



# 水力式升船机单井塔柱内对拉钢索优化布置\*

胡定宽<sup>1</sup>, 何良德<sup>1</sup>, 王新宇<sup>2</sup>, 李中华<sup>3</sup>, 林超<sup>1</sup>

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098; 2. 青岛市即墨区交通运输局, 山东青岛 266200;  
3. 南京水利科学研究院, 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏南京 210029)

**摘要:** 单井型塔柱结构极大改善了水力式升船机竖井水位同步性问题, 但随着提升高度增大, 坚井内水深越大, 侧壁位移、弯矩过大等问题更加突出。以150米级单井塔柱为例, 提出了坚井内布置对拉钢索的设想和简化布置方案。基于钢索拉力权重分配系数的优化方法, 取得了钢索等应力的密度分布最优解, 并离散转化为等效的等荷载布置方案, 可在实际工程中应用。经有限元模型结果对比分析, 等荷载布置与简化方案相比, 最大位移可减小47.44%, 纵横向弯矩极值差别不大。与无钢索方案比较, 最大位移、纵向弯矩、竖向弯矩可分别减小93.5%、74.36%、75.84%。高强钢索预应力方案值得进一步研究。

**关键词:** 水力式升船机; 塔柱; 对拉钢索; 优化方法; 等荷载布置

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0118-08

## Optimal layout of cable in single-well tower structure of hydro-floating ship lift

HU Ding-kuan<sup>1</sup>, HE Liang-de<sup>1</sup>, WANG Xin-yu<sup>2</sup>, LI Zhong-hua<sup>3</sup>, LIN Chao<sup>1</sup>

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. Qingdao Jimo District Transportation Bureau, Qingdao 266200, China; 3. Key Laboratory of

Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The single-well tower structure greatly improves the synchronicity of water level vertical shaft of the hydro-floating ship lift, but with the increase of the lifting height, the greater the water depth in the vertical shaft is, and the more prominent the problems of lateral wall displacement and the excessive bending moment become. Taking the 150-meter-class single well tower column as an example, this paper puts forward the assumption of opposite-tensile cable arrangement in the shaft and simplified cable arrangement scheme. Based on the optimization method of the weight allocation coefficient of cable tension, the optimal solution of the density distribution of cable equal stress is obtained, and the solution is discretized into the equivalent equal load arrangement scheme, which can be applied in practical engineering. The results of the finite element model show that the maximum displacement can be reduced by 47.44% in the equal-load layout compared with the simplified scheme, and there is little difference between the extreme values of the longitudinal and longitudinal bending moments. Compared with the cable-free scheme, the maximum displacement, longitudinal moment and vertical moment can be reduced by 93.5%, 74.36%, and 75.84%, respectively. The prestressing scheme of high strength steel cable deserves further study.

**Keywords:** hydro-floating ship lift; tower structure; opposite-tensile cable; optimization method; equal load arrangement scheme

收稿日期: 2020-06-18

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402007); 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室开放基金资助项目(YT918001)

作者简介: 胡定宽(1995—), 男, 硕士研究生, 从事港口与航道工程结构研究。

升船机是一种重要的通航建筑物, 与船闸相比, 其运转速度快、耗水量小、提升高度大, 尤其适用于高坝通航<sup>[1]</sup>。我国乌江构皮滩三级升船机<sup>[2]</sup>总提升高度 253 m, 其中第二级提升高度 127 m, 是目前世界上总提升高度、单级提升高度最大的升船机。常见升船机采用钢丝绳卷扬(岩滩升船机<sup>[3]</sup>、隔河岩升船机<sup>[4]</sup>)、齿轮爬升(三峡升船机<sup>[5-6]</sup>、向家坝升船机<sup>[7]</sup>)等方式驱动。景洪水电站首次采用了水力(浮动)式升船机<sup>[8]</sup>, 最大提升高度 66.86 m, 可通航 500 吨级船舶。这种新型升船机将传统平衡重改由浮筒代替, 利用水能作为提升动力, 通过输水系统对竖井充泄水, 驱动浮筒的升降从而带动承船厢升降运行<sup>[9]</sup>。与传统驱动升船机相比, 水力式升船机具有独特的优越性: 机械设备简单, 施工方便; 在承船厢漏水时, 仍可保证平衡, 避免安全事故。

景洪水力式升船机两侧的浮筒各自配置在相互独立的竖井内, 采用多井型塔柱结构, 由于受输水系统水力特性的影响, 各竖井不可避免存在一定水位差。随着提升高度的增加, 竖井水位差也逐渐累积, 从而影响各浮筒平衡重的受力均匀性和运动的同步性。针对这一问题, 薛淑<sup>[10]</sup>进行了 150 米级超高升程水力式升船机竖向水位同步技术的研究, 提出了一种将两侧浮筒分别配置在同一个竖井的输水系统, 采用单井型塔柱结构, 竖井为单一矩形大型筒体, 能够及时自平衡井内水位, 有效减小各浮筒的水位差。

本文针对 150 米级单井型塔柱侧壁位移、弯矩过大的问题<sup>[11]</sup>, 提出塔柱内对拉钢索的简化布置方案, 研究对拉钢索的优化布置方法, 建立有限元模型, 验证优化方法的收敛性, 对比优化方案减小侧壁位移、弯矩的效果, 可为未来的水力式升船机建设提供一定的指导。

## 1 对拉钢索简化布置方案

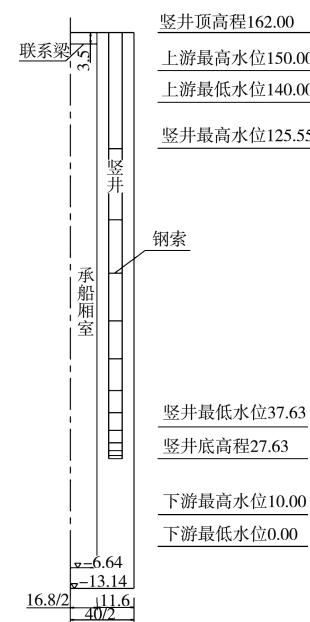
### 1.1 新型对拉式竖井结构

升船机最大提升高度 150 m, 过船吨位 500 t。

升船机塔楼由两侧塔柱、顶部机房、下部底板组成, 总高 175.14 m, 总长 69.6 m, 承船厢室净宽 16.8 m。两侧塔柱内各设一个矩形竖井, 分别对称布置 8 组浮筒, 每组浮筒平面尺寸为 7.8 m × 3.9 m(长×宽), 纵向间距 8.2 m, 竖井宽 4.2 m、长 66.0 m。竖井内最高水位 125.55 m、最低水位 37.63 m, 竖井底高程 27.63 m, 总高 134.37 m。

塔楼两侧卷筒以及平衡重、承船厢吊点布置要求竖井内侧壁厚 3.7 m, 外壁与内壁等厚时, 塔柱宽度 11.6 m, 塔楼总宽 40.0 m。为了改善塔楼的受力条件, 在两侧塔柱顶设 9 根联系梁, 对应布置在相邻组浮筒之间或塔楼上、下游侧。

矩形竖井在内水压力作用下, 纵向侧壁呈现出三边分别固结在井底以及横向侧壁、顶边自由的薄板受力特性。竖井在最大水深 97.92 m 作用下, 侧壁最大位移 219 mm, 最大纵向弯矩 187.1 MN·m、竖向弯矩 183.8 MN·m, 无法满足塔柱的变形要求和钢筋混凝土结构的强度要求。可充分利用竖井内 8 组浮筒之间的 0.4 m 净宽, 布置高强钢丝拉索<sup>[12]</sup>, 分别锚固在两侧壁内, 形成透空的对拉式结构, 使得侧壁转变为多锚拉式板的受力特征, 可有效减小侧壁位移和内力。单井内对拉式塔柱结构见图 1。



a) 横视图

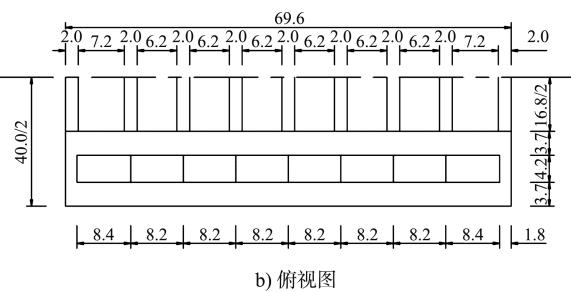


图 1 单井内对拉式塔柱结构 (单位: m)

对拉钢索应力  $\sigma$  应满足设计抗拉强度要求:

$$\sigma \leq [\sigma] = \frac{\sigma_b}{K} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_b$  为高强钢丝极限抗拉强度, 本文选取 1.77 GPa 强度等级;  $K$  为安全系数, 取 2;  $[\sigma]$  为钢索允许应力,  $[\sigma] = 885 \text{ MPa}$ 。

对拉钢索达到允许应力时, 锚固点处侧壁位移  $\delta$  等于钢索拉伸量的一半:

$$\delta = \frac{L\sigma}{2KE} \quad (2)$$

式中:  $L$  为对拉钢索长度,  $L = 11.6 \text{ m}$ ;  $E$  为钢索弹性模量,  $E = 206 \text{ GPa}$ 。钢索达到允许应力  $[\sigma]$  时, 侧壁位移  $\delta = 25 \text{ mm}$ 。

对拉钢索在纵向分为 7 列, 间距 8.2 m。钢索外套管直径小于 200 mm, 与浮筒间空隙不小于 100 mm, 坚向透空率大于 75%。

## 1.2 简化布置方案

对拉钢索简化布置时, 7 列钢索布置完全相同, 中列( $i=1$ )钢索分担的总水压力  $F_1$  最大:

$$F_1 = \frac{1}{2}\rho g H^2 b \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为水的密度, 1 t/m<sup>3</sup>;  $H$  为竖井水深, 97.92 m;  $b$  为中列钢索荷载分担宽度, 取 1 倍钢索列间距,  $b = 8.2 \text{ m}$ 。计算得  $F_1 = 393 \text{ MN}$ 。

忽略侧壁的井底嵌固作用、最高水位以上侧壁的弹性支承作用, 各列钢索拉力的坚向分布规律将与水压力的三角形分布规律相似。将水压力分布图形( $n_1 = 50$  等分, 每根钢索拉力  $F_{1,j} = 7.86 \text{ GN}$ ( $j$  为钢索坚向编号)), 横截面积  $S_{1,j}$  为:

$$S_{1,j} = \frac{F_{1,j}}{[\sigma]} \quad (4)$$

计算得  $S_{1,j} = 88.84 \text{ cm}^2$ , 按规范选择钢拉索规格型号 PES(C)7-241, 钢丝直径 7 mm, 241 根, 公称截面积  $92.75 \text{ cm}^2$ , 双层护套, 拉索外径  $d = 139 \text{ mm}$ 。

按 50 等分形心确定钢索高程, 第 1 层钢索中心与井底高差 0.49 m, 第 2 层与第 1 层高差 0.99 m, 最小透空率 81.2%。计算可知, 在坚向上每列钢索布置 50 根是合理可行的, 每列钢索总面积  $4637.5 \text{ cm}^2$ 。

## 1.3 简化方案钢索应力分析

单井塔柱纵横向对称, 使用 Abaqus 建立 1/4 结构有限元模型, 沿塔柱坚向为  $z$  轴, 沿塔柱纵向(侧壁宽)为  $x$  轴, 沿塔柱横向(侧壁厚)为  $y$  轴。模型坚向高 134.37 m、纵向宽 34.8 m、横向厚 3.7 m。在模型中, 只需布置 4 列钢索, 中列向边列编号依次为第 1~4 列, 中列钢索横截面积只取设计面积的一半。在 Abaqus 中, 没有专门的索单元, 本文选用桁架单元, 在井内水压作用下, 桁架单元始终受拉, 同时不能承担弯矩, 因此桁架单元可模拟钢索的主要受力特性; 坚井侧壁选择壳单元模拟, 材料参数见表 1。钢索与侧壁连接端使用绑定约束(tie), 另一端为  $x-z$  对称约束。侧壁底边为全约束, 中列钢索处侧边为  $y-z$  对称约束, 另一侧边为全约束, 近似认为完全固结于坚井的短侧壁上。

表 1 模型材料参数

材料	本构模型	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/ GPa	泊松比 $\nu$	单元类型
坚井侧壁	线弹性	2 500	28	0.167	壳单元
钢索	线弹性	7 800	206	0.300	桁架单元

对侧壁内面底向上 97.92 m 范围内施加静水压力, 由应力云图(图 2)可见, 侧壁不同位置钢索承担拉力相差较大。坚向来看, 越靠近井底处钢索应力越小。这是因为简化布置时忽略了井底的约束作用、放大了底部侧壁位移和钢索分担的荷载、底部钢索间距过密所致。实际上, 坚井侧壁上端自由, 下端固定于井底, 靠近底部的侧壁水压力可直接向井底传递, 这使得靠近井底的钢索承担拉力大幅减小。水平向来看, 由于各列钢索等刚度布置, 中列处侧壁位移最大、钢索应

力也最大, 越往边列钢索应力越小。可以看出, 钢索应力在竖向、水平向均存在较大差异, 需要进行双向优化处理。

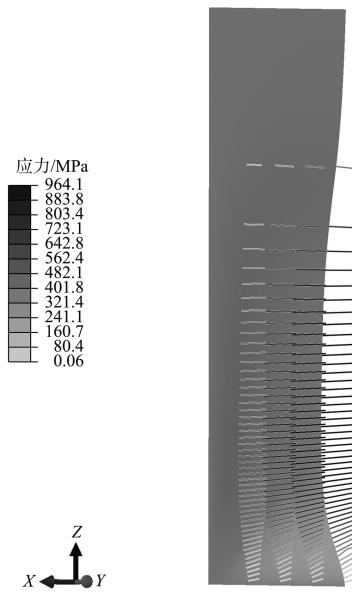


图2 简化布置方案应力云图

## 2 对拉钢索的优化布置方法

### 2.1 钢索等应力优化思路

在钢索总截面积  $S$  一定的条件下, 钢索应力近似相等时, 由式(2)可知在钢索锚固点处侧壁位移也近似相同, 可充分发挥每根钢索的对拉约束作用, 使得侧壁的位移、变形、内力小。

透空式对拉钢索布置需要确定每列钢索根数  $n_i$ 、每根高程  $z_{i,j}$  及其截面面积  $S_{i,j}$ , 其中  $i$  为钢索列编号,  $j$  为竖向钢索编号。

优化过程分为两大步骤: 1) 将各列钢索布置的竖线  $n$  等分, 在等分段中心设置钢索, 形成等间距  $a$  的布置方案, 通过基于钢索拉力权重分配的优化方法获得钢索等应力时截面积  $S_{i,j}$ , 分别计算单位高度钢索截面积  $m_{i,j} = S_{i,j}/a$  (单位:  $\text{cm}^2/\text{m}$ ), 可知第  $i$  列钢索竖向分布密度  $m_i$  的分布规律; 当取间距  $a$  较小的密索布置时, 将逼近钢索连续布置方案的结果。2) 将各列连续分布钢索离散化, 最终可得不等间距满足钢索强度、直径、透空率要求的布置方案。

### 2.2 钢索拉力权重分配法

$m_{i,j}$  求解是一个最优化问题, 变量为不同位置

钢索的截面积  $S_{i,j}$ , 约束条件为钢索总面积  $S$  为常数, 优化目标是钢索应力分别尽量均匀、应力偏离系数  $\xi$  最小。

$$\xi = \frac{1}{S^{\wedge}} \sqrt{\sum_i \sum_j [S_{i,j}(\sigma_{i,j} - \sigma_w)]^2} / \sigma_w \quad (5)$$

式中:  $\sigma_{i,j}$  为钢索应力;  $\sigma_w$  为钢索加权平均应力,  $\sigma_w = \frac{F}{S}$ ,  $S$  为钢索总面积,  $F$  为钢索总拉力。

如钢索截面积与其拉力成正比时, 可得:

$$S_{i,j} = \frac{F_{i,j}}{F} S = \frac{F_{i,j}}{\sigma_w} \quad (\sigma_{i,j} = \sigma_w) \quad (6)$$

因此, 在优化迭代过程中, 若根据钢索拉力大小分配其横截面积, 可使钢索趋近于等应力状态。具体步骤如下:

- 1) 假设钢索初始为等面积布置, 确定初始解  $S_{i,j}^0$ , 建立有限元模型, 求得每根钢索应力  $\sigma_{i,j}^0$ 、钢索拉力  $F_{i,j}^0$ 、钢索总拉力  $F^0$ , 应力偏离系数  $\xi^0$ 。
- 2) 计算每根钢索拉力权重  $\chi_{i,j}^1$ , 重新分配其横截面积  $S_{i,j}^1$ 。

$$\begin{cases} \chi_{i,j}^1 = \frac{F_{i,j}^0}{F^0} \\ S_{i,j}^1 = \chi_{i,j}^1 S \end{cases} \quad (7)$$

建立有限元模型, 求得第一次迭代的  $\sigma_{i,j}^1$ 、 $F_{i,j}^1$ 、 $F^1$ 、 $\xi^1$ 。

- 3) 重复上述步骤, 进行循环迭代。

$$\begin{cases} \chi_{i,j}^k = \frac{F_{i,j}^{k-1}}{F^{k-1}} \\ S_{i,j}^k = \chi_{i,j}^k S \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $k$  为迭代次数;  $\chi_{i,j}^k$ 、 $S_{i,j}^k$  为第  $k$  次迭代时, 第  $i$  列第  $j$  根钢索拉力权重、截面积;  $F_{i,j}^{k-1}$ 、 $F^{k-1}$  为第  $k-1$  次迭代时, 每根钢索拉力、总拉力。

- 4) 迭代收敛准则为:

$$\eta = |\xi^k - \xi^{k-1}| \leq \varepsilon \quad (9)$$

式中:  $\eta$  为前后两次迭代的应力偏离系数差;  $\varepsilon$  为设定为一个极小值, 可取  $\varepsilon = 5 \times 10^{-4}$ 。满足收敛准则时, 迭代解为最优解。

### 2.3 钢索等荷载布置方法

为了减少钢索型号, 方便在实际工程中应用,

需将拉力权重分配法得到的等间距不同横截面积的等应力钢索方案离散转化为不等间距相同横截面积的等荷载布置方案。然而竖井纵向布设有浮筒，钢索只能布置于浮筒间隙，纵向位置不可改变，因此只能在竖向分列离散。

分列离散时，应尽量减小钢索型号。首先，找出最大钢索总面积  $S_i$  所在列，确定合适的钢索根数  $n_i$ 、直径  $d_i$ ，确定钢索型号；按钢索总面积  $S_j$  递减的顺序，用首选钢索型号估算其他列的钢索根数  $n_j$ ，如  $n_j < 10$ ，则减小钢索直径，选择新的钢索型号，直至  $n_j$  确定完毕。

最后，分别把各列钢索密度  $m_i$  分布图  $n_i$  等分，取各等分块的形心位置为钢索高程。离散后的钢索应力基本相等，相同型号的钢索面积相同、钢索拉力也基本相等，因此称之为等荷载布置。一般情况下，中部各列钢索直径较大，钢索密间距小，靠近侧边钢索直径较小，钢索稀疏间距较大。

### 3 优化过程与结果分析

#### 3.1 优化过程

不同列钢索纵向间距 8.2 m，位于  $x=0$ 、8.2、

16.4、24.6 m，分别编号 1、2、3、4 列。同列钢索竖向间距 2 m，每列 67 根，从竖井侧壁底边向上依次编号  $j=1, 2, 3, \dots, 67$ ，共 4 列，总钢索数  $N=268$  根。单根钢索截面积  $S_{i,j}^0=69.2 \text{ cm}^2$ ，第 1 列钢索截面积取正常钢索一半，总横截面积  $S=1.623 \text{ 1 m}^2$ 。

每次迭代时 Abaqus 建模方法同 1.3 节，当靠近侧壁顶的部分钢索出现压应力时，将其权重设为 0，不参与横截面积的分配。在有限元模型中，可设定这部分钢索截面积远小于正常截面积，使其不影响优化计算结果。

迭代过程中，钢索加权平均应力  $\sigma_w$ 、应力偏离系数  $\xi$  以及钢索应力  $\sigma_{i,j}$ 、钢索密度  $m_{i,j}$ 、侧壁的侧向位移  $u_y$ 、纵向弯矩  $M_x$ 、竖向弯矩  $M_z$  等极值变化见表 2。当  $k=8$  时（ $k$  为迭代次数）， $\eta=0.042\%$ ，满足收敛准则获得最优解。迭代时，位移、竖向弯矩、纵向弯矩均大幅减小。侧壁位移极值在纵向逐渐外移，最终稳定于  $x=13 \text{ m}$  附近；竖向不断下移，稳定于  $z=20 \text{ m}$  上下。纵向弯矩  $M_x$  极值始终在侧壁底边上，纵向逐渐外移；竖向弯矩  $M_z$  极值始终出现在侧边上，在竖向不断下移。

表 2 迭代过程特征参数的变化

迭代次数	$\sigma_w/\text{MPa}$	$\xi/\%$	$\sigma_{i,j}/\text{MPa}$	$m_{i,j}/(\text{cm}^2 \cdot \text{m}^{-1})$	$u_y/\text{mm}$	$M_x/(\text{MN} \cdot \text{m})$	$M_z/(\text{MN} \cdot \text{m})$	$\eta/\%$
0	482.09	6.09	1622.19	33.85	45.78	73.88	60.87	-
1	504.14	1.78	677.53	113.90	19.36	51.55	45.77	4.307
2	492.69	0.96	569.88	145.55	16.53	49.01	44.70	0.826
3	485.95	0.65	537.62	158.21	15.62	48.35	44.54	0.304
4	481.85	0.49	523.32	166.85	15.14	48.09	44.49	0.159
5	479.21	0.39	513.25	174.97	14.83	47.97	44.45	0.101
6	477.38	0.32	505.63	181.71	14.61	47.92	44.39	0.071
7	476.19	0.27	499.66	186.66	14.45	47.89	44.33	0.055
8	475.30	0.22	495.00	190.29	14.33	47.89	44.28	0.042

以中列(第 1 列)钢索应力变化过程(图 3)为例，第 1 次迭代后钢索应力均匀性即刻得到大幅度改善，第 3 次迭代后应力变化已经很小；随着迭代次数的增加，侧壁中部钢索应力趋于均匀分布，最大值稳定于 493 MPa。

迭代过程中，中列钢索密度沿竖向变化见图 4。初始解时，钢索沿侧壁均匀分布；第 1 次迭代后，密度分布不均匀，即刻出现明显的峰值；在迭代过程中，峰值不断增大，位置有所下移。中列密度峰值  $166.22 \text{ cm}^2/\text{m}$ ，位于  $z=20 \text{ m}$  附近。

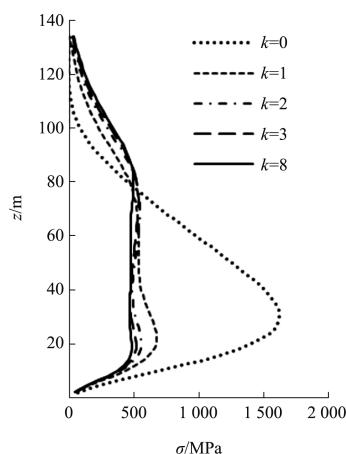


图3 中列钢索应力变化过程

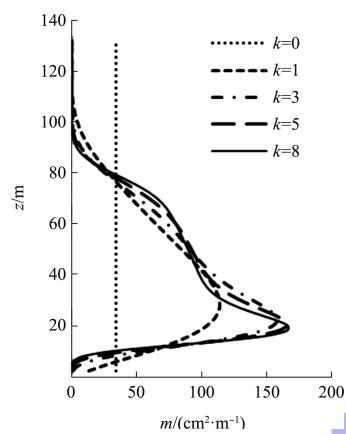


图4 中列钢索密度变化过程

### 3.2 对拉式结构承载变形特性

侧壁实质上是一块三边(两侧边、底边)固定、一边(顶边)自由的板, 顶部36.45 m高度内无水压力作用, 中下部97.92 m高度内水压力三角形分布, 取收敛后优化方案( $k=8$ ), 分析布置对拉钢索后侧壁承载变形特性。

第1、2、3、4列钢索面积为 $7\ 063.89\text{ cm}^2/2$ (1/4模型中间列钢索横截面积取半)、 $7\ 506.04$ 、 $4\ 974.44$ 、 $218.57\text{ cm}^2$ , 分别占比 $43.52\%/2$ 、 $46.24\%$ 、 $30.65\%$ 、 $1.35\%$ 。各列钢索沿侧壁密度分布见图5, 各列变化趋势相似, 峰值在 $z=20\sim22\text{ m}$ , 而在 $z=10\text{ m}$ 以下、 $z=90\text{ m}$ 以上钢索几乎没有分布。第1、2列钢索分配的面积较多, 第4列

钢索靠近侧边, 分配到的面积远小于其他列。

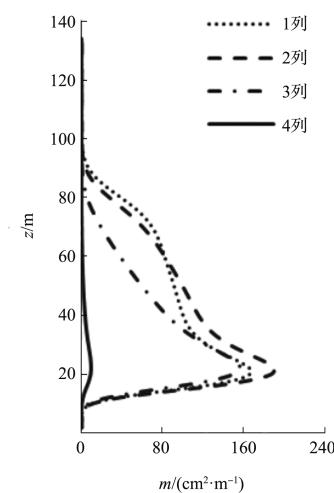


图5 钢索密度竖向分布

各列钢索处侧壁位移竖向分布见图6, 通过各列位移比较, 可分析侧壁位移在纵向的分布规律, 侧壁位移在中部大且较均匀, 越靠近周边越小。侧壁纵向弯矩 $M_x$ (图7)在底边处负弯矩最大, 需要布置第1层钢索处正弯矩最大。侧壁竖向弯矩 $M_z$ (图8,  $b=34.8\text{ m}$ )在侧边处负弯矩最大, 第4列处正弯矩最大。第1、2、3列钢索约束作用较大,  $M_z$ 在纵向上呈波浪状分布, 第4列钢索面积仅1.35%, 对拉约束作用微弱,  $M_z$ 未出现明显局部变化。

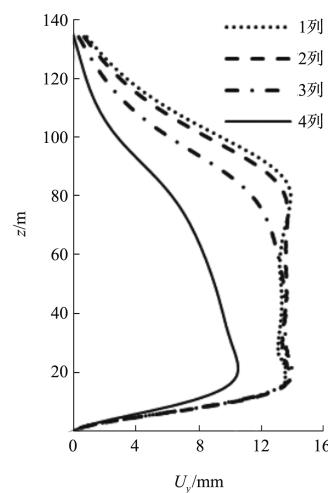


图6 侧壁位移竖向分布

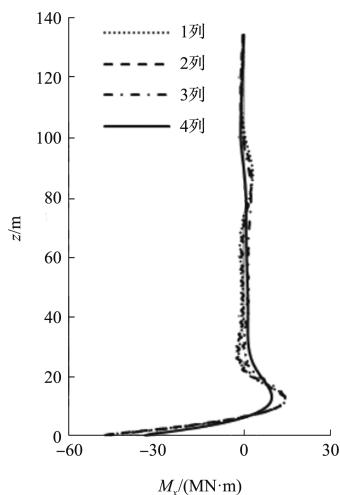


图 7 纵向弯矩竖向分布

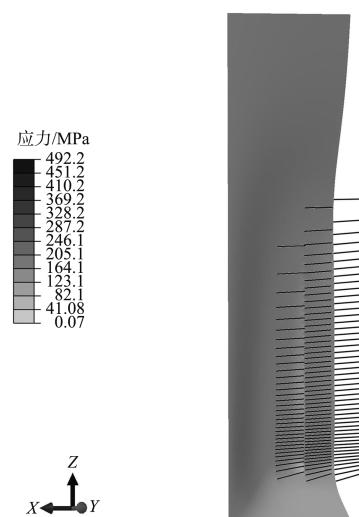


图 9 等荷载布置方案应力云图

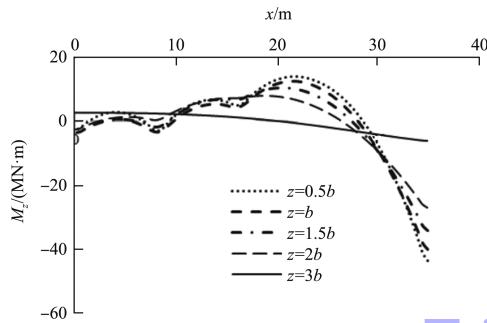


图 8 坚向弯矩纵向分布

### 3.3 等荷载布置方案分析

优化后, 第 4 列钢索面积太小, 约束作用几乎忽略不计, 为减小钢索型号, 方便在实际工程中应用, 可取消第 4 列钢索, 将其面积合并于第 3 列钢索。第 2 列钢索面积最大, 按 52 根布置, 每根面积  $S_{2,j} = 144.34 \text{ cm}^2$ , 取钢索型号 PES(C)7-379, 公称截面积  $145.86 \text{ cm}^2$ , 拉索外径  $d = 174 \text{ mm}$ 。第 1、3 列钢索型号同第 1 列, 可分别取 49、34 根布置。

等荷载布置方案应力分布见图 9。由数值模拟计算可知, 此方案最大钢索应力  $\sigma_{i,j} (= 492 \text{ MPa}) < [\sigma] (= 885 \text{ MPa})$ ; 最小竖向透空率 76.59%, 均满足要求。

对比图 2 可知, 优化方案取消或减小了周边钢索布置, 而且第 1、2、3 列差异布置, 钢索最小拉力 6.25 MN, 最大拉力 6.92 MN, 标准差为 0.80 MN, 可认为每根钢索承担拉力大致相同, 基本达到等荷载布置目的。

简化方案侧壁位移  $U_y$  最大值 27.26 mm, 等荷载方案最大位移减小至 14.33 mm, 减少 47.44%, 优化效果显著。最大纵向负弯矩  $M_x$  简化方案 -49.00 MN·m、优化方案 -47.96 MN·m, 最大坚向负弯矩  $M_z$  简化方案 -43.64 MN·m、优化方案 -44.41 MN·m, 两种钢索布置方案弯矩极值差别不大。但与无钢索方案相比, 等荷载布置方案  $U_y$ 、 $M_x$ 、 $M_z$  分别减小 93.5%、74.36%、75.84%。

### 4 结论

1) 基于竖井内水压力分布规律提出的对拉钢索简化布置方案, 可有效减小侧壁位移和弯矩。但简化方案各列各层钢索承担拉力相差较大, 未能充分发挥钢索对拉作用。

2) 针对简化方案的缺点, 提出拉力权重分配法, 对钢索布置方案进行迭代优化, 可得到钢索应力尽量均匀的最优解。对优化方案离散化, 可转换为与其等效的钢索等荷载布置方案, 便于在实际工程中应用。

3) 等荷载布置与简化方案相比, 最大位移可减小 47.44%, 纵向弯矩、坚向弯矩极值差别不大。与无钢索方案比较, 最大位移、纵向弯矩、坚向弯矩可分别减小 93.5%、74.36%、75.84%。

4) 竖井内最高水位时, 等荷载布置的最大钢索应力  $\sigma = 492 \text{ MPa}$ 。如在竣工前对钢索施加预应

力 393 MPa, 使得竖井无水时, 钢索收缩, 有利于减小高水时侧壁位移和弯矩, 钢索总应力可控制在 885 MPa, 满足允许应力  $[\sigma]$  要求。预应力实施方案值得进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 蒋效忠, 汪云祥, 扈晓雯. 高坝通航技术在水口工程的新发展[J]. 水力发电, 2006, 32(8): 64-67.
- [2] 余友安, 廖乐康, 金辽. 构皮滩垂直升船机金属结构和机械设备设计研究[J]. 人民长江, 2019, 50(5): 119-126.
- [3] 孙鸿秉, 初曰亭. 岩滩垂直升船机技术研究及可靠性分析[J]. 水力发电, 2001(1): 32-35, 69.
- [4] 廖乐康, 于庆奎, 黄发涛. 清江隔河岩升船机主提升机安全制动系统设计[J]. 人民长江, 2004, 35(4): 20-22, 47.
- [5] 钮新强, 覃利明, 于庆奎. 三峡工程齿轮齿条爬升式升船机设计[J]. 中国工程科学, 2011, 13(7): 96-103.

(上接第 91 页)

- [5] 陈子航, 徐显腾. 核电工程物流总承包模式研究[J]. 中国物流与采购, 2017(10): 72-73.
- [6] 温洪涌, 刘鑫. 关于滨海核电厂重件码头设计中一些问题的探讨[J]. 中国水运(下半月), 2013, 13(12): 315-316.
- [7] MILNE W G, SPINK H E, THOMAS A B, et al. Design and operation of nuclear fuel carriers: IAEA-SM-286/80[R]. London: British Nuclear Fuels PLC, 1987.
- [8] HUDSON I A, PORTER I. BNFL's experience in the sea transport of irradiated research reactor fuel to the USA[J]. The nuclear engineer, 2000, 41(3): 73-77.
- [9] TANAKA K. LLW transport by IP-2 packaging [C]// International Atomic Energy Agency. Proceedings of Seminar on Developments in Radioactive Waste Transport. Vienna: IAEA, 1995: 103-108.
- [10] BNFL, COGEMA, ORC. Restour des residus vitrifies de France au Japan[R]. London: BNFL, 2000.
- [11] NAOTERU O, HIROYUKI Y. Radiation safety in sea

- [6] JAN A, THOMAS R, DOROTHEA K. Ship lift at Three Gorges Dam, China-design of steel structures [J]. Steel construction, 2009, 2(2): 61-71.
- [7] 古思思, 孟庆峰. 向家坝升船机方案比选分析[J]. 湖南水利水电, 2015(4): 22-25.
- [8] 马洪琪, 曹学兴. 水力式新型升船机关键技术研究[J]. 水力学报, 2018, 49(4): 446-455, 463.
- [9] 李中华, 胡亚安. 水力浮动式升船机设计原理[J]. 水运工程, 2010(7): 116-120.
- [10] 薛淑. 超高升程水力式升船机水动力特性研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2017.
- [11] 王新宇. 水力式升船机新型塔楼结构研究与有限元分析[D]. 南京: 河海大学, 2019.
- [12] 交通部重庆公路科学研究所. 斜拉桥热挤聚乙烯高强钢丝拉索技术条件: GB/T 18365—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.

(本文编辑 武亚庆)

transport of radioactive material in Japan[C]//PATRAM. Proceedings of 14th International Symposium on the Packing and Transportation of Radioactive Materials, London: PATRAM, 2004: 20-24.

- [12] BROWN A A. International Nuclear Services. Sea transport of irradiated nuclear fuel, plutonium and high-level radioactive wastes [M]//SORENSEN K. Safe and secure transport and storage of radioactive materials. London: Woodhead Publishing, 2015: 155-169.
- [13] ONO M, ITO D, KITANO T, et al. Shielding designs and tests of a new exclusive ship for transporting spent nuclear fuels [J]. Journal of nuclear science and technology, 2000, 37: 337-341.
- [14] BLACKBURN S, BROWN A. Experience in the European transport of spent nuclear fuel[J]. International journal of radioactive materials transport, 1991(2): 115-121.

(本文编辑 王璁)