

# 拱支预应力网架结构的预应力全过程分析方法

周臻 孟少平 吴京

(东南大学土木工程学院 江苏南京 210096)

**摘要:**以武汉长江防洪模型试验大厅为工程背景,提出一种新型的杂交空间结构体系:拱支预应力网架结构。结合该结构体系的特点,从索初始形变的角度出发,建立了该结构的刚度法理论,并提出了预应力全过程分析的混合影响矩阵法、循环迭代逼近法、索初始形变“顺序分析法”以及索张拉力“顺序分析迭代法”等方法,形成该结构预应力全过程分析的完整理论,不仅适用于拱支预应力网架结构,也适用于其它类似的杂交空间结构。最后,通过长江防洪模型试验大厅工程实际算例验证了该方法的准确性和有效性。

**关键词:**预应力空间结构 拱支预应力网架 预应力分析 张拉施工过程分析 索初始形变 杂交空间结构

近几十年来,多种空间结构形式得到了广泛应用和飞速发展。其中,由不同类型的单一结构形式而组成的杂交空间结构体系已成为目前大跨度空间结构研究和应用的热点<sup>[1-8]</sup>。拱支预应力网架结构是由拱、网架、拉索和吊构成的一种新型杂交空间结构,并已应用于国家水利部利用世界银行贷款的重点项目之一:武汉长江防洪模型试验大厅工程。本文结合拱支预应力网架的特点,详细讨论了该结构的预应力全过程分析理论和方法,为类似结构的预应力设计和分析提供理论依据和实用方法。

## 1 结构形式与布置

如图1所示,以武汉长江防洪模型试验大厅

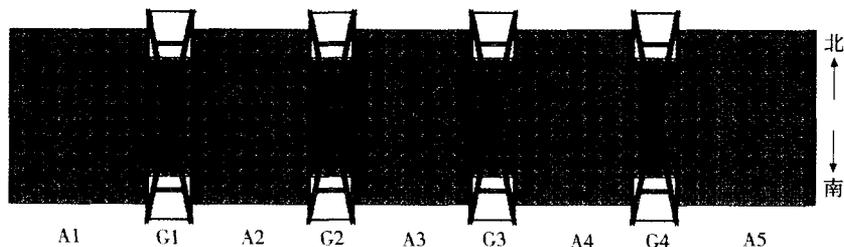


图1 结构平面示意

分析该结构体系可发现,由于拱对网架的支撑作用,使得整体结构空间的跨越能力有了很大的提高,这是单一的网架结构体系所无法实现的。拱支预应力网架结构体系尤其适用于两个方

为例,拱支预应力网架结构体系由双层圆柱面微弯网架体系和提篮拱体系两部分构成。网架部分分为A1~A5五个区,各区网架在整体结构四周外侧支撑于柱上,并在柱顶处网架下弦横向布置水平预应力拉索,以减小网架在荷载作用下的挠度。在各区网架相交处布置提篮拱,提篮拱通过竖向吊杆悬挂网架,并对吊杆进行预张拉使其具有足够的刚度,为网架提供有效的竖向弹性支撑,使网架形成四边支撑的双向受力体系。提篮拱部分分为G1~G4四个区,在每区提篮拱的下弦设置4根水平预应力混凝土拉杆(南北向和东西向)以减小拱脚处水平推力。限于篇幅,图2给出A1区拉索和G1区吊杆位置与编号,其它各区可由此类推。

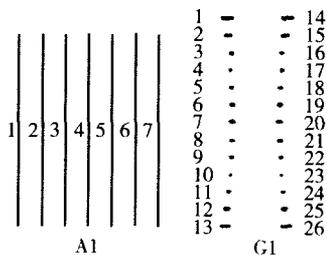


图2 拉索和吊杆位置与编号

向跨度差别较大的结构,以长江防洪模型试验大厅为例。由于需要进行湖北地区长江流域的模型试验,因此建筑要求在结构的纵向(即东西向)能够跨越很大的范围。这使得整体结构在两个方向的跨度差别很大,拱支预应力网架结构恰能满足要求。

本文获第三届欧维姆优秀预应力论文奖三等奖(原载《土木工程学报》2007.No.12)

## 2 基于初始形变的预应力分析

预应力分析的方法可归为两大类：第一类是基于力的分析方法；另一类是基于形变的分析方法<sup>[1-6]</sup>。基于力的分析方法由于计算过程复杂、计算量大，在工程中的应用受到限制<sup>[2-6]</sup>。实际上，预应力产生的本质不是力，而是索的初始形变（即索的无应力长度与实际长度的差值）<sup>[2]</sup>。本文讨论的预应力分析方法便是基于索初始形变建立的。因此进行预应力全过程分析的首要任务，就是要依据设计要求确定索初始形变。

一般而言，拉索预应力空间结构的设计要求会给定某一荷载状态下的索力，由此构成确定索初始形变的依据。然而，对于拱支预应力网架结构，拉索和吊杆的设计要求是从不同的方面给定的。对于拉索，设计要求会给定结构在某一荷载状态下的索力；而对于吊杆，由于其作用主要是为网架提供弹性支座，而且过大的预张力会使吊杆附近的节点设计困难，因此设计要求一般会限制吊杆下挂点（也即与网架相连的点）在某一荷载状态时的竖向位移。设计要求给定的这两个约束条件决定了结构的目标预应力态，也成为拉索和吊杆初始形变确定的依据。为表述方便，在此定义设计要求中：某一荷载状态为“目标状态”、拉索在目标状态下的索力为“目标索力”、吊杆下挂点在目标状态下的竖向位移为“目标位移”。

### 2.1 拱支预应力网架结构的刚度法表达式<sup>[2,8-10]</sup>

实际上对预应力空间结构施加预应力的本质是克服索初始形变（或初始缺陷长度）而强迫就位的过程，因此，该预应力结构的矩阵力学模型为：

平衡方程：

$$T^T S = F_0 \quad (1)$$

物理方程：

$$S = K_e (\Delta - D) \quad (2)$$

几何方程：

$$\Delta = T \delta \quad (3)$$

式中： $T$ 为几何矩阵； $T^T$ 为 $T$ 转置，即平衡矩阵； $F_0$ 为节点力向量； $S$ 为杆件内力向量； $D$ 为初始形变向量，对拱支预应力网架结构应包括3个子向量： $D^c$ 为拉索元的初始形变， $D^h$ 为吊杆

元的初始形变， $D^l = 0$ 为其他非预应力杆元的初始形变； $\Delta$ 为杆件伸长量向量； $\delta$ 为节点位移向量； $K_e$ 为单元刚度矩阵。

将式(2)和式(3)代入式(1)可得拱支预应力网架结构的刚度法表达式：

$$K \delta = F_0 + T^T K_e D = F_0 + F_1 \quad (4)$$

其中 $K = T^T K_e T$ 为结构整体刚度矩阵。

由式(4)可知，如果已知拉索和吊杆的初始形变，即 $D$ 已知，则通过一般的刚度求解方法就可完成整个结构的分析。然而，由于设计要求给定的是目标状态下拉索的目标索力 $F^l$ 和吊杆下挂点的目标位移 $\delta^l$ ，因此，无法直接利用式(4)求解 $D$ 。笔者在此提出两种分析方法：混合影响矩阵法和循环迭代逼近法。

### 2.2 混合影响矩阵法

设整个结构中拉索单元数为 $m$ ，吊杆单元数为 $n$ ，其他非预应力杆元数为 $p$ ， $F_0$ 对应于目标状态下的节点荷载向量，则混合影响矩阵法的求解步骤如下：

1) 分别对第 $i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ )根拉索赋予一单位初始形变，即 $d_{ci}^l = -1$ ，其余拉索和吊杆的初始形变为零。求解方程 $K \delta = F_0 + T^T K_e D$ ，可求得第 $i$ 根拉索存在 $d_{ci}^l = -1$ 时，第 $j$ 根拉索的内力 $F_{ij}^l$  ( $j=1, 2, \dots, m$ )和第 $k$ 根吊杆的下挂点位移为 $\delta_{ik}^l$  ( $k=1, 2, \dots, n$ )。

2) 分别对第 $i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )根吊杆赋予一单位初始形变，即 $d_{hi}^l = -1$ ，其余吊杆和拉索的初始形变为零。求解方程 $K \delta = F_0 + T^T K_e D$ ，可求得第 $i$ 根吊杆存在 $d_{hi}^l = -1$ 时，第 $j$ 根吊杆的下挂点位移为 $\bar{\delta}_{ij}^l$  ( $j=1, 2, \dots, n$ )和第 $k$ 根拉索的索力为 $\bar{F}_{ik}^l$  ( $k=1, 2, \dots, m$ )。

3) 构造混合影响矩阵 $G$ ，

$$G = \begin{bmatrix} F_{11}^l & F_{21}^l & \cdots & F_{m1}^l & \bar{F}_{11}^l & \bar{F}_{21}^l & \cdots & \bar{F}_{n1}^l \\ F_{12}^l & F_{22}^l & \cdots & F_{m2}^l & \bar{F}_{12}^l & \bar{F}_{22}^l & \cdots & \bar{F}_{n2}^l \\ \vdots & \vdots \\ F_{1m}^l & F_{2m}^l & \cdots & F_{mm}^l & \bar{F}_{1m}^l & \bar{F}_{2m}^l & \cdots & \bar{F}_{nm}^l \\ \delta_{11}^l & \delta_{21}^l & \cdots & \delta_{m1}^l & \bar{\delta}_{11}^l & \bar{\delta}_{21}^l & \cdots & \bar{\delta}_{n1}^l \\ \delta_{12}^l & \delta_{22}^l & \cdots & \delta_{m2}^l & \bar{\delta}_{12}^l & \bar{\delta}_{22}^l & \cdots & \bar{\delta}_{n2}^l \\ \vdots & \vdots \\ \delta_{1n}^l & \delta_{2n}^l & \cdots & \delta_{mn}^l & \bar{\delta}_{1n}^l & \bar{\delta}_{2n}^l & \cdots & \bar{\delta}_{nn}^l \end{bmatrix}$$

4) 构造混合影响矩阵法方程:

$$GD^i = H \quad (5)$$

式中:  $G$ 为混合影响矩阵, 如式(5)所示;  $D^i = \{ \{D^c\}^T, \{D^h\}^T \}^T$ 为拉索和吊杆的初始形变向量;  $H = \{ \{F^i\}^T, \{\delta^i\}^T \}^T$ 为目标索力和目标位移向量。

求解式(5)便可得到对应于设计要求的拉索和吊杆的初始形变向量  $D^c$  和  $D^h$ 。混合影响矩阵法的关键是构造混合影响矩阵  $G$ , 即要求得  $G$  中各影响元素  $G_{ij}$ 。在拉索和吊杆的数目较少时,  $G$  的规模较小, 可多次求解式(4)获得。但在实际工程中, 拉索和吊杆的数目通常较多, 直接采用混合影响矩阵法会遇到很大的困难。如长江防洪模型试验大厅结构体系中共采用38根拉索和104根吊杆, 如果要构造一个完整的混合影响矩阵, 则  $G$  的规模将达到  $142 \times 142$ , 共包含20164个元素, 对于工程设计分析来说, 其计算量是惊人的。这限制了混合影响矩阵法在实际工程中的应用。

### 2.3 循环迭代逼近法

实际上, 分析式(4)可知,  $D^i$  确定后, 可通过式(4)求得节点变位  $\delta$ , 进而由式(2)和式(3)求得杆件内力向量。由此便可得到与  $D^i$  对应的目标状态下拉索索力  $F_0^i$  和吊杆下挂点位移  $\delta_0^i$ 。为达到设计要求, 需选择合适的  $D^i$ , 使得  $F_0^i$  和  $\delta_0^i$  恰好等于目标索力  $F^i$  和目标位移  $\delta^i$ 。由此可基于式(4)建立一种求解  $D^i$  的循环迭代逼近法, 其步骤如下:

1) 设  $i$  代表循环迭代进行的次数, 开始令  $i=1$ ,  ${}^i D^i = 0$ , 求解  $K\delta = F_0$  可得  ${}^i F_0^i$  和  ${}^i \delta_0^i$ 。

2) 由于  ${}^i F_0^i$  和  ${}^i \delta_0^i$  与  $F^i$  和  $\delta^i$  不相等, 因此需对  ${}^i D^i$  进行修正。令  $E_s$  为拉索弹性模量,  $L_s$  为拉索原长,  $A_s$  为拉索面积, 由此可求得:

$$\Delta D^c = \frac{(F^i - {}^i F_0^i) L_s}{E_s A_s}, \quad \Delta D^h = \delta^i - {}^i \delta_0^i.$$

令  $\Delta D^i = \{ \{ \Delta D^c \}^T, \{ \Delta D^h \}^T \}^T$ , 则可求得:

$${}^{i+1} D^i = {}^i D^i + \Delta D^i \quad (6)$$

3) 求解  $K\delta = F_0 + T^T K_e {}^{i+1} D^i$  得  ${}^{i+1} F_0^i$  和  ${}^{i+1} \delta_0^i$ , 令  $\varepsilon_F = \frac{|F^i - {}^{i+1} F_0^i|}{F^i}$ ,  $\varepsilon_\delta = |\delta^i - {}^{i+1} \delta_0^i|$ 。

如果  $\varepsilon_F$  和  $\varepsilon_\delta$  同时小于设定的容差, 则迭代终止,  ${}^{i+1} D^i$  即所求初始形变最终值; 反之, 令  $i = i+1$ , 回到第2)步, 进入下轮迭代直至收敛。

### 2.4 两种方法的比较

两种方法都是基于式(4)建立起来的间接求解  $D^i$  的方法, 但混合影响矩阵法利用式(4)计算所有的拉索和吊杆之间的相互影响, 进而建立起  $D^i$  与  $F^i$  和  $\delta^i$  之间的显示关系, 由此求解  $D^i$ ; 而循环迭代逼近法则没有将  $D^i$  与  $F^i$  和  $\delta^i$  之间的关系显示化, 而是通过不断的修正  $D^i$  使其计算结果不断逼近  $F^i$  和  $\delta^i$ 。比较两种方法在计算量和计算精度上的差异, 结果如下:

1) 据笔者分析结果, 即使对于拉索和吊杆数目较多的情况, 循环迭代逼近法一般也只需迭代3次~4次, 其结果误差就已很小; 而随着拉索和吊杆数目的增加, 混合影响矩阵法的计算量则成倍增长。因此, 当结构规模较大、拉索和吊杆数目较多时, 循环迭代逼近法在计算量上有很大优势。

2) 对比两种方法的分析步骤可发现, 混合影响矩阵法认为初始形变对拉索索力和吊杆下挂点位移的影响可以线性叠加, 因此混合影响矩阵法隐含一个前提, 即: 结构反应呈线性。当结构几何非线性影响较大时, 这个前提显然不成立, 但为了使  $D^i$  与  $F^i$  和  $\delta^i$  之间的关系显示化, 混合影响矩阵法又必须采用线性结构反应的假定, 因此这会使分析结果与正确结果存在偏差; 反之, 循环迭代逼近法则不存在任何假定, 无论结构几何非线性影响多大, 只需在循环迭代过程中求解式(4)时, 始终考虑几何非线性影响, 则分析结果完全正确。不过几何非线性对结构影响越大, 循环迭代逼近法的收敛越慢, 但据笔者经验, 总迭代次数仍在10次以内。

## 3 预应力施工阶段的力学分析

### 3.1 分批张拉与多次张拉的概念

分批张拉是指将所有的索分为若干批, 按照张拉顺序一批接一批施工; 多次张拉则是指分若干次将所有的索张拉至设计要求索力。多次张拉又可分为两种情况: 一种为等荷载状态多次张拉

(或分级张拉),即每次张拉时结构承受荷载状态不变;另一种为变荷载状态多次张拉,即每次张拉时结构承受的荷载状态都改变。此外,在多次张拉时,有可能给定单次目标索力(即每一次张拉完成时各索的索力),也有可能给定单次索张拉力(即每次张拉时各索的张拉力),这两种情况也需要加以区分。由于拱支预应力网架结构的拉索和吊杆较多,实际施工时必然会采取分批、多次张拉的预应力施工方案,由于各施工阶段的索力和位移相互影响,加大了预应力施工分析的难度。

### 3.2 索分批张拉的分析

首先需要明确的是,第3节求出的拉索和吊杆的初始形变值是一个状态量,即它只与设计要求的预应力状态有关,而与具体的预应力施工过程无关。由此便可建立索分批张拉分析的初始形变“顺序分析法”。在分析第*i*批索施工时,直接赋予第*i*批索相应的初始形变,并保留前面*i-1*批索已有的初始形变,由此求解下式:

$$(K - K_{si}) \delta = F_0 + T^T (K - K_{esi}) D_i \quad (7)$$

式中:  $K_{si} = T^T K_{esi} T$  为张拉第*i*批索时,不参与结构工作索在整体坐标系下的刚度矩阵;  $K_{esi}$  为不参与结构工作索局部坐标系下刚度矩阵;  $D_i = \{d_1, d_2, \dots, d_i\}$  为第1批到第*i*批索的初始形变向量。根据式(7)求得的第*i*批索的索力,就是张拉该批索时的张拉控制力,此外还可得到张拉第*i*批索时对前面已张拉索的影响,以及在该施工阶段的应力和位移等预应力施工过程数据。

分批张拉分析过程中,随着各批张拉索张拉后参与结构工作,使得结构体系在不断变化,理论上可采用生死单元法进行处理,即在索未参与结构工作时,将该索的刚度矩阵乘以一个很小的因子,将其“杀死”,而在该索参与结构工作时,则恢复该索的刚度矩阵,使其“出生”。实际上,笔者认为可根据索的特性,采取一种更为简便的方法,称为“升温降温法”。“升温降温法”基于统一的分析模型(包括所有索单元在内),在张拉开始前,将所有索的环境温度都升至很高的值,使其处于完全的松弛状态,然后在

张拉第*i*批索时,将该批索的环境温度降温至产生相应的初始形变值,由此在使其参与结构工作的同时,也实现了对该索的张拉。

### 3.3 索多次张拉的分析

索多次张拉较分批张拉分析复杂一些,这是因为多次张拉分析时,在结构的初始态(即无预应力态)与目标预应力态(即设计要求)之间增加了一系列的过程预应力态(即各次张拉所要达到的目标)。在这种情况下,为了能够进行预应力施工时所有状态(包括所有过程预应力态)的分析,需要采取以下步骤:

1) 由于初始形变是状态量,因此首先要求得对应于各个过程预应力态及目标预应力态的索初始形变。

2) 在第*i*次张拉第*j*批索时,直接赋予第*j*批索相应的第*i*次初始形变,保持前面*j-1*批该次已张拉索的第*i*次初始形变不变,后面各批索的初始形变则为第*i-1*次初始形变,由此求解下式:

$$(K - {}^i K_{sj}) \delta = F_0 + T^T (K - {}^i K_{esj}) {}^i D_j \quad (8)$$

式中第*i*次张拉第*j*批索时的初始形变向量:

$${}^i D_j = \{ {}^i d_1, {}^i d_2, \dots, {}^i d_j, {}^{i-1} d_{j+1}, \dots, {}^{i-1} d_n \} \quad (9)$$

式中*n*代表索的总批数。根据式(8)即可求得该阶段的所有施工过程数据。由上可知,进行索多次张拉分析的关键是确定各过程预应力态及目标预应力态的索初始形变。在3.1节中已指出,在多次张拉时,既可能给定单次目标索力,也可能给定单次索张拉力。当给定单次目标索力时,可依据第2节中的方法求得相应的索初始形变;当给定单次索张拉力时,问题将会复杂一些。实质上,这是索初始形变顺序分析方法的逆过程。在此提出索张拉力“顺序分析逆迭代法”进行求解:

1) 在求解第*i*次第*j*批索的初始形变时,所有索的第*i-1*次初始形变和前面*j-1*批索的第*i*次初始形变已经求得,即式(9)中只有 ${}^i d_j$ 为要求的未知量,其余都已知。

2) 以第*i*次第*j*批索的该次张拉力为目标值,采用第2节所述的方法,可求得 ${}^i d_j$ ,即为与第*j*批索的第*i*次张拉力对应的初始形变。

对于等荷载状态多次张拉和变荷载状态多次张拉的情况,实质上其分析方法是类似的。只是分析时,变荷载状态多次张拉需要在两次张拉分析之间嵌入一个荷载分析阶段,其余的分析步骤则完全类似。

#### 4 算例:长江防洪模型试验大厅结构

##### 4.1 设计要求与张拉方案

该工程的结构布置、拉索和吊杆位置与编号如图1~图3所示。各区网架南北向跨度为99m,东西向跨度为90m,南北向跨中厚度为5m,边缘厚度为2.24m,99m跨方向为圆弧形曲线,矢高1.6m;各区提篮拱跨度为120m,矢高45.5m,拱桁架厚度为3.5m,结构南北向整体跨度约450m。设计要求在结构承受恒载(包括结构自重和网架屋面系统荷载)作用时,水平拉索索力为620kN,竖向吊杆下挂点竖向位移为0。综合考虑设计要求、结构安装进度、张拉设备限制等因素,制定预应力施工的两种方案如下:

##### 1) 张拉方案A

①网架和提篮拱安装完成后,在吊杆下方设置临时支撑,并安装拉索;②结构在自重状态下,以A1~A5的次序依次对各区拉索进行第一次张拉至300kN,每区拉索的张拉以对称为原则从中间往两边分批进行;③以同样的张拉顺序将各区拉索张拉至设计要求;④安装网架屋面系统和吊杆;⑤按照G1~G4的次序张拉各区吊杆至设计要求,每区吊杆的张拉以对称为原则,在提篮拱的两个分支上同时从拱中间往两边分批进行。

##### 2) 张拉方案B

①网架和提篮拱安装完成后,在吊杆下方设置临时支撑,并安装拉索;②结构在自重状态下,先以A1~A5的次序依次对各区拉索进行第一次张拉,各索张拉控制力均为300kN,每区拉索的张拉以对称为原则从中间往两边分批进行;③安装网架屋面系统;④以同样的张拉顺序将各区拉索张拉至设计要求;⑤安装吊杆;⑥按照G1~G4的次序张拉各区吊杆至设计要求,每区吊杆的张拉以对称为原则在提篮拱的两个分支上同时从拱的中间往两边分批进行。

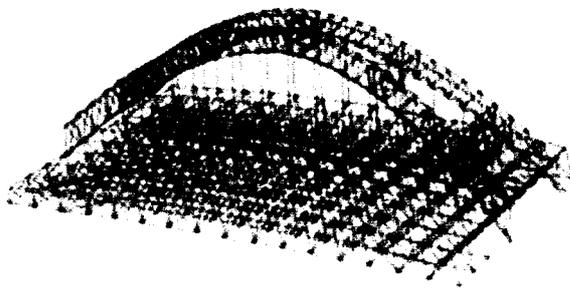
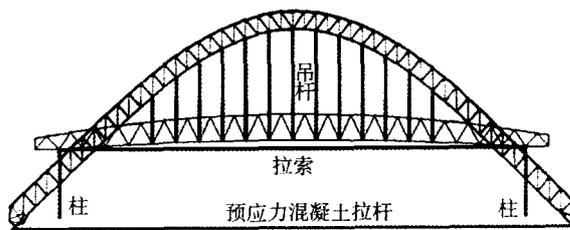


图3 结构剖面和局部示意

##### 4.2 结构的预应力全过程分析

根据4.1节中设计要求的描述,目标状态为结构承受恒载作用的状态,拉索的目标索力为620kN,吊杆下挂点的目标位移为0。张拉方案A中拉索为等荷载状态多次、分批张拉,张拉次数为两次,给定单次目标索力为300kN;张拉方案B中拉索为变荷载状态多次、分批张拉,张拉次数仍为两次,给定单次索张拉力为300kN。两种方案中吊杆均为一次分批张拉,但吊杆张拉时的荷载状态与拉索张拉时的荷载状态不同,因此吊杆与拉索张拉顺序的相互关系又属于变荷载状态张拉的情况。由此可以看出,两种张拉方案的张拉顺序都相当复杂,采用本文提出的方法可以准确有效的进行分析。

首先,无论是张拉方案A还是张拉方案B,其张拉完成时的最终预应力态都是设计要求的预应力态,因此方案A和方案B中所有拉索和吊杆相应于设计要求的索最终初始形变是一样的,可采用第2节所述的方法求出,考虑到对于本工程混合影响矩阵法的计算量很大,因此采用循环迭代逼近法。然后,对于方案A,可采用同样的方法求出拉索相应于单次目标索力的初始形变;而对于方案B,则采用索张拉力“顺序分析逆迭代法”求出拉索相应于单次索张拉力的初始形变。在各次拉索初始形变确定之后,便可将拉索和吊

杆的初始形变作为状态量，按照张拉顺序依次施加给所有的拉索和吊杆，由此便可对张拉方案A和张拉方案B进行详细的施工过程分析。限于篇幅，以下仅给出A1区拉索和G1区吊杆的预应力分析结果。表1为按照上述方法确定的各次张拉时拉索和吊杆的初始形变值，表2为拉索在各施工阶段的索力大小，表3为吊杆在分批张拉时各阶段的索力分析结果，表4为张拉全部完成后，各吊杆下挂点的位移。表2、表3中框出的数据即为各索的张拉控制力。

表1 拉索和吊杆的初始形变

拉索初始形变							
编号	1	2	3	4	5	6	7
第一次张拉 方案A	13.419	13.029	12.717	12.561	12.770	13.200	13.697
第一次张拉 方案B	13.409	12.801	12.237	11.801	12.360	12.946	13.661
最终预应力态	28.716	28.476	28.217	28.049	28.331	28.682	29.096

吊杆初始形变							
编号	1	2	3	4	5	6	7
最终预应力态	1.869	2.410	2.965	3.781	4.307	4.774	4.774

表2 各施工阶段拉索索力值 kN

拉索编号		1	2	3	4	5	6	7	
张拉方案A	张拉4				316				
	第一次张拉拉索	张拉3、5		310	307	308			
	张拉拉索	张拉2、6	304	303	303	302	304		
	张拉拉索	张拉1、7	300	300	300	300	300	300	
	第二次张拉拉索	张拉4	298	297	295	595	294	296	299
	张拉拉索	张拉3、5	297	282	596	585	591	286	296
	张拉拉索	张拉2、6	291	593	584	581	589	611	290
	张拉拉索	张拉1、7	596	587	581	578	586	606	622
	安装屋面系统		624	626	628	630	634	642	646
	吊杆张拉完成		620	620	620	620	620	620	620
张拉方案B	张拉4				300				
	第一次张拉拉索	张拉3、5		300	290	300			
	张拉拉索	张拉2、6	300	293	286	293	300		
	张拉拉索	张拉1、7	300	294	290	284	291	294	300
	安装屋面系统		327	333	337	335	338	330	322
	第二次张拉拉索	张拉4	326	331	333	645	333	328	321
	张拉拉索	张拉3、5	323	325	638	636	642	322	319
	张拉拉索	张拉2、6	317	631	632	632	636	647	314
	张拉拉索	张拉1、7	624	626	628	630	634	642	646
	吊杆张拉完成		620	620	620	620	620	620	620

表3 吊杆分批张拉时的索力值 kN

吊杆编号	张拉7、20	张拉6、19 8、21	张拉5、18 9、22	张拉4、17 10、23	张拉3、16 11、24	张拉2、15 12、25	张拉1、14 13、26
1							65.54
2						60.74	44.25
3					80.73	66.57	61.44
4				96.79	84.237	80.06	80.026
5			123.38	109.76	106.40	107.07	109.48
6		126.40	103.71	97.44	98.505	101.54	105.06
7	175.91	127.38	109.74	105.14	107.41	111.11	115.01

表4 吊杆张拉完成时各下挂点竖向位移 cm

编号	1	2	3	4	5	6	7
位移	0.032	0.036	0.033	0.035	0.036	0.032	0.030

从表2~表4中数据可看出，虽然拉索和吊杆的索力在张拉过程中随着施工阶段、荷载状态的变化不断改变，但由于采用索初始形变这个状态量进行分析，因此按照两种张拉方案进行分析最终都达到了设计要求的预应力状态，表明采用本文的方法能够准确有效地进行拱支网架结构的预应力全过程分析。

### 5 结论

(1) 拱支预应力网架结构是一种新型的杂交空间结构体系，尤其适用于两个方向跨度相差较大的特殊大跨结构，但结构中采用了大量的拉索和吊杆，使得张拉方案较为复杂，加大了预应力全过程分析的难度。

(2) 本文从索初始形变的角度出发，提出了“混合影响矩阵法”、“循环迭代逼近法”、索初始形变“顺序分析法”以及索张拉力“顺序分析逆迭代法”，能够有效的解决该结构预应力全过程分析的问题，并以长江防洪模型试验大厅为工程实际算例，验证了方法的准确性和有效性，为类似结构的设计和分析提供理论依据和实用方法。

### 参考文献

- [1] Ayyub Bial M, Ahmed Ibrahim, David Schelling. Postensioned trusses: analysis and design [J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(6): 1491~1506.
- [2] 邓华, 董石麟. 拉索预应力空间网格结构全过程设计的分析方法[J]. 建筑结构学报, 1999, 20(4): 42~47.

Deng Hua, Dong Shilin. Analytical method of pretensioned

- reticulated structure [J]. Journal of Building Structure, 1999, 20(4): 42~47. (in Chinese)
- [3] Kouno Hidejiro, Kato Shiro, Nakazawa Shoji. A study of decision method of initial tension force in structure with cables [J]. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, 2000, 1021~1022.
- [4] 袁行飞, 董石麟. 索穹顶结构施工控制反分析[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2): 75~79.  
Yuan Xingfei, Dong Shilin. Inverse analysis of construction process of cable dome [J]. Journal of Building Structure, 2001, 22(2): 75~79. (in Chinese)
- [5] 卓新, 袁行飞. 预应力索分批张拉过程中张力的仿真分析[J]. 土木工程学报, 2004, 37(9): 27~30.  
Zhuo Xin, Yuan Xingfei. Emulation analysis of the tensile forces of prestressed cables during multistage tensioning construction [J]. Journal of Civil Engineering, 2004, 37(9): 27~30. (in Chinese)
- [6] 李永梅, 张毅刚. 索承网壳结构施工张拉索力的确定[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(4): 76~81.  
Li Yongmei, Zhang Yigang. Determination of cable forces during construction for cable-supported lattice shells [J]. Journal of Building Structure, 2004, 25(4): 76~81. (in Chinese)
- [7] Kawaguchi M, Abe M, Tatemichi I. Design, tests and realization of 'suspend dome' system [J]. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 1999, 40(3): 179~192.
- [8] 董石麟, 邓华. 预应力网架结构的简捷计算法及施工张拉全过程分析[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2): 18~22.  
Dong Shilin, Deng Hua. A simple computation method of prestressed space truss and its global process pretensioning analysis [J]. Journal of Building Structure, 2001, 22(2): 18~22. (in Chinese)
- [9] 董石麟, 钱若军. 空间网格结构分析理论与计算方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.  
Dong Shilin, Qian Ruojun. Theory and computation of space lattice structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000. (in Chinese)
- [10] Pellegrino S. Structural computations with the singular value decomposition of the equilibrium matrix [J]. International Journal of Solids Structures, 1993, 30(21): 3025~3035.

## 简讯

## 沉船打捞技术的新突破 ——“畅通”轮艉段打捞工程圆满成功

2009年10月10日22:30, 沉没在距烟台港12海里烟台2#锚地附近海域的“畅通”轮艉段, 在烟台打捞局和柳州欧维姆机械股份有限公司的共同努力下, 被成功打捞出水; 10月12日晚, 沉船被拖拉到指定海域并下放至浅滩。至此, 我国沉船打捞史上新技术创新应用的典范——“畅通”轮艉段打捞工程圆满成功。

“畅通”轮船长182m, 宽26.04m, 为日本建造的巴拿马籍货轮。2007年9月15日, “畅通”轮和德国籍集装箱轮“HANJIN GOTHEN BURG”号在山东省烟台正北41海里处相撞, “畅通”轮船艉被撞开, 经烟台打捞局、烟台海事局、北海救助局合力施救, 将遇难船舶拖至距烟台港大约12海里的航道外。受台风影响, “畅通”轮断为两段沉没。2008年6月29日, 经过烟台打捞局35天的努力, “畅通”轮船艉段已被成功打捞出水。而“畅通”轮艉段长度短、重量大, 且船舱已严重损坏, 起浮后仍然不能自浮, 如果用传统的浮吊和浮筒抬浮工艺来打捞沉船, 整体起浮沉船成功概率极低。烟台打捞局最终决定尝试使用拉力千斤顶抬浮沉船新技术。

经多方考察和比较, 烟台打捞局决定采用柳州欧维姆机械股份有限公司的设备和进行沉船打捞。欧维姆公司在液压提升、顶推技术的应用方面具有雄厚的技术力量和丰富的施工经验, 曾成功完成了上海东方明珠电视塔天线桅杆提升、上海大剧院钢屋架整体提升、番禺30-1气田海洋石油钻井平

台导管架装船及下水等重大工程。经研究讨论, 根据被打捞船只重量和海上作业安全系数要求, 决定采用拉力千斤顶系统两套, 分别布置在沉船两边的两艘大型驳船上, 每套系统含14台拉力千斤顶, 利用已穿过沉船下端的7道千斤洞, 牵引14条起浮钢缆。每一台拉力千斤顶可提供抬浮力450吨, 14对可提供12600吨浮力, 可满足沉船打捞的需要。

由于工期非常紧, 柳州欧维姆机械股份有限公司在接受任务后迅速成立了项目组, 在最短时间内完成了技术设计、材料采购、生产、调试等工作, 9月25日, 比合同规定提前10天交货完毕, 并成立技术小组赶赴现场提供技术指导服务。在经过16天的紧张准备工作后, 10月10日中午11:00, 14对拉力千斤顶开始发力作业, 经过2个小时的调试起浮, 下午13:00左右, “畅通”轮艉段终于从海底淤泥中被抬浮起来, 晚上22:30, “畅通”轮艉段起浮成功。然后, 通过缆绳将沉船与两艘驳船连接, 三者形成一体, 在千斤顶始终保持受力状态下拖运往30海里外的浅滩海域, 10月12日晚, 沉船被拖拉到指定海域并下放至浅滩, 打捞工程圆满成功。

此次“畅通”轮艉部的成功打捞, 既是对我国传统打捞方式突破性的创新, 又是对液压提升技术的应用创新, 运用此项工艺进行沉船打捞, 可使传统的打捞沉船时间大大缩短, 具广阔的应用前景。

(编辑部)