

DOI: 10.7672/sgjs2026020142

杭州西站云门复杂扭转曲面网壳结构施工 模拟及变形预调分析*

张可¹, 王凌琪², 张恩源², 梁桂², 童精中², 孙会郎³

(1. 浙江中南绿建科技集团有限公司, 浙江 杭州 310052;

2. 浙江大学高性能结构研究所, 浙江 杭州 310058;

3. 杭州中联筑境建筑设计有限公司, 浙江 杭州 310058)

[摘要] 杭州西站云门网壳结构整体呈不规则异形曲面, 部分杆件轴线为空间曲线, 且截面沿轴线呈现扭转, 其复杂受力体系为施工带来挑战。为提出合理的分步施工方案和安装顺序, 控制施工过程误差, 建立该网壳结构精细化有限元模型, 采用生死单元技术对施工过程进行模拟, 获得结构内力和变形响应, 验证所提施工方案的合理性。考虑到结构按照设计位形安装后可能因自重作用产生变形而偏离设计位置, 采用正装迭代法对该网壳结构开展了构件变形预调分析, 得到各结构构件变形预调值, 保证结构最终位形与设计位形一致。

[关键词] 火车站; 网壳; 变形; 预调; 施工技术; 数值模拟

[中图分类号] TU758

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)02-0142-07

Simulation and Deformation Pre-adjustment Analysis of the Complex Twisted Surface Shell Structure of Yunmen at Hangzhou West Railway Station

ZHANG Ke¹, WANG Lingqi², ZHANG Enyuan², LIANG Gui², TONG Jingzhong², SUN Huilang³

(1. Zhejiang Zhongnan Green Construction Technology Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310052, China;

2. Institute of Advanced Engineering Structures, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;

3. CCTN Architectural Design Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: The complex twisted surface shell structure of Yunmen at Hangzhou West Railway Station features an overall irregular free-form surface, where the axes of certain members are spatial curves with cross-sections twisting along the axis. This geometric complexity results in a complicated mechanical system, posing significant challenges for construction. As a large-scale structure, a stepwise construction scheme is adopted, the mechanical state at each step is closely related to the previous state and influences the installation positioning of subsequent steps. To propose a rational construction sequence and ensure strict error control, a refined finite element model was established. A simulation of the construction process was conducted using the element birth and death technique to obtain internal force and deformation responses, validating the rationality of the proposed scheme. Furthermore, considering that the structure might deviate from the design position due to self-weight deformation, a deformation pre-adjustment analysis was performed using the forward iteration method. The deformation pre-adjustment values for the structural members were determined to ensure the final configuration is consistent with the design configuration.

Keywords: railway stations; shell; deformation; pre-adjustment; construction; simulation

0 引言

近年来,随着结构工程的不断发展,大跨空间钢结构因其轻质高强被广泛应用于体育馆、桥梁、

* 浙江中南绿建科技集团有限公司科研课题

[作者简介] 张可,高级工程师,E-mail:59152576@qq.com

[收稿日期] 2025-10-10

机场和车站等工程中^[1-2]。网壳结构作为大跨空间结构的一种,与传统框架结构相比,具有造型优美、轻盈、空间利用率高等优点^[3]。然而,网壳结构施工相比于框架结构存在对设备要求高、精度和质量控制严格等特点。网壳结构如果采用整体提升施工,需使用高达几十米到上百米的吊装机械,因此多采用分块拼装和分步施工^[4]。另外,不同施工方案可能导致施工过程中结构应力存在较大差别,不合理的施工方案甚至可能导致安全事故的发生。

为避免上述情况,工程师们往往预先确定合理的施工方案,进而降低施工风险、保障施工安全。随着计算机科学技术的发展,利用大型程序进行施工模拟成为近年来的热点^[5-9]。但不同于传统的静力加载,施工模拟需考虑时序变动,包括材料时变、边界时变,并考虑不同施工步之间的连续性,即对时变结构进行模拟,给模型建立和分析带来了挑战^[10-14]。此外,施工过程中的重力作用可能导致大跨空间结构在经过多个施工步后的位形严重偏离设计位形,造成安全隐患。因此需要求出结构构件预调值,用于抵消竣工位形与设计位形相差较大的部分,以降低安全风险^[10-14]。然而,对于大跨钢结构而言,需计算出三维空间状态下各杆件预调值,计算分析难度较大^[15]。

近年来,诸多学者对结构施工过程进行了研究^[15-24]。刘学武^[16]利用 ANSYS 软件建立了 CCTV 新台址主楼施工过程仿真模型,阐述了结构在施工过程中的受力机理,给出了杆件预调值。张其林等^[17]对大跨悬臂钢结构施工过程进行了数值仿真分析,计算结果与实测值相比具有较好的精度。张君等^[18]对甘肃天水体育中心游泳馆网壳结构进行了施工模拟研究,利用 MIDAS 软件对结构提升和卸载进行了模拟。郭彦林等^[19]采用 ANSYS 软件对国家体育场大跨屋盖进行了施工模拟,并通过对 2 种落架顺序的计算,确定了合理的施工方案。矫苏宁等^[20]利用 TEKLA 软件对广东某国际会展中心双曲网壳架单元进行吊装施工模拟,分析结果为确保施工质量提供了有力支撑。田黎敏等^[21]对深圳湾体育中心大跨空间钢结构进行了模拟,利用 ANSYS 软件并引入生死单元技术,确定了该工程变形预调值,用于指导构件加工。王秀丽等^[22]对西宁体育馆施工过程进行了仿真分析与健康监测,对保证结构施工安全发挥了重要作用。郭彦林等^[23]对国家体育场钢结构屋盖落架过程进行了模拟分析,通过比较不同施工顺序,阐明了采用“由外到内”落架方案的优越性。刘学武等^[24]通过对 CCTV 新台址主楼

进行数值模拟研究,采用综合迭代计算方法,确定了结构变形预调结果,为施工精度控制提供依据。胡长明等^[25]对法门寺合十舍利塔建立了用于施工过程分析的 ANSYS 有限元模型,并通过与实际工程的监测值比较,验证了模型可靠性。

本文研究对象为杭州西站云门网壳结构(见图 1),其具有独特的非对称曲面构型,且大量杆件轴线为空间曲线,截面沿轴线呈现扭转,无法依据已有研究对网壳结构施工模拟结果判断施工方案的合理性及可行性。因此,有必要建立杭州西站云门网壳结构施工精细化有限元模型,分析施工方案的合理性,并得到结构构件变形预调值。

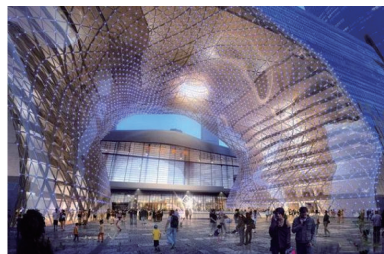


图 1 云门建筑效果

Fig. 1 Architectural effect of Yunmen

本文首先利用 ABAQUS 软件建立杭州西站云门复杂扭转曲面网壳结构精细化模型,模型中考虑了杆件截面扭转方向、施工步之间的连续性,并引入生死单元技术得到了结构在各施工阶段的内力与变形响应。依据分析结果,采用正装迭代法对影响施工安装的变形预调值进行计算分析,得到了结构杆件变形预调值,并给出了相应施工建议。

1 工程概况

杭州西站作为杭州亚运会的重点交通配套工程,承载着迎送四海来客的重要使命。云门项目是杭州西站枢纽南区站城综合体项目中的重要组成部分,其位于杭州西站南侧,占地面积 1.08 万 m²,总建筑面积 9.67 万 m²,结构顶标高 81.350m。

“云门”的设计灵感源自良渚玉琮,通过统一的立面设计手法,营造出兼具现代质感与江南意蕴的“云海”城市聚落氛围,并与杭州互联网“云”科技相呼应。该工程由东、西 2 座 15 层塔楼和空中连体结构组成,其中塔楼采用钢框架和钢支撑结构形式,空中连体采用 3 层钢桁架结构形式。云门结构主要覆盖在 2 座塔楼、空中连廊及屋顶表面的结构上,如图 2 所示。

云门结构包括幕墙钢结构的屋顶单层框架和底部复杂扭转曲面单层网壳,如图 3 所示。底部网壳由上部洞口花瓶状网壳和底部异形不规则曲面

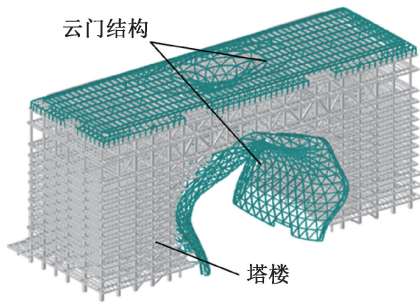


图 2 云门结构
Fig. 2 Yunmen structure

网壳组成。为连接封边圆管和主结构,采用 60 组小短杆进行特殊连接。此外,22 组 V 形撑用于内部支撑和固定网壳,并通过 28 组成品铰支座将网壳最下部与结构基础连接。上部花瓶状网壳通过 8 组成品铰支座与空中连体连接,并与屋顶框架相连。底部曲面单层网壳位于标高 -0.150m 的混凝土地下室顶板上,与屋顶框架连接,高度为 81.35m ,投影长 95m 、宽 68m 。上部花瓶状网壳高 31m ,在腰身处断面为椭圆形,最细处的长短轴分别为 $11.9, 7.9\text{m}$,网壳三角形边长为 $3.1\sim 9.6\text{m}$ 。网壳结构中除封边圆管和支撑杆外,主要杆件采用 $\square 500\times 200\times 14\times 14$ 箱形构件,其他构件截面高度为 $500\sim 600\text{mm}$,宽度为 $200\sim 400\text{mm}$,壁厚为 $16\sim 80\text{mm}$ 。支撑杆件共有 10 种规格,尺寸为 $\phi 245\times 12\sim \phi 400\times 30$,封边构件规格为 $\phi 600\times 30$ 。

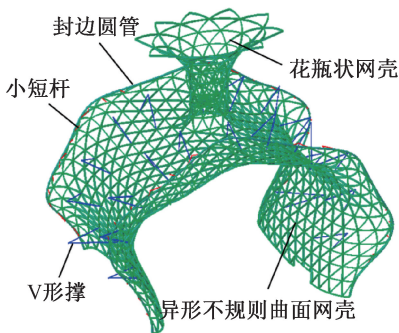


图 3 云门复杂扭转曲面网壳结构
Fig. 3 Complex twisted surface shell structure of Yunmen

2 网壳结构施工方案

结合现场场地条件、结构特点及施工设备情况,网壳结构施工顺序从下至上分别对应下部 A 区(分块吊装)、中部 B 区(整体提升)和上部 C 区,如图 4 所示。对于下部 A 区网壳,在宽度方向上分为 3 块,在高度方向上以网壳支撑为界进行分块。由于顶部倾角较大,为避免吊机卡杆,采用小块分块。西立面共分为 14 个分块,东立面共分为 12 个分块。

对于中部 B 区网壳,采用搭设拼装平台进行散拼安装。对于上部 C 区花瓶状网壳结构下部,采用分块吊装方式,每个环分为 2 个分块进行吊装。最上部的网壳分为 4 个分块进行安装,顶部网壳进行散装安装。其中,下部 A 区网壳最大分块尺寸为 $12\text{m}\times 19\text{m}$,最大分块质量达 17.8t ;上部 C 区网壳最大分块尺寸为 $8.0\text{m}\times 8.6\text{m}$,最大分块质量达 6.4t 。

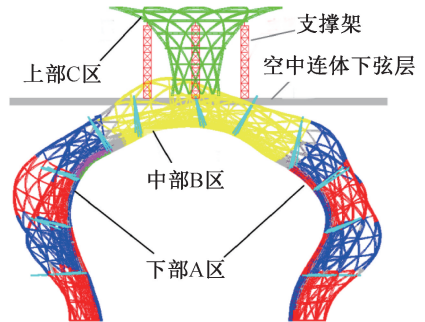


图 4 网壳结构施工分区
Fig. 4 Construction zoning of the reticulated shell structure

3 施工模拟

3.1 有限元模型建立

利用 ABAQUS 软件建立云门复杂扭转曲面网壳有限元分析模型,建模过程中需设定材料属性、杆件截面、单元类型、相互作用关系、边界条件、荷载工况和网格划分等。实际工程中,构件均采用 Q355 钢。考虑到施工过程中结构仅受重力作用,因此钢材采用理想弹塑性本构,弹性模量为 205GPa 。

为考虑杆件剪切变形的影响,网壳结构采用梁单元 B31 模拟。需要说明的是,在应用梁单元进行分析时,须指派合适的梁单元方向,以获得精准的杆件放置形态,不同的形态将导致杆件受力出现较大差别。由于云门网壳采用整体建模技术,杆件数量多,单独对每根杆件分别指派将造成计算成本大量增加,因此为提高计算效率并兼顾精度,将结构分为如图 5 所示几个区块(不同颜色代表不同区块)对梁单元方向进行指派。每个区块均被指定 1 个特殊的梁单元方向,以确保每个区块内杆件主弯方向是绕其强轴的。模型中杆件主弯方向与其所在空间平面垂直,保持与实际工程设计结果一致,如图 6 所示。

网壳各杆件之间通过焊接连接,在大型结构中模拟焊接的方式包括设置 Tie 接触、Merge 装配及建立焊接单元。考虑到接触节点较多会导致模型难以收敛,影响计算结果,因此,本文模型中采用 Merge 的方式将各杆件进行装配,以模拟焊接连接。

整个结构通过 V 形撑铰接在东、西座塔楼上。

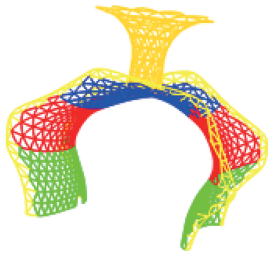


图5 梁单元方向指派分区

Fig. 5 Zoning for beam element orientation assignment

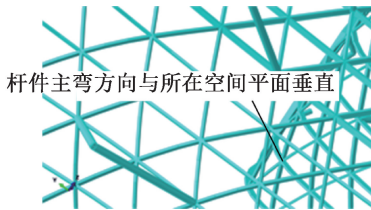


图6 梁单元指派后示意(局部)

Fig. 6 View after beam element assignment(local)

因此,在杆件和塔楼连接处设立约束,仅限制杆件端部节点在 x, y, z 方向的平动位移,释放杆件端部节点转动。在施工过程中,结构采用吊装方式,主要受到重力作用,故仅需对结构整体施加自重荷载。

在 ABAQUS 软件中有 3 种网格划分策略可供选择,分别为自由划分、扫掠划分和结构划分。其中,自由划分网格形状不规则,结构收敛性较差;扫掠划分适用于复杂实体单元的网格划分;结构划分可指定划分单元形状。考虑到计算时间和计算精度的平衡,本文模型采用结构划分策略,将杆件梁单元划分为单元长度 $\leq 300\text{mm}$ 的单元段,最终建立的网壳结构有限元模型如图 7 所示。

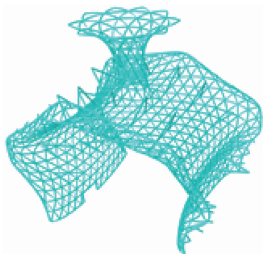


图7 网壳结构有限元模型

Fig. 7 Finite element model of the reticulated shell structure

3.2 生死单元分析

网壳结构施工包括多个步骤,后安装的构件会影响已安装构件的静力响应。根据施工方案,分为由下至上的 6 个施工步(见图 8),其中施工步 1,2 对应下部 A 区,施工步 3,4 对应中部 B 区,施工步 5,6 对应上部 C 区。

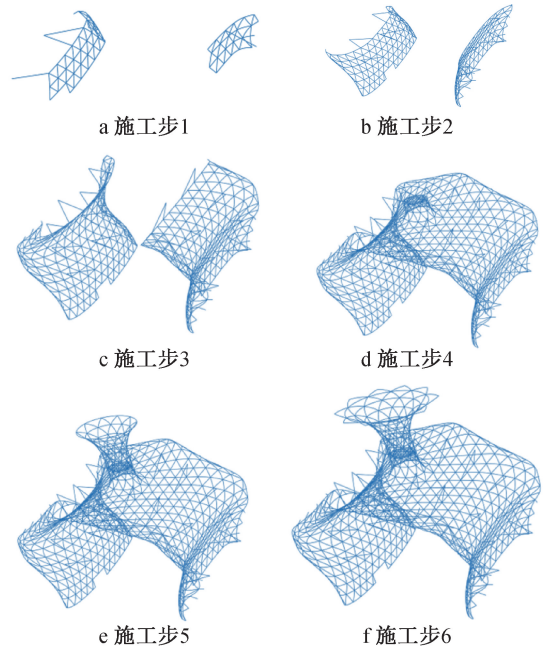


图8 网壳结构施工步

Fig. 8 Construction procedure of the reticulated shell structure

为更准确地模拟施工过程中的结构应力和变形发展情况,反映施工过程是否安全,依据已有研究成果^[15,18,23,25],在有限元分析中引入生死单元技术,即利用 ABAQUS 软件中“model change”对各施工步进行相应的“激活”和“杀死”,确保模拟过程与实际施工过程一致。

3.3 结果分析

通过逐步“激活”每个施工步骤可得到网壳结构施工过程,施工完成时的应力云图如图 9 所示。由图 9 可知,该结构大部分杆件应力较小,约为 20MPa 。只有网壳形状突变部分(杆件翻折部分)应力较大,但最大应力也仅为 60MPa ,杆件均处于弹性状态。此外,分析结果显示结构最大位移为 27.8mm ,相对于整个结构而言是较小的变形,表明该工程结构刚度较大,按序施工引起的施工误差可控。

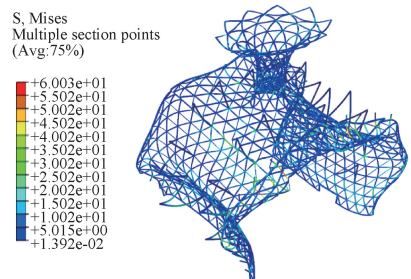


图9 网壳结构应力云图(单位:MPa)

Fig. 9 Stress of the reticulated shell structure(unit:MPa)

选取应力较大的杆件,包括底座附近的典型杆

件和提升段网壳典型杆件(见图10),对这些杆件在施工过程中的最大应力进行分析,结果如图11所示。由图11可知,随着施工步的推进,不同位置的杆件应力变化趋势存在显著差异。随着施工步的增加,GJ3杆件应力出现了下降,GJ4杆件应力一直保持增长态势并达到较高的数值。这是由于随着施工步的推进,后续安装的结构与原先安装完成的结构共同承担了荷载,使结构内部内力重分布,而不同区域重分布得到的应力差别较大。

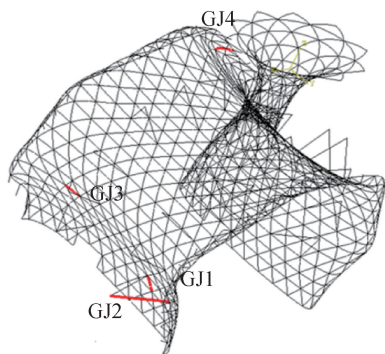


图10 关键杆件位置

Fig. 10 Location of key members

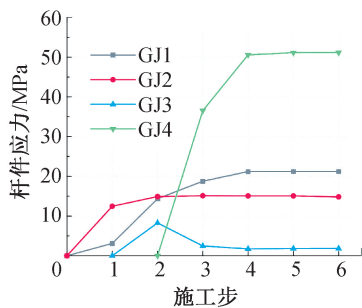


图11 关键杆件应力变化曲线

Fig. 11 Stress variation curves of key members

4 杆件变形预调分析

4.1 正装迭代法

利用生死单元技术可对网壳结构施工过程进行模拟,但不能保证竣工后位形与设计位形一致。为进一步反映施工过程中结构位形发展情况,指导工程获得更高的施工精度,本文采用正装迭代法对结构构件进行变形预调分析,以获得杆件变形预调值^[26]。

正装迭代法基本概念如图12所示,其中 v 为结构设计位形, u^1 为利用生死单元技术模拟后得到的变形。因此,一次施工模拟后结构位形将到达 $(v+u^1)$ 处,如图12b所示。此时,对结构反向施加 u^1 ,则有2种可能性:如果结构非线性较弱,结构可回到设计位形 v 上,且预调值为 u^1 ,预调结束;如果结构

非线性较强,由于塑性变形的存在,无法将结构初始位形 $(v-u^1)$ 回到设计位形 v 上,而是到达 $(v-u^1+u^2)$ 上,此时与设计位形的偏差为 (u^1-u^2) ,需进一步迭代分析。下次迭代分析需在设计位形 v 上施加 $-u^2$,由于非线性变形的存在,结构位形将变成 $(v-u^2+u^3)$,与设计位形的偏差有所减小,变为 (u^2-u^3) 。如此反复迭代 n 次,直到达到较小的偏差,认为此位形与设计位形基本一致时迭代结束,变形预调分析完毕。预调结束时,初始位形为 $(v-u^n)$,获得初始位形后即可得到杆件预调值。

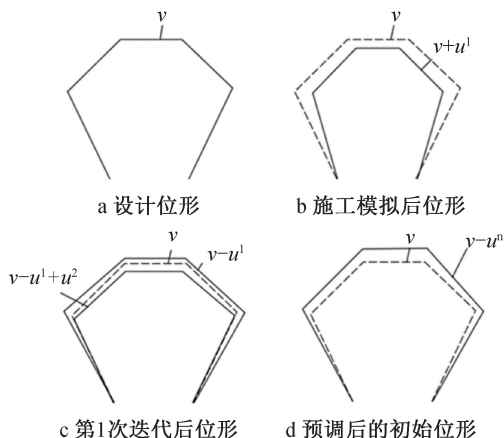


图12 正装迭代法

Fig. 12 Forward iteration method

每次迭代均需对云门网壳结构重新进行施工模拟分析,即重新执行建模和计算步骤,造成计算成本较高、时间较长。为此,通过Python建立参数化的ABAQUS施工模拟输入文件,读取网壳结构施工模拟全流程步骤,引入每次迭代的判断准则,引导程序自动计算、自动迭代。网壳结构正装迭代法杆件变形预调分析流程如图13所示。

根据预调需求,结果文件主要为每次施工模拟后处理文件中的各节点位移信息。杆件预调中的判断准则引入了无量纲参数 ε ,用于调节最终的预调精度,本文取 $\varepsilon=1/10\ 000$,可保证符合工程需求的变形预调精度。

4.2 杆件变形预调结果

网壳结构节点、杆件数量多,为确定网壳结构是否预调完毕,在其不同区域分散选择10个代表性节点作为控制点,并以计算得到的控制点位移文件作为下次迭代的输入端,传递到迭代判定程序中,直至满足迭代判定条件,可认为预调结束。控制点分布如图14所示,其设计位形坐标和预调后坐标如表1所示。

由表1可知,结构按照变形预调后的位形施工,可保证最终受荷后的位形与设计位形基本一致; x ,

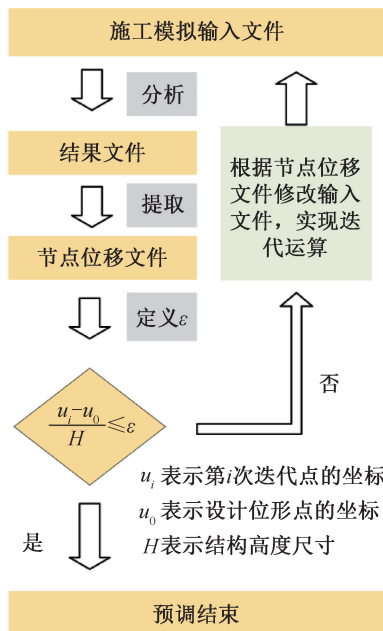


图 13 杆件变形预调分析流程

Fig. 13 Process of deformation pre-adjustment analysis for members

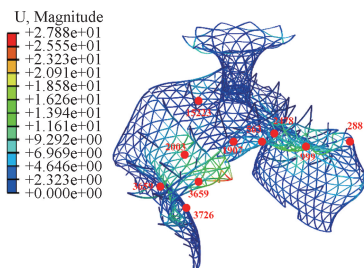


图 14 预调分析控制点分布

Fig. 14 Distribution of control points for pre-adjustment analysis

y, z 坐标误差均值分别为 0.06, 0.26, 3.09mm, 误差最大值不超过 9.4mm, 这表明本文采用的变形预调模拟方法可有效控制杭州西站云门复杂扭转曲面网壳结构施工误差。

5 结语

1) 利用 ABAQUS 软件建立了云门网壳结构有限元模型, 通过梁单元模拟和适当的单元方向指派, 保证了模型中杆件状态与实际工程一致。

2) 运用生死单元技术将有限元模型中 6 个施工步逐步“激活”, 获得了云门网壳结构施工过程中的应力和变形响应, 发现结构最大应力为 60MPa, 最大变形为 27.8mm, 整体处于弹性范围内, 验证了所提施工方案的可行性。

3) 基于云门网壳结构有限元模型, 通过 Python 建立了参数化施工模拟文件, 并以此为基础, 确定了应用正装迭代法确定杆件预调分析完成的判断

表 1 节点设计位形坐标和预调后坐标

Table 1 Coordinates of design configuration and pre-adjusted configuration of nodes mm

节点编号	设计位形变形后坐标	预调位形变形后坐标
3 726	(102 870, 57 150.3, 12 873.1)	(102 870, 57 150.5, 12 873.7)
3 659	(101 978, 94 545.6, 12 366.1)	(101 978, 94 545.3, 12 367.6)
2 077	(96 584.3, 49 959.3, 38 179.3)	(96 585.2, 49 959.9, 38 188.7)
2 003	(99 409, 89 201.4, 35 670.5)	(99 410.8, 89 201.7, 35 674.2)
1 907	(115 623, 51 072.9, 50 041.2)	(115 623, 51 073.1, 50 045.4)
2 478	(136 189, 54 508.1, 48 827.9)	(136 189, 54 508.8, 48 834.2)
15 223	(124 289, 91 818.7, 49 781.3)	(124 289, 91 818.7, 49 784.3)
999	(149 309, 46 400.5, 46 028.8)	(149 309, 46 401.3, 46 037)
288	(168 985, 45 222.4, 40 279.5)	(168 985, 45 222.9, 40 281.4)
563	(159 384, 94 563.2, 15 652.1)	(159 382, 94 562.7, 15 654.1)

准则及流程。依托该准则与流程, 采用正装迭代法对网壳结构开展有限元迭代分析, 通过监测控制点坐标实现杆件变形的预调, 使最终受荷位形与设计位形间的偏差控制在 9.4mm 以内, 进而为实际工程施工过程和精度控制提供参考。

参考文献:

- [1] 董石麟. 空间结构的发展历史、创新、形式分类与实践应用[J]. 空间结构, 2009, 15(3): 22-43.
DONG S L. The development history, innovation, classification and practical application of spatial structures [J]. Spatial structures, 2009, 15(3): 22-43.
- [2] 沈世钊, 武岳. 结构形态学与现代空间结构[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 1-10.
SHEN S Z, WU Y. Structural morphology and modern space structures [J]. Journal of building structures, 2014, 35(4): 1-10.
- [3] 董石麟, 罗尧治, 赵阳. 大跨度空间结构的工程实践与学科发展[J]. 空间结构, 2005, 11(4): 3-10, 15.
DONG S L, LUO Y Z, ZHAO Y. Practical application and research advances of long-span space structures [J]. Spatial structures, 2005, 11(4): 3-10, 15.
- [4] CHOI C K, CHUNG H K, LEE D G, et al. Simplified building analysis with sequential dead loads—CFM [J]. Journal of structural engineering, 1992, 118(4): 944-954.
- [5] GAO F, ZHOU H, LIANG H J, et al. Structural deformation monitoring and numerical simulation of a supertall building during construction stage [J]. Engineering structures, 2020, 209: 110033.
- [6] 冯立新, 杨翠青. 不规则网壳结构施工全过程非线性模拟结构分析[J]. 智能城市, 2016, 2(5): 200-201.

- FENG L X, YANG C Q. Nonlinear simulation structural analysis of irregular reticulated shell structure in the whole construction process[J]. *Intelligent city*, 2016, 2(5): 200-201.
- [7] NJOMO W, OZAY G. Sequential analysis coupled with optimized substructure technique modeled on 3D-frame construction process[J]. *Engineering structures*, 2014, 80: 200-210.
- [8] CHOI C K, KIM E D. Multistory frames under sequential gravity loads[J]. *Journal of structural engineering*, 1985, 111(11): 2373-2384.
- [9] 张清, 王建刚, 王福星, 等. 大跨度钢桁架连廊模块化施工模拟分析[J]. *施工技术(中英文)*, 2025, 54(8): 1-5.
- ZHANG Q, WANG J G, WANG F X, et al. Simulation analysis of modular construction for large-span steel truss corridor[J]. *Construction technology*, 2025, 54(8): 1-5.
- [10] 曹志远. 土木工程分析的施工力学与时变力学基础[J]. *土木工程学报*, 2001, 34(3): 41-46.
- CAO Z Y. Construction mechanics and time varying mechanics in civil engineering[J]. *China civil engineering journal*, 2001, 34(3): 41-46.
- [11] 王光远. 论时变结构力学[J]. *土木工程学报*, 2000, 33(6): 105-108.
- WANG G Y. On mechanics of time-varying structures[J]. *China civil engineering journal*, 2000, 33(6): 105-108.
- [12] CRUZ P J S, MARÍ A R, ROCA P. Nonlinear time-dependent analysis of segmentally constructed structures[J]. *Journal of structural engineering*, 1998, 124(3): 278-287.
- [13] 王懂, 巨若冰, 慕丰丞, 等. 大跨度悬挑钢结构施工及临时支撑技术[J]. *施工技术(中英文)*, 2025, 54(11): 82-87.
- WANG D, JU R B, MU F C, et al. Construction of large-span suspended steel structure and application of temporary support technology[J]. *Construction technology*, 2025, 54(11): 82-87.
- [14] 张文津, 王康, 刘贵文, 等. 大跨度钢屋盖轮辐式索桁架结构施工方法与数值模拟[J]. *施工技术(中英文)*, 2024, 53(8): 8-12.
- ZHANG W J, WANG K, LIU G W, et al. Construction technology and numerical simulation of wheel-spoke cable truss structure for large-span steel roof[J]. *Construction technology*, 2024, 53(8): 8-12.
- [15] 束伟农, 朱忠义, 閻东东, 等. 腾讯北京总部大楼施工关键问题研究[J]. *建筑结构*, 2019, 49(18): 115-119, 24.
- SHU W N, ZHU Z Y, GE D D, et al. Research on key problems of construction for Tencent (Beijing) Headquarters Building[J]. *Building structure*, 2019, 49(18): 115-119, 24.
- [16] 刘学武. 大型复杂钢结构施工力学分析及应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- LIU X W. Analysis and application of construction mechanics of large complex steel structures[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008.
- [17] 张其林, 罗晓群, 高振锋, 等. 大跨钢结构施工过程的数值跟踪和图形模拟[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(10): 1295-1299.
- ZHANG Q L, LUO X Q, GAO Z F, et al. Numerical tracing and graphic simulation for construction processes of large span pre-tensioned steel structures[J]. *Journal of Tongji University (natural science)*, 2004, 32(10): 1295-1299.
- [18] 张君, 王秀丽, 毕贵权, 等. 天水体育中心游泳馆网壳结构施工模拟分析与监测[J]. *建筑结构*, 2020, 50(17): 34-39, 33.
- ZHANG J, WANG X L, BI G Q, et al. Construction simulation analysis and monitoring of steel reticulated shell structure of natatorium for Tianshui Sports Center[J]. *Building structure*, 2020, 50(17): 34-39, 33.
- [19] 郭彦林, 郭宇飞, 刘学武. 大跨度钢结构屋盖落架分析方法[J]. *建筑科学与工程学报*, 2007, 24(1): 52-58.
- GUO Y L, GUO Y F, LIU X W. Analysis methods of removing temporary supports to large-span steel structural roof[J]. *Journal of architecture and civil engineering*, 2007, 24(1): 52-58.
- [20] 矫苏宁, 方金刚. 大跨度双层网壳钢结构受力分析与施工模拟研究[J]. *广州建筑*, 2022, 50(6): 41-44.
- JIAO S N, FANG J G. Stress analysis and construction simulation of long-span double-layer reticulate shell steel structure[J]. *Guangzhou architecture*, 2022, 50(6): 41-44.
- [21] 田黎敏, 郝际平. 深圳湾体育中心钢结构施工非线性时变有限元分析[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(10): 137-143.
- TIAN L M, HAO J P. Nonlinear time-dependent finite element analysis on erection procedure of the Shenzhen Bay Sports Center steel structure[J]. *Journal of building structures*, 2014, 35(10): 137-143.
- [22] 王秀丽, 李瑛, 杨文伟. 大跨钢结构施工加载健康监测及模拟分析[J]. *空间结构*, 2012, 18(4): 49-54.
- WANG X L, LI Y, YANG W W. Health monitoring and simulation analysis over construction loading process for long-span steel structure[J]. *Spatial structures*, 2012, 18(4): 49-54.
- [23] 郭彦林, 郭宇飞, 高巍, 等. 国家体育场钢结构屋盖落架过程模拟分析[J]. *施工技术*, 2006, 35(12): 36-40, 73.
- GUO Y L, GUO Y F, GAO W, et al. Simulating analysis of removing temporary supports for steel structural roof in National Stadium[J]. *Construction technology*, 2006, 35(12): 36-40, 73.
- [24] 刘学武, 郭彦林, 张庆林, 等. CCTV 新台址主楼施工过程结构内力和变形分析[J]. *工业建筑*, 2007, 37(9): 22-29.
- LIU X W, GUO Y L, ZHANG Q L, et al. Analysis of internal force and deformation for the new CCTV headquarters during the construction process[J]. *Industrial construction*, 2007, 37(9): 22-29.
- [25] 胡长明, 曾凡奎, 李永辉, 等. 法门寺合十舍利塔施工过程模拟与实测分析[J]. *工程力学*, 2009, 26(S1): 153-157.
- HU C M, ZENG F K, LI Y H, et al. Construction process simulation and actual analysis of palms together dagoba in Famen Temple[J]. *Engineering mechanics*, 2009, 26(S1): 153-157.
- [26] 郭彦林, 刘学武, 刘禄宇, 等. CCTV 新台址主楼钢结构施工变形预调值计算的分阶段综合迭代法[J]. *工业建筑*, 2007, 37(9): 16-21.
- GUO Y L, LIU X W, LIU L Y, et al. Analysis method of pre-set construction deformation values for the new CCTV headquarters[J]. *Industrial construction*, 2007, 37(9): 16-21.