

复杂工况下异型曲面网架滑移提升组合施工技术

刘玉磊

上海建工四建集团有限公司

摘要：根据新海港综合交通枢纽项目异型双曲面网架的结构特点与工况条件，考虑安全、质量、进度、成本等多重因素，对比多种施工方案，确定了原位拼装与局部滑移提升结合的施工方案。考虑到滑移、提升产生的应力，施工前使用SAP2000与MADIS GEN软件针对网架滑移、整体提升、卸载后及金属屋面施工全过程进行施工模拟，分析网架在各工况下的应力、应变情况，对提升方案进行优化并加强了部分网架杆件，提高了施工的安全性。施工过程中开展了网架变形监测，对实测与理论数值的偏差进行分析，得到了较好的效果，可为后续类似工程提供参考。

关键词：异型曲面网架；网架滑移；网架提升；施工荷载；模拟计算；变形监测

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.10.019

近年来，国内新建的公共建筑往往使用了网架、桁架结构作为屋面支承体系。随着人民审美水平的提升，这些建筑造型也逐渐向着多样化、新颖化、复杂化的方向发展。这类网架需要根据自身的结构形式特点与现场工况条件，因地制宜地选择施工方案，同时也需要综合考虑施工难度、安全风险、进度要求、场地条件以及措施成本等因素。另一方面，由于本项目施工方案的新颖性、独特性与复杂性，没有类似工程的经验可参考。为了保证施工安全，对施工方案的全过程进行安全验算，以确保施工荷载作用下杆件的应力与形变不超过设计允许范围，是十分有必要的。

一、工程概况

新海港综合交通枢纽（GTC）及配套设施建设工程位于海南省海口港新海港港区，钢筋混凝土结构，地上3

层，地下2层，建筑高度34m，建筑面积70859m²。

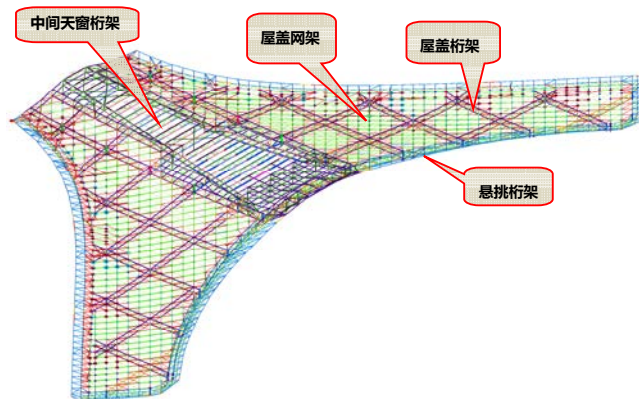


图1.1 屋面网架三维模型

本项目屋盖整体呈现燕尾型，为东高西低、中间高南北低的异型曲面网架。网架最低处标高17.18m，最高处32.15m，东西向长度134m，南北向长度236m，投影面积约13000m²。网架采用正交斜放空间双层网格结构，节点采用焊接球节点；中庭处采用桁架结构，跨度37m。网架杆件共约12000根，规格Φ76×5.0~Φ500×22不等，总重量约1120吨。

二、施工方案选择

本工程南北两侧的砼结构屋面由西向东，由两翼向中心呈阶梯型上升，楼面标高16.300m~18.500m不等。到中庭处降至两层楼面12.850m处，形成大空间。综合本工程结构特点、施工难度、安全风险、进度要求、场地条件以及措施成本等多方面因素考虑，对以下不同的施工方案进行分析。

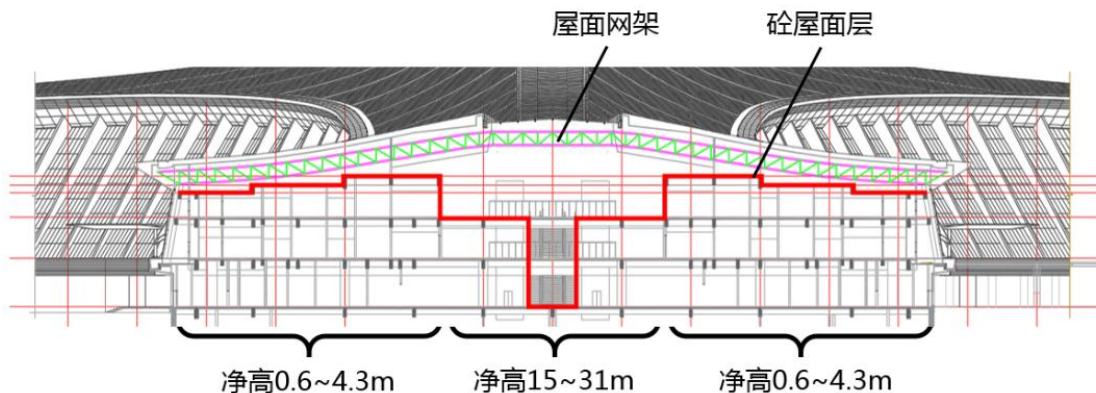


图2.1 网架与砼屋面位置关系剖面示意

1) 高空散装：在南北两侧由于净高较小，可直接砼屋面楼板上使用胎架支撑进行原位拼装，吊装使用塔吊或汽车吊。在中庭处则需搭设落地式脚手架，最大搭设高度31m。在楼板上原位拼装施工较简便，所需措施

费用较少，安装速度较快，不需要高空焊接，施工质量可以得到最大限度的保证。但中庭处需搭设8.4万m²的脚手架，搭设所消耗的材料过多且耗时长；支撑架的搭设高度、重量均超过规范要求，属于危大工程。

2) 分块预拼装吊装：在场地周围将网架提前分块拼装，再使用塔吊吊装至既定位置。此方案相较于高空散装可加快施工速度，但本工程网架跨度较大，吊装时的变形量无法保证安装精度要求；另外在高空拼接时安全风险较大。

3) 滑移：在场地下铺设滑移轨道，可在外侧分段拼装网架，再累积分段滑移至既定位置。此方案施工简便，对场地占用小，较为安全可靠。但本工程南北两侧场地呈阶梯状，并不具备滑移条件。

4) 提升/顶升：在网架中设置多个提升吊点，网架在地面拼装完成后再整体提升至设计标高。根据网架造型特点，需要设置吊点50余个，采用分段累积提升的施工工艺。此方案钢结构主要的拼装、焊接及油漆等工作在楼面进行散件吊装拼装，施工效率高，施工质量易于保证，可有效的减小临时措施的用量。此外，提升设备体积小、自重轻、承载能力大，特别适宜于复杂结构或场地条件较不利的工况。根据本工程网架造型特点，整体提升需要设置吊点50余个，采用分段累积提升的施工工艺。但由于南北两侧提升高度很小，技术经济性不如原位散装方案。

鉴于对现场施工条件及结构布置的分析，充分利

用以上4种方案的优点，本工程网架的施工方案最终定为：南北两侧搭设支撑胎架进行原位散装，外悬挑桁架分段吊装，中庭部分桁架先在二层楼板上滑移拼装，再分段累积提升的施工方案。

三、提升施工方案

(一) 提升方案设计

如图3.1所示，洋红色为提升单元①，重量290.6吨；绿色为提升单元②，重量203.8吨；深蓝色为后装杆件。

1. 提升方案选择

由于整个提升区网架呈现东高西低的姿态，提出了两个思路供选择：提升方案①利用液压同步提升系统将屋盖结构TS1单元提升约4.2m后，暂停提升；拼装提升单元TS1与提升单元TS2间连接杆件，形成整体提升单元。再利用液压同步提升系统将其整体提升单元提升约4.6m至设计标高并安装后装杆件等，完成屋盖结构的安装作业。提升方案②两个单元分别独立提升，先将TS2单元提升约4.6m至设计标高并安装后装杆件，再将TS1单元提升约8.8m至设计位置并安装TS1与TS2间的连接杆件与其他后装杆件。提升流程见图3.1。

使用SAP2000软件分别对两种提升方案进行建模计

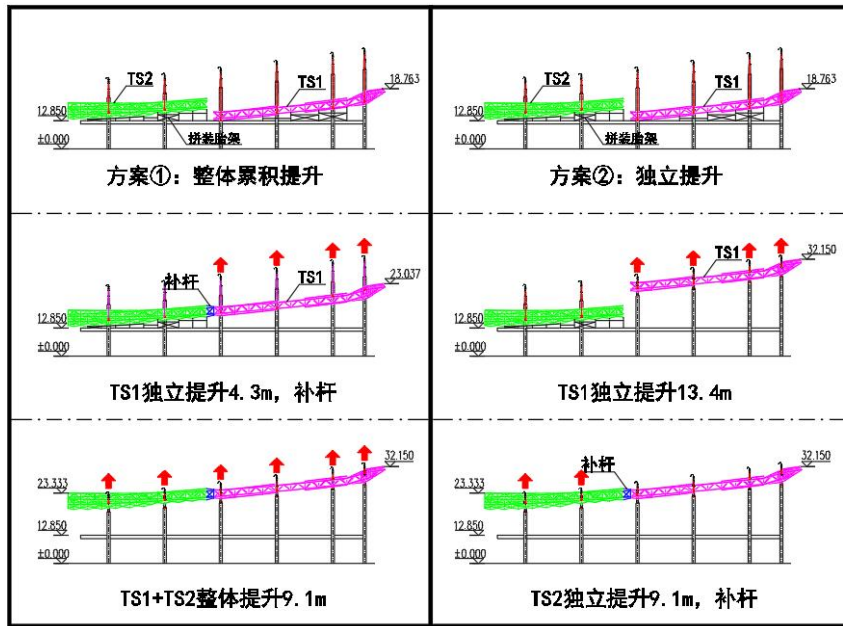


图3.1 两个提升方案施工流程对比

算，得到两种方案提升过程与最终提升完成后的最大应力，见表3.1。方案①的提升过程内应力变化总体上好于方案②，并且方案①在两次提升过程中有纠偏机会，有利于累计误差消除。然而，提升施工正值海南台风天气高发时节，方案①要求提升单元在空中完成整体组装补杆，滞空时间约5~7天，安全性较低。

表3.1 两种提升方案应力对比 (MPa)

工况	提升方案①	提升方案②
第一次提升	0.35	0.42
第二次提升	0.58	0.53
卸载后	0.49	0.57

综合考虑各种因素，最终选择方案①整体提升方案，通过增加临时固定杆件，使第一次提升网架单元在滞空时与结构临时固接，解决了整体提升安全性较低的缺点。

(二) 提升措施设计

1. 提升平台设计与验算

提升平台利用结构混凝土钢管柱及临时塔架设置，根据提升工艺要求及结构特点，本次提升临时措施主要包括转换梁、立柱、缀条、水平构造杆、平台梁、导向架以及加固杆等。

使用SAP2000软件，建立提升平台模型，根据规范对提升平台施加竖向提升荷载以及横向风荷载，验算提

升平台的安全性和稳定性。根据模型分析卸载前提升平台各杆件的受力状态与变形情况。提升结构最大竖向变形值7.8mm，出现在D101和D108平台梁处，最大水平变形5mm，提升支架最大的应力比0.65，整体稳定性满足要求。

2. 网架加固措施

根据提升过程结构受力情况，在部分下吊点位置对结构进行临时加固。根据计算结果，加固杆选择Φ245×12圆管可以满足使用需求，材质同网架为Q355B。为了不改变网架受力情况，临时加固杆需要在卸载后拆除。

3. 提升点混凝土结构加固

每个提升支架底部均设置转换钢梁，转换钢梁两端通过20mm厚钢板及膨胀螺丝架设固定在混凝土梁上。使用MIDAS-GEN软件建立局部结构模型，验算各提升点下方混凝土梁承载力否满足要求。经验算，除D202提升支架处的悬挑混凝土梁需进行回顶加固外，其余混凝土梁经验算承载力满足要求。

(三) 施工全过程模拟计算

本工程建立了施工全过程模型，逐一分析第一次提升、第二次提升（整体提升）、卸载后以及上部金属屋面施工完成后，各工况下网架的应力与变形情况是否符合设计与规范的要求。

表3.2 各施工阶段网架最大应力、变形计算值

工况	最大杆件应力比	最大竖向位移 (mm)
第一次提升	0.35	-5
第二次提升	0.58	-9
卸载后	0.49	-24
屋面施工完成	0.71	-37

表4.1 卸载后网架标高实测数据与计算值对比（单位：米 时间：2022.8.2）

点号	理论值	实测值	点号	理论值	实测值	点号	理论值	实测值
1	21.194	21.185	2	21.194	21.182	3	21.194	21.18
4	21.06	21.071	5	21.06	21.069	6	21.06	21.07
7	21.295	21.299	8	21.295	21.302	9	21.295	21.291
10	22.197	22.181	11	22.197	22.184	12	22.197	22.186
13	23.631	23.619	14	23.631	23.62	15	23.631	23.622
16	25.624	25.622	17	25.624	25.635	18	25.624	25.617
19	26.877	26.852	20	26.132	26.101	21	26.877	26.853

7mm，实测数据与计算结果较为符合，说明进行施工全过程模拟分析具备实际参考价值。同时实测数据也满足了设计要求，实测标高与设计标高相差不超过跨度/1000，即37m/1000=0.037m。

五、结语

通过对本工程异型曲面网架的结构特点、现场施工条件以及各方因素的深入分析与方案比选，确定了南北两侧原位散装，中庭部分桁架先在二层楼板上滑移拼装，再分段累积提升的施工方案，为项目施工节省成本300余万元，工期缩短约45天。施工前对方案的全过程各工况建模分析，进行安全验算，确保方案的技术可行

计算结果显示，钢结构竖向位移最大值为37mm，结构最大应力比为0.73，卸载后结构应力比最大0.49。位移和应力值均满足规范要求。根据《钢结构设计规范》，本工程钢结构挠度控制在L/250以内。承载力极限状态荷载效应组合下的最大设计应力比0.85。

四、施工变形监测

为了监测施工过程安全，以及对理论模型计算结果进行验证，本工程在网架提升区布置了21个变形监测点。对测点的标高变化进行持续观测，得到网架各工况下变形变化曲线。根据图4.1的实测数据可得到，两次提升过程变形程度较小，卸载后、屋面施工完成后两工况下的跨中挠度变化较为明显，并且东侧竖向变形较大，与上部荷载的分部情况相符。

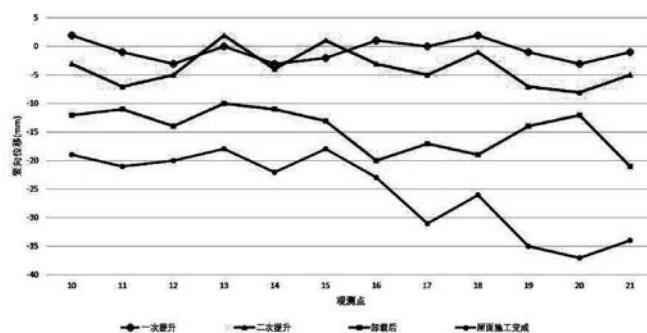


图4.1 网架变形监测数据

通过对卸载后网架标高实测数据的分析可以得知，标高实测数据与理论值最大偏差为31mm，平均偏差

性与施工过程的安全性。在施工过程中持续对网架的变形情况进行监测，现场观测数据与理论值符合良好，可为同类工程施工提供借鉴。

参考文献

- [1] 弓国涛. 复杂空间钢结构曲面肋梁加工及安装技术分析[J]. 中国设备工程. 2021, (2)
- [2] 南耀琴. 巨型截面多腔体钢管混凝土柱施工技术[J]. 山西建筑. 2021, (1).
- [3] 董军业, 乔元亮, 赵忠杨, 等. 超高层大体量厚板双扭曲复杂钢结构施工技术[J]. 施工技术. 2018.