

引用格式:王耀,张浩,张峰,等.大跨度钢结构屋盖预应力反张拉施工方法及过程优化[J].工业建筑,2025,55(8):268-276. WANG Yao, ZHANG Hao, ZHANG Feng, et al. Construction Methods and Process Optimization of Prestressed Reverse Tension for Long-Span Steel Structure Roofs: tensioning for large span steel structure roof[J]. Industrial Construction, 2025, 55(8): 268-276 (in Chinese). DOI: 10. 3724/j. gyjzG23112217

大跨度钢结构屋盖预应力反张拉施工方法及过程优化^{*}

王耀¹ 张浩¹ 张峰¹ 李洋¹ 李栋² 鲍敏³

(1. 中建海峡建设发展有限公司,福州 350015;2. 福州大学土木工程学院,福州 350116;3. 北京建筑工程研究院有限责任公司,北京 100039)

摘 要 对于中小型钢结构体育场馆,为了减小施工过程对结构状态的影响,充分利用钢结构自身具有一定弹性变形范围这一特点,提出了一种针对中小型体育场馆的预应力施工工艺。工艺的主要特点是先施工主桁架,再施工屋顶网架,主桁架施工完成后通过下拉索将其下拉至一定位置(弹性范围内),将屋顶网架与主桁架进行连接,待全部连接完成后,将下拉索拉力逐级解除,主桁架在下拉索拉力解除后,出现一定程度的回弹,回弹过程中,屋顶网架形成预应力结构,主桁架和屋顶之间形成稳定的整体。通过数值模拟,对该施工工艺进行过程分析,提出最优预应力施工方案。

关键词 线性;大跨度;钢结构;屋盖;下拉;回弹

Construction Methods and Process Optimization of Prestressed Reverse Tension for Long-Span Steel Structure Roofs

WANG Yao¹ ZHANG Hao¹ ZHANG Feng¹ LI Yang¹ LI Dong² BAO Min³

(1. Strait Construction and Development Co., Ltd., Fuzhou 350015, China; 2. College of Civil Engineering of Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 3. Beijing Construction Engineering Research Institute Co., Ltd., Beijing 100039, China)

Abstract: For small and medium-sized steel structure sports venues, a prestressed construction technology is proposed to reduce the impact of the construction process on the structural state and to fully utilize the characteristics of the steel structure itself, which has a certain elastic deformation range. The main feature of the process is to first construct the main truss, followed by the roof grid. After the main truss is completed, it is pulled down to a specific position (within its elastic range) using a pull-down cable, and the roof grid is connected to it. After all connections are completed, the tension in the pull-down cable is gradually released in stages. After the pull-down cable tension is released, the main truss experiences a certain degree of rebound. During this process, the roof grid forms a prestressed structure, and a stable whole is formed between the main truss and the roof. A numerical simulation was performed to analyze the construction process and determine the optimal prestressed construction scheme.

Keywords: linear; long span; steel structure; roof; pull down; rebound

0 引 言

随着经济社会的快速发展,大跨度空间结构尤

其是大跨度体育场馆的需求急速增长。相对于钢筋混凝土结构,钢结构因其具有自重轻、跨度大、造

^{*} 国家自然科学基金项目(52108121)。

第一作者:王耀,正高级工程师,主要从事工程项目管理相关工作,405983916@qq.com。

通信作者:张浩,副教授,主要从事结构教学及科研工作,zhanghao08022@163.com。

收稿日期:2023-11-22

型独特等方面的优势,已被广泛应用于大型体育场馆等建(构)筑物。

对于大跨度钢结构而言,预应力技术的引入使空间钢结构得到了极大的发展,由于可以充分提高结构刚度,使得此类结构体系的跨越能力较常规的刚性结构体系有了质的提高^[1-2]。无论从概念设计、结构分析还是施工过程,预应力空间钢结构得到了国内外众多学者的关注,罗尧治等^[3-4]在讨论索杆张力结构体系特性的基础上,从平衡方程出发,计算确定索杆张力结构的初始预应力分布。同时介绍了预应力空间网格结构在工程中的应用形式、设计思想以及拉索作用的方式和效果^[5]。

在对空间钢结构施加预应力过程中,常规的施工工艺一般是对柔性构件施加拉力,使相互连接的构件成为整体刚度的结构,典型结构如张弦结构。这种结构形态在施工过程中存在明显的阶段性,各阶段的荷载状况、几何形态和边界条件等都发生变化,施工过程中的受力状态与各施工步对应的时间表现出非线性^[6]。

如果对结构特点和施工过程不了解,有可能会引起严重的后果,如结构形状失控,索力与设计偏差较大等,直接影响结构的安全性^[6]。因此对这种结构来说,施工的主要目标是如何实现设计要求的索力和结构形态^[7],即施工过程中的找形。找形分析通常贯穿屋盖结构的施工全过程,从钢结构构件的就位拼装到预应力的施加方案,直到最终提供钢结构的安装定位及预应力的逐级加载。在找形分析研究方面,袁行飞^[7]在刚体位移假设的基础上,通过拆杆法来模拟过程施工并确定了各个阶段的施工控制参数。董石麟等^[8]以某一空间结构为研究对象,采用动力松弛法对不同施工方法进行了施工过程模拟全过程分析。姜群峰^[9]通过采用控制悬链线单元索段原长的方法来模拟索穹顶结构的成形过程,并对过程进行了分析。葛家琪等^[10]以北京奥运会羽毛球馆屋盖结构为研究对象,通过采用张拉环索的方法对施工全过程进行了仿真分析。还有很多学者在钢结构预应力施工及设计方面进行了研究^[11-20],如从算法优化的角度研究了预应力空间结构的变形和弹塑性稳定。

预应力劲性悬索屋盖适用于跨度较大的场馆类项目,具有结构形式轻盈,建筑空间能得到充分利用等优点。这种结构类型在施工过程中大多采用构件安装于预应力施加分步进行的施工工艺中,

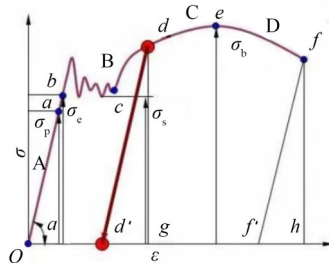
难点在于结构体系复杂、工艺复杂、施工过程对结构状态影响较大等方面。为了简化劲性悬索施工工艺,对传统预应力施工工艺进行改进,充分发挥钢结构自身具备一定的弹性变形性质,设计了一种新的结构体系。这种体系的理念是通过钢桁架的下拉回弹来实现预应力的获取,同步可实现构件的安装就位。这种工艺与传统预应力施工工艺有着本质上的不同,相应的找形分析和预应力施工技术尚属空白。通过数值模拟,对这种施工技术进行过程分析,评估结构的安全性和稳定性,提出最优预应力施工方案。

文章首先介绍了这种预应力施工技术的理念以及过程中参数控制,再结合霞田体育馆工程案例,介绍了如何通过主桁架下拉再回弹使屋顶结构获取预应力的具体施工步骤。施工前,先用有限元软件进行了数值模拟,得到了优化状态下的张拉控制参数,再按照控制参数进行张拉和放张。通过监测结果与模拟结果对比,验证施工方案的可行性和合理性。在悬索屋盖施工工艺基础上进行了简化,以期提高安全性和经济性。

1 反张拉预应力理念及过程控制

1.1 反张拉预应力理念

钢材的应力-应变曲线见图1,变形过程可划分为4个阶段,分别为弹性阶段(A)、屈服阶段(B)、强化阶段(C)以及颈缩阶段(D)。



σ_p 为线弹性阶段强度; σ_e 为非线弹性阶段强度; σ_s 为强化阶段强度;
 σ_b 为强化阶段极限强度。

图1 钢材应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of steels

由图1可知, Oa 段为直线,应力 σ 与应变 ε 在此段为线性关系,两者之间符合胡克定律(Hooke's law),关系式表示为:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

式中:比例系数 E 为弹性模量,即图1中的A阶段,材料在该阶段发生变形后可恢复到原来的状态。

采用通过桁架回弹获取预应力的方法适用于类似图2所示的单层钢结构屋盖。其整体结构包括主桁架、钢结构屋盖、固定支座、下拉索等部分。依据此种思路使屋盖钢结构获得预应力,其具体思路是:当主桁架安装完毕之后,利用下拉索将其进行一定程度的下拉(弹性范围内),再与屋盖钢结构相互连接,待全部连接完成之后再再将下拉索解除,此时利用主桁架的回弹可使屋盖钢结构获得预应力。

从力学机理上解释,采用这种结构类型,竖向荷载通过屋面传递给横向索,水平反力由边拉索和边柱提供,用来和横向索内力形成力偶,抵抗力矩。

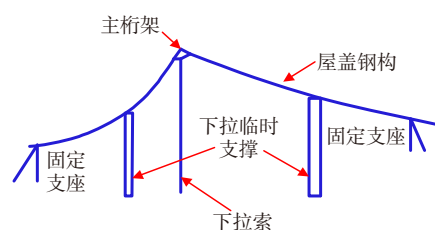


图2 单层屋盖结构获取预应力示意

Fig. 2 Schematic diagram of obtaining prestress for the single-layer roof structure

在竖直方向,由于回弹力的存在,相当于增加了下部支撑,通过这种方式来实现跨度增大的目的,详见图3。

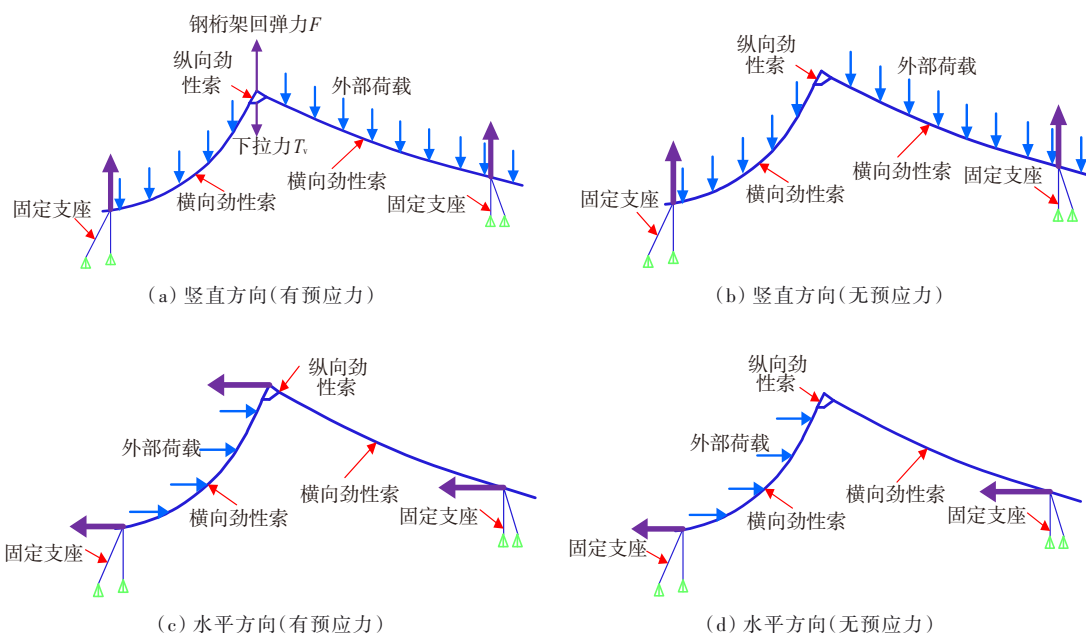


图3 竖直方向和水平方向力的平衡机制

Fig. 3 Balance mechanism of vertical and horizontal forces

同时这种结构形式是对常规的劲性杆件加柔性拉索预应力结构的改进,采用全劲性杆件预应力结构体系,在增大跨度的同时,使建筑更具有空间感。体系示意图见图4。

采用柔性拉索为劲性杆件形成整体刚度的过程中,需要进行严格的找形分析,结构变形对初始状态有一定的影响,必须在变形后的形状上再建立平衡关系,而全劲性杆件则可以较好地克服这些不足之处。

通过桁架下拉,切断下拉索使桁架回弹,屋面钢结构获取预应力的过程详见表1。

2 主桁架回弹获取预应力案例——霞田体育馆

2.1 工程介绍

霞田体育馆项目在设计过程中,遵循“蔓藤城市”设计理念,最大限度保留山体绿地,构筑生态网络,建设体育公园和宜居园区。屋面结构采用了双向悬垂结构体系来实现这种理念,造型新颖。屋盖结构为双曲面钢结构空间结构,整体结构体系为双向悬垂结构体系,顶部为主桁架,采用四肢空间网格,两端分别由一根三合一钢柱支撑,两端三合一钢柱之间设置两根摇摆柱,其主要作用是在主桁架下拉过程中,使变形更加协调。

两侧屋盖结构采用单层杆件,一端与主拱连

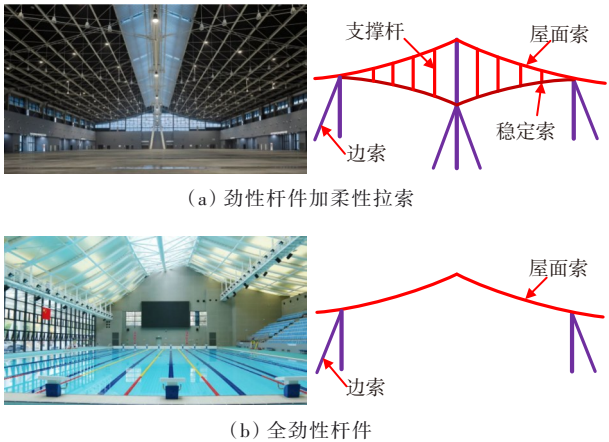


图 4 预应力结构体系
Fig. 4 Prestressed structural system

表 1 每步的施工内容

步骤	施工内容	示意
第一步	安装主桁架和平面网架(两者之间处于断开状态),在主桁架上安装下拉索(主桁架与屋盖钢结构处于断开状态)	
第二步	利用下拉索将主桁架分级张拉至设定值,然后将两侧屋盖钢结构与主桁架连接	
第三步	拆除下拉索,主桁架发生回弹,带动屋盖钢结构发生向上位移,从而使屋盖钢结构获得预应力	

接,一端与两侧人字形柱连接,人字柱的作用主要起固定支撑作用,平面屋架与人字形柱之间采用铰连接。

为了提高结构的整体稳定性,在与主桁架平行的方向两侧设置屋面交叉拉索,与主桁架垂直的方向设置前部、中部和后部屋面交叉拉索。平面尺寸约 109 m×63 m,一侧高度约 26.9 m,另一侧高度约 20.9 m,两侧高差为 6 m,人字柱之间的间距为 4.2 m。模型二维及三维示意图 5,其中标红部分

为交叉拉索。

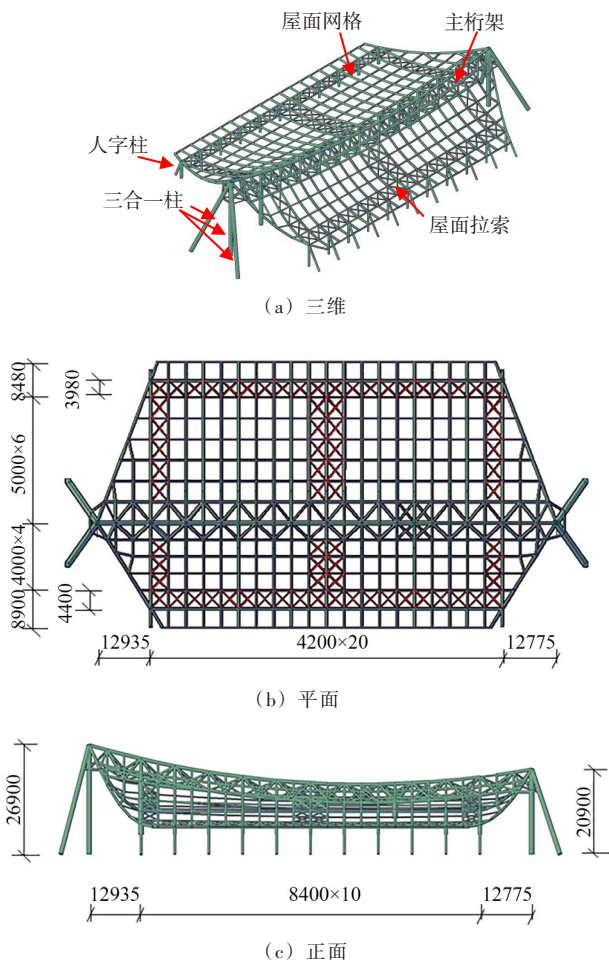


图 5 霞田体育馆平面和立面 mm
Fig. 5 Plan and elevation of Xiatian Stadium

主桁架采用四肢空间网格结构,高度约 4.5 m,主要包括腹杆、上弦杆和下弦杆,结构形式见图 6。

主桁架、屋盖钢架、人字柱、摇摆柱及三合一柱等支撑体系均采用涂抹防火层的圆钢管,不同类型组成构件的几何及物理参数见表 2。

2.2 主桁架下拉索布置

主桁架下拉过程由低松弛下拉索完成,每根下拉索由 7 股 15.2 mm 钢绞线组成,上端通过焊接在主桁架上的锚与主桁架相连,下端与预埋件相连。拉索通过液压千斤顶拉紧,钢丝拉索如图 7 所示。

下拉索布置在东西向第 4~17 节点之间,总计 14 根下拉索,下拉索之间间距为 4.2 m,东西侧摇摆柱与相邻拉索之间的距离均为 4.2 m。临时下拉索布置如图 8 所示。

下拉索的张拉过程中,拉索拉力由下拉油表进行控制,应变由应变片控制,应变片布置在主桁架

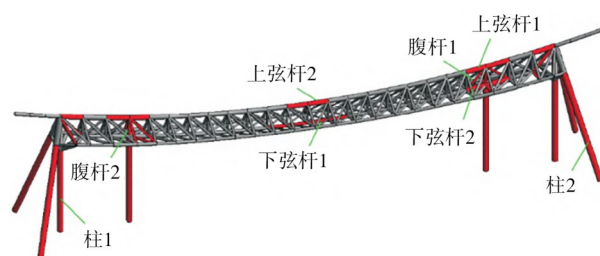


图6 主桁架空间网格结构

Fig. 6 Spatial grid structure of the main truss

表2 构件的几何和物理参数

Table 2 Geometric and physical parameters of components

构件	截面尺寸	内径 d / mm	厚度 t /mm	弹性模量 E /MPa
主桁架上下弦杆		420	15	2.06×10^5
屋顶钢架		197	8	2.06×10^5
人字柱		234	8	2.06×10^5
摇摆柱		520	15	2.06×10^5
三合一柱		580	10	2.06×10^5

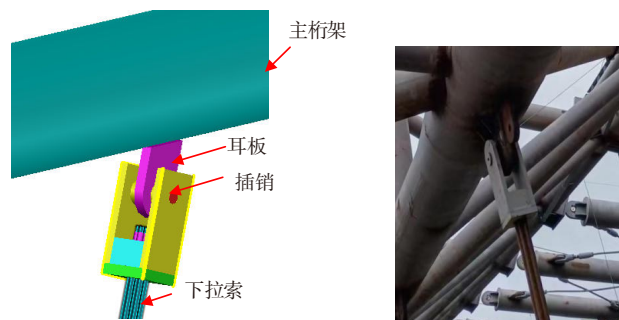


图7 下拉索模型

Fig. 7 Pull-down cable model

上,布置如图9所示,总计8个监测点。

3 理论分析、数值模拟及监测

下拉过程控制通过理论分析、数值模拟和现场监测相结合的方式进行。首先理论分析确定索力施加的最大值,确保桁架的变形处在弹性范围之内。然后通过数值模拟确定拉索的下拉值,最后与现场监测结果进行对比,验证分析的合理性。

3.1 理论分析

按照图纸建立游泳馆结构的整体模型,构件规格、边界条件等和图纸一致,见图10。

下拉桁架为四肢空间网架结构,见图11。

将下拉桁架的截面面积进行代换,可以表示为:

$$A = \frac{4\pi[(d+2t)^2 - d^2]}{4} = 4\pi t(d+t) \quad (2)$$

主桁架的物理和力学参数见表3。

将主桁架构件的物理力学参数代入式(3),计算得到 $w_{\max} = 1.51 \text{ m}$ 。

$$w_{\max} \leq \frac{L_0}{2E} \sqrt{f_y^2 + 2Ef_y} \quad (3)$$

式中: L_0 为桁架跨度。

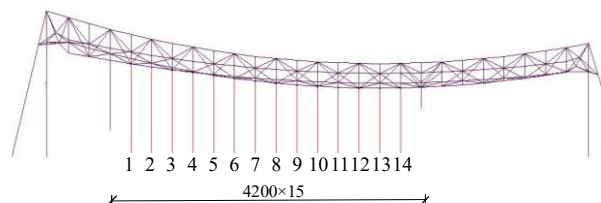


图8 临时下拉索的布置 mm

Fig. 8 Arrangements of temporary pull-down cables



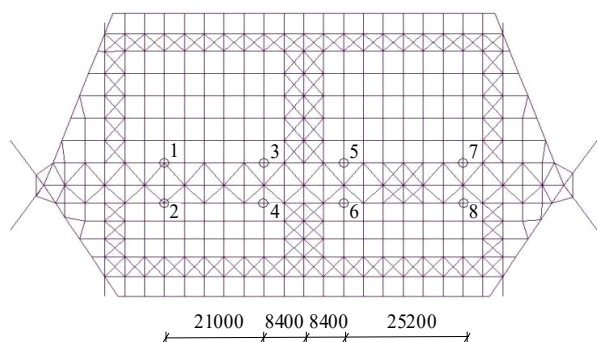


图 9 监测点的布置 mm

Fig. 9 Arrangements of monitoring points

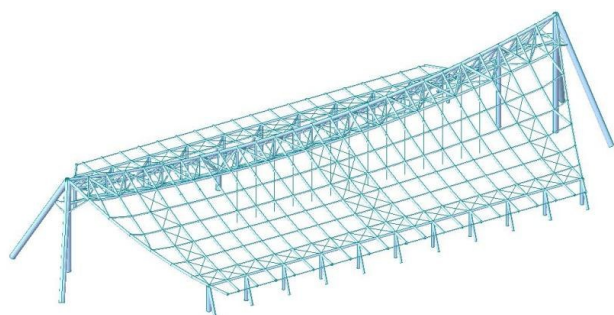


图 10 霞田体育馆 3D 模型

Fig. 10 3D model of Xiatian Stadium

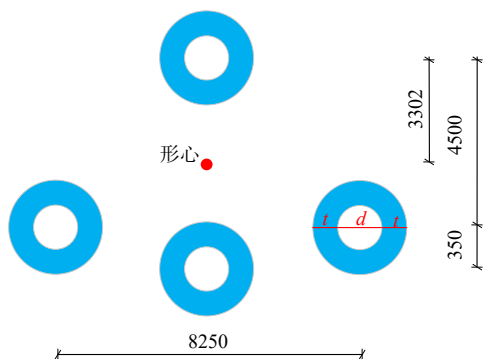


图 11 四肢下拉主桁架 mm

Fig. 11 Four-limb pull-down main truss

表 3 主桁架组成构件的几何和物理参数

Table 3 Geometric and physical parameters of components of the main truss

厚度 t/mm	内径 d/mm	面积 A/mm^2	屈服强度 f_y/MPa	弹性模量 E/MPa	惯性矩 I/mm^4
0.015	0.42	0.082	235	2.06×10^5	0.665

安全系数取 10, 则下拉过程中的位移控制值 $w_{\max-\text{con}}$ 应满足:

$$w_{\max-\text{con}} \leq \frac{1.51}{10} = 0.151 \text{ m} \quad (4)$$

通过挠度理论, 得到单根拉索的下拉值 F_i 应满足的条件为:

$$F_i \leq 600 \text{ kN} \quad i = 1, 2, \dots, 14 \quad (5)$$

3.2 数值模拟及监测

通过数值模拟调整拉索的下拉值。下拉索的调整以模拟得到的最大下拉值 $w_{\max}$ 与理论分析得到的最大下拉值 $w_{\max}$ 之间的误差率作为目标函数, 如式(6)所示。

$$\left| \frac{w_{\max, \text{理论值}} - w_{\max, \text{模拟值}}}{w_{\max, \text{理论值}}} \right| \leq 10\% \quad (6)$$

张拉过程按照分组分级进行张拉控制, 共分三级, 下拉力分别对应控制值的 30%, 70% 以及 100%。两边对称张拉, 将下拉索划分为 4 组, 第 1 组为拉索 6~9, 第 2 组为拉索 4、5 及拉索 10、11, 第 3 组为拉索 2、3 及拉索 12、13, 第 4 组为拉索 1、14, 每一级张拉顺序见表 4。

表 4 拉索分组分级张拉顺序

Table 4 Grouped and graded tensioning sequence of cables

分级	下拉索张拉顺序
第一级	第 1 组 → 第 2 组 → 第 3 组 → 第 4 组
第二级	第 4 组 → 第 3 组 → 第 2 组 → 第 1 组
第三级	第 1 组 → 第 2 组 → 第 3 组 → 第 4 组

下拉过程中, 拉索力需及时进行动态调整。通过有限元软件模拟, 得到优化后的各下拉索在不同级别的下拉值, 如图 12 所示, 从而得到张拉过程最大下拉力为 509 kN。

主拱在下拉索张拉过程中发生的位移云图见图 13。

3.3 放张过程控制

放张过程采用分组进行放张, 从中间往两边依次进行, 将拉索分为 7 组, 第 1 组为拉索 7、8, 第 2 组为拉索 6、9, 第 3 组为拉索 5、10, 第 4 组为拉索 4、11, 第 5 组为拉索 3、12, 第 6 组为拉索 2、13, 第 7 组为拉索 1、14。放张过程中, 及时对拉索拉力进行动态调整。通过有限元软件模拟, 得到优化后的各下拉索在不同级别的放张值, 如图 14 所示。

临时拉索拆除后的位移见图 15, 可知位移值均未超出控制值 $w_{\max-\text{con}}$ 。

模拟分析得到的监测点下拉值与回弹值见表 5。可见: 下拉过程中, 监测点 4 在第三级下拉阶段出现最大下拉值 112 mm, 其两侧逐渐减小; 待与两侧屋盖结构连接之后进行回弹, 监测点 3 在回弹阶段出现最大下拉值 88 mm, 最大回弹值出现在监测点 4, 回弹量为 45 mm。

不同点在不同阶段的变形实测值见表 5。可看

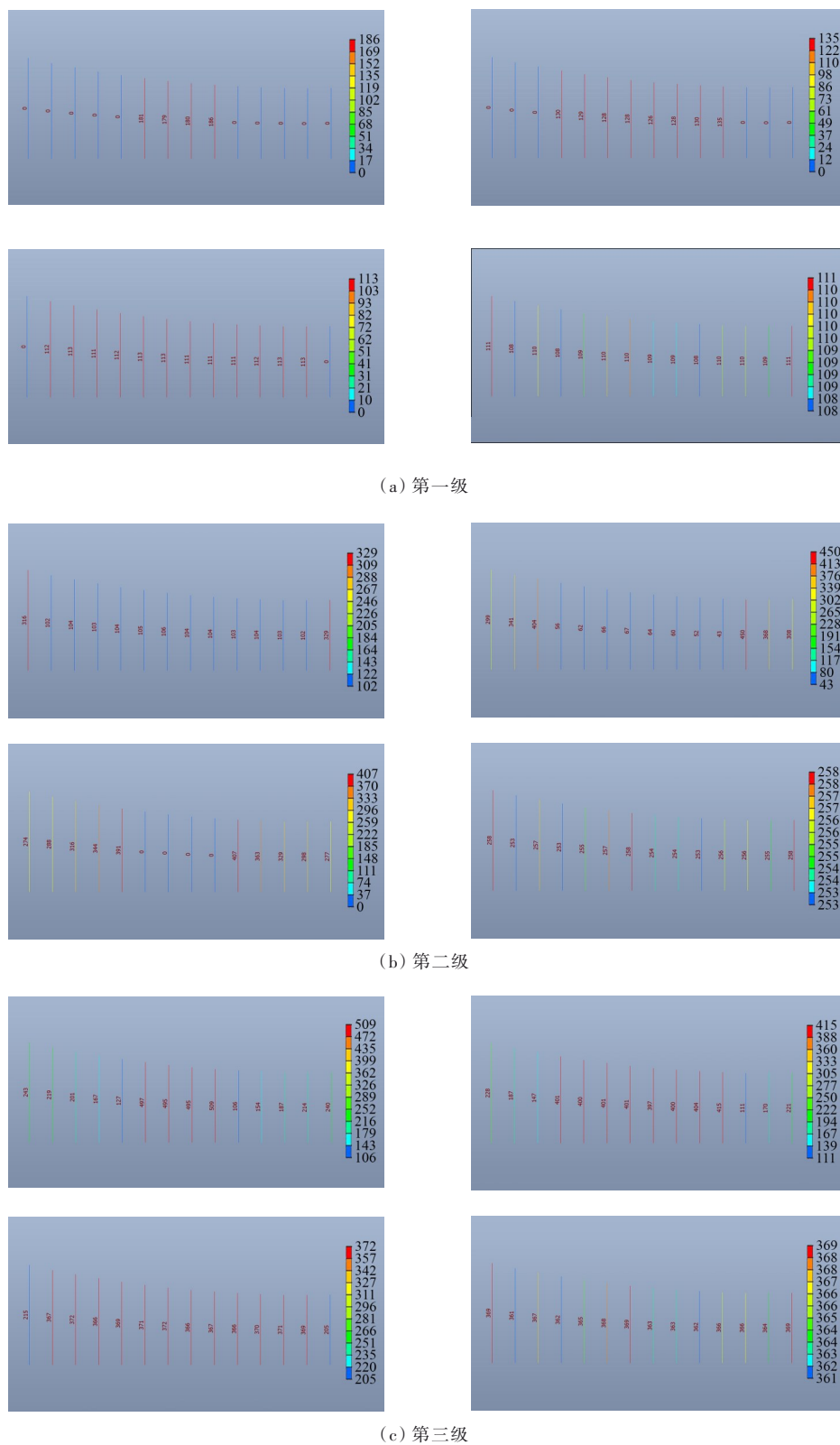


图 12 分组分级张拉 kN
Fig. 12 Grouped and graded tensioning

出,监测点 4 在第三阶段的最大竖向位移为 103 mm,略小于模拟值,且其左右两侧逐渐减小。

回弹阶段在监测点 4 出现最大值 53 mm,桁架回弹量为 50 mm。同时,桁架在各监测点均出现了一定

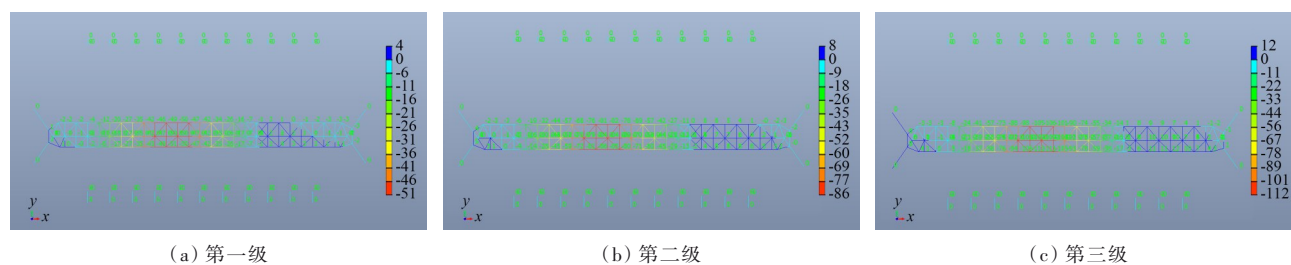


图 13 分级张拉完成之后的竖向位移 mm

Fig. 13 Vertical displacements after graded tensioning

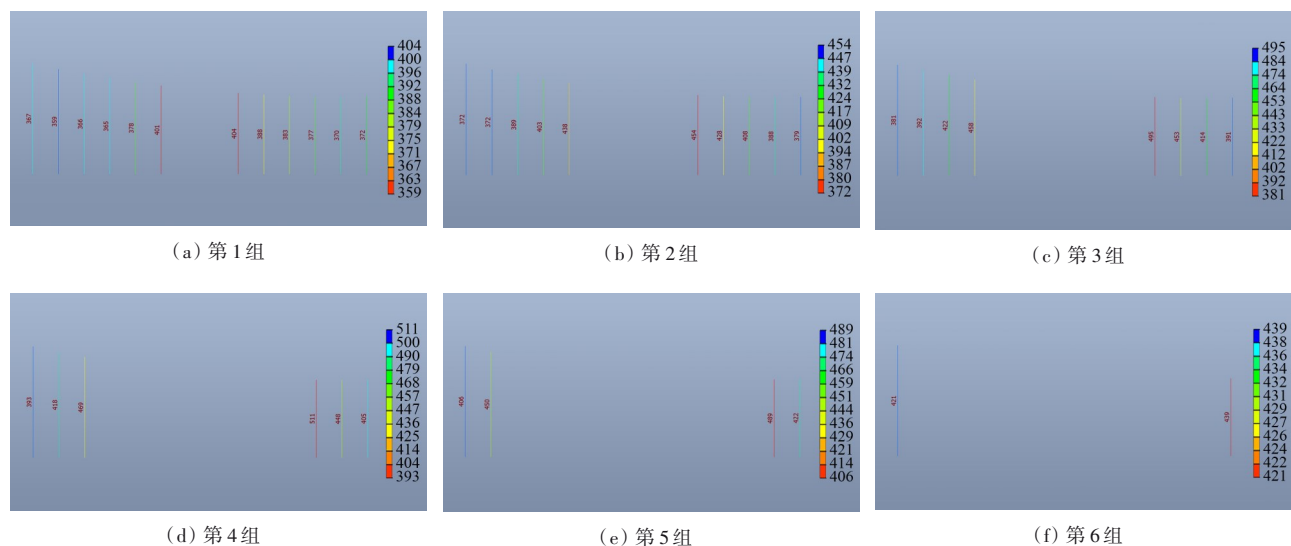


图 14 各组拉索拆除后索力 kN

Fig. 14 Tension forces after removal of each group of cables

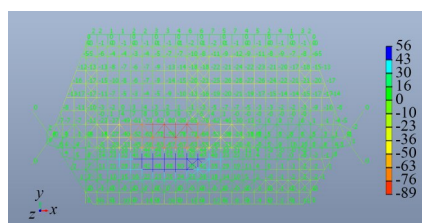


图 15 临时拉索拆除后竖向位移 mm

Fig. 15 Vertical displacements after temporary cable removal

程度的回弹,说明屋盖钢结构整体处于受拉状态。

4 结 论

基于钢结构存在一定的弹性变形范围,设计了一种基于线性应力、应变关系的大跨度钢结构屋盖预应力施加方法。通过采用柔性拉索对劲性桁架下拉,切断下拉索之后,桁架结构产生回弹。在回弹过程中,桁架结构获得预应力。与采用柔性拉索为劲性桁架提供预应力相比,不需要严格的找形分析,过程操作简单。

将该方法应用于霞田体育馆项目,主要过程分

表 5 监测点的模拟与实测变形值

Table 5 Simulated and measured deformation values of monitoring

		points							
		监测点							
施工阶段		1	2	3	4	5	6	7	8
模拟下拉 阶段竖向 位移	第一级	-20	-17	-49	-51	-34	-35	0	3
	第二级	-32	-26	-81	-86	-57	-60	5	8
	第三级	-41	-37	-105	-112	-74	-78	9	11
模拟回弹阶段竖向 位移		-37	-20	-88	-67	-62	-45	8	9
模拟回弹值		4	17	17	45	12	33	1	2
实测下拉 阶段竖向 位移	第一级	-33	-31	-52	-50	-30	-27	8	12
	第二级	-41	-43	-60	-75	-48	-65	12	15
	第三级	-55	-57	-76	-103	-68	-75	19	20
实测回弹阶段竖向 位移		-31	-35	-46	-53	-45	-40	12	11
实测回弹值		24	22	30	50	23	35	7	9

竖向位移向下为负;回弹值=最大下拉值-最大回弹值。

为 3 步:第一步主桁架施工完毕之后,利用下拉索将其下拉(拉力和位移控制使其处于弹性范围内),下拉值与桁架跨度、屈服强度和弹性模量有关。桁架

跨度和屈服强度越大,下拉值越大。弹性模量越大,下拉值越小。第二步将主桁架与两侧屋面网格进行刚性连接。第三步从中间往两侧逐步解除拉索,主桁架出现往上回弹,最大回弹量为 50 mm,中心部位回弹量要大于左右两侧,整体处于受拉状态。

参 考 文 献

- [1] 陆赐麟. 预应力钢结构学科的新成就及其在我国的工程实践[J]. 土木工程学报,1999,32(3):3-10.
- [2] 陆赐麟,尹思明,刘锡良. 现代预应力结构[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [3] 罗尧治,董石麟. 索杆张力结构初始预应力分布计算[J]. 建筑结构学报,2000,21(5):59-64.
- [4] 罗尧治,董石麟,严慧,等. 索杆张力结构初始预应力分布计算[C]//第九届空间结构学术会议论文集,杭州:2000.
- [5] 罗尧治,曹国辉,董石麟,等. 预应力拉索网格结构的设计与研究[J]. 土木工程学报,2004,37(3):52-57.
- [6] 郭彦林,刘学武. 钢结构施工力学状态非线性分析方法[J]. 工程力学,2008,25(10):19-24.
- [7] 袁行飞. 索穹顶结构的理论分析和试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2000.
- [8] 董石麟,袁行飞,赵宝军,等. 索穹顶结构多种预应力张拉施工方法的全过程分析[J]. 空间结构,2007,13(1):3-14.
- [9] 姜群峰. 松弛索杆体系的形态分析和索杆张力结构的施工成形研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
- [10] 葛家琪,张国军,王树. 弦支穹顶预应力施工过程仿真分析[J]. 施工技术,2006,35(12):10-13.
- [11] 杨霄,蒋炳丽,庄艺斌,等. 长春奥林匹克公园体育场屋盖索膜及钢结构设计[J]. 建筑结构,2018,48(24):7-12.
- [12] 范重,刘先明,胡天兵,等. 国家体育场钢结构施工过程模拟分析[J]. 建筑结构学报,2007,28(2):134-143.
- [13] 庄艺斌,蒋炳丽,杨霄,等. 长春奥林匹克公园体育场空间曲线环梁的受力分析及预应力应用[J]. 建筑结构,2018,48(24):13-18.
- [14] ZHANG Q, WANG X Y, YANG R G, et al. Prestress design for cable-strut structures by grouping elements [J]. Engineering Structures, 2021, 244, 112010.
- [15] AYDN Z. Size, layout and tendon profile optimization of prestressed steel trusses using Jaya algorithm[J]. Structures, 2022, 40: 284-294.
- [16] LI X, HE J F, LI M, et al. Modal analysis method for tensegrity structures via stiffness transformation from node space to task space[J]. Engineering Structures, 2020, 203, 109881.
- [17] MA S, CHEN M H, SKELTON R E. Dynamics and control of clustered tensegrity systems[J]. Engineering Structures, 2022, 264, 114391.
- [18] CHHUN P, SELLIER A, LACARRIERE L, et al. Incremental modeling of relaxation of prestressing wires under variable loading and temperature [J]. Construction and Building Materials, 2018, 163: 337-342.
- [19] ABDULKARIM S J, SAEED N M. Nonlinear technique of prestressing spatial structures[J]. Mechanics Research Communications, 2023, 127, 104040.
- [20] 张洋,陈朝晖,杨帅. 大型钢网架穹顶结构弹塑性稳定性分析[J]. 土木与环境工程学报,2022,44(5):189-196.
- [21] 李廉锟. 结构力学[M]. 北京:高等教育出版社,2010.