

# 大跨度曲面双层网壳结构整体顶升施工技术研究

## Research on Integral Jacking Construction Technology of Large-span Curved Double-layer Reticulated Shell Structure

刘敏

Min Liu

渝黔渝万铁路有限责任公司 中国·重庆 400000

Chongqing-Guizhou-Chongqing-Wanzhou Railway Co., Ltd., Chongqing, 400000, China

**摘要:** 新建郑州至万州铁路重庆段巫山、奉节、云阳3座新建车站候车大厅均为正放四角锥双层网壳结构,节点形式为焊接加肋空心球,下弦周边点支撑。其中云阳站网架尺寸为110m×54m,最高处屋面高度19.45m,网架矢高2.530~3.869m变化,总重约285t;奉节站网架尺寸为116m×58.80m,最高处屋面高度为22.30m,网架矢高0.509~4.701m变化,总重约450t;巫山站最大网架尺寸为52.2m×28.7m,网架最高点9.85m,总重约105t。采用整体顶升施工技术在确保施工质量、安全的前提下,大大缩短了施工周期,取得了良好的社会和经济效益。

**Abstract:** The waiting halls of the three newly-built stations of Wushan, Fengjie and Yunyang in the Chongqing section of the new Zhengzhou - Wanzhou Railway are all square pyramid double-layer reticulated shell structures, the joint form is welded stiffened hollow ball, and the lower chord is supported by surrounding points. The grid frame size of Yunyang Station is 110m × 54m, the roof height at the highest point is 19.45m, the height of the grid frame is 2.530~3.869m, and the total weight is about 285t; The grid frame size of Fengjie Station is 116m × 58.80m, the highest roof height is 22.30m, the height of the grid frame is 0.509~4.701m, and the total weight is about 450t; The maximum grid size of Wushan Station is 52.2m × 28.7m, the highest point of the grid is 9.85m, and the total weight is about 105t. Under the premise of ensuring the construction quality and safety, the overall jacking construction technology has greatly shortened the construction period and achieved good social and economic benefits.

**关键字:** 大跨度; 曲面网壳结构; 整体顶升; 施工技术

**Keywords:** large span; curved surface and shell structure; overall jacking; construction technology

**DOI:** 10.12346/etr.v4i12.7448

## 1 引言

大跨度空间网格结构的成型是通过吊装、整体(或部分)滑移、整体顶升(或提升)等施工技术从一系列准结构逐渐安装形成最终结构的过程。在施工过程中可能会发生结构失去平衡而倾覆,或由于结构失去稳定而倒塌或由于局部构件和节点强度不足而破坏,也可能成型后的结构与设计状态相差甚远。因此,本次结合郑万高铁重庆段云阳站候车大厅网架施工,介绍大跨度网壳结构拼装、整体顶升、卸载的施工工艺及关键施工技术<sup>[1]</sup>。

## 2 工程特点及重、难点

本工程施工地狭窄,站房四周仅能预留部分材料运输道路,且不能形成环线;加之铁路站房建设周期一般较短,需为装修施工预留足够的作业时间;本工程网架施工需综合考虑质量、安全、工期、经济性等因素。

①网架拼装精度控制。整个网架中央高两侧低,采用累积顶升法进行拼装,需提供一款稳定的地面拼装胎架。

②杆件焊接质量控制。焊接质量是结构受力状态和性能稳定的基础,亦是网架施工控制的关键环节。

③网架整体同步顶升及监控量测控制。网架顶升同步控

【作者简介】刘敏(1982-),男,中国重庆人,本科,工程师,从事房建专业研究。

制是关键,同时顶升过程中需对网架进行有效的监控量测,确保网架安装精度满足规范要求。

### 3 施工方案分析

#### 3.1 可供选择的施工方案

①高空拼装。搭设满堂支撑胎架,将小拼单元或散件(单根杆件及单个节点)直接在设计位置进行总拼的方法。优点:构件起重要求低。缺点:需搭设拼装支撑体系,工期长,场地要求严格。

②整体吊装。在地面完成网架结构的拼装,形成一个整体,再通过起重机械将结构整体提升到结构柱顶部位以上,进行空中的移位和落位完成安装工作。优点:高空作业量少,焊接质量好。缺点:大型起重设备吊运,技术复杂。

③高空滑移。在施工建筑物屋面搭建平台,拼装完成后用牵引设备将单元向前滑移,再进行第二个拼装单元的拼装、滑移,直到将所有的单元拼装完成并滑移到指定位置<sup>[2]</sup>。优点:对设备要求不高。缺点:需合适的平台。

④整体提升。利用提升装置将在地面或楼面拼装的结构逐步提升至既定位置的施工方法。安装方法有滑模提升、桅杆法、升板机提升等。优点:提升平稳、差异小,同步性好。缺点:设备投入大、准备复杂、费时、费工。

⑤整体顶升。在地面胎架上拼装,利用液压同步顶升系统顶升至设计标高后进行就位安装,与整体提升具有相似性,不同之处在于顶升系统设置形式,该法不需要大型吊装设备和机具,安装工艺简单,同步性好,功效高,施工安全。

通过以上分析、对比,结合郑万高铁站房项目钢网架结构形式、场地环境及建设要求等因素,适用整体顶升法进行施工。

#### 3.2 整体顶升方案分析

##### 3.2.1 顶升点位布置

顶升点设置方法是利用原设计文件,顶升点作为支座,只考虑承受竖向荷载,不考虑地震、温度等作用。根据设计图纸、规范及相关施工经验,给出顶升点位数量及位置布置方案,利用空间结构设计软件验算。如出现超应力杆件,则需要调整顶升点位数量及位置直至无超应力杆件为止,或改变个别超应力杆件的截面,直至满足要求。

方案一:共设置4排共计12个顶升点位(图1)。

经验算,方案一顶升点布置数量和位置存在超过50%的超应力杆件。由于超应力杆件数量较多,通过调整顶升点数量及位置进行方案调整。

方案二:在方案一的基础上增加2个顶升点位,顶升点位按照4排共计14个进行布置(图2)。

经验算,方案二顶升点布置数量和位置不存在超应力杆件,满足要求。

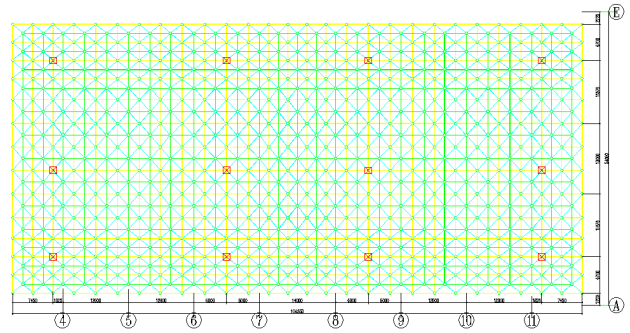


图1 方案一顶升点数量及位置布置图

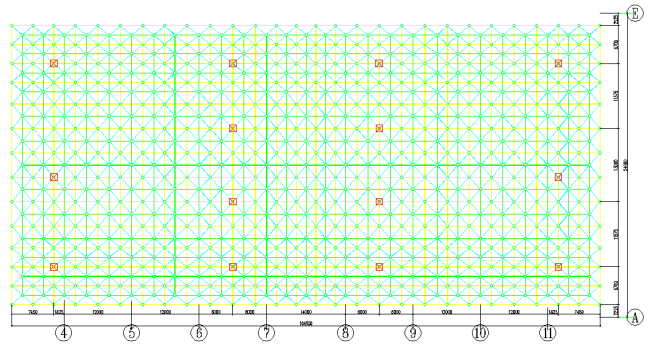


图2 方案二顶升点数量及位置布置图

##### 3.2.2 不同工况下的3D3S模型受力分析

在顶升工况验算中,共分成三个施工过程进行了施工验算、分析。

①第一工况:第一工况为中间跨拼装区域网架,利用中间2排8个顶升点进行地面扩展拼装顶升。此时最大支座反力150.8kN,最大应力比0.60。

②第二工况:第二工况为在第一工况基础上,两侧各扩展拼装4排节点球,仍利用中间2排8个顶升点进行扩展拼装顶升。此时最大支座反力313.7kN,最大应力比0.94。

③第三工况:第三工况为整个网架地面拼装完成,利用4排14个顶升点进行网架整体顶升就位安装。此时最大支座反力307.9kN,最大应力比0.83。

结论:根据计算结果显示,各工况条件下,都没有超应力杆件,且位移没有超差,满足顶升要求。

##### 3.2.3 顶升系统

顶升支架:网架节点正方形格构架,立柱规格P140×4mm,标准节高度1010mm,标准节与标准节间采用螺栓球连接,拆卸十分方便。

60T自锁式千斤顶:可以保证在油管爆裂的情况下也可以对千斤顶活塞柱保持锁死状态,防止顶升支架下滑引起网架的整体失稳。

中压2MPa液压泵站:可控制2台液压千斤顶。

电脑同步控制系统:通过每台千斤顶上的位移传感器信

号控制该油路电磁阀的开通或关闭，从而调节各项顶升点顶升力，实现力与位移的控制。

顶升前在电脑端设置单次顶升最大行程和最大同步误差等信息<sup>[3]</sup>，顶升过程当中有顶升点最大同步误差超过设定值后，系统自动控制最大行程顶升点暂停顶升，待其他顶升点位达到或接近最大行程后再启动暂停顶升点继续顶升。

### 3.2.4 顶升支座的优化

如图3所示，顶升支座采用30mm厚钢板制作，包含1块底板基座和4块肋板支撑部，肋板支撑部顶面与焊接球接触面处理成球形凹陷结构，大大提高连接节点的配合稳定性，支撑点焊接球落入球形凹陷结构内，提升支座胎架结构应对侧向力的能力；底板扩大受力面积提高支座胎架的整体支撑稳定性。

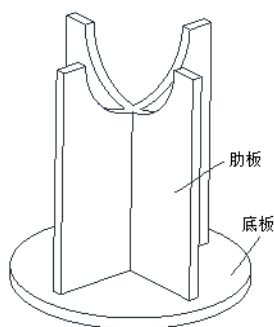


图3 顶升支座胎架示意图

## 4 施工工艺流程及操作要点

### 4.1 工艺流程

施工准备→台架拼装→网架拼装→网架焊接→验收合格→网架顶升→网架卸载。

### 4.2 胎架拼装

采用钢板底座+钢管支撑部胎架，通过底部钢板底座扩大受力面积，支撑部钢管作为主支撑结构，顶部通过垫薄钢板进行微调。根据相邻球节点高差及焊接作业操作高度要求，支撑点高度从400~1200mm不等，拼装胎架高度大于1m时，底部托板通过2颗M14膨胀螺栓与地面固定。

### 4.3 网架拼装

①网架拼装顺序。确定合理的拼装顺序是为了减少焊接时产生的变形与应力。总体拼装的顺序从中心向四周扩拼，从中跨向两边扩拼，因为网架在向四周拼装时，四周均可自由收缩。

②小单元基准格拼装及扩展拼装。

第一，放线：根据图纸在地面上测设出下弦球及支撑胎架中心十字线，并设置好支撑胎架。

第二，放球：将已验收的焊接球按规格、编号放入安装节点，并将球水平中心线的环形焊缝置于赤道方向。

第三，放置杆件：将备好的杆件按规定的规格布置在两

球之间，调整间隙并点固。

第四，安装上弦球：在已成型的下弦单元网格上，用两根腹杆加上弦球做成人字形往上拼装，将上弦球定位，使上弦球中心与地面投影中心位置吻合。同样方法，将其余三个上弦球定位，然后安装上弦杆，形成一个小单元基准格。

第五，扩展拼装：中心区小单元基准格拼装完成后，利用球和杆之间的相互定位逐渐向外扩展拼装。

③网架拼装误差控制措施。主要从杆件加工精度和现场控制测量两方面进行控制，采用计算机进行放样、分析，充分考虑各种误差；现场采用全站仪进行定位放样、测量控制，每格拼装完成均进行高、低度、水平度、几何尺寸、挠度等测量，做到每格合格，整体拼装后做一次全面检查和测量，确保不留下任何问题。

拼装胎架如图4所示。

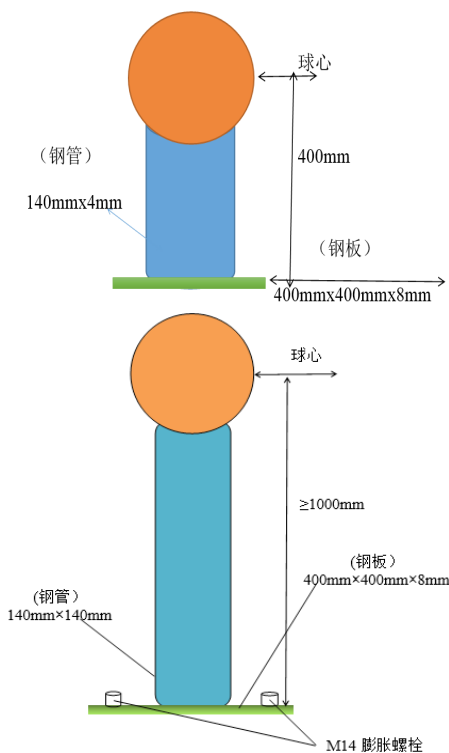


图4 拼装胎架示意图

### 4.4 网架焊接

采用气体保护焊封底和盖面，主要从焊接工艺、焊接人员及焊缝检测进行控制。

#### 4.4.1 焊接工艺

①正式焊接施工前，根据现行国家标准《钢结构焊接规范》规定进行焊接工艺评定试验。

②焊接前，采用钢丝刷、砂轮等工具清除待焊处表面的氧化皮、铁锈、油污等杂物。

③球、杆焊接前应在杆件端头位置加设钢衬垫板，钢衬垫板应选用屈服强度不大于被焊钢材标称强度的钢材，且焊接性应相近。钢衬垫板应与接头母材密贴连接，其间隙不应大于1.5mm，并与焊缝充分熔合。采用手工电弧焊和气体

保护电弧焊时,钢衬垫板厚度不应小于4mm。

#### 4.4.2 焊接人员

进场焊工均应有“安监局”或“应急管理局”颁发的特种作业操作证。焊工进场后按实际焊接环境组织考试,考试合格后方可进行工程实体焊接作业。

#### 4.4.3 焊缝检测

焊缝表面缺陷100%检查;内部缺陷检查全熔透的一、二级焊缝采用超声波探伤检查,一级焊缝100%,二级焊缝20%,当超声波探伤不能对缺陷作出判断时采用射线探伤。

### 4.5 网架顶升

#### 4.5.1 顶升施工流程

安装顶升支承架系统;启动油泵,泵站供油,在电脑控制下,千斤顶同步顶推升一个行程;在底部加装一个支承架标准节;泵站回油,让支架承担网架重量,然后抽出拉板销钉;泵站回油,让千斤顶活塞回到缸体内;安装拉板销钉,泵站供油,使千斤顶处于受力状态,准备下一次顶升。

#### 4.5.2 缆风绳设置

顶升前对顶升支撑架进行揽风处理,每个顶升点设置4根 $\phi 14$ 钢丝绳倒链,可使支撑架与网架形成一个刚性的整体。在顶升过程中,架体每升高5m,增加4根 $\phi 14$ 钢丝绳与网架结构进行拉结,增强顶升稳定性。

#### 4.5.3 试顶升

所有准备工作完成后进行试顶升,让网架脱离支撑胎架200mm,锁定油缸,8小时后检查网架及地面基础。如有异常变化必须相应处理,方可继续施工。

#### 4.5.4 正式顶升

试顶升合格后进行正式顶升,每次顶升至500mm高度时,须校核各顶升点之间的相对位移,再继续顶升到一个标准节,开始组装标准节,以此类推,直至到达网架就位标高。在顶升过程中,通过同步数控系统及过程监控量测手段,保证在顶升过程中各顶点保持同步,同步精度误差在10mm内。

#### 4.5.5 监控量测

①网架顶升前,在网架的4个角处及中心处确定五个固定点。通过吊线锤的方式对水平位移进行观测。千斤顶每顶升一个行程,通过观察和卷尺测量检查、控制网架平面位置偏差在设计及规范允许范围内。

②网架拼装完成顶升作业前,在下弦中央一点及各向下弦跨度的四等分点位置设置挠度监测点,顶升前通过全站仪测量各监测点平面位置及高程,检查网架拼装挠度是否满足设计要求,并记录初始数据作为后续挠度监测的对比值和参考值。

千斤顶每顶升一个行程,利用全站仪对设置在下弦球上的监测点进行平面位置及高程测量,监测顶升过程中网架精度是否满足设计要求,同时进一步印证液压同步控制系统同步顶升控制的有效性。

③顶升过程中,利用红外线水平仪对顶升支架垂直度进行监测,每顶升一个行程测量一次,顶升支架垂直度允许偏

差不大于1/1000。

### 4.6 网架卸载

#### 4.6.1 网架卸载

①当网架具备就位条件后开始卸载,在卸载过程中最重要的是保证同步,各顶升点之间高差最大不得超过30mm。

②每次卸载高度为50mm,然后停止并观察各点状态,以确保下一次卸载的调整值,把卸载误差控制在10mm之内。

③卸载过程中应有观察员、安全员,监控全过程,发现异常情况及时报告。

#### 4.6.2 顶升机具拆除

千斤顶卸载之后进行顶升支架的拆除,先将顶升支架上部与网架连接部位断开,以顶升架顶端为吊点,利用吊车把顶升架吊起使支架底部脱离地面,工作人员在地面依次从下往上拆除顶升架。在拆除过程中,每拆除一个标准节,吊车吊臂下降一个标准节高度,使整个顶升架的拆除在地面完成,最大限度地确保安全。

## 5 效益分析

①社会效益:钢网架采用整体顶升施工工艺圆满完成施工,得到了业主、监理等各方的认可,并被多家知名新闻媒体宣传报道,提高了企业形象及知名度。

②经济效益:通过对钢网架拼装精度和焊缝质量的管控,提高了网架验收的合格率,避免了不必要的返工,最主要的是有效地控制了工期。采用整体顶升施工工艺代替满堂脚手架高空散装施工工艺,极大地节约了钢网架施工措施费约300万元。

③质量效益:采用整体顶升施工,超过80%的工作量都在地面或接近地面完成,便于施工质量的跟踪、检查和整改,也能有效地避免工人因“不便”或其他原因而“漏处理”的质量隐患。

## 6 结语

网架施工采用在地面胎架上通过累积顶升法扩展拼装,原地拼装完成后利用液压同步顶升系统顶升至设计标高,支座及支座周边结构高空安装完成后<sup>[4]</sup>,卸载就位完成整体网架结构施工的工艺,提高了网架的拼装精度、降低了质量隐患和安全风险、消解了工期压力,证明了中型铁路站房大跨度、焊接球节点钢结构网架整体顶升施工的经济性、安全性和可靠性。

## 参考文献

- [1] 赵航.大跨度钢结构安装工艺整体顶升技术研究与应用[J].沈阳建筑大学,2015(12).
- [2] 阴吉英,何建华.大跨度双曲面抽空三角锥混合节点网架施工技术[J].建筑技术,2008,39(2).
- [3] 余流,杜澎泉.大跨度张弦网架结构关键施工技术[J].施工技术,2010,39(7).
- [4] 冯小平,段敏,周观根,等.首都机场T3A航站楼超大型网架结构的施工技术[J].钢结构,2006,21(86).