复合张弦结构整体提升及张拉分析施工关键技术研究

单　宇*，贾尚瑞，张之浩，姚　杰
（浙江精工钢结构集团有限公司，浙江 绍兴　312030）

摘　要： 萍乡奥体中心体育馆钢结构屋盖采用了弦支穹顶与张弦梁复合结构体系。该结构形式复杂、施工场地受限，施工方案的选择直接影响场馆的施工质量与造价。文中结合有限元分析结果，从安全性、经济性、施工可行性的角度出发，对比弦支穹顶结构采用分块吊装与局部整体提升两类施工方案，并对两种张弦结构的施工张拉顺序进行对比分析。结果表明：弦支穹顶结构采用局部整体提升工艺，其综合经济性与成型质量更优；提升阶段对结构下部拉索施加一定的预拉力，可有效改善结构刚度不足引发的不均匀变形问题；复合张弦结构需先完成全部钢结构安装后方可开展张拉作业，该工程选择优先张拉张弦梁、后张拉弦支穹顶的工序，对结构受力与工期管控更有利。同时也总结了该工程累积提升、分级张拉、全过程施工监测等核心施工技术，整套施工流程安全可控、方案合理可行，可为同类复合张弦结构工程提供施工思路与实践参考。

关键词： 张弦结构；弦支穹顶；张弦梁；累积提升施工；施工张拉顺序
中图分类号： TU758.11，TU391　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1671－9379(2026)07－0112－11
DOI：10.13969/j.jzgjgjz.20241218003

Research on Key Construction Technologies for Integral Lifting and Tensioning Analysis of Hybrid String Structures

*SHAN Yu**, *JIA Shangrui*, *ZHANG Zhihao*, *YAO Jie*
(Zhejiang Jinggong Steel Building Group Co.,Ltd., Shaoxing 312030, China)
*Corresponding author: 1059324075@qq.com

Abstract: The steel roof of the Pingxiang Olympic Sports Center gymnasium adopts a hybrid design of a suspen-dome and a beam string structure. Due to the complex structural design and limited site construction conditions, the selection of construction scheme for the gymnasium is of great significance for construction quality and cost. Combined with the finite element analysis results, a scheme comparison was made between sectional hoisting and partial integral lifting of the suspen-dome from the perspectives of safety, economy, and construction feasibility, and the construction tensioning sequences of the two string structures were analyzed. The results indicate that the partial integral lifting for the suspen-dome has better cost-effectiveness and quality reliability. At the same time, applying a certain level of pretension to the lower cables of the structure can mitigate uneven deformation caused by insufficient structural stiffness during the lifting process. For the hybrid string structure, the installation of steel structure must be completed before tensioning. In this project, tensioning the beam string structure prior to the suspen-dome is more advantageous for the structural stress and construction schedule. This article also summarizes other key construction technologies in this project, including cumulative lifting, graded tensioning and monitoring of the construction process. The construction process is safe and controllable, and the scheme is reasonable and effective, which can provide solutions and construction experience for similar structural buildings in the future.

Keywords: string structure; suspen-dome; beam string structure; cumulative lifting construction; construction tensioning sequence

收稿日期：2024-12-18

作者简介：
单　宇(1994—)，男，硕士，工程师，主要从事钢结构施工方面的研究。E-mail：1059324075@qq.com。(通信作者)

随着大跨空间结构技术的不断发展，多种适配大跨度建筑的张弦结构得到广泛应用，其中张弦梁结构、弦支穹顶结构凭借优异的力学性能与便捷的施工工艺应用最为普遍。两类结构均由日本学者提出，通过在结构中布置高强度拉索优化整体内力分布，增大钢材强度的利用率，使其适配各类大跨度公共建筑[1]。

20世纪90年代，张弦梁结构与弦支穹顶结构相继被引入国内。早期广州国际会展中心[2]、上海浦东国际机场T1航站楼[3]等工程采用了张弦梁结构，最大跨度可达百米；2001年建成的天津港保税区商务中心大堂[4]为国内首座弦支穹顶建筑，屋盖直径达35.4 m。二十余年间，两类结构在国内各地体育馆、会展中心等建筑中持续推广、迭代发展[5-7]。目前，国内相关研究多集中于结构成型后的受力性能[8-9]，针对施工阶段力学行为的分析较少；弦支穹顶结构常规施工流程为先钢结构吊装、后预应力张拉，对采用整体提升等其他施工工艺的研究相对较少；同时多数建筑仅单一采用某一类张弦结构，同时应用两种及以上结构的工程十分少见。

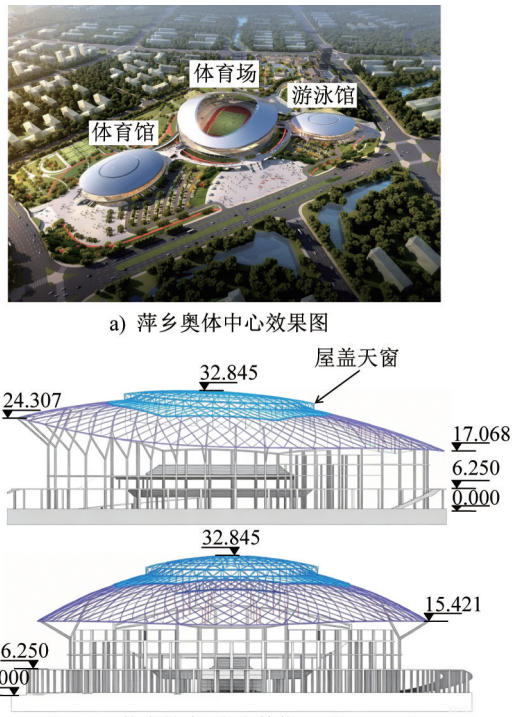
萍乡奥体中心体育馆作为江西省2026年省运会篮球、羽毛球赛事专用场馆，钢结构屋盖同时采用弦支穹顶结构与张弦梁结构。该复合结构虽造型新颖，但受力复杂、可借鉴的施工经验较少。为解决场馆施工难题，本文对比了弦支穹顶分块吊装、局部整体提升两种施工方案，分析带预拉力整体提升工艺的控制效果。同时设计4种组合张拉工序，筛选对结构受力影响最小的张拉方案。经有限元模拟与现场施工变形监测验证，本文整套施工技术满足设计指标、施工全过程安全可控；其中局部弦支穹顶带预拉力整体提升、成型后统一张拉的施工工艺，国内暂无同类工程先例，可为后续同类复合张弦结构工程提供技术思路与施工经验。

1　工程概况

萍乡奥体中心总建筑面积约10.70万 m^2，包含体育场、体育馆、游泳馆三个场馆及相关配套设施。其中体育馆位于项目西南区域，下部主体为混凝土结构，上部屋盖为双曲面钢结构。屋盖长轴标高区间为17.068～32.845 m，短轴标高区间为15.421～32.845 m（图1），上部整体为单层网壳，天窗位置局部增设双层网壳。

体育馆钢结构组成与断面形式如图2、图3所示。体育馆屋盖整体划分为内场、外场两大区域。其中，内场屋盖由弦支穹顶结构与张弦梁结构组成，两结构通过一榀平面桁架上弦杆衔接，桁架两端固接于土建结构柱；外场屋盖全部采用单层网壳体系。屋盖网壳、桁架等构件均采用圆管截面，截面规格为P114×8～P600×40，钢材牌号为Q355B。

弦支穹顶结构最大跨度为76.5 m，由八边形环桁架、



a）萍乡奥体中心效果图

b）体育馆立面图(单位：m)

图1　萍乡奥体中心体育馆

Fig. 1　Pingxiang Olympic Sports Center gymnasium

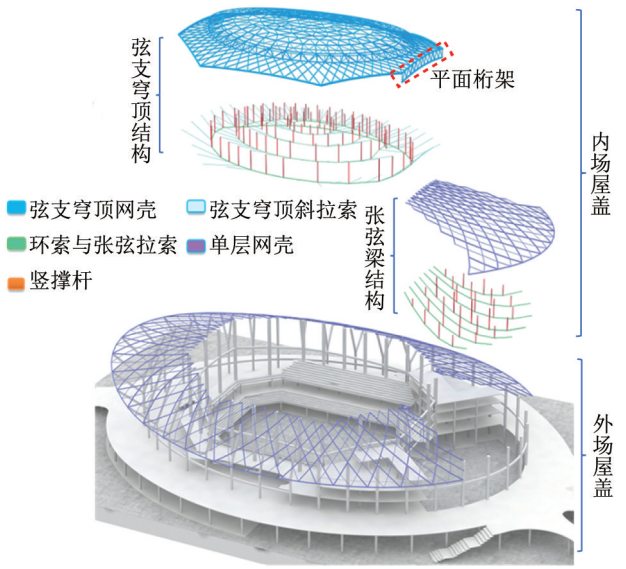


图2　体育馆钢结构组成

Fig. 2　Composition of steel structure of the gymnasium

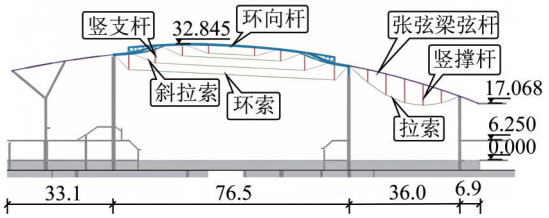


图3　屋盖钢结构断面图（单位：m）

Fig. 3　Sectional diagram of roof steel structure (unit: m)

上部网壳、下部索杆体系构成；索杆体系包含4圈环向索、径向索与撑杆，拉索总计110根，撑杆最大高度为6.3 m；张弦梁结构最大跨度为36.0 m，拉索总计7根，撑杆最大高度为6.6 m。两类结构拉索均采用高强度低松弛预应力热镀高钒钢绞线，钢绞线极限抗拉强度分为1 670 MPa、1 770 MPa两档，截面规格为D30～D68。

2 施工难点

结合结构体系与现场施工条件，体育馆屋盖施工难点集中于内场区域，具体如下：

(1) 体育馆内场平面桁架将空间分割为弦支穹顶、张弦梁两个相对独立的区域；弦支穹顶结构下方施工前提前浇筑土建看台，施工场地十分局促，叠加屋盖下挂马道、临时支撑体系占用空间，机械吊装、杆件补装作业空间严重受限。此外，屋盖网壳未成型前整体刚度较弱，同时由于屋盖安装标高较高、曲面造型独特，结构安装需设大量临时支撑，若全程采用单一的分块吊装施工工艺，会给施工便捷性与经济性带来不利影响。

(2) 本场馆构件全部采用相贯焊节点。该工程存在大量拉索销轴板与杆件交汇的节点(图4)，此类节点焊缝密集、隐蔽焊缝占比高、施工工序复杂、焊接工程量大，现场焊接施工管理难度高。预应力结构对焊缝质量要求严苛，焊缝成型质量直接决定整体受力安全，因此尽可能减少高空焊接作业，更利于施工质量管控。

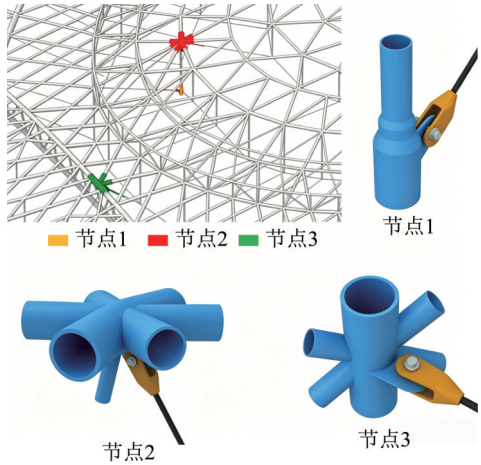


图4 屋盖节点

Fig. 4 Joints of roof

(3) 该工程施工工序链条长、前期筹备工作量大。从钢结构拼装、整体提升、分级张拉到临时支撑拆除，结构历经多阶段受力转换；由于张弦梁结构与弦支穹顶结构距离较近，张拉作业会互相产生影响。因此为满足设计要求，实际施工过程中各施工工况需进行有限元分析，同时配套全过程实时监测与调整。

3 屋盖施工工序研究

3.1 计算模型及相关参数

采用Midas Gen有限元软件建立了如图5所示的整体计算模型，预应力拉索(弹性模量E为1.95×10^5 MPa，线膨胀系数α为1.2×10^{-5} ℃$^{-1}$，泊松比v为0.3)采用桁架单元模拟，其余钢构件采用梁单元模拟。施工模拟荷载主要考虑结构自重与拉索初拉力，建模阶段按设计给定初始内力来施加索力(图6)。

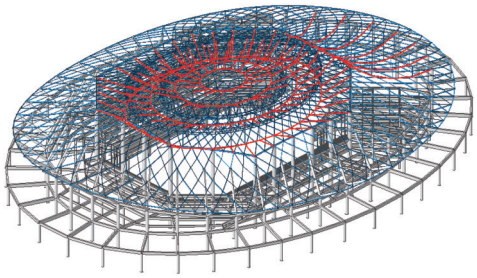


图5 整体计算模型

Fig. 5 Overall calculation model

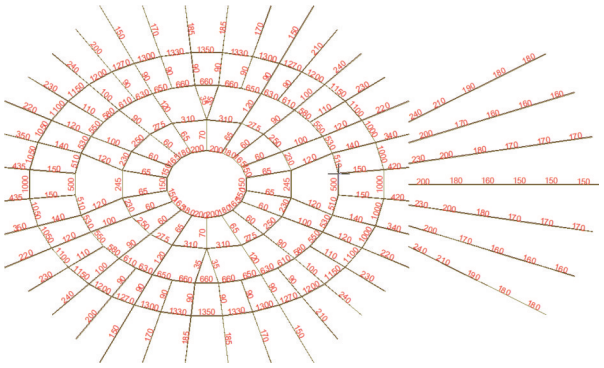


图6 拉索设计初拉力值(单位：kN)

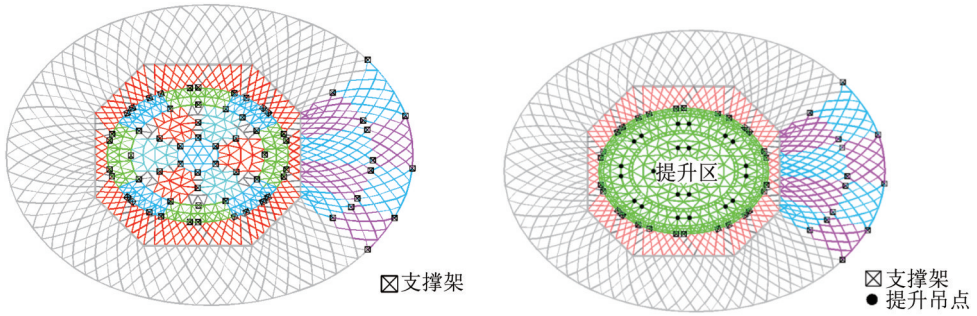
Fig. 6 Initial tension value of cable design (unit: kN)

3.2 内场钢结构施工方案比选

结合体育馆工程特点与施工难点，针对内场钢屋盖拟定三种施工方案：

(1) 方案一为全区域采用分块吊装施工方案。将内场屋盖划分为37个吊装单元，采用“地面拼装、高空原位拼装”思路，以支撑架作为临时支撑，按图7a)的施工顺序从左至右逐块完成屋盖单元的高空原位拼装作业。待所有屋盖分块全部安装完毕后，再进行马道、撑杆、拉索等下部构件的安装，最后进行张拉施工，该方案的临时措施总用钢材投入量约1 500 t。

(2) 方案二和方案三采用“弦支穹顶结构局部整体提升，其余结构分块吊装”的方式施工，提升范围如图7b)所示。考虑到结构成型前整体刚度较弱，吊点应均匀布置于网壳高刚度节点位置，提升架体之间预留施工操作空间，共设置2个单吊点、10个双吊点；马道、撑杆等构件



a) 方案一：支撑架布置及分块划分　　b) 方案二、方案三：提升架布置及分块划分

图7　钢结构施工方案

Fig. 7　Construction schemes for steel structure

可随提升过程一并安装，待提升就位后仅高空补装少量杆件即可开展张拉。该种方案下临时措施总用钢量约1 200 t。值得注意的是。方案二与方案三的主要区别在于提升过程中位于提升区结构下方的内侧3圈拉索是否安装及施加预拉力。

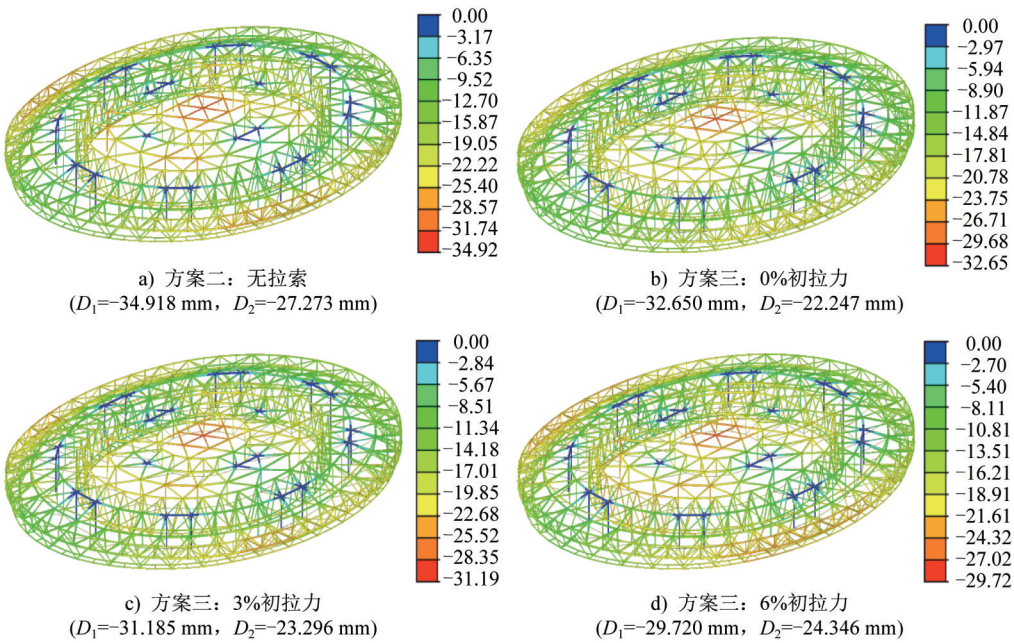
表1从施工工期、施工质量、资源投入量等三个方面对三个方案进行了对比分析。

表1　施工方案对比分析

Table 1　Comparison and analysis of construction schemes

优劣分析	方案一	方案二及方案三
优点	施工工艺简单，可参照的施工经验较多。	(1) 可极大减少高空作业量，施工质量容易保障； (2) 结构施工互不干涉，有利于缩短施工工期； (3) 措施总投入量小，可降低施工成本，同时提高施工效率。
缺点	(1) 高空作业量大，焊接质量难以保证； (2) 由内向外依次施工，施工工期较长； (3) 支撑架布置较密集，影响施工效率； (4) 措施总投入量大，经济性较差。	(1) 可借鉴经验较少； (2) 网壳刚度小，提升时结构变形较大。

由表1可知，采用局部整体提升思路的方案二、方案三在施工质量、造价、工期等方面具备明显优势。通过有限元模拟对比方案二(无拉索)、方案三(装拉索，拉索预拉力分别取初拉力的0、3%、6%、9%、12%、15%)共7种提升工况(图8)。计算结果显示，提升过程中结构在x方向和y方向的水平变形较小(均小于5 mm)，相较于竖向

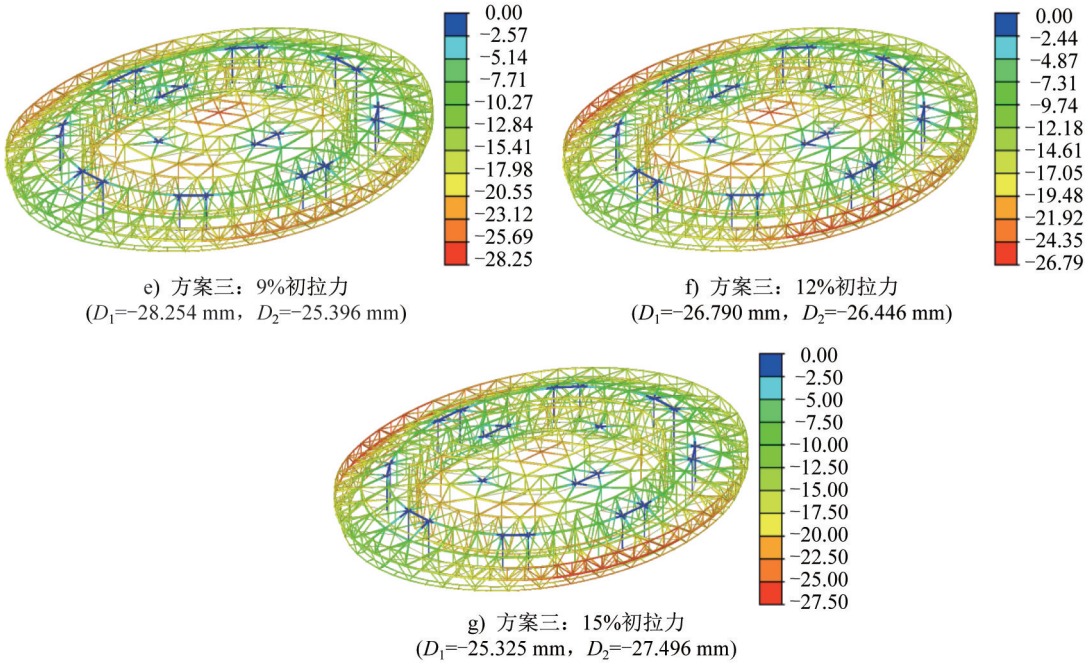


a) 方案二：无拉索
(D_1=−34.918 mm，D_2=−27.273 mm)

b) 方案三：0%初拉力
(D_1=−32.650 mm，D_2=−22.247 mm)

c) 方案三：3%初拉力
(D_1=−31.185 mm，D_2=−23.296 mm)

d) 方案三：6%初拉力
(D_1=−29.720 mm，D_2=−24.346 mm)



e) 方案三：9%初拉力
(D_1=−28.254 mm，D_2=−25.396 mm)

f) 方案三：12%初拉力
(D_1=−26.790 mm，D_2=−26.446 mm)

g) 方案三：15%初拉力
(D_1=−25.325 mm，D_2=−27.496 mm)

图8 方案二与方案三提升区域竖向变形（单位：mm）

Fig. 8 Vertical deformation in the lifting zone of scheme 2 and 3 (unit: mm)

变形其变形可控、调节难度低，故重点分析z方向竖向变形规律；此外，结构在提升过程中竖向变形较大的区域主集中于结构中部（变形值D_1）与边缘区域（变形值D_2）（图9），不同预拉力下D_1、D_2的变形变化趋势见图10。

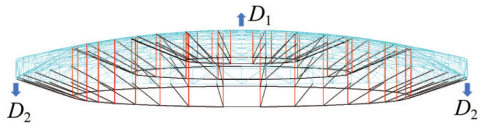


图9 拉索作用下D_1和D_2变形趋势

Fig. 9 Deformation trend of D_1 and D_2 under the action of cable

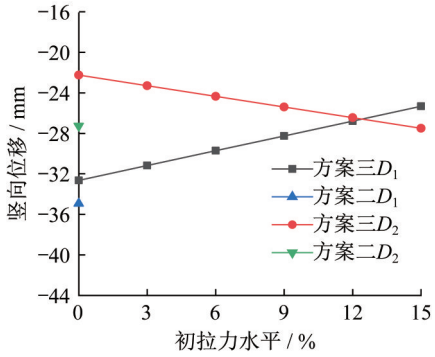


图10 不同预拉力下D_1和D_2变化曲线

Fig. 10 Change curves of D_1 and D_2 under different pretension forces

由图10可知，0%初拉力时，预装拉索后单层网壳转变为弦支穹顶结构，自重作用下吊点间网壳下挠产生的荷载可通过撑杆传递至环索，索杆体系可约束上部网壳竖向变形，整体刚度得到提升；对比方案二（无拉索），方案三（0%初拉力）中部最大竖向变形D_1减少了6.5%（2.268 mm），结构各位置竖向变形也更均匀；在不同水平预拉力作用下，撑杆对结构中部产生向上的推力，拉索对结构边缘产生斜向下的拉力；D_1随预拉力增大而增大，D_2则相反；D_1、D_2的变化趋势与施加的预拉力呈线性相关，说明结构自身刚度不随预拉力大小发生明显变化。该规律与文献[1]结论一致。为保证提升全过程结构变形同步性，选取使结构整体变形最小的预拉力作为施工控制值，变形差计算公式见式(1)：

$$D_Z=|D_1-D_2| \tag{1}$$

式中：D_Z为提升区中心与边缘位置竖向变形差值。

当预拉力为12%初拉力时，此时变形差D_Z仅为0.344 mm，此工况下结构杆件最大应力比为0.64，满足设计要求（图11）。

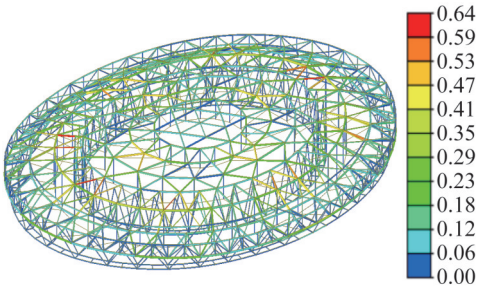


图11 提升工况杆件应力比

Fig. 11 Stress ratio of members in lifting case

3.3　张拉施工方案比选

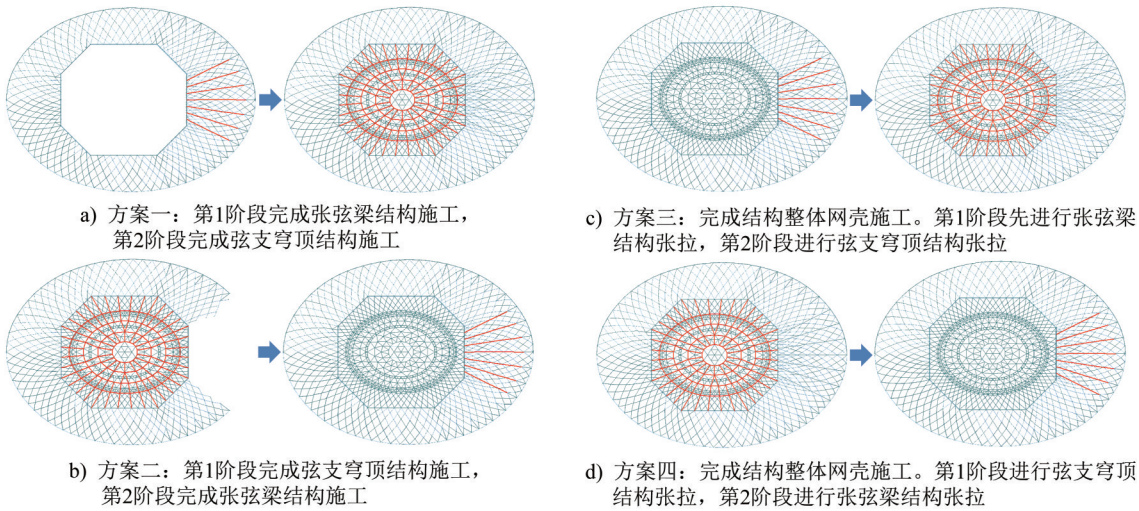
该工程采用等效降温法[10]模拟拉索张拉全过程。具体方法为，首先赋予拉索初拉力（按图5所示设计要求），利用钢材热胀冷缩特性，在安装阶段通过升温使拉索拉力降为0，待拉索安装完成后再通过降温使拉索恢复设计初拉力。具体计算公式见式(2)、(3)：

$$\sigma = \alpha \Delta t E \tag{2}$$

$$P = A\sigma \tag{3}$$

式中：Δt为施加预应力所需温度差；E为材料弹性模量；α为钢材线膨胀系数；σ为通过施加温度差所产生的应力；A为拉索截面面积；P为拉索拉力。为保证结构受力安全，正式张拉前拉索位置的钢结构需安装完成，且所有对接焊缝探伤检验须合格。

该工程弦支穹顶结构与张弦梁结构协同受力，但两类结构张拉进度难以完全同步，受张拉工序、场地条件和施工设备限制。基于此，设计4种张拉顺序施工方案，各方案划分为钢结构安装、预应力张拉两个阶段（图12）。分析可知，结构第1阶段施工时受力状态与设计状态偏差最大，因此提取各方案第1阶段杆件最大应力比汇总于表2中。



a) 方案一：第1阶段完成张弦梁结构施工，第2阶段完成弦支穹顶结构施工

b) 方案二：第1阶段完成弦支穹顶结构施工，第2阶段完成张弦梁结构施工

c) 方案三：完成结构整体网壳施工。第1阶段先进行张弦梁结构张拉，第2阶段进行弦支穹顶结构张拉

d) 方案四：完成结构整体网壳施工。第1阶段进行弦支穹顶结构张拉，第2阶段进行张弦梁结构张拉

图12　四类张拉施工方案

Fig. 12　Four types of tensioning construction schemes

对比表2中方案一和方案二、方案三和方案四两组计算结果可知，优先张拉弦支穹顶结构均会导致网壳部分杆件应力比大幅超限，存在构件失效风险；原因是弦支穹顶结构拉索的设计初拉力远大于张弦梁结构拉索的设计初拉力，两类结构并行布置时，先张拉索力更小的张弦梁可分担内力，避免杆件应力超标；对比表2中方案一和方案三、方案二和方案四两组计算结果可知，整体网壳全部拼装成型后再张拉，杆件最大应力比均有不同程度降低，这是由于成型后的网壳整体性更强、内力传递更均匀，可规避局部杆件应力集中问题。

表2　各方案第1阶段杆件最大应力比

Table 2　Maximum stress ratio of components in phase 1 for each scheme

张拉方案	方案一	方案二	方案三	方案四
应力比	0.87	1.58	0.84	1.27

提取方案一、方案三最终施工步有限元分析结果，与结构一次成型设计状态对比，规定平面桁架跨中最大水平位移，以向弦支穹顶侧变形为正、向张弦梁侧变形为负，对比数据见表3。结果表明，两种施工方案成型后结

表3　方案一和方案三最终施工步结果对比

Table 3　Comparison of final construction step results between scheme 1 and scheme 3

施工方案	张弦梁结构		弦支穹顶结构		平面桁架	
	最大起拱高度/mm	最大拉索索力/kN	最大起拱高度/mm	最大拉索索力/kN	跨中最大水平变形/mm	支座剪力/kN
一次成型态	69.19	230.57	46.33	1 345.95	−1.83	187.79
方案一	60.94	218.85	48.66	1 320.12	9.02	192.75
方案三	61.42	233.33	52.38	1 339.96	−1.14	204.06

构的起拱高度、受力状态、索力与设计成型态偏差均较小。方案一中施工第1阶段桁架弦支穹顶侧无侧向约束，张弦梁结构张拉后桁架产生较大水平位移；而在第2阶段，后续网壳安装后变形无法完全复位，因此最终桁架跨中最大位移大于设计成型态与方案三桁架跨中最大位移，方案一对施工精度控制难度更高（图13）。同时方案一要求弦支穹顶网壳滞后施工，与前文钢结构提升施工工序冲突；方案三工序衔接顺畅，更利于工期管控，因此确定采用方案三的施工张拉顺序。按该方案施工完成后，使用荷载工况下杆件的最大应力比为0.83，满足设计要求（图14）。

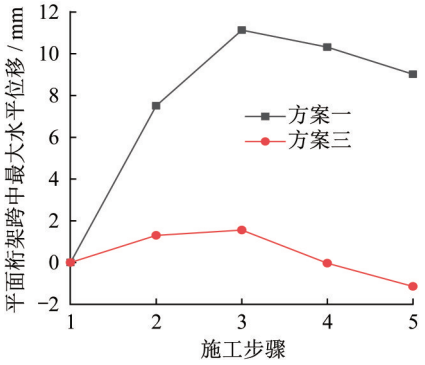


图13 桁架跨中最大水平位移随施工步变化曲线

Fig. 13 Curves of maximum horizontal displacement in the midspan of the truss with construction steps

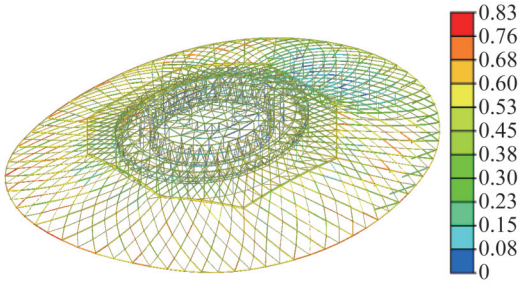


图14 使用荷载工况下杆件应力比云图

Fig. 14 Stress ratio contour of members under service load conditions

4 施工关键技术

4.1 累积提升施工技术

4.1.1 累积提升施工方案

体育馆内场屋盖施工区域划分如图15所示。由于提升单元平面投影与土建看台重叠，为保障提升连续作业，将提升区域分为两个部分：双层网壳天窗划分为提升2区，于看台顶面拼装；天窗内侧单层网壳为提升1区，在场地中心拼装（相对标高为±0.000），两分区拼装完成后，通过提升的方式使提升1区与提升2区在空中对接，再整体累积提升至设计标高。弦支穹顶结构天窗外侧划分为12个吊装分块（吊装1区），张弦梁结构共划分为8个吊装分块（吊装2区），图中黑色杆件为各施工区域或分块之间的连接补杆。

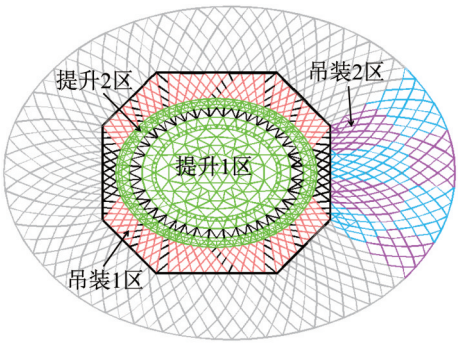


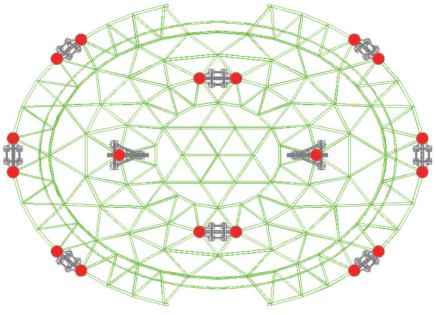
图15 体育馆内场施工区域划分

Fig. 15 Division of construction areas of the gymnasium

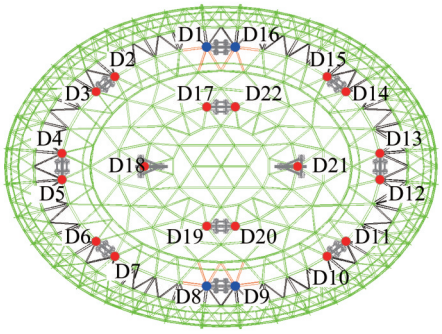
内场钢结构整体施工顺序为：吊装1区分块吊装→提升2区看台拼装→提升1区与吊装2区同步施工→提升区累积提升，吊装区吊装、补杆→钢结构施工完成。

4.1.2 提升架设置

本次提升作业中，提升1区网壳质量为127.5 t，第一次提升高度为6.25 m；提升1区与提升2区对接后整体总质量为305.0 t（含马道、撑杆及拉索等构件），两次累积提升总高度为29.25 m。第一次提升受看台干涉限制仅布置18个吊点（红色吊点）；待第一次提升对接完成后，再布置剩余4个提升点（蓝色吊点），如图16所示。



a) 第一次提升吊点布置

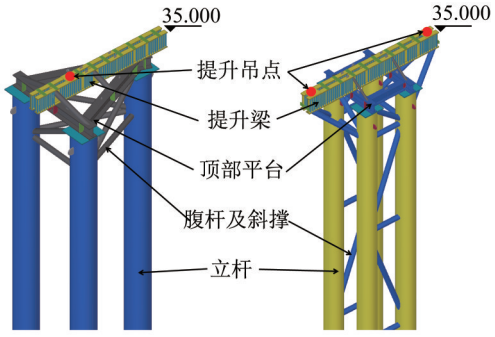


b) 第二次提升吊点布置(D*为提升吊点编号)

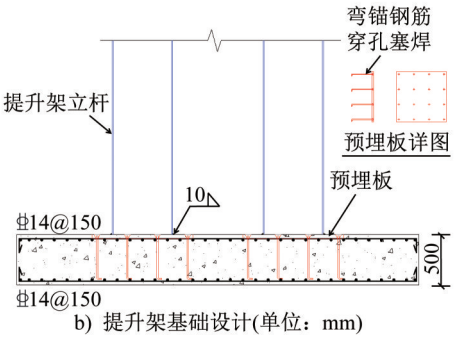
图16 提升吊点布置

Fig. 16 Arrangement of lifting points

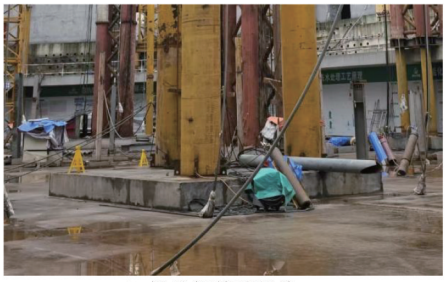
单提升吊点采用三肢格构式提升架，提升架立杆规格为P800×10，顶部平台钢梁规格为H390×300×10×16；双提升吊点采用四肢格构式提升架，提升架立杆规格为P630×10，顶部平台钢梁规格为H294×200×8×12。为保证施工安全，在提升架基础浇筑0.5 m厚的钢筋混凝土承台（承台布置双层双向C14@150钢筋）；立杆与承台预埋钢板穿孔焊接，以确保架体在提升时保持稳定。所有提升架顶标高为35 m，钢材牌号为Q355B（图17）。



a) 单吊点提升架和双吊点提升架上部设计(单位：m)



b) 提升架基础设计(单位：mm)



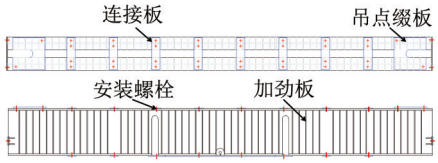
c) 提升架基础照片

图17　提升架构造

Fig. 17　Construction of lifting frame

本次提升主梁采用双拼装配式工字钢，工字钢规格为H340×250×9×14，两侧腹板设置间距为100 mm、宽度为80 mm的加劲板，双梁通过连接板与安装螺栓拼接。位于提升梁顶的吊点缀板通过安装螺栓与钢梁固定，缀板位置可根据实际使用需求进行调整。与传统整体焊接提升梁相比，该提升梁通用性强、拆卸便捷、周转利用率高（图18）。

提升所使用的提升器型号及每台提升器配置的钢绞线数量根据有限元分析结果确定。经分析可知，提升



a) 提升梁深化图



b) 提升梁照片

图18　提升梁

Fig. 18　Lifting beam



a) 第一次提升



b) 第二次提升

图19　累积提升施工

Fig. 19　Cumulative lifting construction

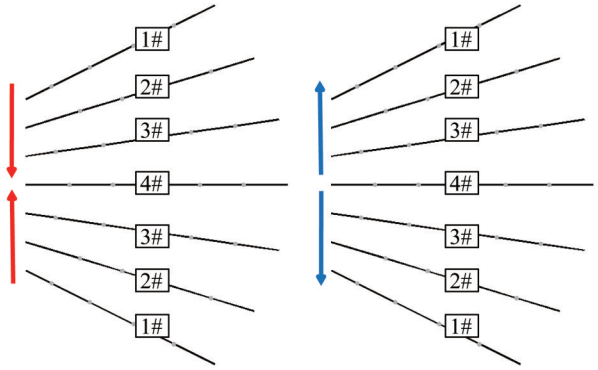
器选用YS-SJ-45穿心式液压提升器，单次提升行程为30 cm；配套钢绞线根据规范规定选用[11]，且单台提升器的钢绞线配置满足安全系数$K\geqslant 3$的要求，最终采用直径为15.2 mm、公称抗拉强度为1 860 MPa的钢绞线。

为保证结构安全，提升时同步控制标准，根据结构特点、过往施工经验、文献[12]中的相关内容等，本次提升规定任意两吊点行程差超过50 mm时液压系统自动停止运行；同时利用提升器单次行程停顿间隙，结合提升反力、位移监测数据动态微调，保障成型精度。提升单元被提升至设计标高后补装间隙杆件，形成整体稳定的受力体系，同步释放提升系统油压，钢绞线完全松弛后累积提升施工完成。

4.2 分级张拉施工技术

累积提升完成后安装剩余拉索。为保证结构均衡受力、避免施工过程中发生“群锁效应”[13]，该工程中张弦结构采用两级张拉的方案施工，以张拉力控制为主、结构变形控制为辅的双控标准。

该张弦梁结构采用单向拉索张拉工艺施加预应力，张拉施工沿跨中拉索对称分4组、两级开展，如图20所示。第一级张拉由两侧向跨中推进，张拉控制力达到设计值的70%；第二级张拉由跨中向两侧补张拉，直至索力达到设计值的100%。

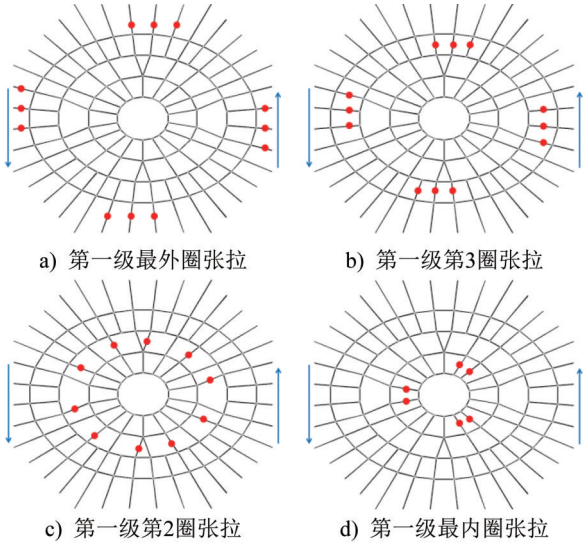


a) 第一级张拉至70%设计拉力 b) 第二级张拉至100%设计拉力

图20 张弦梁结构分级张拉

Fig. 20 Graded tensioning of beam string structure

弦支穹顶采用径向索张拉法施加预应力，张拉工序分为两级。第一级由最外圈向最内圈张拉，索力张拉至设计值的70%，如图21所示；第二级张拉方向与第一级相反，由最内圈向最外圈张拉至100%设计索力。张拉细节如下：外圈、第3圈、最内圈径向索均分三组逆时针依次张拉；第2圈径向索分为两组依次张拉。



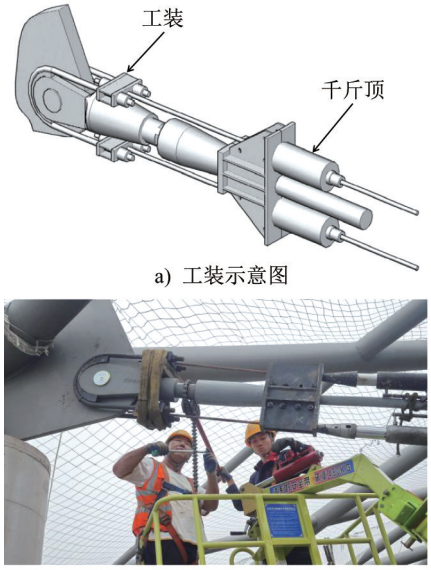
a) 第一级最外圈张拉 b) 第一级第3圈张拉

c) 第一级第2圈张拉 d) 第一级最内圈张拉

图21 弦支穹顶结构第一级张拉

Fig. 21 First tensioning level of suspen-dome structure

张拉设备组件较多，施工时需保证工装形心与拉索轴线重合，避免张拉过程产生偏心受力(图22)。该工程张拉时最多同步配置8台油泵、24台300 kN千斤顶；待油泵供油稳定后开始加压，油压达到钢拉索设计拉力后结合监测数据判断是否实施超张拉，超张拉控制幅度不得大于5%，随后稳压完成钢索张拉。同时需严格控制油泵



a) 工装示意图

b) 张拉照片

Fig. 22 张拉工装与现场施工

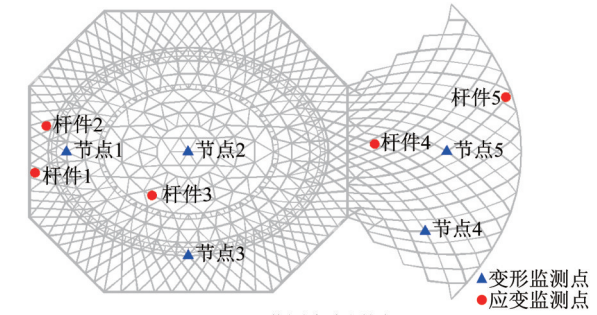
Fig. 22 Tensioning fixture and on-site construction

供油速率，单级张拉供油时长不宜少于0.5 min。鉴于本次张拉采用对称同步张拉工艺，弦支穹顶与张弦梁张拉时，将每一级张拉荷载再拆分为3个小分级；每一小级同步供油加载，加载完毕后全部千斤顶暂停供油，通过分级间歇调整的方式，实现整体同步张拉控制。

4.3 施工变形监测

为检验施工效果，结合有限元分析结果，在体育馆内场钢结构杆件竖向变形、应力比较大的位置布置监测点(图23)。共布设5组应变监测点与5组位移监测点，其中应变监测点采用钢表面振弦式应变计，由测读设备采集应变数据并换算杆件应力；竖向变形监测采用高精度反射片，借助全站仪采集测点坐标，计算结构竖向变形。分别提取钢结构提升完工、张弦梁张拉完工、弦支穹顶张拉完工三个工况的实测数据与有限元模拟结果，汇总至表4、表5开展对比分析。

结果显示，各施工工况下实测监测数据与有限元理论计算结果吻合良好。施工全过程及成型后，仅少量构件实测应力略高于模拟值，但均未超过构件设计应力比限值；各监测点竖向变形实测值与模拟值偏差均在施工允许误差范围内。整体结构安全储备充足，施工全过程安全可控。



a) 监测点布置图



b) 应变计布置



c) 位移反射片布置

图23　监测点布置

Fig. 23　Arrangement of monitoring points

表4　应力监测结果对比

Table 4　Comparison of stress monitoring results　MPa

施工工况	数据类型	杆件1	杆件2	杆件3	杆件4	杆件5
钢结构提升完成	模拟值	−28.6	−17.5	−19.2	−28.2	−18.7
	实测值	−29.4	−16.7	−19.0	−29.6	−19.0
张弦梁结构张拉完成	模拟值	−25.4	−15.8	−19.6	−15.4	22.1
	实测值	−25.0	−15.2	−19.1	−13.3	23.5
弦支穹顶结构张拉完成	模拟值	115.7	120.1	−29.5	−37.4	28.9
	实测值	114.8	119.5	−29.7	−35.9	30.1

表5　竖向变形监测结果对比

Table 5　Comparison of vertical deformation monitoring results　mm

施工工况	数据类型	节点1	节点2	节点3	节点4	节点5
钢结构提升完成	模拟值	−16.4	−50.8	−34.2	−13.5	−22.5
	实测值	−15.5	−55.2	−38.0	−12.8	−25.6
张弦梁结构张拉完成	模拟值	15.9	−51.3	−45.1	38.1	45.3
	实测值	16.2	−55.0	−40.9	40.9	44.7
弦支穹顶结构张拉完成	模拟值	42.1	34.0	−53.8	45.6	49.5
	实测值	44.8	38.2	−55.6	43.1	46.6

5　结论

本文以萍乡奥体中心项目体育馆为研究载体，基于有限元计算结果完成施工方案比选，并通过施工变形监测验证技术可行性，主要结论如下：

（1）针对相贯焊接型弦支穹顶，相较于传统分块吊装方案，采用整体提升施工工艺能够大幅减少高空作业，同步提升施工质量与施工效率，且临时措施投入更少，综合经济效益更优。

（2）对网壳及不同预拉力工况下的弦支穹顶开展整体提升有限元分析发现，体系成型为弦支穹顶后整体刚度相比纯网壳有所提升，但预拉力大小对结构刚度基本无影响。为保证提升阶段结构竖向变形分布更为均匀，该工程将提升预拉力取值为12%初拉力。

（3）复合张弦结构施工需遵循先完成屋盖钢结构安装、再开展预应力张拉作业的要求，避免杆件出现不利受力；张拉作业优先施工设计预拉力较小的索段，防止构件应力比超出限值。

（4）通过研究带预拉力整体提升、分级张拉工序、全过程监测等复合张弦体系关键施工技术，保证了该工程顺利完工，相关技术思路可为同类工程提供设计与施工参考。

参考文献：

[1] 张明山.弦支穹顶结构的理论研究[D].杭州：浙江大学，2004.
ZHANG Mingshan. Theoretical research on suspen-dome[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.(in Chinese)

[2] 孙文波.广州国际会展中心大跨度张弦梁的设计探讨[J].建筑结构，2002，32(2)：54-56.DOI：10.19701/j.jzjg.2002.02.016.
SUN Wenbo. Design and research of large-span beam string structure of Guangzhou international exhibition center [J]. Building Structure, 2002, 32(2): 54-56.DOI: 10.19701/j.jzjg.2002.02.016.(in Chinese)

[3] 汪大绥，张富林，高承勇，等.上海浦东国际机场(一期工程)航站楼钢结构研究与设计[J].建筑结构学报，1999，20(2)：2-8.DOI：10.14006/j.jzjgxb.1999.02.001.
WANG Dasui, ZHANG Fulin, GAO Chengyong, et al. Research and design of steel structure of Shanghai Pudong international airport terminal (first phase of the project) [J]. Journal of Building Structures, 1999, 20(2): 2-8. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.1999.02.001.(in Chinese)

[4] 天津保税区商务交流中心大堂张拉整体屋盖结构[J].建筑结构，2003，33(6)：17.
Tension integral roof structure in lobby of Tianjin Free Trade Zone Business Exchange Center[J]. Building Structure, 2003, 33(6): 17.(in Chinese)

[5] 刘锡良.中国空间网格结构三十年的发展[J].工业建筑，2013，43(5)：103-107.DOI：10.7617/j.issn.1000-8993.2013.05.023.
LIU Xiliang. The development of spatial grid structures in China in the last thirty years[J]. Industrial Construction, 2013, 43(5): 103-107.DOI: 10.7617/j.issn.1000-8993.2013.05.023.(in Chinese)

[6] 董石麟，邢栋，赵阳.现代大跨空间结构在中国的应用与发展[J].空间结构，2012，18(1)：3-16.DOI：10.13849/j.issn.1006-6578.2012.01.003.

DONG Shilin, XING Dong, ZHAO Yang. Application and development of modern long-span space structures in China[J]. Spatial Structures, 2012, 18(1): 3-16. DOI: 10.13849/j. issn. 1006-6578.2012.01.003.(in Chinese)

[7] 陈志华.弦支穹顶结构研究进展与工程实践[J].建筑钢结构进展,2011,13(5):11-20.
CHEN Zhihua.Research progress and engineering practice on suspen-dome structure [J]. Progress in Steel Building Structures,2011,13(5):11-20.(in Chinese)

[8] 王红云,白正仙,刘宁.张弦结构应用及研究综述[C]//庆贺刘锡良教授执教六十周年暨第十一届全国现代结构工程学术研讨会论文集.2011:228-234.
WANG Hongyun, BAI Zhengxian, LIU Ning. Review of application and research on cable-supported structures[C]// Proceedings of the 11th National Symposium on Modern Structural Engineering Celebrating Professor Liu Xiliang′s 60 Years of Teaching.2011:228-234.(in Chinese)

[9] 陈志华.张弦结构体系研究进展及发展展望[J].工业建筑,2015,45(8):1-9,52.DOI:10.13204/j.gyjz201508001.
CHEN Zhihua. Research progress and prospect of cable-supported structures[J].Industrial Construction,2015,45(8):1-9,52.DOI:10.13204/j.gyjz201508001.(in Chinese)

[10] 吴祖咸,高子珺.用等效降温法模拟预应力来实现张弦梁结构找形[J].浙江工业大学学报,2008,36(5):587-590.DOI:10.3969/j.issn.1006-4303.2008.05.027.
WU Zuxian, GAO Zijun. Application of the equivalent lowering temperature method in simulating pre-stress tension procedure to solve the form-search of BSS [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2008, 36(5): 587-590. DOI:10.3969/j.issn.1006-4303.2008.05.027.(in Chinese)

[11] GB/T 5224—2023 预应力混凝土用钢绞线[S].
GB/T 5224—2023 Steel strand for prestressed concrete[S].(in Chinese)

[12] 马强.单层网壳整体提升技术研究与仿真[D].包头:内蒙古科技大学,2020.
MA Qiang. Research and simulation of integral lifting technology of single layer latticed shell [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2020.(in Chinese)

[13] 蒯蓓蕾,赵文达,曾旭,等.混合结构斜拉索分级张拉施工过程模拟[J].建筑结构,2022,52(增刊1):2984-2988.DOI:10.19701/j.jzjg.22S1180.
KUAI Beilei, ZHAO Wenda, ZENG Xu, et al. Simulation of the construction process of the hybrid structure cable tension by stages[J]. Building Structure, 2022, 52(Suppl. 1): 2984-2988.DOI:10.19701/j.jzjg.22S1180.(in Chinese)

(上接第100页)

[19] WOOD G S, KWOK K C S, MOTTERAM N A, et al. Physical and numerical modelling of thunderstorm downbursts [J].Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001,89(6):535-552.DOI:10.1016/S0167-6105(00)00090-8.

[20] HOLMES J D, OLIVER S E. An empirical model of a downburst[J].Engineering Structures,2000,22(9):1167-1172. DOI:10.1016/S0141-0296(99)00058-9.

[21] ABOSHOSHA H, EL DAMATTY A. Dynamic response of transmission line conductors under downburst and synoptic winds [J]. Wind and Structures, 2015, 21(2): 241-272. DOI: 10.12989/was.2015.21.2.241.

[22] KAIMAL J C, WYNGAARD J C, IZUMI Y, et al. Spectral characteristics of surface-layer turbulence [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1972, 98(417): 563-589. DOI:10.1002/qj.49709841707.

[23] 曹舒娅,何琰,孙伟,等.2019年江苏梅汛期一次强对流成因分析[J].气象科学,2022,42(5):602-609.DOI:10.12306/2022jms.0031.
CAO Shuya, HE Yan, SUN Wei, et al. Analysis on the causes of a strong convective weather during Meiyu period over Jiangsu in 2019 [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2022, 42(5):602-609.DOI:10.12306/2022jms.0031.(in Chinese)

[24] 汪之松,徐清禄,方智远,等.下击暴流风场及输电塔风致响应实测研究[J].振动与冲击,2024,43(24):267-276.DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2024.24.029.
WANG Zhisong, XU Qinglu, FANG Zhiyuan, et al. Measurement of downburst storm wind field and wind response of transmission tower[J].Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(24): 267-276. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2024.24.029.(in Chinese)

[25] GB 50135—2019 高耸结构设计标准[S].
GB 50135—2019 Standard for design of high-rising structures [S].(in Chinese)

[26] 何典.下击暴流风场模拟及其对输电塔线的破坏分析[D].武汉:华中科技大学,2016.
HE Dian.Simulation of the downburst wind field and analysis of the damage to the transmission tower-line [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.(in Chinese)

[27] 陈波,胡礼颖,邓静伟.基于模糊性能水准的输电塔线体系抗风可靠性研究[J].武汉理工大学学报,2024,46(7):46-51.
CHEN Bo, HU Liying, DENG Jingwei. Research on wind resistance reliability of transmission tower-line system based on fuzzy performance level [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2024, 46(7): 46-51.(in Chinese)

[28] 雷旭,付兴,肖凯,等.强风作用下输电塔结构不确定性倒塌分析[J].中国电机工程学报,2018,38(增刊1):266-274.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.180665.
LEI Xu, FU Xing, XIAO Kai, et al. Failure analysis of a transmission tower subjected to wind load using uncertainty method[J].Proceedings of the CSEE, 2018, 38(Suppl.1): 266-274.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.180665.(in Chinese)