

# 跨河大跨钢网架滑移施工关键技术研究

徐常森\*, 贾尚瑞, 郭彤, 邢遵胜  
(浙江精工钢结构集团有限公司, 浙江 绍兴 312030)

**摘要:** 杭州仁和粮食储备库码头钢罩棚为跨河大跨钢网架结构,其整体位于河道上方,下方无天然作业场地。综合考虑施工成本及场地条件,拟采用滑移施工方案;此后,通过对比分析带短轨累积滑移与无短轨累积滑移两种施工方法在结构杆件的附加应力、施工可控性及滑移单元对接精度控制难度等方面的差异,确定采用无短轨累积滑移施工方案。在此基础上,采用Midas Gen对结构开展施工模拟仿真分析,并在施工最终阶段以成桥荷载为基准叠加设计荷载,实现了对结构的施工-设计全过程仿真分析,验证了施工方案的安全性和合理性;结合场地条件设计了安拆便捷、承载力高及抗侧性能好的滑移支承结构及拼装平台;考虑滑移支承结构与滑移结构的协同变形,对二者进行合模分析,并结合二者在荷载作用下的相对位移,采取滑靴预偏、放大滑靴限位挡块间距等措施,避免滑移过程中出现“啃轨”现象;采用带支座滑移方法,避免后期塞装支座的情况发生。

**关键词:** 跨河钢网架; 方案对比; 累积滑移; 短滑轨; 仿真分析; 协同变形

中图分类号: TU758.11

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)07-0116-11

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240226001

## Research on Key Technologies for Sliding Construction of Large-Span Cross River Steel Grid Structures

XU Changsen\*, JIA Shangrui, GUO Tong, XING Zunsheng  
(Zhejiang Jingong Steel Building Group Co., Ltd., Shaoxing 312030, China)

\*Corresponding author: xuchangs@jgsteel.cn

**Abstract:** The steel canopy of the Hangzhou Renhe Grain Reserve Warehouse dock is a large-span steel truss structure crossing the river. The entire structure is located above the river channel, with no natural work space below. Taking into account construction costs and site conditions, the sliding construction plan was selected. Furthermore, by comparing and analyzing the additional stress of structural members, construction controllability and difficulty in controlling the accuracy of slip unit docking between the two construction methods with and without short rail cumulative sliding, the construction plan without short rail cumulative sliding was finally selected. On this basis, using Midas Gen to conduct construction simulation analysis of the structure, and superimposing design loads in the form of bridge load on the final step of construction, the simulation analysis of the entire process of construction-design of the structure was realized, verifying the safety and rationality of the construction plan. Combined with site conditions, a sliding support structure and assembly platform with convenient installation and removal, high bearing capacity, and good lateral resistance performance were designed. Considering the collaborative deformation of the sliding support structure and the sliding structure, a combined deformation analysis is conducted for both, and combined with their relative displacement under load, measures such as pre-deflection of sliding shoes and amplification of the spacing between sliding shoes and limit blocks are taken to avoid the phenomenon of "rail gnawing" during sliding. The method of

收稿日期: 2024-02-26

作者简介:

徐常森(1993—),男,硕士,工程师,主要从事钢结构设计、施工方面的工作。E-mail: xuchangs@jgsteel.cn。(通信作者)

贾尚瑞(1985—),男,硕士,高级工程师,主要从事建筑钢结构设计、制造和施工技术方面的研究。

sliding with supports was used to avoid later installation of supports.

**Keywords:** cross river steel grid structure; plan comparison; cumulative sliding; short slide rail; simulation analysis; collaborative deformation

近年来,我国钢结构设计与建造技术发展迅速,钢结构建筑规模持续扩大,建筑造型愈发复杂新颖且其场地条件愈发复杂,对施工技术的要求随之不断提高,合理的施工方案和仿真分析是保证施工安全、经济的关键。滑移施工法因其施工效率高、场地适应性强<sup>[1-2]</sup>等优点被广泛应用于各类大型钢结构项目的施工中,尤其是场地条件复杂的项目。

针对场地条件复杂的钢结构滑移施工,国内外已有较多工程案例,如重庆东站站房钢结构工程采用了超高滑移技术施工,以应对下部混凝土楼面大开洞、多错层等情况导致的施工条件固有局限<sup>[3]</sup>;成都万达城冰雪乐园、简阳文体等钢结构工程采用了倾斜滑移技术施工<sup>[4-5]</sup>;鄂尔多斯机场新航站楼钢结构工程采用了累积旋转带柱滑移技术施工<sup>[6]</sup>;深圳大运会主体育馆钢结构工程采用了累积旋转滑移技术施工<sup>[7]</sup>。

基于上述案例,结合杭州仁和粮食储备库码头钢结构工程,对河上大跨钢网架滑移施工关键技术展开研究。从结构杆件附加应力、施工可控性及滑移单元对接精度控制难度三个方面,对比了跨中设置短滑轨的累积滑移(后文称:带短轨累积滑移)和跨中不设置短滑轨的累积滑移(后文称:无短轨累积滑移)两种施工方案的优劣性。同时对滑移结构进行施工、设计全过程仿真分析,保证施工的安全性;结合场地情况,针对性设计了滑移支承结构及拼装平台;考虑滑移支承结构与滑移结构在荷载作用下的协同变形,对滑靴进行了预偏处理。通过对该工程的技术梳理与总结,提炼形成了河上大跨钢网架施工技术,旨在为同类型工程施工提供有益借鉴。

## 1 工程概况

杭州仁和粮食储备库码头钢结构罩棚整体位于河道上方,如图1所示。钢罩棚长约176 m、宽约127.2 m,最大跨度95 m,由上部钢网架屋盖与下部V形交叉格构式钢柱支撑组成,上部钢网架屋盖为双层正放四角锥网架,顶部设有钢网架米斗,两侧通过球铰支座与下部格构钢柱相连,单侧球铰支座采用双排布置,网架节点包括螺栓球节点与焊接球节点两种类型,如图2所示,

钢结构侧视图如图3所示。钢网架最大顶标高为23 m,顶部钢网架米斗造型最大顶标高为32 m,网架厚度约5 m,网格尺寸为3.36 m×3.36 m。截面类型均为钢圆管,截面规格为P75.5 mm×3.75 mm~P351 mm×20 mm,采用Q355B和Q235B类型钢。网架节点包括螺栓球节点与焊接球节点两种类型。

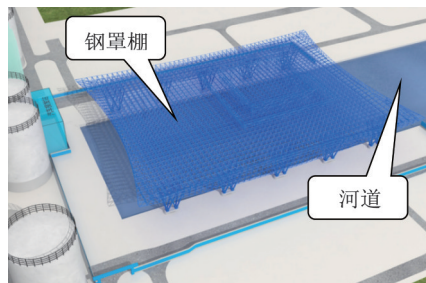


图1 结构效果

Fig. 1 Structural rendering

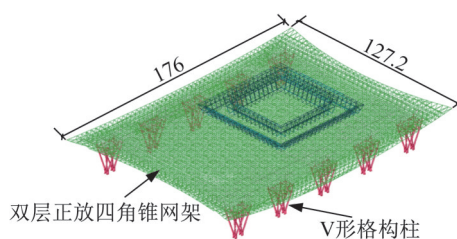


图2 钢结构整体轴测图(单位:m)

Fig. 2 Axonometric drawing of steel structure (unit: m)

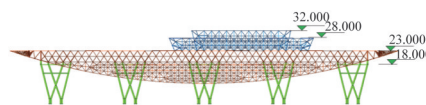


图3 钢结构侧视图(单位:m)

Fig. 3 Side view of steel structure (unit: m)

## 2 施工方案比选

目前,大跨网架钢结构常用的施工工艺有分块吊装、整体提升、滑移等<sup>[1-2]</sup>。由于本工程屋盖结构下方为河道,无天然作业场地,若采用分块吊装工艺,则需配备超大吨位吊机;若采用整体提升法工艺,则需在河道内打桩搭建施工作业平台。如此,不仅增加了施工成本和安全风险,且结构下部与河面间净空较小,结构完工后拔桩船难以驶入屋盖下部进行拔桩作业。基于此情况,决定采用累积滑移法施工,因此仅需在结构西侧河道内搭建宽12 m的拼装平台,并在河岸两侧布置滑移支承结构作为施工临时措施。采用此方法施工不仅降低了施工成本和施工难度,而且在结构施工完毕后,可直接在河岸边进行平台拆除和拔桩作业,施工便捷。

针对累积滑移施工方案有带短轨累积滑移和无短轨累积滑移两种选择,具体如下:

### (1) 带短轨累积滑移方案

带短轨累积滑移方案滑轨布置如图4所示。在结构

的两侧设置两道长滑轨,跨中平台位置设置两道短滑轨。如图5所示,结构共分为14个滑移分区和2个拼装分区。施工时将滑移分区1在拼装平台上拼装完成后,向前滑动一个滑移单元宽度的距离,之后安装滑移分区2。完成滑移分区2的安装后,安装两个分区之间的对接段,如图6所示。在此基础上,将已完成安装的网架向前滑动一个滑移单元宽度的距离,继续安装滑移分区3。如此重复,直至完成拼装分区的网架滑移施工。最后接装两侧翘曲区域的网架,再卸载滑靴。

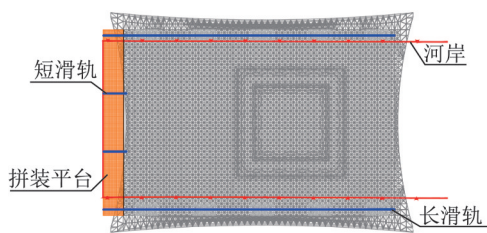


图4 带短轨累积滑移方案滑轨布置  
Fig. 4 Arrangement of rails in cumulative sliding scheme with short rails



图5 结构分块布置  
Fig. 5 Arrangement of structural block

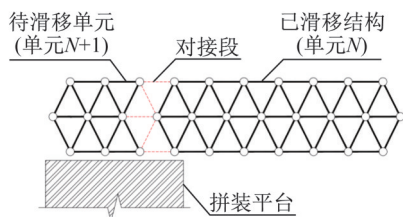


图6 滑移单元对接示意  
Fig. 6 Schematic diagram of sliding unit docking

(2) 无短轨累积滑移方案

无短轨累积滑移方案滑轨布置如图7所示。在结构两侧设置两道长滑轨,跨中平台位置不设置短滑轨,其结构分区与带短轨累积滑移方案的结构分区相同。施工时,在拼装平台上完成滑移分区1的拼装后,即拼装胎架卸载,使拼装完成的网架自然下挠。下挠完成后,将已完成拼装的网架向前滑移一段距离,在平台上方保留一个节间宽度的网架段,以便后续杆件对接及高差调平。之

后继续拼装滑移分区2,并在其自然下挠完成后安装其与滑移分区1之间的后补杆,使两个分区形成整体,并向前滑移。如此重复,直至完成拼装分区的网架滑移施工。最后接装两侧翘曲区域的网架,再卸载滑靴。

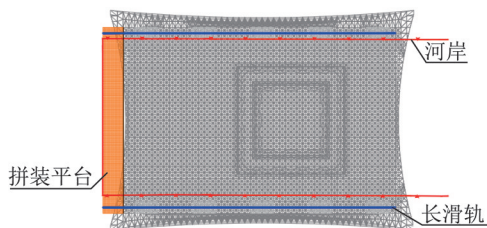


图7 无短轨累积滑移方案滑轨布置  
Fig. 7 Arrangement of rails in cumulative sliding scheme without short rails

下面从结构变形控制难度、结构杆件附加应力及施工可控性等方面对两种方案进行对比分析,比选出最佳施工方案。

2.1 结构杆件附加应力对比

施工过程中,结构的成型是从局部到整体的动态过程。在不同的施工阶段,结构的形态、受力特性、边界条件和和荷载条件均不同。因此,在结构施工完成后构件的应力状态与设计一次成型时构件的应力状态存在差异,导致施工完成后结构构件会产生一定的附加应力<sup>[9]</sup>。对于施工单位而言,施工过程中的结构杆件附加应力的的大小是衡量施工方法优劣的重要标准之一。

采用Midas Gen软件对上述两种滑移施工方法进行施工仿真模拟分析,对比两种滑移施工方法对结构杆件附加应力大小的影响如图8、9所示,并对因施工产生的杆件附加应力进行统计分析,结构构件附加应力统计结果如表1所示。

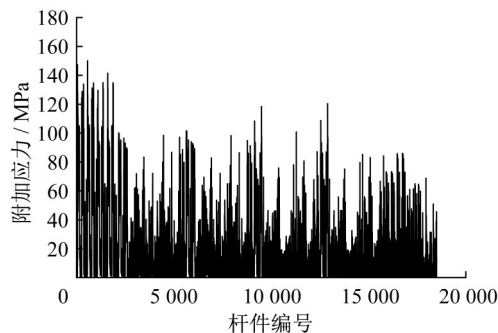


图8 无短轨累积滑移法杆件附加应力折线图  
Fig. 8 Line graph of additional stress on members using cumulative sliding scheme without short rails

由上述统计数据可以看出,带短轨累积滑移方案中,杆件的附加应力数据的1/4分位数比无短轨累积滑移方

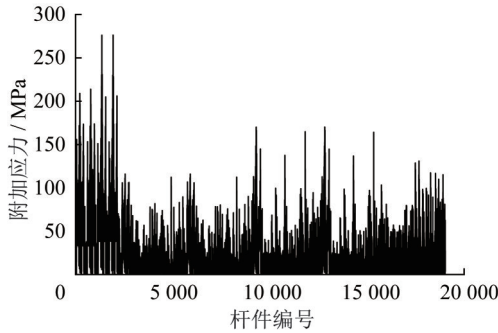


图9 带短轨累积滑移法杆件附加应力折线图

Fig. 9 Line graph of additional stress on members using cumulative sliding scheme with short rails

表1 两种滑移施工方法杆件附加应力统计数据

Table 1 Statistical data of additional stress on members using two sliding construction methods MPa

取值点	无短轨累积滑移	带短轨累积滑移
1/4分位数	2.87	4.09
中位数	8.06	10.25
3/4分位数	17.46	24.46
最大值	150.03	276.22
均值	15.04	19.63

案杆件相应的1/4分位数高42.5%、中位数比无短轨累积滑移中位数高27.2%、3/4分位数比无短轨累积滑移3/4分位数高40.1%、最大值比无短轨累积滑移最大值高84.1%、平均值比无短轨累积滑移平均值高30.5%。由此可见,相比于无短轨累积滑移方案,带短轨累积滑移方案中由于单元N+1跨中存在短滑轨滑靴支撑,其结构在滑移施工时的支承及受力状态与设计状态差距较大,其结构杆件附加应力更高。

## 2.2 施工可控性对比

大跨网架在滑移过程中,滑靴为滑移结构的临时支承,滑靴反力发生变化意味着结构杆件的内力与拉压状态也发生了变化,结构随之产生附加应力,甚至发生塑性形变<sup>[2]</sup>。此外,滑靴垂直轨道方向的水平位移也会导致在滑轨过程中发生“卡轨”现象。由于本工程钢网架整体位于河面上方,当结构滑离平台后下方无施工作业面,若在滑移过程中遇到上述突发情况,会增大其解决难度和成本。因此,在网架滑移过程中需尽量保证滑靴反力、滑靴垂轨方向水平位移等指标保持稳定,使结构以较稳定的状态向前滑移,减少不可控因素。

为分析两种滑移施工方法施工过程的可控性,分别提取其滑靴反力与滑靴垂轨方向水平位移进行对比,对比结果如下。

### (1) 长滑轨滑靴反力变化对比

提取带短轨累积滑移和无短轨累积滑移各施工步中长滑轨上部滑靴反力进行对比分析,长滑轨滑靴编号如图10所示。

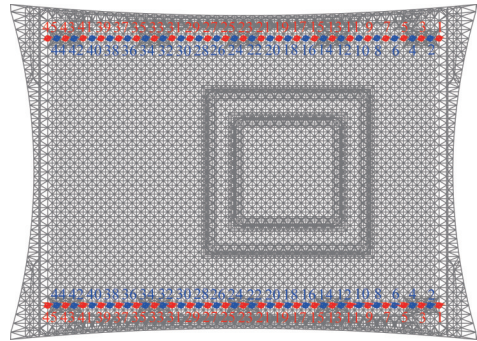


图10 长滑轨滑靴编号

Fig. 10 Numbering of sliding shoes in long-rails

从长滑轨滑靴反力变化趋势可以看出:采用带短轨累积滑移法时,滑靴反力会随着结构的滑移逐渐增大,而之后趋向稳定,如图11所示;采用无短轨累积滑移法时,滑靴反力始终都处于较稳定的状态,如图12所示。

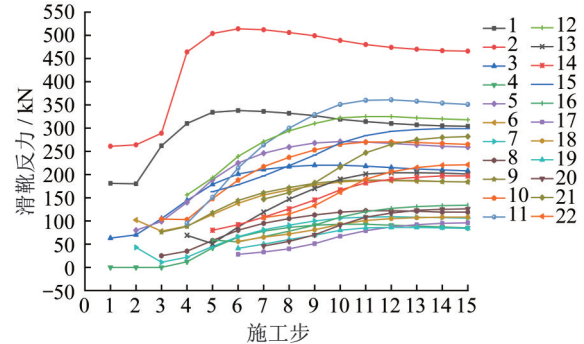


图11 带短轨累积滑移方案滑靴反力变化

Fig. 11 The variation of sliding shoe reaction force for cumulative sliding scheme with short rails

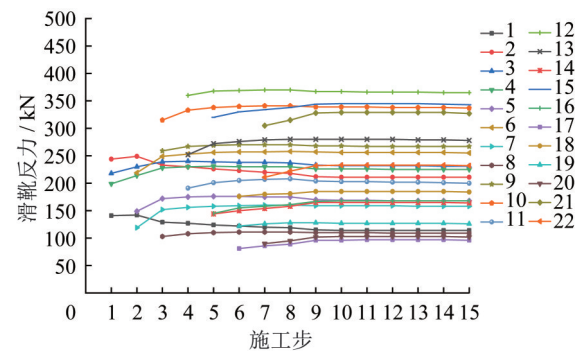


图12 无短轨累积滑移滑靴反力变化

Fig. 12 The variation of sliding shoe reaction force for cumulative sliding scheme without short rails

## (2) 滑靴垂轨方向水平位移变化对比

提取带短轨累积滑移和无短轨累积滑移各施工步中长滑轨上部滑靴垂直轨道方向的水平位移进行对比分析。

从各滑靴垂轨方向的变形趋势可以看出:当采用带短轨累积滑移法施工时,随着结构的滑移,各长滑轨滑靴垂轨方向的水平位移逐渐增大,之后趋于稳定,如图13所示。当结构采用无短轨累积滑移法施工时,随着结构的滑移,各长滑轨滑靴垂轨方向的水平位移变化幅度始终较小,如图14所示。

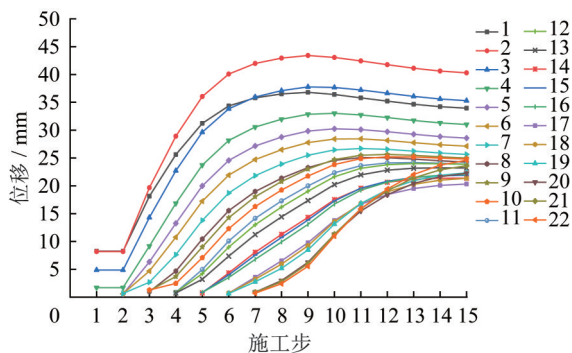


图13 带短轨累积滑移方案滑靴垂轨方向水平位移

Fig. 13 Horizontal displacement of the sliding shoe in the vertical direction of the cumulative sliding scheme with short rails

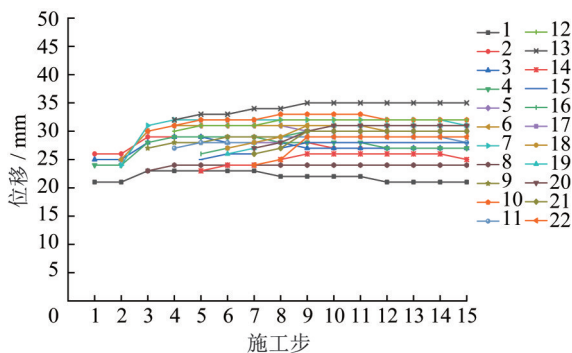


图14 无短轨累积滑移方案滑靴垂轨方向水平位移

Fig. 14 Horizontal displacement of the sliding shoe in the vertical direction of the cumulative sliding scheme without short rails

从上述对比可以看出:带短轨累积滑移法方案中,单元 $N+1$ 在滑离拼装平台前已经和单元 $N$ 对接形成整体,如图6所示。在其短滑轨滑靴卸载后结构随之下挠,滑靴随之产生垂直轨道方向的水平位移,其结构的自重荷载也随之传递至本榀及其他榀滑移单元的滑靴上,从而使滑靴的反力增大。在此过程中,结构内力也进行了重分布,部分结构杆件的拉压状态也随之改变。随着滑移的进行,单元 $N+1$ 与单元 $N$ 右侧结构的间距逐渐增大,

单元 $N+1$ 短滑轨滑靴的卸载对前部单元 $N$ 右侧结构的影响逐渐减小,对应的滑靴反力与滑靴垂直轨道的水平位移也逐渐趋于稳定。

而在无短轨累积滑移方案中,单元 $N+1$ 是在结构完全卸载后再与单元 $N$ 进行对接,此时单元 $N+1$ 的自重荷载已全部卸载至两端长滑轨滑靴上,结构处于较稳定的状态,其受力状态与单元 $N$ 相同<sup>[8]</sup>,故对接后对单元 $N$ 的受力模式影响较小。因此在后续滑移过程中,各滑靴的反力变化较小。

由此可见,采用带短轨累积滑移方案,滑靴反力、结构的内力、部分杆件的拉压状态及长滑轨滑靴的垂轨方向水平位移会产生较大变化,结构滑移施工的可控性较差。而采用无短轨累积滑移方案时,上述指标均较稳定,结构滑移施工的可控性较好。

## 2.3 滑移单元对接精度控制难度对比

本工程的钢网架跨度和施工挠度均较大。无论是采用何种滑移形式,保证单元 $N+1$ 与单元 $N$ 之间的对接精度均是施工的关键。

单元 $N+1$ 与单元 $N$ 在对接前均会产生不同程度的下挠,保证二者对接口的挠度差接近是保证对接精度的关键。提取两种滑移方案每次对接次对接口差值的最大值进行均值处理并统计分析。各对接次对接口挠度差值及变化趋势如图15、表2所示。

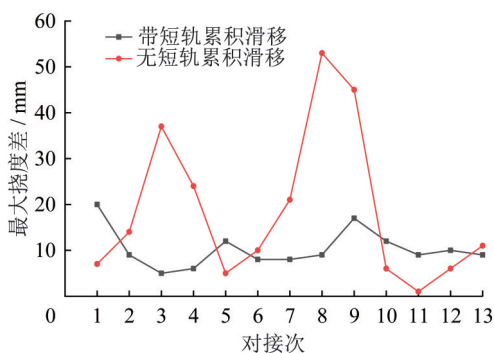


图15 各对接次对接口挠度差值变化

Fig. 15 Variation of deflection difference of docking interface in all docking sequences

从上述统计数据可以看出:带滑轨累积滑移方案中第1、5、9、10次对接挠度差较大,其中第1次对接挠度差较大是由于单元 $N$ 的长跨较小,且处于三边支承状态结构出现轻微扭转,导致对接侧出现了小幅上拱;第5、9、10次对接挠度差大是由于单元 $N$ 在对接侧滑靴支承间存在上部米斗造型,从而导致下挠增大。无滑轨滑移方案中第3、8、9次对接挠度差较大,是由于单元 $N+1$ 对接侧跨中区域存在上部米斗造型,导致下挠过大。

表2 各对接次对接口挠度差值

Table 2 Deflection difference of docking interface in all docking sequences mm

对接次序	带短轨滑移对接口 挠度差	无短轨滑移对接口 挠度差
1	20	7
2	9	14
3	5	37
4	6	24
5	12	5
6	8	10
7	8	21
8	9	53
9	17	45
10	12	6
11	9	1
12	10	6
13	9	11
最大值	20	53
平均值	10	19
方差	17.39	279.40

对比两种滑移方案挠度差统计数据可以看出:无短轨滑移方案的挠度差值及其变化幅度均高于带短轨滑移方案的挠度差值及其变化幅度,其中无短轨滑移方案挠度差最大值与平均值分别比带短轨滑移方案挠度差最大值与平均值高165%、90%。

从上述对比可知,无滑轨累积滑移方案中单元 $N+1$ 与单元 $N$ 之间会产生更大的挠度差,导致对滑移单元件对接精度的控制难度更大。

## 2.4 本节小结

由上述对比可知:在带滑轨累积滑移方案中,单元 $N+1$ 在卸载前已与单元 $N$ 对接完毕,使得其卸载过程对单元 $N$ 的滑靴反力及滑靴垂直于轨道方向的水平位移产生较大影响,因此该方案的施工可控性更差。且在累积滑移方案中,滑移结构跨中存在短滑轨滑靴支撑,导致结构受力及支承状态与设计状态差异较大,结构杆件的附加应力更高。

但由于带滑轨累积滑移方案中滑移单元跨中设置了短滑轨,且单元 $N$ 对接侧在与单元 $N+1$ 对接完毕后再滑离短滑轨,因此其滑移单元的对接精度较无短轨累积滑移方案滑移单元的对接精度更易控制。综合考虑后,本工程最终选定无短轨累积滑移方案。

## 3 施工关键技术

### 3.1 施工-设计全过程仿真分析

传统施工仿真模拟仅分析结构在施工过程中结构的变形及构件应力情况,未考虑结构在受施工干扰且成型后,受设计荷载作用时的变形及承载力是否满足要求。基于此现状,本工程采用有限元分析软件Midas Gen对屋盖结构进行了滑移施工-设计全过程仿真分析,即在施工全过程仿真分析的基础上,需在结构施工最终阶段的状态下叠加设计荷载开展分析。

#### 3.1.1 分析模型

对滑移结构进行独立建模分析:其上部滑移结构的竖向设置只受压边界,沿滑移方向设置为自由滑动状态。垂直滑移方向的边界分为三种状态,即:(1)当滑靴所受水平力小于滑靴与滑轨之间的静摩擦力时,滑靴被完全约束;(2)当滑靴所受水平力大于滑靴与滑轨之间的静摩擦力时,滑靴与滑轨间产生相对位移;(3)当滑靴与滑轨的相对位移值超过限位挡板与滑轨之间的间距时,发生“啃轨”现象,滑靴被完全约束。因此,采用三折线节点弹性支承模拟滑靴与滑轨之间的连接。

#### 3.1.2 荷载考虑

滑移结构施工-设计全过程分析考虑的荷载有:(1)恒载:滑移结构自重荷载,根据深化模型重量取自重系数1.3;(2)活载:主要由滑移不同步产生,鉴于结构刚度较小,通过节点强制位移实现对这一效应的模拟;(3)风荷载:本工程位于浙江省杭州市,按10年重现期基本风压取 $0.3 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ,风荷载分别作用于平行和垂直滑轨的方向上;(4)温度作用:取 $\pm 20^\circ\text{C}$ 呼吸温度;(5)设计荷载:在结构施工最终阶段的基础上叠加设计荷载,荷载类型为成桥阶段荷载(ST);(6)滑移施工动力效应:取动力系数1.1。

#### 3.1.3 分析结果

结构一次成型变形云图和施工最终步变形云图如图16、17所示。从滑移结构的竖向变形云图可以看出施工完成后,结构呈现出跨中下挠与两端上拱的变形趋势,与结构一次成型的变形趋势接近且结构变形均匀。但结构施工最终步变形量与一次成型变形量差距较大,且各滑移单元在卸载后的下挠值也有差异,为保证拼接精度及结构成型后的位型,需要结合具体位移值对结构进行预起拱。

结构在施工阶段的构件应力比云图及叠加设计荷载后的应力比云图如图18、19所示。从构件应力分析结果可知,因施工阶段与设计一次成型时结构的受力状态存在差异,部分杆件内力有所增加,因此需对应应力超标杆件

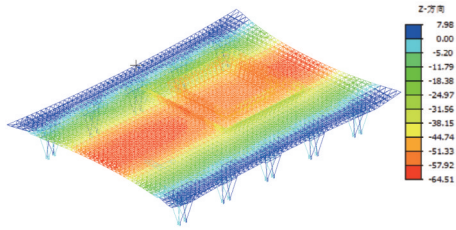


图 16 结构一次成型变形云图(单位:mm)

Fig. 16 Deformation contour of structure formed at one time (unit: mm)

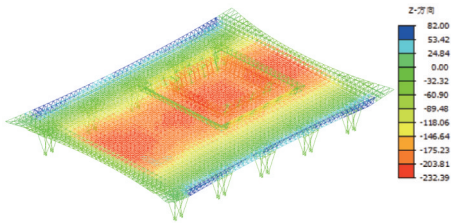


图 17 结构施工最终步变形云图(单位:mm)

Fig. 17 Final step deformation contour of structural construction (unit: mm)

进行换杆处理。从换杆区域分布来看,杆件内力增幅较大的区域主要集中在各滑移单元跨中区域的上、下弦杆及滑靴支承区域的腹杆处。

经过换杆处理后,结构在施工最终阶段其杆件最大应力比为 0.85;在最终阶段的基础上叠加设计荷载后杆件的最大应力比为 0.95,该最大值位于结构跨中上弦杆位置处,此杆件为受压构件其承载力由稳定条件控制。

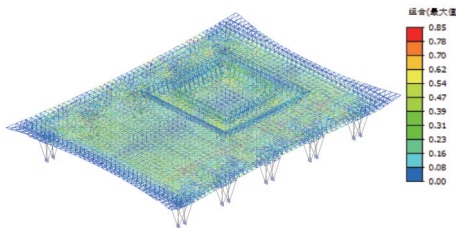


图 18 施工阶段的构件应力比云图

Fig. 18 Contour of component stress ratio during construction phase

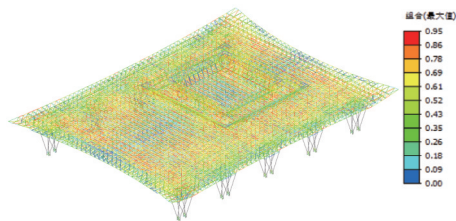


图 19 叠加设计荷载后构件应力比云图

Fig. 19 Contour of component stress ratio after superimposing design loads

从结构稳定性分析结果可知,滑移施工各阶段结构稳定性安全系数最小值  $K_{min}=4.3(>4.2)$ ,满足《空间网架结构技术规程》(JGJ 7—2010)<sup>[10]</sup>要求。

### 3.2 滑移支承结构设计

本项目滑移支承结构由“拼装平台+滑轨+滑轨支承结构”组成。

#### 3.2.1 拼装平台设计

##### 1) 拼装平台布置及构造

由于屋盖钢网架整体位于河道上方,下方无天然作业场地,且河岸边场地较小无法搭建拼装平台,故将拼装平台设置于靠近西侧岸边的河道内,同时机械可在河岸边进行平台安装及拆除作业,使施工更加便捷,如图 21 所示。

拼装平台构造图如图 20 所示。拼装平台由“平台横梁+拉杆+钢柱”组成,长 130 m、宽 12 m、高 17 m,平台底部设置钢管桩作为平台基础。钢管桩为 P820 mm×12 mm 的开口圆管,打桩深度约 30 m。钢管桩露出水面 0.5 m,顶部设置十字顶板及封口板,便于安装平台钢柱。

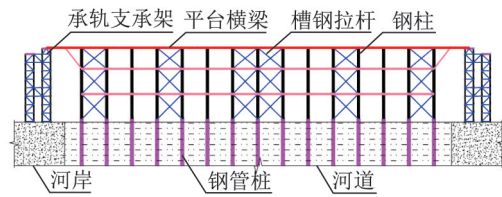


图 20 拼装平台构造

Fig. 20 Construction of assembly platform

平台钢柱为 P630 mm×12 mm 的圆钢管,底部与钢管桩封口板焊接。平台横梁截面规格为 450b 工字钢,材质为 Q235B;拉杆截面规格为 16#槽钢,交叉布置于钢柱之间,材质为 Q355B。钢梁上部铺设成品板形成施工作业面。

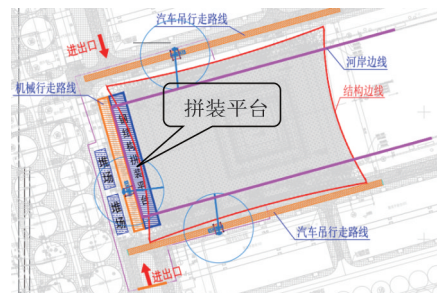


图 21 拼装平台布置

Fig. 21 Arrangement of assembly platform

##### 2) 分析模型

采用有限元软件 Midas Gen 对模型进行分析,其中

钢柱底部采用铰接边界模拟,撑杆及拉杆采用桁架单元模拟,钢梁采用梁单元模拟。

3) 荷载考虑

拼装平台考虑的荷载有:(1)恒载:滑移结构自重荷载,自重系数取1.1;(2)活载:拼装平台施工荷载 $L_1=2.0\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ;拼装平台上部网架自重荷载(折算为均布荷载) $L_2=1.4\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ,均布荷载均折算为线荷载施加于钢梁上;(3)风荷载:本项目位于浙江省杭州市,按10年重现期,基本风压取 $0.3\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ,风荷载分别作用于平行和垂直滑轨的方向,折算为线荷载施加在平台钢柱上;(4)温度作用:取 $\pm 20\text{ }^\circ\text{C}$ 呼吸温度。

3.2.2 滑轨及其支承结构设计

1) 滑轨及其支承结构布置及构造

为便于结构滑移就位后的支座安装,及滑移支承结构与格构柱的拉结,将滑轨布置于结构双排抗震支座之间,对应的滑移支承结构布置于滑轨下方与河道两岸上,如图22所示。



图22 滑移支承结构现场照片

Fig. 22 On-site photo of sliding support structure

考虑支承结构与结构之间的净空高度、滑靴高度以及滑槽宽度,承轨钢梁截面规格选定为为:H570 mm $\times$ 400 mm $\times$ 20 mm $\times$ 30 mm,材质为Q355B。格构柱之间的承轨钢梁利用格构式支撑架作为竖向支撑。考虑到格构柱支撑承受滑移荷载时的变形较大,故在格构柱内部设置圆管柱作为承轨钢梁的竖向支撑。

格构式支撑架立杆截面为B150 mm $\times$ 8 mm、腹杆截面为B80 mm $\times$ 5 mm、材质为Q355B,底部通过预埋件与浅基础连接固定。圆管柱截面为P630 mm $\times$ 12 mm,材质为Q355B。考虑到结构滑移时在风荷载、温度荷载及自重荷载作用下,滑轨会承受一定的水平力,故格构式支撑架采用双排布置,圆管柱中部设置拉杆与格构柱拉结,以提高支承结构的侧向稳定性。

2) 分析模型

采用有限元分析软件Midas Gen对选取的滑移支承

结构标准段进行建模分析,如图23所示。其中,钢管柱与格构式支撑架底部采用铰接边界模拟;拉杆与格构式支撑架腹杆采用桁架单元模拟;承轨钢梁采用梁单元模拟。

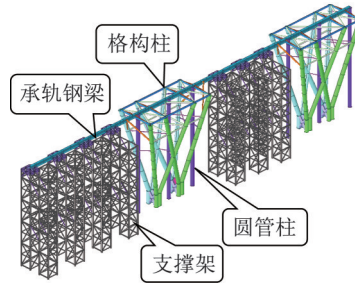


图23 滑移支承结构模型

Fig. 23 Sliding support structure model

3) 荷载考虑

拼装平台考虑的荷载有:(1)恒载:滑移结构自重荷载,自重系数取1.1;(2)活载:滑靴传递的竖向荷载;滑移结构在温度荷载、风荷载作用下产生的水平力,由施工仿真分析模型中提取;顶推器产生的除平衡滑靴摩擦力之外的额外反推力,按照经验取 $0.05F$ ( $F$ 为顶推器的顶推力);(3)风荷载:本工程位于浙江省杭州市,按10年重现期,基本风压取 $0.3\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ,风荷载分别作用于平行和垂直滑轨的方向,折算为线荷载施加在平台钢柱上;(4)温度作用:取 $\pm 20\text{ }^\circ\text{C}$ 呼吸温度。

4) 分析结果

从变形情况来看,滑移支承结构顶部最大水平变形为24.54 mm( $<30.00\text{ mm}$ ),满足槽钢轨道容差要求,且考虑滑移结构与滑移支承结构的协同变形,轨道容差余量会更大;承轨钢梁最大竖向位移为8.13 mm( $<6\ 500/600=10.80\text{ mm}$ ),满足《钢结构滑移施工技术标准》(T/CSCS 009—2020)<sup>[11]</sup>的要求。

滑移支承结构应力比云图如图24所示。从结构应力情况来看,构件最大应力比为0.81( $<0.90$ ),该构件出现在承轨钢梁靠近支撑的位置,由剪切强度控制。

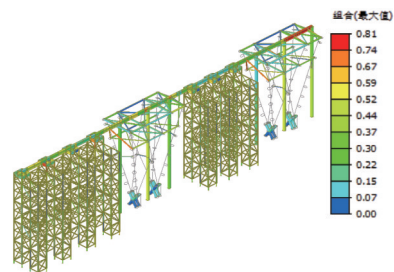


图24 滑移支承结构应力比云图

Fig. 24 Stress ratio contour of sliding support structure

### 3.3 滑靴预偏

本工程滑移施工采用夹轨式,滑靴底板与工字钢滑轨之间设置有两块侧向限位挡板。由于屋盖结构跨度大、单个滑移单元刚度较小,且滑移结构跨中未设置短滑轨。在滑移过程中,结构在自重、温度等因素的作用下,滑靴会产生垂轨方向的水平位移,导致滑靴的水平限位挡板与滑轨之间的间隙产生变化<sup>[12]</sup>。因此需根据理论分析结果对滑靴的初始位置进行预偏处理,同时调整水平限位挡板的间距,以避免屋盖在滑移过程中其水平限位挡板与滑轨之间产生物理接触,发生“啃轨”现象。

考虑到本工程采用独立搭设的滑移支承结构,该结构侧向刚度较小,在水平力及温度作用下,滑移支承结构与滑移结构会产生一定程度的协同变形。因此需将滑移结构与滑轨支承结构进行合模分析,以分析滑移结构在自重荷载及温度荷载作用下滑靴与滑轨之间的相对位移,合模模型如图25所示。考虑到滑靴所受水平力与滑靴、滑轨间静摩擦力的大小关系对二者相对位移的影响,滑移结构与滑移支承结构之间的连接采用三折线弹性连接。

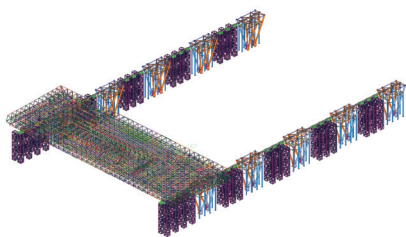


图25 滑移结构与滑移支承结构合模模型

Fig. 25 Combined model of sliding structure and sliding support structure

分别提取各施工阶段下各滑靴及滑靴与滑轨接触点在自重荷载与温度作用工况下,垂轨方向的水平位移值,将统计所得的最大值进行均值处理并求取其平均值及二者的差值如表3所示。

表3 不同工况下滑靴及滑轨水平位移值

Table 3 Horizontal displacements of sliding shoes and rails under different loading conditions mm

水平位移	自重荷载	温度作用
滑靴水平位移均值	29	16
滑轨水平位移均值	8	6
二者水平位移差	21	10

由于在外力作用下,滑移支承结构与滑移结构会产生协同变形,因此二者产生的相对位移值需取二者垂直于轨道方向水平位移的差值。分析可知,在滑移结构自重作用下,滑靴与滑轨产生了自跨中向两端方向的相对

位移,各滑靴相对位移最大值的均值为21 mm;在 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 呼吸温度作用下,各滑靴与滑轨相对位移最大值的均值为10 mm。综上,对各滑靴沿两端向跨中方向预偏21 mm以抵消自重作用下滑靴与滑轨之间的相对位移。同时根据呼吸温度作用下滑靴与滑轨之间的相对位移值,适当扩大水平限位挡板的间距。

### 3.4 V形柱及柱顶支座的安装

V形柱按南北两侧对称分布,靠内侧钢管厚度较大,为 $P700\text{ mm}\times 45\text{ mm}$ ;靠外侧钢管厚度较小,为 $P700\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ ,如图26所示。将钢柱从立面上分为柱脚埋入段和上部钢柱两大部分,以内侧钢柱为例将上部钢柱分为5个分段,如图27所示。

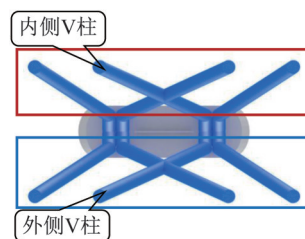


图26 V形柱俯视图

Fig. 26 Top view of V-shaped columns

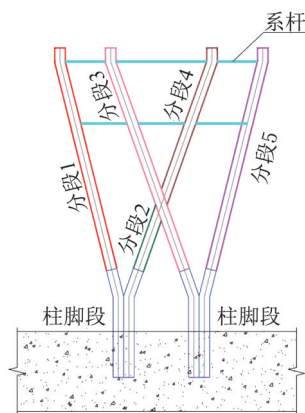


图27 V形柱分段示意

Fig. 27 Diagram of V-shaped column segmentation

V形柱安装主要采用100 t汽车吊装。由于上部钢柱分段存在一定斜度,吊装时下部搭设单管作为临时支撑,单管撑规格为 $P299\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 。钢柱安装完毕后安装柱间系杆,最后拆除单管撑。

如图28为柱顶支座详图,图中网架与V形柱之间采用抗震球支座进行连接。由于焊接球需“嵌入”支座上方的环向外加劲肋中,若在网架滑移到位后再塞装支座,施工难度会增大。

对此采用带支座滑移。具体步骤为:(1)在网架拼

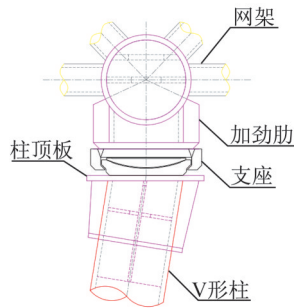


图28 柱顶支座详图

Fig. 28 Detailed drawing of column top support

装时将支座与焊接球进行焊接固定;(2)适当提高滑靴高度,使支座底板与V型柱顶板形成一定间隙,确保滑移过程中二者不发生干涉,同时通过施工预起拱,保证内侧与外侧支座的底部标高接近;(3)网架滑移至设计位置后,对滑靴逐步卸载,确保内外侧支座同步落位至设计位置,如图29所示;(4)完成支座底板与柱顶板的焊接。



图29 网架卸载前支座的位置

Fig. 29 The position of the supports before unloading

## 4 结论

本文结合了杭州仁和粮食储备库码头钢结构工程项目,对河上大跨钢网架滑移施工的方案进行了对比并对施工关键技术进行了总结,得出了主要技术点如下:

(1)相对于带短轨累积滑移法,无短轨累积滑移法的杆件附加应力更小、施工可控性更高,但滑移单元对接精度控制难度稍大,其可以通过预起拱、反顶调节等措施解决。因此,最终选定无短轨累积滑移法。

(2)在结构施工最终阶段的状态下,以成桥荷载为基准叠加设计荷载,对钢网架滑移进行施工-设计全过程仿真分析,验证了本项目滑移方案的安全性和可行性。

(3)考虑施工场地特殊性,针对性设计了安拆便捷、承载力高和抗侧性能好的滑移支承结构及拼装平台。

(4)考虑滑移支承结构与滑移结构的协同变形,对滑移结构及滑移支承结构进行合模分析。结合滑靴与滑轨在自重荷载与温度荷载作用下的相对位移,对滑靴采

取预偏、适当放大滑靴限位挡块间距等措施,避免滑移过程中出现“啃轨”现象。

(5)网架带支座整体滑移,可避免滑移后塞装支座,从而减小施工难度。

## 参考文献:

- [1] 王宏.大跨度钢结构施工技术[M].第2版.北京:中国建筑工业出版社,2020:338-340.  
WANG Hong. Construction technology of longspan steel structure[M].2nd ed.Beijing: China Architecture & Building Press,2020:338-340.(in Chinese)
- [2] 邱鹏.空间网格结构滑移法施工全过程分析方法及若干关键问题的研究[D].杭州:浙江大学,2006.  
QIU Peng.Research on construction analysis method during the whole erection process and some critical technology for sliding construction of space network structure.[D] Hangzhou: Zhejiang University,2006.(in Chinese)
- [3] 丁坚龙,刘粟雨,章一瑜,等.某交通中心钢屋盖施工方案比选及施工关键技术[J].施工技术(中英文),2024,53(2):38-42.DOI:10.7672/sjgs2024020038.  
DING Jianlong, LIU Suyu, ZHANG Yiyu, et al. Construction scheme comparison and key construction technologies of a traffic center steel roof[J]. Construction Technology, 2024, 53(2):38-42.DOI:10.7672/sjgs2024020038.(in Chinese)
- [4] 裘建华,邹海涛,邹春林,等.大跨钢桁架结构倾斜滑移施工技术[J].建筑钢结构进展,2023,25(7):108-116.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.07.011.  
QIU Jianhua, ZOU Haitao, ZOU Chunlin, et al. Study on the inclined sliding construction technology for large-span steel truss structures[J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(7):108-116.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.07.011.(in Chinese)
- [5] 邓良波,张宏达,吴楚桥,等.简阳文体倾斜网架钢屋盖施工技术[J].工程技术研究,2021(9):51-52.DOI:10.3969/j.issn.1671-3818.2021.09.022.  
DENG Liangbo, ZHANG Hongda, WU Chuqiao, et al. Construction technology of steel roof of Jianyang style inclined grid structure[J]. Engineering and Technological Research, 2021(9):51-52.DOI:10.3969/j.issn.1671-3818.2021.09.022.(in Chinese)
- [6] 王留成,俞奇效.鄂尔多斯机场新航站楼钢结构工程累积旋转带柱滑移施工技术[J].施工技术,2012,41(357):9-12.DOI:CNKI:SUN:SGJS.0.2012-02-005.  
WANG Liucheng, YU Qixiao. Construction technology of accumulated rotating slip with column in steel structure project of new terminal of Ordos Airport[J]. Construction Technology, 2012, 41(357):9-12.DOI:CNKI:SUN:SGJS.0.2012-02-005.(in Chinese)
- [7] 魏成权.体育馆钢屋盖旋转滑移技术[J].广东土木与建筑,2010,17(8):39-42.DOI:10.19731/j.gdtyjz.2010.08.

- 012.41.  
WEI Chengquan. Stadium steel roof rotating slip technique[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2010, 17(8): 39-42. DOI: 10.19731/j.gdtmyjz.2010.08.012. (in Chinese)
- [ 8 ] 张文学. 大跨度拱形钢网架滑移施工全过程仿真分析关键技术[J]. 建筑施工, 2020, 42(8): 1541-1543, 1546. DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2020.08.062.  
ZHANG Wenxue. Key technology of simulation analysis in whole process of large-span arch steel space truss sliding construction[J]. Building Construction, 2020, 42(8): 1541-1543, 1546. DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2020.08.062. (in Chinese)
- [ 9 ] 崔嘉慧, 邵冰, 邹海涛, 等. 不同施工工艺下周边支承网架结构附加应力分布及安全性研究[J]. 建筑钢结构进展, 2023, 25(6): 85-96. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.06.010.  
CUI Jiahui, SHAO Bing, ZOU Haitao, et al. A study on the additional stress distribution and safety of peripheral support grid structures under different construction techniques [J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(6): 85-96. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.06.010. (in Chinese)
- [ 10 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 空间网格结构技术规范: JGJ 7—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Space Frame Structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [ 11 ] 中国钢结构协会. 钢结构滑移施工技术标准: T/CSCS 009—2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.  
China Steel Construction Society. Technical Standard for Sliding Construction of Steel Structure: T/CSCS 009—2020[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020. (in Chinese)
- [ 12 ] 蔡柳鹤, 贾尚瑞, 邢遵胜, 等. 苏州文体中心体育馆屋盖滑移施工模拟分析[J]. 建筑钢结构进展, 2016, 18(4): 75-80, 38. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2016.04.012.  
CAI Liuhe, JIA Shangrui, XING Zunsheng, et al. Construction simulation on the roof sliding of gymnasium in Suzhou Culture and Sports Center[J]. Progress in Steel Building Structures, 2016, 18(4): 75-80, 38. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2016.04.012. (in Chinese)