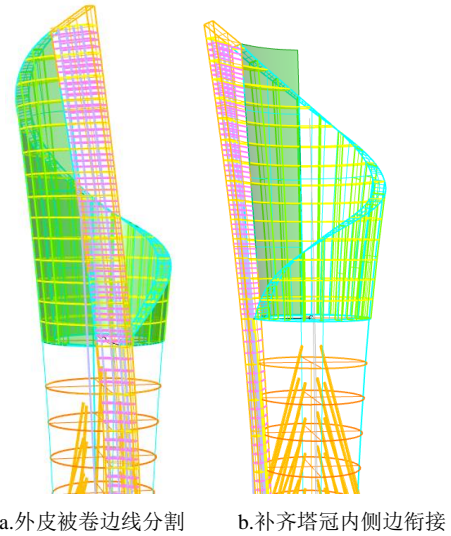


图12 塔冠外皮与卷边的衔接。

塔冠内皮通过外皮偏移(offset)得到，而卷边的厚度是根据整体缩放比例定的，在衔接的部分厚度对不上(详见图15的椭圆拟合弧段)，因此要重新对卷边与椭圆断面相交位置处(270度圆心角至卷边切点的弧段)的线进行贴合处理；补齐的部分，线型也是椭圆，其短轴与主塔大椭圆相同，根据关键点相切的原则推导，结合椭圆解析几何的公式，椭圆拟合弧段的椭圆长轴 $a$ 可根据公式计算得出：

$$a = bx_a \sqrt{\frac{1}{b^2 - y_a^2}} \quad (3)$$

式中， $(x_a, y_a)$  为卷边与内壁板接缝处的坐标。

4. 塔冠结构计算

考虑塔冠形态为不闭合的筒体，刚度较弱，又承受高空风荷载受力要求，首先考虑充分利用塔冠本身内外双层板具有的厚度来提供刚度，因此塔冠的结构参考潜艇的双层外壳结构，采用双层筒壳体形式，即内外双筒+中间竖向加劲隔板+横向加劲环隔板的形式，使结构有足够刚度。

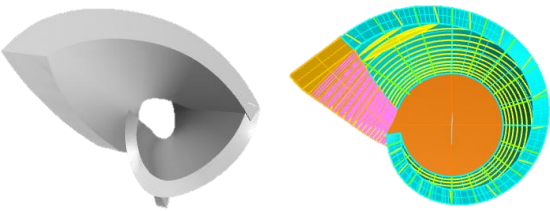


图13 塔冠顶部视角下，原模型与施工图模型效果对比。

塔冠的厚度，即内外双筒之间的距离，首先根据效果图的尺寸大致定0.8~1.1m，并考虑卷边升上来之后，厚度与卷边厚度衔接的尺寸确定的；太厚显得臃肿不够美观，太薄无法满足结构刚度要求，并综合考虑人的检修通行空间，最终定为0.88m；

塔冠的结构：竖向每1.5m做一圈环向加劲，环向每18度圆心角(约1.3~1.6m)做一道竖向加劲，一圈共计20道；环向、竖向加劲均开人孔，侧面保留0.24m度加劲高度。

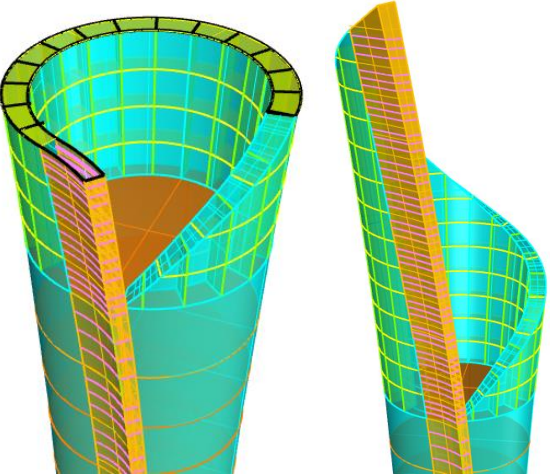


图14 塔冠三维结构图。

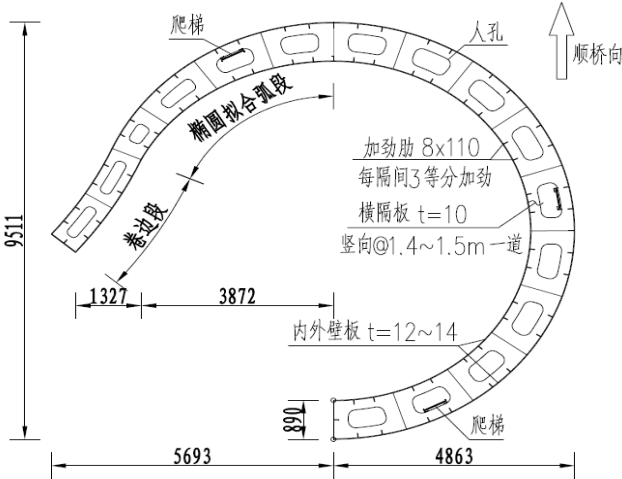


图15 塔冠的内部加劲结构

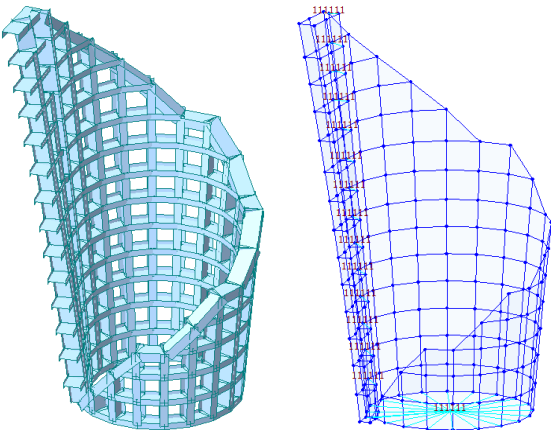


图16 塔冠Midas三维梁格模型和边界展示。

塔冠采用Midas计算，为简化计算量，整体计算近似采用工字型梁格模拟，采用梁单元，梁截面按照带翼缘的工字型建模，翼缘宽度按箱形截面取，有效翼缘宽度 $B=40 \cdot e_k \cdot t$  [4]，Q355钢板， $e_k=0.82$ ，板单元按实际板厚建模，仅用于施加风荷载。

风荷载：基本风压按 $0.5 \text{ kN/m}^2$ ，主塔塔冠高度144m，计算风压标准值为 $1.263 \text{ kN/m}^2$ ；

考虑到塔冠造型类似卷筒具有的兜风特性，对主桥塔带来的额外弯矩和水平风力的影响，按偏大的风振系数考虑 [6]。根据计算风振系数 $\beta_z = 1.970$ ，考虑此影响得到风压标准值为 $3.21 \text{ kN/m}^2$ ；

(1)位移结果：



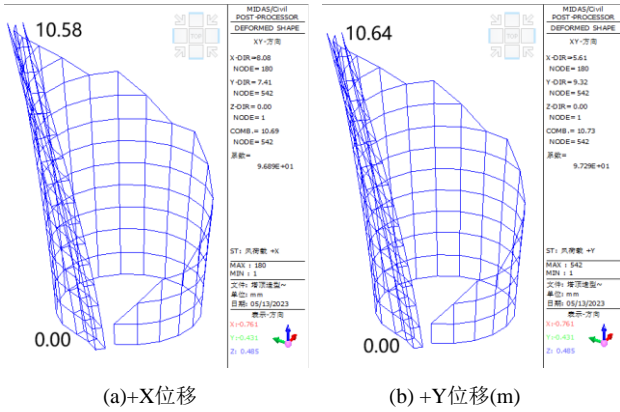


图17 塔冠在+X、+Y向风荷载下的XY平面位移(m) (考虑阵风)。

塔顶+X横桥向风荷载单项，塔冠顶部位移0.01058m， $0.0111/20.5=1/1847$ ；塔顶+Y横桥向风荷载单项，塔冠顶部位移0.01064m， $0.01064/20.5=1/1927$ ；根据钢结构设计标准[8]附录B 表B.1.1，在不考虑阵风系数时，柱顶控制在 $L/400$ ，悬臂构件计算长度 $2L$ ，因此控制挠度为 $L/200=20.5/200=0.1025\text{m}$ ；因此风荷载+X、+Y两者均满足规范要求。

(2)应力结果：

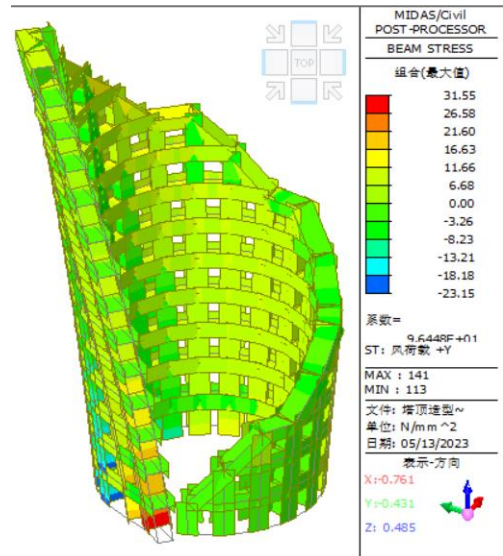
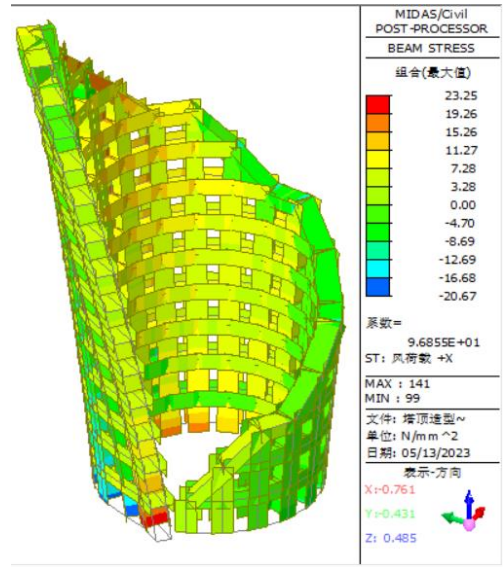
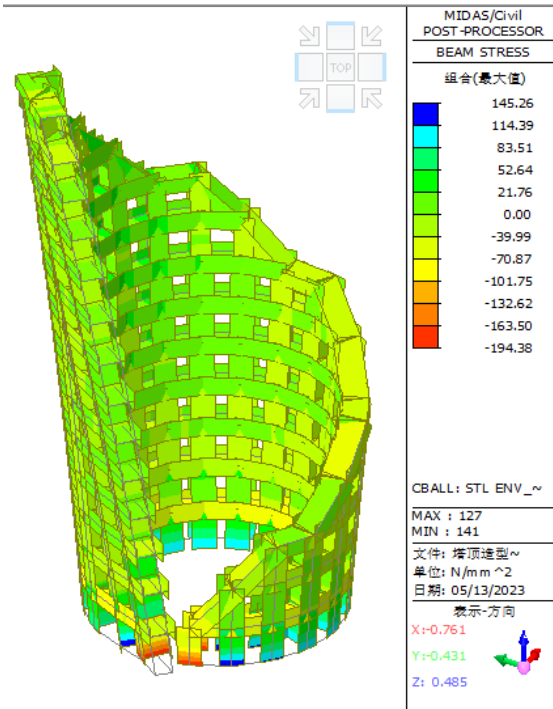
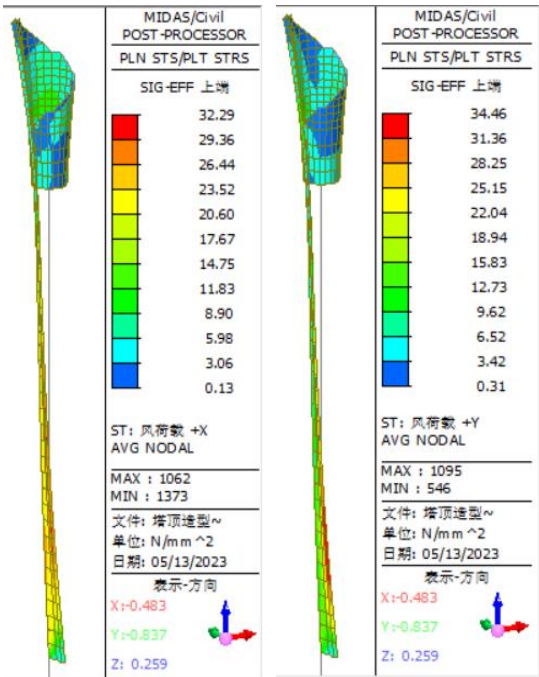


图19 风荷载下工字梁应力。

+X向风荷载单项，引起应力最大40Mpa，位于顶部封边梁；+Y向风荷载单项，引起应力最大48.8Mpa，位于封边梁与底部交界；可见应力均满足规范要求；

卷边并入整体模型计算：将塔冠与下侧卷边建入桥塔模型，塔冠下方的桥塔椭圆截面按梁单元模拟，卷边按板单元模拟，塔冠按工字型梁格的梁单元近似模拟，板单元侧面节点与塔身梁单元采用刚臂连接。整体计算模型中，板单元应力如下：



a. 卷边应力+X 最大44MPa b. 卷边应力+Y 最大33MPa

图20 风荷载下卷边应力分布。

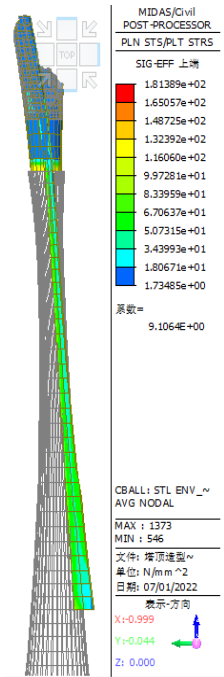


图21 基本组合 卷边板单元应力。

可见，卷边板应力都在85Mpa以内，且全塔高度均匀分布；而塔顶的塔冠受力主要靠内外双层筒+腹板组成的工字型截面钢梁，板应力较小。

(3)动力特性结果：执行特征值分析得到结果如下

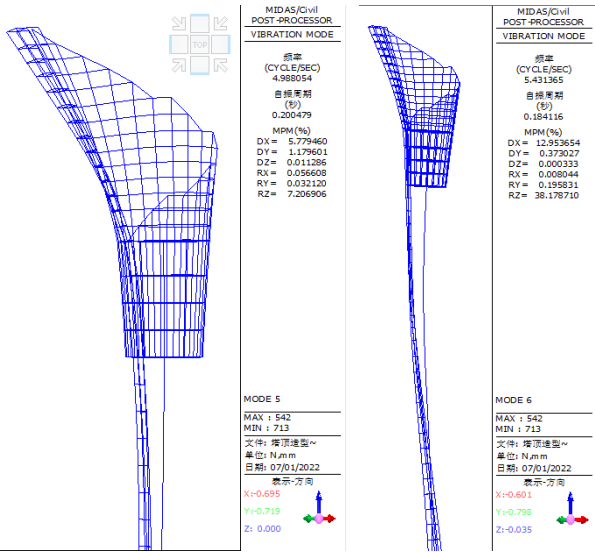


图22 1阶(左)、2阶(右)局部模式。

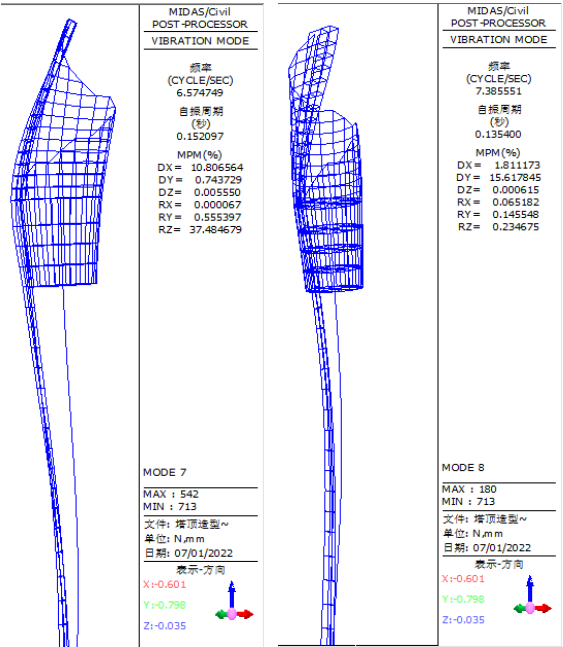


图23 3阶(左)、4阶(右)局部模式。

表1 卷边模式分析表。

局部模式	频率(Hz)	质量参与系数	振动形态
1阶	f <sub>1</sub> =4.98	7.2%(Rz)	塔顶卷边向外撇出
2阶	f <sub>2</sub> =5.43	38.18%(Rz)	塔顶+卷边扭转
3阶	f <sub>3</sub> =6.58	37.48%(Rz)	塔顶扭转+内撇
4阶	f <sub>4</sub> =7.39	15.62%(DY)	塔顶扭转+内撇

可见卷边+塔冠结构的前3阶振动形态以扭转为主，说明抗扭刚度较弱；局部模式频率均>3Hz，说明结构整体刚度较大，满足规范要求。

### 5. 卷边对塔底受力的影响

为了追求景观上卷边的完整性，卷边从塔顶一直延伸到了塔底，而由于塔底在水位以下，在主梁以下的部分，卷边采用钢筋混凝土，和下塔柱主体一起浇筑。由于卷边的存在，对塔底的截面特性，和塔底部砦结构的受力特征有影响。



### 5.1. 带卷边前后截面特性对比

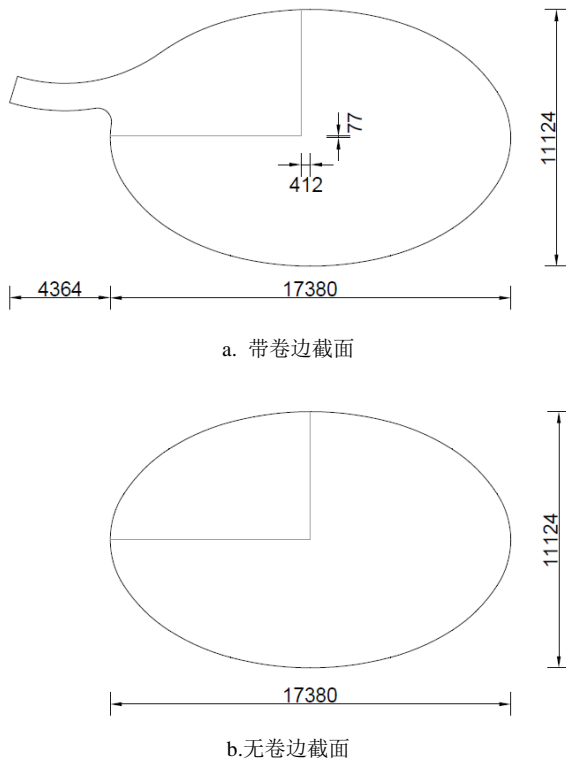


图24 带卷边与无卷边-塔底截面与中性轴位置。

表2 带卷边前后截面特性对比表。

截面特性	不带卷边	带卷边	放大倍率(%)
$A(\text{mm}^2)$	1.5182E+08	1.5817E+08	4.18%
$I_{xx}(\text{mm}^4)$	1.1762E+15	1.2002E+15	2.03%
$I_{yy}(\text{mm}^4)$	2.8603E+15	3.5162E+15	22.93%

截面重心偏位： $dx=412\text{mm}$ ， $ey=77\text{mm}$ ， $x$ 向偏心距  
 $e=dx/hx=412/17380=0.0237=1/42$

可见，卷边使截面面积增大了4.18%，横向(卷边伸出方向)抗弯惯性矩 $I_{yy}$ 增大22.93%较显著， $I_{xx}$ 增大2.03%不太明显；截面的中性轴 $x$ 向偏移了412mm，相当于塔底尺寸的1/42，小于附加偏心距1/20的量级，因此卷边对主塔受力的影响很小，可以忽略。

但卷边自身与主塔一起浇筑，会受到主塔传下来轴力、弯矩的影响，主要考虑以下2种工况，对卷边应力的影响：

(1)主塔整体升降温度，考虑常水位以下主塔及承台泡在水中，升降温幅度减小；

(2)主塔自重、恒载；

以下就这块内容详细分析：

### 5.2. 整体升降温工况下，卷边对塔底截面应力的影响

采用ANSYS对下塔柱进行有限元分析，按SOLID95三维实体单元建模，离散单元均为四面体，将卷边与椭圆塔身、承台及桩基建出，桩底边界条件为固结，如下图：

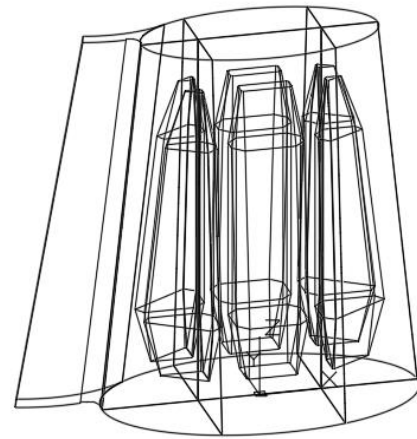


图25 下塔段几何模型。

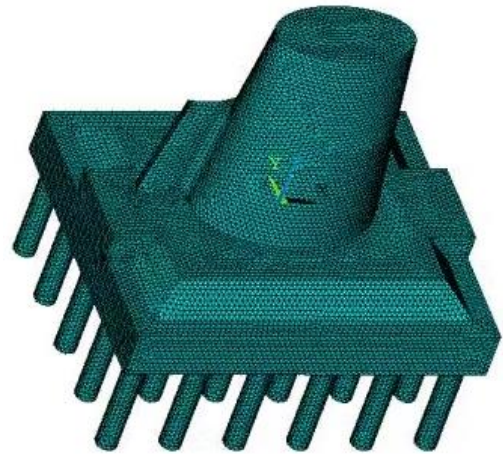
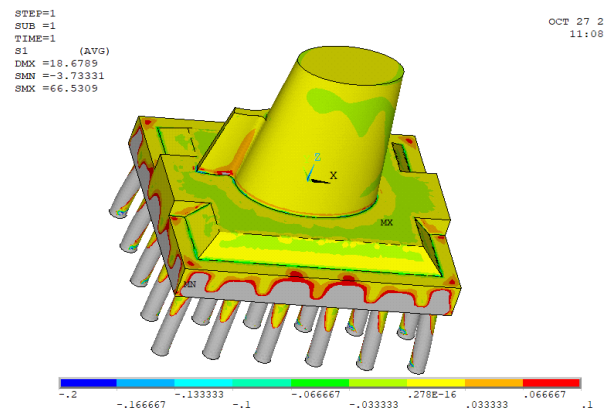


图26 实体单元计算模型三维网格划分。

荷载工况包括：

(1)考虑承台在水中，常水位以下塔柱和承台升温18度、降温20度，常水位以上塔柱整体升温36度，降温41度，

降温41度、升温36度的主拉应力结果分别如下：



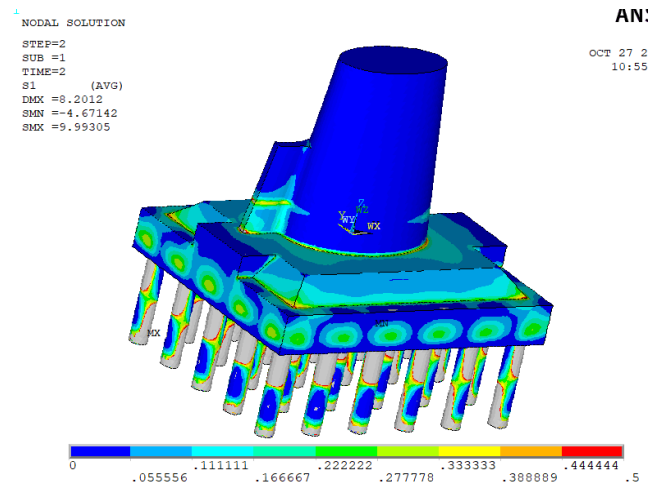


图28 升温36度-下塔段主拉应力。

可见，升温、降温工况对塔柱下部的装饰和塔壁交接内弧处的交接应力比较大，衔接钢筋需要加强；塔柱上方传递下来的力对塔柱上方的交接内弧处应力较大，需要加强衔接钢筋。

控制截面验算卷边应力：

取主塔根部以上10m高度处为验算截面，从主桥模型结果中，提取距塔底10m高度处的节点力，按照荷载作用位置在(1)椭圆中心；(2)截面形心，分别计算2个工况：

工况一：基本组合弯矩最小，最小表示弯矩为负，向卷边另侧弯；

工况二：基本组合弯矩最大，最大表示弯矩为正，向卷边同侧弯。各工况的弯矩、轴力方向如下图所示：

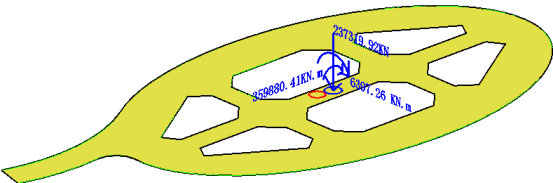


图29 工况一，荷载作用在“椭圆中心”。

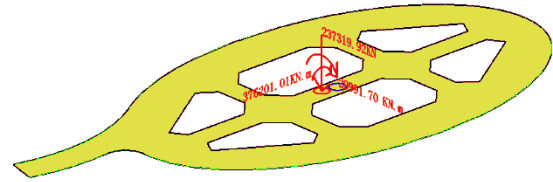


图30 工况一，荷载作用在“截面形心”。

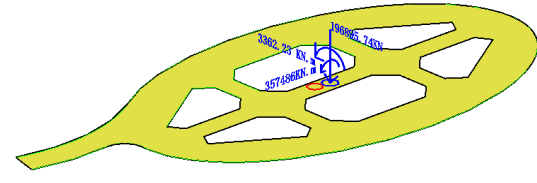


图31 工况二，荷载作用在“椭圆中心”。

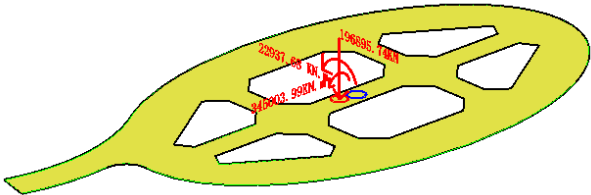


图32 工况二，荷载作用在“截面形心”。

表3 基本组合荷载工况的轴力、弯矩、剪力表。

荷载作用位置	工况	轴力 Fx(KN)	横桥弯矩 My(KN.m)	顺桥弯矩Mz KN.m
椭圆中心	工况一	-237319	6397.3	-359880
	工况二	-196895	-3362.2	357486
截面形心	工况一	-237319	29991.7	-376201
	工况二	-196895	22937.7	345004

表4 应力计算结果(负数为压应力)。

		工况一(卷边受拉)	工况二(卷边受压)
轴力	N	-237319920	-196895740
截面面积	mm	77914441.5	77914441.5
轴力产生的应力(压)	MPa	-3.046	-2.527
横桥向弯矩	N.mm	29991701374	-22937683229
惯性矩I	mm <sup>4</sup>	4.8915E+14	4.8915E+14
中性轴距卷边距离	mm	1218.73	1218.73
横桥向弯矩产生的应力(小拉，大压)	MPa	0.075	-0.057
顺桥向弯矩	N.mm	3.76201E+11	-3.45004E+11
惯性矩I	mm <sup>4</sup>	1.62244E+15	1.62244E+15
中性轴距(卷边的距离)	mm	10731.26	10731.26
顺桥向弯矩产生的应力(小拉，大压)	MPa	2.488	-2.282
截面应力(压为负，拉为正)	MPa	-0.483	-4.866

可见最大拉应力仅为0.075Mpa，最大压应力为4.866Mpa。

控制截面应力电算结果如下：

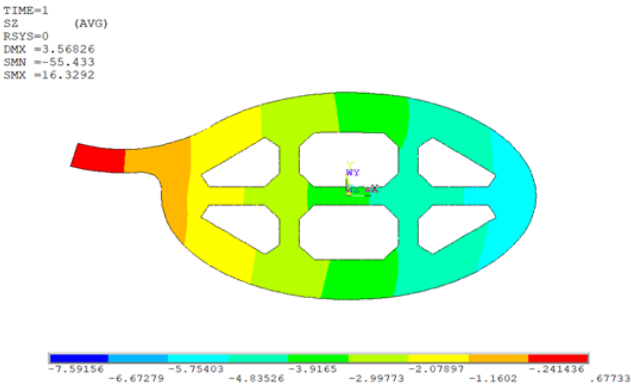


图33 工况一，截面轴向应力。

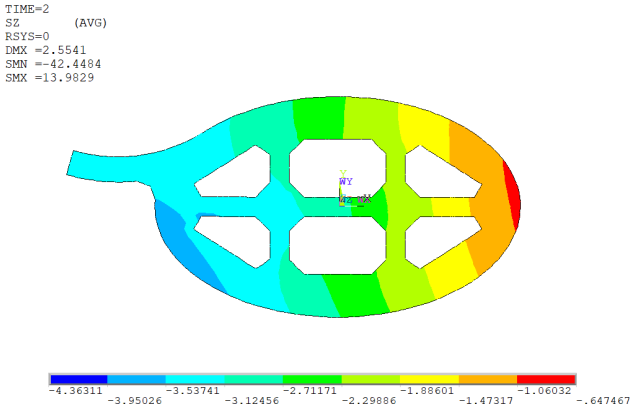


图34 工况二，截面轴向应力。

可得出如下结论：

- (1) 计算表明，基本组合下，弯矩向卷边另侧最大的工况下，卷边最外侧有微小的拉应力0.678MPa；基本组合，弯矩向卷边同侧最大工况下，卷边为全截面受压。因此在承载能力极限状态最不利情况下，主塔对卷边局部仅导致微小拉应力，正常使用状况下仍以受压为主。
- (2) 对下塔柱混凝土卷边在整体升、降温工况下的三维有限元分析表明，升降温时，卷边内侧倒角位置产生比别处更大的应力，构造需加强钢筋处理。

## 6. 结语

本文结合犀牛Rhino + Grasshopper参数化找形，完成了某独塔斜拉桥卷轴型桥塔复杂形状的精确建模，高度还原了桥塔的景观效果，也了兼顾桥塔结构对尺寸的要求，主要结论如下

- (1) 基于黄金分割比例原则，通过基于Rhino软件的参数化建模的方式，对桥塔整体形态比例，和塔冠螺旋线的形态比例进行控制，达到全塔形态的统一；
- (2) 卷边厚度、卷边向外甩出的尺寸都从属于桥塔的顶底大、腰细的整体规律，采用一致变化的放大比例k，达到整体效果的统一；
- (3) 对较为独特的塔冠造型，具有针对性的采用了腹板连接的内外双层筒形式，计算结果表明，在风荷载下的各项结构指标均满足规范要求。

- (4) 通过实体有限元计算+手算，研究了下塔柱在增加了混凝土卷边后，卷边与主塔相互影响的程度，研究表明主塔对卷边局部受力的影响很小，承载能力极限状态下仅有0.075Mpa拉应力；在整体升降温工况下，局部应力较大的位置在卷边内侧倒角处，可以此作为施工图配筋的依据。

本桥索塔的造型较为独特，在以往桥梁设计中并不多见；本桥索塔景观造型采用了参数化设计方法，将为今后类似桥梁的设计提供经验。

## 参考文献

- [1] Rhinoceros&Grasshopper参数化建模 [M]. 湖北: 华中科技大学出版社, 2011. ISBN: 978-7-5609-7241-1.
- [2] 《Grasshopper入门&晋级必备手册》[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013. ISBN: 978-7-302-33438-5.
- [3] 程罡,《Grasshopper参数化建模技术》[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017. ISBN: 978-7-302-46842-4.
- [4] 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D64-2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2015 ISBN: 978-7-114-12507-2.
- [5] 赵佳男. 太原摄乐大桥主桥设计 [J]. 桥梁建设, 2021, 51(03): 116-122. ISSN: 1003-4722
- [6] 周旋. 某超高层结构塔冠结构设计概况 [J]. 四川建材, 2020, 46(07): 64-66.  
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-4011.2020.07.032>
- [7] 杨永伟, 李凯, 邓露, 等.独塔斜拉桥钢-混结合段的试验与数值研究 [J]. 中外公路, 2022, 42(06): 62-71.  
<https://doi.org/10.14048/j.issn.1671-2579.2022.06.011>
- [8] 钢结构设计标准: GB50017-2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [9] 王茜, 王春生, 俞欣等.钢桥塔的构造设计研究 [J]. 公路, 2008, 5: 46-50. ISSN: 0451-0712.

## 作者简介

施政, 男, 1991 年出生, 硕士研究生, 工程师。