

# 弦支穹顶结构施工技术及其施工全过程模拟方法

刘慧娟<sup>1</sup>, 罗永峰<sup>2</sup>, 杨绿峰<sup>1</sup>

(1. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004;

2. 同济大学 土木工程学院建筑工程系, 上海 200092)

**摘要:**弦支穹顶结构由于拉索的存在,其施工阶段的力学性能与其使用阶段不尽相同,其受力状态可能更为不利。通过系统研究弦支穹顶结构实际工程的施工工艺,提出包括施工顺序、预应力张拉施加方式、临时支撑系统和预应力张拉方式等 4 个关键施工参数,研究了弦支穹顶结构张拉环索受力机理,并根据此张拉机理和所提关键施工参数建立了有限元分析的时变模型,编制了相应的计算程序。算例分析表明,应用该计算模型和方法,可以对弦支穹顶结构的施工过程进行精确控制,具有较强的适用性。

**关键词:**弦支穹顶;施工工艺;施工参数;张拉机理;施工全过程分析

**中图分类号:**TU74 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)05-0142-07

## Construction Parameters and Process Simulation Method of Suspen-domes

LIU Hui-juan<sup>1</sup>, LUO Yong-feng<sup>2</sup>, YANG Lu-feng<sup>1</sup>

(1. The Key Laboratory of Engineering Disaster Prevention and Structural Safety of the Chinese Ministry of Education in Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China; 2. Department of Civil Engineering,

Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** Mechanical behavior of Suspen-domes during construction is different with that in service and even more adverse because of cables introduced in the structures. By studying the actual suspen-dome projects, the key construction parameters for them were extracted and tensioning mechanism of hoop cables was studied. Then according to the tensioning mechanism and the key construction parameters, a numerical model and an algorithm for the whole process of tensioning were proposed. Moreover, a case study was addressed to approve the effectiveness.

**Key words:** suspen-dome; construction technology; construction parameters; tensioning mechanism; whole construction process analysis

弦支穹顶结构从概念的提出<sup>[1]</sup>到目前广受欢迎和广为建造经历了十多年的时间,对其使用阶段的研究比较早,也相对比较充分<sup>[2-3]</sup>。但由于在结构中引入预应力钢索<sup>[4-5]</sup>,相对传统结构而言,施工阶段的力学性能和使用阶段不尽相同,可能出现比使用阶段更为不利的受力状态,在弦支穹顶结构设计阶段的结构分析中,应进行各个施工阶段结构的受力

分析,并且在这些分析中要恰当考虑施工工艺对结构受力的影响。因此,应将弦支穹顶结构的施工阶段作为一个独立的过程进行详细分析,了解弦支穹顶结构在不同预应力状态下的受力性能。

张拉预应力索是弦支穹顶结构施工经常采用的方法,其张拉全过程分析是弦支穹顶结构施工阶段分析的主要内容之一,是探索随着预拉力增长准结

收稿日期:2010-03-05

基金项目:国家自然科学基金项目(50768001);大跨度空间钢结构施工模型及其力学问题研究(20070247002)

作者简介:刘慧娟(1981-),女,博士,主要从事空间结构的研究,(E-mail)lhj8110@163.com。

构力学性能的发展趋势。目前,已有文献<sup>[6-8]</sup>对张拉过程分析的模拟中,忽略了对施工工艺影响的研究和张拉机理的深入分析,因而其张拉模拟算法也难以做到与实际工程准确匹配。基于此背景,该文研究弦支穹顶结构实际的施工工艺,提出关键施工参数,分析张拉过程弦支穹顶结构受力机理,并根据受力机理和所提关键施工参数,采用 Ansys 有限元软件 APDL 语言,考虑材料和几何双重非线性,编制了张拉全过程算法程序,并对一个具有代表意义的弦支穹顶结构进行了分析,其计算结果验证了所提张拉全过分析算法的正确性、有效性和实用性。

## 1 弦支穹顶结构的施工工艺

施工阶段弦支穹顶结构的受力状态与施工工艺是密切相关的,进行弦支穹顶结构施工阶段的张拉全过程分析,有必要全面研究现有可行的施工工艺,并根据不同的施工参数进行分类,提出关键施工参数,以便在理论分析中合理引入这些施工参数。

### 1.1 实际工程中弦支穹顶结构的施工工艺

弦支穹顶结构在日本应用较多,20世纪90年代既已建造了诸如光丘穹顶和聚会穹顶等几座以弦支穹顶结构为主要受力结构的场馆建筑。继中国第一座弦支穹顶结构——天津保税区商务交流中心大厅之后,中国也兴建了几座跨度较大的弦支穹顶结构,如2008年北京奥运会羽毛球馆、常州体育馆(长轴114.08 m,短轴76.04 m,矢高21.08 m)<sup>[8]</sup>、武汉体育中心二期工程(长轴方向总长165 m,短轴方向总长145 m)、安徽大学磬苑校区体育馆、济南奥体中心体育馆<sup>[9]</sup>以及连云港体育馆等。

施工工艺来源于工程实践,对收集到的实际弦支穹顶结构的施工资料进行分析,提出施工顺序、预拉力施加方式、临时支撑系统和张拉方式(张拉顺序和批次)为关键施工参数。这4个关键参数可基本概括普通弦支穹顶结构的施工工艺,表1列出了实际工程中弦支穹顶结构的施工工艺。

表1 实际工程中弦支穹顶结构的施工工艺

| 工程名称                          | 施工顺序                    | 预拉力施加方式         | 临时支架系统 | 张拉方式                |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------|--------|---------------------|
| 天津保税区商务交流大厅                   | 在设计位置上拼装,然后施加预应力        | 张拉环向索法          | 满堂脚手架  | 一次张拉                |
| 天津博物馆贵宾厅屋顶                    | 在设计位置上拼装,然后施加预应力        | (实际施工中将索换成了刚性杆) | ——     | ——                  |
| 北京工业大学奥运会羽毛球馆 <sup>[10]</sup> | 在设计位置上拼装,然后施加预应力        | 张拉环向索法(径向为拉杆)   | 满堂脚手架  | 分级逐环(超张拉到110%)      |
| 常州体育馆                         | 单层网壳在设计位置上焊接完成然后施加预应力   | ——              | 满堂脚手架  | 同一环同步分级             |
| 武汉体育馆                         | 中部区域采用顶升和四周悬拼安装,然后施加预应力 | 撑杆调节法           | 临时台架   | 从外而内,同一环撑杆,同步一次顶撑到位 |
| 昆明柏联广场屋顶                      | ——                      | 张拉钢索法           | 无      | 一次张拉                |
| 安徽大学磬苑校区体育馆                   | 在承台上张拉,然后提升至设计位置        | 张拉钢索法           | 临时台架   | 一次张拉                |

### 1.2 弦支穹顶结构关键施工参数

据前文所述及表1可知,大跨度弦支穹顶结构的施工工艺可以通过4个关键施工参数来体现:施工顺序、预拉力施加方式、临时支撑系统及预拉力张拉方式(顺序和批次)。

1)施工顺序。施工顺序可以分为杆件拼装、结构张拉和结构吊装(或顶升)或拆除临时支撑结构,其中第3步在某些施工工艺中可能不需要。无论具体的施工过程是怎样的,网壳拼装、结构吊装或顶升和结构张拉这3项施工工作可作为概括弦支穹顶结构施工过程的主要阶段。

2)预拉力施加方式和方法。根据预应力施加的对象,可将预应力施加方式分为3大类:张拉环向索、张拉径向索、顶升撑杆。

索内预拉力的施加方法应根据结构特点、张拉机具、锚具特点和吊装能力等综合确定,必要时可以采用不同方法的组合方式施加预拉力。从表1可以看出,在实践中大跨度弦支穹顶结构较多地采用张拉钢索(环索或径向索)法,比如2008奥运会羽毛球馆等工程均是采用张拉环索法。

3)临时支架系统。大跨度弦支穹顶结构由于成形前结构的弱刚性,施工中常要设置临时支架系统。

临时支架系统有满堂脚手架、临时台架和临时支撑等类型。施工中采用的临时支架系统类型因不同施工工艺而各不相同。

4)张拉方式。对于弦支穹顶结构较常使用的张拉钢索法施工,其张拉方式的内容主要有张拉顺序和张拉批次 2 个方面。

## 2 弦支穹顶结构的预应力张拉机理

为了更好地进行弦支穹顶结构张拉全过程分析,需要预先对其张拉机理进行分析。选取包含关键施工参数、采用张拉环索施工法的弦支穹顶结构为分析模型,以保证分析模型的代表性,进而保证结论具有较为普遍的实用价值。

对如图 1(a)所示的弦支穹顶结构,其张拉过程及各阶段的受力特点:1)安装单层网壳与撑杆,并在网壳投影平面内适当位置设置临时支架,如图 1(b),此时单层网壳支承在支座和临时支撑上,撑杆自由悬挂在单层网壳上;2)根据索段的放样长度,牵引索并将索与撑杆相连,如图 1(c)所示,单层网壳、撑杆和索已连成一体,支承在支座和临时支撑上;各构件只承受自重作用;3)在每段环索两端张拉钢索,可以由内环向外环,也可采用本图所示的由外而内的张拉方式。单层网壳尚未脱离临时支架,如图 1(d)(图中为了说明的便利,将索力的方向表示为水平),第 1 环径向索已经开始被动张拉,相应的撑杆开始随动受力,各构件受力与 2)阶段有了明显的不同,除了自重荷载外,又产生了由第 1 环环索预应力逐渐施加引起的内力重分布。但其他各环相应的构件则仍保持 2)阶段的状态。目前第 1 环索张拉索段还承受千斤顶的拉力  $T_3'$ ;4)继续张拉环索,直到张拉到目标值  $T_3$ ,单层网壳不断起拱,结构的位形不断改变,并可能部分或全部脱离临时支架;然后将其他两环索张拉到位,分别达到设计值  $T_1$ 、 $T_2$ ,如图 1(e)。此时,单层网壳、撑杆和索成为一个整体支承在支座上;5)若有部分临时支撑在阶段 4)张拉结束时没有完全脱离,则需要对其进行后续的临时支撑卸载工作,以保证结构达到预期的设计状态。

在阶段 1),可把单层网壳和临时支架作为 1 个结构进行分析,由于尚未引入钢索,不必将其归入张拉过程;阶段 2)和 3)可以合并为 1 个阶段,只是在阶段 2)张拉力较小而已;结构在阶段 4)和 5)的几何和边界约束均不同于阶段 3)。因此,弦支穹顶结构的张拉过程模拟重点是模拟阶段 3)和阶段 4),并根据具体的结构施工过程,在阶段 5)可能发生的情况下,模拟阶段 5)。

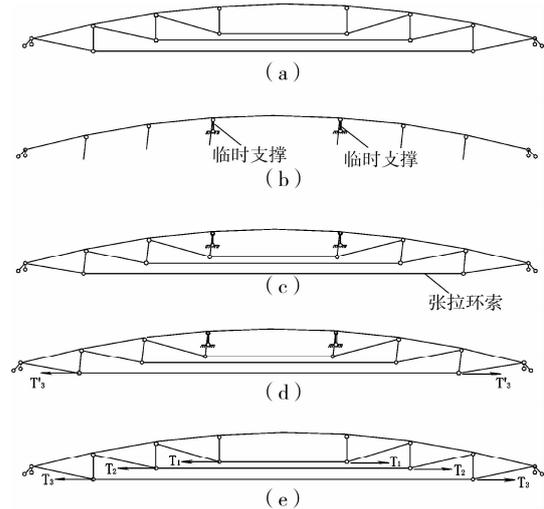


图 1 弦支穹顶结构的张拉全过程剖视示意图

## 3 张拉全过程分析数值模拟

前文研究内容表明,弦支穹顶结构张拉过程具有如下特点:1)弦支穹顶结构的几何形状、边界约束和受力状态是不断变化的;2)采用不同的工艺会导致结构的受力状态变化有较大差异,如使用分层组装张拉法和上层网壳吊装至设计位置后张拉,2 种施工工艺结构的受力状态变化是完全不同的,或者同样是上层网壳吊装至设计位置,张拉顺序或张拉方法不同也可以形成完全不同的受力状态。因此,弦支穹顶结构张拉全过程数值模拟必须满足:数值模型必须保证各构件的几何、材料与实际结构在每一施工阶段中的状态相同,构件之间的连接与实际结构施工状态相符,预拉力的施加效果符合实际的张拉效果,结构在每一施工阶段的荷载和边界约束与实际结构的施工状态相同。

张拉阶段是一个时变过程,在这个过程中,杆件个数、荷载和准结构边界都在变化。如果把初应变看作结构参数引入到计算模型中,在张拉过程中该参数在不断地变化,即是时变的。张拉阶段的数值模拟内容与使用阶段的比较见表 2,2 个阶段模拟的内容存在一些差异。

表 2 张拉阶段和使用阶段的数值模拟区别

| 模拟内容 | 起始几何   | 基本构件         | 预拉力 | 荷载   |
|------|--------|--------------|-----|------|
| 张拉阶段 | 放样几何   | 网壳、索、撑杆、临时支撑 | 变化  | 可能不变 |
| 使用阶段 | 建筑设计几何 | 网壳、索、撑杆      | 不变  | 变化   |

### 3.1 关键施工参数模拟及施工控制变量的确定

3.1.1 临时支撑的数值模拟 施工结构的数值模型的变边界特性是由临时支撑的增减引起的,如何

准确模拟变边界特性,取决于临时支撑的正确模拟。

临时支撑只存在于弦支穹顶结构的施工阶段,且当结构张拉拱起,全部临时支撑与结构脱离后,这些临时支撑就彻底退出工作。从受力性质上讲,临时支架只承受轴向压力,采用只压不拉的空间二力杆单元可以准确模拟临时支撑。

**3.1.2 施工顺序,张拉力施加,张拉方式的数值模拟** 施工顺序的引入不仅与分析模型中结构荷载和临时支撑有关,最主要的是与预应力施加方式和张拉顺序有关,也即预应力张拉采用的施工顺序不同,张拉阶段外部荷载以及临时支撑系统的类型和布置也不一样,这些差异可以在分析模型中如实体现。该文采用前进法模拟施工顺序,利用施加初应变法模拟环索张拉,分析中采用从外而内逐环张拉方式。

**3.1.3 确定张拉过程的控制变量** 随着张拉施工的进行,结构将逐渐脱离临时支撑并成形,其刚度和承载力都比单层网壳有了显著的增强。结构的变形对张拉力不再敏感,张拉力的微小增量不会导致显著的结构变形,因此可采用张拉力控制方法,即使用张拉力控制结构位形和内力。另一方面,与预拉力相比,结构施工中的位移测量结果相对精确,也可选择变形作为张拉过程结构分析时的控制变量辅助量。而控制点及控制自由度的选取可以根据施工中的要求来确定,一般选择易于测量的自由度,如竖向位移,且宜选择竖向位移较大的点,如网壳中心点或者其他网壳节点。而更为精确的方法则是选择预应力和变形作为双重控制变量,文中采用该双重控制变量。

因此,张拉过程分析可理解为给定各环索在每个张拉阶段的目标预拉力计算对应的结构内力和位移,分析结构在张拉施工中有无不利状态,避免个别构件或位置位移或内力响应超限,为实际施工控制提供数据和依据。

### 3.2 双控法张拉全过程算法

弦支穹顶结构的几何位形在施加预应力后可能发生较大改变,即初始状态和零状态的几何可能存在较大差异,往往不可忽略,因此,结构构件能否按建筑设计图纸进行施工放样是值得商榷的。而合理的做法是先对弦支穹顶结构进行找形分析,确定合理的初始状态几何,并以此为分析起点,确定结构初始状态的内力分布和放样几何,然后由放样几何状态出发进行张拉全过程分析。

在上述分析研究以及双控法施工找形算法<sup>[24]</sup>的基础上,编制了针对逐环张拉环索的施工方法的张拉全过程分析程序 SCAP,其主要步骤有:

1)首先,采用 SFP 程序<sup>[11]</sup>对已知预应力态构型的弦支穹顶结构进行施工找形。

2)按照找形分析得到的放样态更新数值分析模型;

3)按照更新后的数据建立第一施工阶段数值分析模型,引入施工阶段模型的初应变,并施加外荷载;

4)进行几何非线性计算,并得到本施工阶段的施工控制索力和节点控制位移,然后按照施工顺序,对其他的施工阶段重复上述内容,依次获得各施工阶段的施工控制索力和节点控制位移。

图2给出了张拉全程分析程序 SCAP 的流程,该分析程序由于是基于双控施工找形基础上的,因此可同时满足预应力设定值和预应力平衡态位形的双重要求。

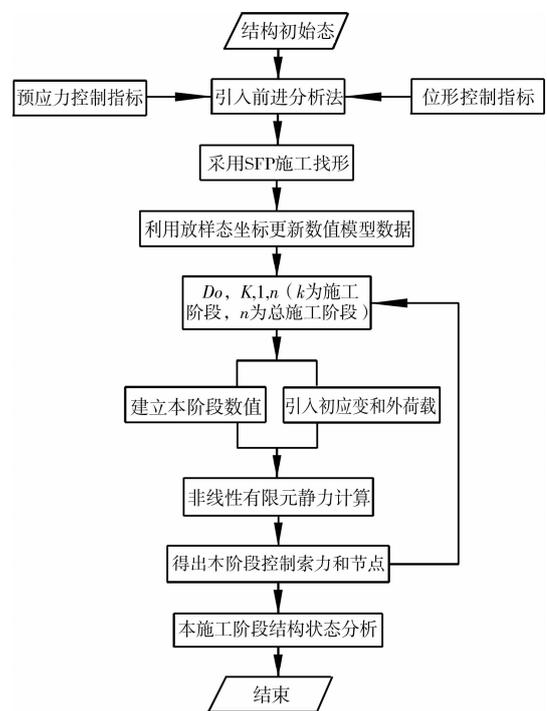


图2 张拉全程分析程序

该文通过引入4个关键施工参数所建立的施工全过程数值模拟方法,代表了弦支穹顶结构施工工艺普遍的过程,所以该模型在弦支穹顶结构施工分析中具有较强的适应性。具体应用中,可以根据实际工程的不同工艺作适当调整。

### 3.3 算例分析

弦支穹顶结构模型如图3所示,其上部结构为跨度90 m、矢高15 m的k8-联方型单层网壳。弦支穹顶结构杆件和临时支撑的截面参数见表3,预应力设计值如表4所示。张拉施工方法按照由外环而

内环的顺序,采用同一圈环索同步张拉,且 1 次张拉 到位,各个施工阶段具体内容如表 5 所示。

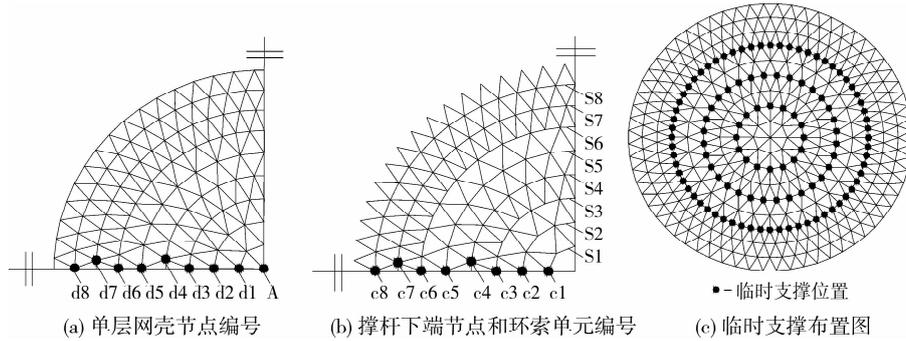


图 3 弦支穹顶结构模型

表 3 预应力设计值

| 环索位置编号   | S1     | S2     | S3     | S4      | S5      | S6      | S7      | S8      |
|----------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 预应力设计值/N | 20 000 | 50 000 | 80 000 | 100 000 | 200 000 | 250 000 | 400 000 | 500 000 |

表 4 弦支穹顶结构构件截面参数

| 构件名称                 | 单层壳     | 环索     | 径向索    | 撑杆      | 临时支撑       |
|----------------------|---------|--------|--------|---------|------------|
| 钢种                   | Q235    | 钢丝绳    | 钢丝绳    | Q235    | Q235       |
| 截面型号                 | 250φ10  | 5×55   | 5×37   | 146φ6   | 46×4(等效截面) |
| 面积 A/mm <sup>2</sup> | 6 063   | 1 075  | 706    | 2638    | 525(等效面积)  |
| 弹性模量                 | 2.06e11 | 1.8e11 | 1.8e11 | 2.06e11 | 2.06e11    |
| 密度                   | 7 850   | 7 850  | 7 850  | 7 850   | 7 850      |

表 5 施工阶段内容

| 施工阶段 | 开始状态     | 阶段 1  | 阶段 2  | 阶段 3  | 阶段 4  | 阶段 5  | 阶段 6  | 阶段 7  | 阶段 8  |
|------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 施工内容 | 单层壳和临时支撑 | 张拉 S8 | 张拉 S7 | 张拉 S6 | 张拉 S5 | 张拉 S4 | 张拉 S3 | 张拉 S2 | 张拉 S1 |

表 6 施工找形计算结果

|                  |        |        |        |         |         |         |         |         |
|------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 初始初应变 $\epsilon$ | 0.934  | 0.826  | 0.75   | 0.828   | 0.185   | 0.197   | 0.296   | 0.287   |
| 预应力值 $P/N$       | 19 999 | 50 000 | 79 999 | 100 000 | 200 000 | 250 000 | 400 000 | 500 000 |

表 7 张拉全过程模拟计算结果

| 平衡态预应力/N | 目标值 $P$            | 20 000 | 50 000 | 80 000  | 100 000 | 200 000 | 250 000 | 400 000 | 500 000 |
|----------|--------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|          | 求解值 $F$            | 19 999 | 50 000 | 79 999  | 100 000 | 200 000 | 250 000 | 400 000 | 500 000 |
| 相对误差%    | $\Delta =  P-F /P$ | 5.0e-5 | 0.00   | 1.25e-5 | 0.00    | 0.00    | 0.00    | 0.00    | 0.00    |

表 6 给出了施工找形的结果,具体算法可参考文献[24];表 7 给出了张拉全过程模拟计算结果。其中表 7 中的目标值即为表 6 通过施工找形计算得出的预应力  $P_2$  的值。从表 7 可知,全过程分析得出

的预应力最终值与找形得出的一致。据此验证了该计算方法的正确性和有效性。

张拉全过程分析可得出各个施工阶段的施工控制值以及施工阶段控制点位移,分别如表 8、9 所示。

表 8 SFP 施工控制值

| 控制单元 | 预应力施工控制值/N |         |         |         |         |         |         |             |
|------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------|
|      | 1 阶段       | 2 阶段    | 3 阶段    | 4 阶段    | 5 阶段    | 6 阶段    | 7 阶段    | 8 阶段        |
| S8   | 461 240    | 484 425 | 490 288 | 493 228 | 495 861 | 498 201 | 499 415 | 500 000(对应) |
| S7   |            | 382 862 | 397 379 | 398 439 | 399 069 | 399 592 | 399 866 | 400 000     |

续表 8

| 控制单元 | 预应力施工控制值 |      |         |         |          |         |         |         |
|------|----------|------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|
|      | 1 阶段     | 2 阶段 | 3 阶段    | 4 阶段    | 5 阶段     | 6 阶段    | 7 阶段    | 8 阶段    |
| S6   |          |      | 237 694 | 247 921 | 249 025  | 249 590 | 249 865 | 250 000 |
| S5   |          |      |         | 188 478 | 198 235  | 199 519 | 199 857 | 200 000 |
| S4   |          |      |         |         | 89 818.8 | 98 597  | 99 671  | 100 000 |
| S3   |          |      |         |         |          | 72 635  | 79 087  | 80 000  |
| S2   |          |      |         |         |          |         | 45 885  | 50 000  |
| S1   |          |      |         |         |          |         |         | 20 000  |

表 9 施工阶段控制点位移

| 控制点 | 施工阶段控制点位移/m |          |          |          |          |          |          |          |
|-----|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|     | 1 阶段        | 2 阶段     | 3 阶段     | 4 阶段     | 5 阶段     | 6 阶段     | 7 阶段     | 8 阶段     |
| A   | 0.022 4     | 0.029 5  | 0.032 0  | 0.035 0  | 0.037 0  | 0.038 9  | 0.040 2  | 0.040 2  |
| d1  | 0.020 3     | 0.027 4  | 0.029 9  | 0.032 9  | 0.034 9  | 0.036 8  | 0.038 2  | 0.043 6  |
| d2  | 0.017 7     | 0.024 8  | 0.027 3  | 0.030 3  | 0.032 3  | 0.034 3  | 0.041 1  | 0.041 4  |
| d3  | 0.016 6     | 0.023 7  | 0.026 2  | 0.029 2  | 0.031 1  | 0.037 4  | 0.035 5  | 0.304 5  |
| d4  | 0.017 2     | 0.024 3  | 0.026 95 | 0.033 85 | 0.029 05 | 0.031 5  | 0.030 4  | 0.164 8  |
| d5  | 0.017 8     | 0.024 9  | 0.027 7  | 0.038 5  | 0.027 0  | 0.025 6  | 0.025 3  | 0.025 1  |
| d6  | 0.013 7     | 0.019 7  | 0.040 9  | 0.030 9  | 0.029 1  | 0.028 5  | 0.028 3  | 0.028 2  |
| d7  | 0.017 1     | 0.031 7  | 0.005 68 | 0.004 2  | 0.003 61 | 0.003 10 | 0.002 84 | 0.002 71 |
| d8  | 0.025 8     | -0.010 4 | -0.012 8 | -0.013 4 | -0.013 9 | -0.014 4 | -0.014 7 | -0.014 8 |

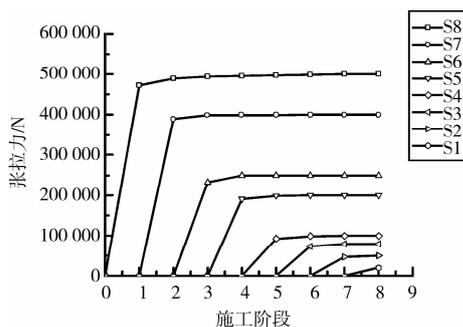


图 4 SCAP 计算出的环索张拉力

图 4 给出了 SCAP 计算出的张拉过程中各个环索的张拉力,由该图可知,张拉过程中,后续环索张拉会增加已张拉的各环环索力和撑杆内力。张拉第  $n$  圈环索时,第  $n+1$  圈环索的索力增加量比较大,以 S2、S3、S4 索力受前一步张拉影响幅度较大,其增长幅度接近 10%,而已张拉的第  $n+2$  至 8 圈环索索力增加量较小,索力增长幅度小于 1%。总体来看,逐环张拉各环环索时,各环索相互影响较小,这与此结构上部网壳的刚度较大有关。

采用由 SCAP 程序计算出的拉索预应力施工控制值、结构变形控制值进行施工,可按照设定的精度满度施工要求。因此,考虑了施工进程的双控法预

应力张拉分析方法是理想的施工阶段分析方法,其分析结果可按设定精度满足设计和施工控制、监测的要求。

### 4 结论

通过对弦支穹顶结构施工工艺的系统研究,提出了 4 个关键施工参数:施工顺序、预拉力施加方式、临时支撑系统和张拉方式(包括张拉顺序和批次);并将这些参数引入到施工过程分析的有限元模型中。通过分析张拉阶段受力机理,表明弦支穹顶结构索张拉过程中,拉索初应变、杆件个数、荷载和准结构边界等参数都表现出时变性。

根据上述施工分析的时变有限元模型,编制了张拉全过程分析程序,并对一算例进行了分析,算例分析表明按照该文方法,采用双控法,可按照设定的精度满度施工要求,从而验证了所提算法的正确性和有效性。

### 参考文献:

[ 1 ] KAWAGUEHI MAMORU, ABE MASARU, HATATO TATSUO, et al . On mural system “suspendome” system [ C ]//Proceedings of IASS Symposium.

- Istanbul, 1993:523-530.
- [ 2 ] KAWAGUEHI MAMORU, ABE MASARU, HATATO TATSUO, et al. Structural tests on the “suspendome” system [ C ]//Proceedings of IASS Symposium. Atlanta, 1994:384-392.
- [ 3 ] KAWAGUEHI MAMORU, ABE MASARU, TATEMICHILKUO. Design and realization of “suspendome” system [ J]. Journal of the IASS, 1999, 40 ( 131 ) :179-192.
- [ 4 ] KANG WENJIANG, CHEN ZHIHUA, LAIN HEUN, et al. Analvand design of the general and out most-ring stiflened SUS-pend dome structures [ J]. Eneering Structus, 2003, 25:1685-1695
- [ 5 ] KAWAGUCHI MAMORU, ABE MASARU, TATEMICHLLKUO. Design test and realization of “suspendome” system [ J]. Journal of IASS, 1999, 40 ( 131 ) :179-192.
- [ 6 ] 秦亚丽. 弦支穹顶结构施工方法研究和施工过程模拟分析[D]. 天津大学, 2006.
- [ 7 ] 李咏梅, 王勇刚, 张毅刚. 索承网壳结构成形阶段拉索张拉顺序的研究[J]. 施工技术, 2007, 36(3):24-27. LI YONG-MEI, WANG YONG-GANG, ZHANG YI-GANG. Research on tension sequence during the stage of form finding for cable-supported lattice shell structure[J]. Construction Technology, 2007, 36 ( 3 ) : 24-27.
- [ 8 ] 王永泉, 郭正兴, 罗斌, 等. 常州体育馆大跨度椭圆形弦支穹顶预应力拉索施工[J]. 施工技术, 2008, 37(3):33-36. WANG YONG-QUAN, GUO ZHENG-XING, LUO BIN. Prestressed cable construction of large-span elliptic suspended-deme in Changzhou gymnasium [ J ]. Construction Technology, 2008, 37(3):33-37.
- [ 9 ] 秦杰, 王泽强, 张然, 等. 2008 奥运会羽毛球馆预应力施工监测研究[J]. 建筑结构学报 2007, 28(6):83-91. QIN JIE, WANG ZE-QING, ZHANG RAN, Study on prestress construction monitoring of the badminton gymnasium for 2008 Olympic Games [ J ]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6):83-91.
- [ 10 ] 刘学春, 张爱林, 葛家琪, 等. 施工偏差随机分布对弦支穹顶结构整体稳定性影响的研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6):76-82. LIU XUE-CHUN, ZHANG AI-LIN, GE JIA-QI, et al. Study on the influence of construction deviation random distribution on the integral stability of suspend-dome [ J ]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6):76-82.
- [ 11 ] 刘慧娟. 弦支穹顶结构施工过程模拟分析研究[D]. 同济大学, 2009.

(编辑 胡 玲)

## 更正启事

本刊 2010 年第 4 期第 96 页“Fenton-SBR 工艺对渗滤液溶解性有机物的去除特性”一文作者“刘智萍<sup>1</sup>, 郭劲松<sup>1</sup>, Abdulhussai A Abbsa<sup>1,2</sup>, 方芳<sup>1</sup>”更正为:“刘智萍<sup>1</sup>, 郭劲松<sup>1</sup>, Abdulhussain A Abbas<sup>1,2</sup>, 方芳<sup>1</sup>”, 目录及英文摘要作相应更正, 特此声明。

《土木建筑与环境工程》编辑部