

# 伞状单元体大曲率负高斯曲面单层 ETFE 钢-索膜结构施工工法

中铁建工集团有限公司

石 冬、曹晓凯、胡祖顺、晁 毅、沈龙飞

## 1. 前言

钢-索膜结构在实现复杂空间曲面建筑形体方面优势明显，在大空间、大跨度、艺术性强的复杂形体建筑体中钢-索膜结构更受建筑师的青睐。近些年国内涌现出了一大批有代表性的大跨度、复杂空间钢-索膜结构，比较有代表性的如国家体育馆“鸟巢”、国家游泳中心“水立方”、天津于家堡火车站及北京世园会“妫汭剧场”。

近些年随着 ETFE 等新型膜材的出现，传统的结构设计手段及施工工艺已不足以应对复杂形体 ETFE 钢-索膜结构，亟需对复杂形体 ETFE 钢-索膜结构的结构设计手段及施工工艺进行革新，解决复杂形体 ETFE 钢-索膜结构设计及施工的技术瓶颈。

汉十铁路随州南站是目前国内第一个采用大跨度单元体钢结构、单层双曲 ETFE 索膜结构的复杂形体 ETFE 钢-索膜结构高铁站房。面对复杂形体 ETFE 钢-索膜结构设计及施工技术难题，中铁建工随州南站项目与北京工业大学、武汉大学开展技术合作，前后三次在施工现场制作 1:1 实体模型，对复杂形体 ETFE 钢-索膜结构设计及施工工艺进行探索研究，通过 1:1 模型施工数据采集分析、问题发现及结构体系优化、施工工艺创新，最终形成了一套成熟的复杂形体 ETFE 钢-索膜结构施工工艺。

## 2. 工法特点

(1) 随州南站屋盖钢结构采用独具特色的伞状单元体结构形式，结构形体复杂，构件数量众多，且多为曲线构件，现场焊接工作量较大，钢结构安装难度大。施工现场紧邻铁路线路、站前广场，施工场地紧张，且钢结构施工工期较短。为克服施工场地及工期的不利因素，采取地面制作胎架、“重叠式”单元拼装，极大限度的减少地面空间占用，并将构件拼装时间前移，节约工期，为后期集中吊装创造条件。

(2) 复杂空间结构安装难度大、精度要求高，为确保安装精度，将钢结构分成若

千小单元，并在地面制作拼装胎架，将构件组装成单元模块，将大量高空焊接作业改为地面拼装焊接，使焊接难度降低、检测难度降低、拼装精度提高，同时采用分单元大吨位吊装，减少高空吊装、拼接工作量，提高施工效率。

(3) 针对钢结构临时支撑构件数量大，安装及拆除经济投入多的弊端，按施工流水安排分批次支撑及卸载，增加临时支撑周转次数，减少临时支撑构件用量，同时采取沙箱原理卸载方式，方便临时支撑的安装及拆除，减少钢结构临时支撑作业的机械及人工投入，从而大幅度降低施工措施费。

(4) 针对伞状单元体钢结构形体复杂、安装精度要求高的特点，在主体钢结构安装时对结构整体变形进行监测，并采用三维扫描手段对主体钢构及索膜结构支座构件安装精度进行控制，提高钢结构的安装精度，减少构件精度复核及修正的人员投入，缩短操作时间，提高工作效率。

(5) 用于固定索膜结构的支座构件数量繁多，尺寸多样，焊接量大。采用整体加工，将多个安装支座加工成整体安装单元，模块化安装的方法，既保证了构件批量化生产，从安全生产、质量、施工效率方面都有了很大提高，节约了工期与成本。

(6) 针对国内首例大曲率负高斯曲面单层 ETFE 索膜结构，对索膜结构体系及五金件进行优化，采用模块化索膜支座安装及定型化专用五金件，在施工现场制作 1:1 实体模型，验证并改进索膜结构体系及五金件的可行性及适用性，在此基础上总结改进，形成了一套大曲率负高斯曲面单层 ETFE 索膜结构体系。

(7) 通过实验室研究及施工现场模型施工验证，形成了一套先进的大曲率负高斯曲面单层 ETFE 索膜结构体系施工方法，并在随州南站成功应用。

(8) 针对复杂形体大曲率负高斯曲面单层 ETFE 索膜结构施工精度要求高、精度控制难度大及膜结构收口铝板形体复杂、加工难度大的特点，联合采用 BIM、三维扫描技术，将大量的人工测量作业改进为信息化、自动化的数据采集，将建筑实体模型化，精度数据可视化，同时在建筑实体模型的基础上设计加工收口铝板，大幅降低精度控制及收口铝板加工难度。

### 3. 适用范围

本工法适用于大型公共建（构）筑物中，具有复杂立面、曲面外形，可拆分为多种相同单元体的大跨度钢梁钢桁架结构体系施工及形体复杂、艺术性强的复杂形体大

曲率负高斯曲面单层 ETFE 索膜结构施工。

## 4. 工艺原理

### 4.1 钢结构地面分单元拼装、模块化大吨位起吊

随州南站伞状单元空间钢结构造型复杂，构件数量众多，高空拼装难度大，精度要求高，选择合理的钢结构安装方案有利于缩短施工周期、提高施工精度。膜结构依附于钢结构，钢结构安装精度的提高也有利于提高膜结构的安装质量。

本工程通过优化钢结构安装方案，将常规高空散装优化为地面分单元组装，将复杂屋面分解门式钢架、马鞍型屋盖、雁翅型屋盖结构单元，在地面搭设拼装胎架，将大量高空焊接改为地面批量焊接，即可提高施工效率又可提高拼装精度，同时使拼装作业更加安全。为充分发挥拼装胎架的利用率及节约拼装场地，采用“重叠式”拼装，每个胎架拼装 4 个屋盖单元，极大限度的减少地面空间占用，并将构件拼装时间前移，在混凝土结构施工阶段即开始钢结构的地面拼装工作，使主体混凝土结构与钢结构同步施工，大幅节约施工时间。

拼装完成后采用 500 吨履带吊整体吊装拼装单元，吊装单元高空合拢，吊装及合拢顺序自结构中向两侧对称开展，减少安装时的累计偏差，拼装单元合拢为高空焊接，焊接作业量已大大降低，对施工安装及质量均有益。

### 4.2 钢结构临时支撑的搭拆

为保证安装单元的稳定性，在拼装单元之间搭设临时支撑，临时支撑采用格构式，每 3m 或 1.5m 为一个小单元，最上面一节设沙箱底座，支撑于门式钢架跨中部位，顶部拉缆风绳保证临时支撑的稳定。屋面钢梁及伞状单元体内部水平支撑及斜撑全部安装完毕，钢结构形成稳定受力体系后拆除临时支撑。放出沙箱支座内的铁砂，取出沙箱支座，使临时支撑与钢结构脱离，随后拆除支撑。拆除的临时支撑周转进入下轮支撑作业。

### 4.3 钢结构安装精度控制

随州南站伞状单元体钢结构精度控制是本工程的重点，它直接关系到钢结构及后续膜结构的施工质量。采用结构变形监测及构件三维坐标对构件安装精度进行控制。构件安装时跟踪每根构件的支座坐标，确保构件安装定位准确，构件安装完毕采用三维扫描对已完成结构空间位置进行扫描，并与结构 BIM 模型对比，查找结构偏差并纠

正。构件安装完成拆除临时支撑时对结构整体变形进行监测，变形量超出设计值立即采取措施纠正。

#### 4.4 大曲率负高斯曲面单层 ETFE 索膜结构协同受力体系优化

随州南站大曲率负高斯曲面单层 ETFE 索膜结构在国内尚属首例，无成熟案例可供参考，为顺利完成本工程施工，中铁建工随州南站项目与专业膜结构厂家及北京工业大学合作，对大曲率负高斯曲面单层 ETFE 索膜结构协同受力体系进行研究，并通过制作 1:1 实体模型解决技术难题验证技术方案，经过三次模型施工及工艺改进，最终确定采用双向索加单层膜结构体系。优化纵横向钢索数量及间距，使膜面平顺，双曲面形态完美；纵向索紧贴膜面并通过索套与膜面协同受力，横向索脱离膜面起分散荷载及辅助找型的作用，纵横索通过专用万向索夹连接，万向索夹使纵横索可自由转动、可靠传递荷载并使横向索曲线平顺过渡；膜面边缘采用拉弯铝合金夹具，使膜片边缘曲线平顺过渡；钢索及膜面张拉螺栓通过定型五金件与支座钢结构连接，解决钢索在支座处出现折角及调紧螺栓不能与支座完全贴合的问题；改进支座索膜支座安装方式，保留索膜支座基本形态，将高空散装改进为工厂模块化加工，提高钢构件工厂化加工比例，同时优化索膜支座与主结构连接方式，由焊接改为螺栓链接，减少现场工作量，加快施工效率提高施工精度。

#### 4.5 大曲率负高斯曲面单层 ETFE 索膜结构安装工艺及精度控制

通过实验室研究、现场验证及改进，确定索膜结构安装及张拉的最佳方案，与北京工业大学、武汉大学合作研究膜面、钢索张拉的应力与应变的对应关系，并在 1:1 模型施工中验证，在正式施工中将膜面及钢索张拉应力转换为弹性形变量，通过控制张拉形变的方式控制张拉力，简化控制流程；引入三维扫描技术，对膜面、膜边缘进行扫描，利用逆向建模技术复现膜结构单体的形态，将模型数据导入 BIM 与膜结构理论模型进行比对，查找膜面、边缘存在的尺寸偏差，并在 BIM 模型上标示存在偏差的部位及偏差数值，采用数字模型对作业人员进行交底，使曲面纠偏操作更直观，调整结果更有效；科学合理组织施工机械，摒弃传统脚手架操作工艺，根据作业面及工作量配置高空作业机械及人员，在提高索膜结构施工效率的同时为装修施工提供工作面，使装修施工与膜结构施工同步开展，缩短总体工期。

#### 4.6 大曲率负高斯曲面单层 ETFE 索膜结构收口铝板的加工及安装

为使收口铝板与每个伞状单元完全匹配，需要考虑每个单元体形态的细微差别。通过三维扫描技术对膜结构实际形态进行扫描，建立建筑实体的高精度数字模型，作

为膜结构收边铝板下料的依据，摒弃使用全站仪坐标定位的传统测量方式，大大节省了数据采集时间及人力，为后期整个膜结构施工节省了大量时间。依据逆向建模得到的伞状单元模型，逐个对应的建立每个单元的收口铝板的模型，在此基础上拆分得到细部尺寸略有不同的每块收口铝板的加工模型图并逐块编号，方便成品铝板的安装。中铁建工 BIM 团队通过与铝板加工厂共享铝板模型数据，辅助加工厂完成了双曲铝板的拆分工作，将双曲铝板根据折线位置及形态拆分为小块平面铝板，工厂依据详细的加工图纸将平面铝板弯曲、拼接后加工成可供现场直接使用的双曲面异型铝板。工厂的铝板加工依据现场施工安排及进度分单元加工、分批质检、分批供货，保证了现场施工按计划顺利开展。得益于三维扫描技术的成功应用，随州南站索膜结构收边件与吊顶、膜结构完美结合，伞状单元体形态优美、自然。

## 5. 施工工艺流程及操作要点

### 5.1 工艺流程（见下页）

### 5.2 操作要点

#### 5.2.1 钢构件出厂前验收

钢构件出厂验收主要包括 4 方面内容，即构件尺寸检查、焊缝检测、漆膜厚度及附着力检测、构件预拼装。为保证出厂验收覆盖全部构件并及时验收，在构件加工期间项目部安排专业工程师、监理单位安排专业监理工程师驻场监造。

##### （1）构件尺寸检查

钢构件加工完成后，按设计图纸尺寸对构件的长、宽、高、钢板厚度、构件连接端钢板坡口、螺栓孔大小、位置及曲线构件的弧度、弦长等尺寸，长度检测采用钢卷尺，厚度检测采用游标卡尺，钢板坡口采用量角器。构件尺寸检查时所有构件逐一检查，检查合格的填写出厂合格证明并在构件显著位置粘贴构件合格信息的二维码，不合格构件在构件表面标识不合格信息及不合格位置，视情况做出报废或返回车间整改。

##### （2）焊缝检测

焊缝检测包括焊缝外观质量检查及无损探伤两项内容。

焊缝外观质量检查包括表面缺陷及焊缝尺寸检查。工厂加工的一、二、三级焊缝，均需采用放大镜对焊缝外观进行检查，检查焊缝表面是否有气泡、夹渣、弧坑裂纹、电弧擦伤、咬边、未焊满、根部收缩等缺陷，焊缝尺寸采用焊缝量规检查，对焊缝余高、宽度进行检查。检查数量为每批同类构件抽查 10%，且不少于 3 件。

无损探伤包括超声波探伤、射线探伤。对工厂加工的一级焊缝，所有焊缝进行 100% 探伤检测；二级焊缝抽检 20% 做探伤检测；超声波不能对焊缝内部缺陷作出判断时，采用射线探伤。

### （3）漆膜厚度及附着力检测

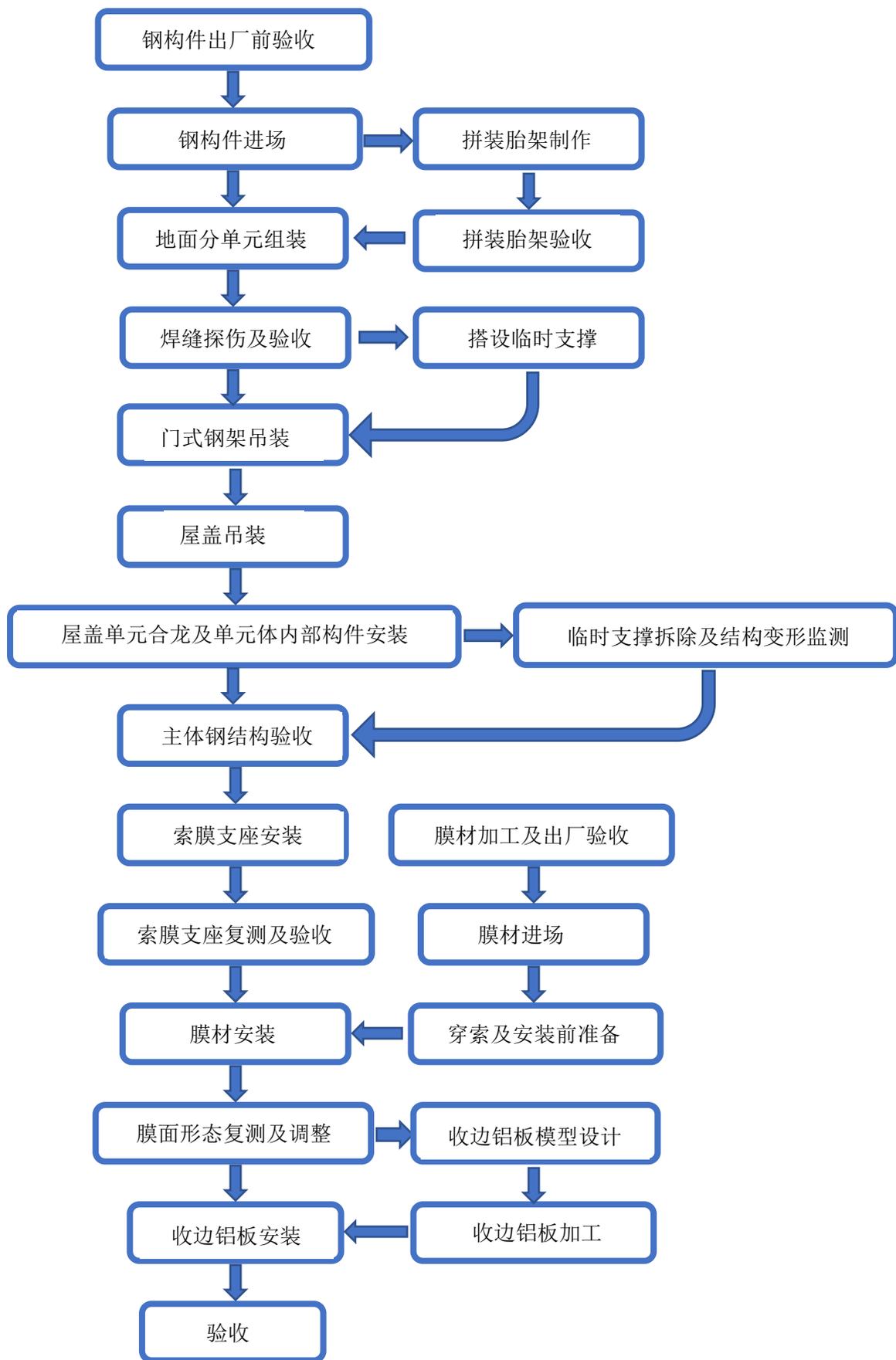
工厂完成底漆、中间漆涂装的钢构件应进行漆膜厚度和附着力检测，漆膜厚度检测采用超声波测厚仪，附着力检测采用附着力检测仪。

因为钢构件的底漆、中间漆在出厂前均已完成涂刷，因此需分别检测底漆、中间漆的涂刷厚度及漆膜总厚度，每层漆膜厚度及漆膜总厚度应满足设计及规范要求。检测数量按构件数抽查 10%，且同类构件不少于 3 件，每个构件检测 5 处。

附着力检测需检测底漆与钢材基材的附着力和底漆与中间漆的附着力，常用方法有画圈法和划格法两种，具体采用何种方法视构件类别及检测难以程度而定。检测数量按构件数抽查 1%，且不少于 3 件，每件测 3 处。

### （4）构件预拼装

因随州南站单元体钢结构结构复杂，曲线构件较多，为保证出厂构件均能合格拼装，避免构件返厂，在出厂前对伞状单元构件进行预拼装，构件拼装无误后以单元体为单位分别装车发货，预拼装期间发现的问题构件在场内整改或重新加工。预拼装工作有驻场工程师及监理工程师共同监督，确保出厂构件全部合格。



### 5.2.2 地面分单元组装

随州南站站房工程背靠线路、前方为站前广场，在钢结构施工阶段线路及站前广场地下停车场已开工建设，站房周边场地紧张，且本工程钢结构工程结构形式特殊、造型复杂。为保证钢结构的施工质量并节约施工场地，经方案比选及优化，最终确定采用地面分单元重叠组装、模块化吊装的施工方案。

随州南站钢结构由 24 个伞状单元及波浪形屋盖组成，为方便批量化组装及钢结构的安装，将钢结构工程分解成门式钢（架图 5.2.2-1）、马鞍形屋盖（架图 5.2.2-2）、雁翅形屋盖（架图 5.2.2-3）三种结构形式，根据结构形式分别搭设拼装胎架批量组装。24 个伞状单元可以分成两种类型共 38 榀门式钢架，波浪形屋盖可以分成 24 个马鞍形单元和 21 个雁翅形单元。

门式钢架单元拼装构件数量较少，拼装成型后重量小于 5 吨，拼装时在主体混凝土结构板上搭设拼装胎架，每个胎架拼装一品钢架，拼装完成马上起吊，胎架转入下一榀钢架拼装。

马鞍形单元和雁翅形单元结构复杂、构件数量较多、拼装难度大、拼装作业工程量大，拼装时在站房周边搭设拼装胎架，以控制拼装位置在 500T 履带吊起重范围内且避开大型机械施工通道为原则，进行场地布置。胎架采用工字钢搭设，由 45#B 工字钢底座、H300×200×8×12H 型钢立柱及横梁焊接组装而成，胎架组装完成后由项目部质检员对胎架焊接质量、尺寸、支座位置进行检查验收，验收合格方可使用。

为解决场地狭小等不利因素，采用重叠式胎架进行地面单元拼装，拼装胎架分层设置拼装支座，拼装时钢结构单元叠放但底层单元不承受上部单元重量，每个拼装单元重量通过拼装支座传递给胎架竖向立柱，从而使每个拼装单元不因额外受力而变形。每个拼装胎架拼装 4 榀屋盖单元，不仅可解决施工场地限制，还可将焊接量最大限度地控制在地面完成，降低焊接操作难度及测量定位难度，提高工程质量，并且将钢结构施工作业时间前移，在混凝土结构施工阶段即开始钢结构拼装，缩短总体施工周期。

拼装单元的焊缝检测及尺寸复核工作全部在地面完成，每完成一个单元检测一个，钢结构拼装阶段检测单位派员驻场配合全过程检测，确保拼装质量百分百合格。为防止胎架的不均匀沉降，确保拼装精度，拼装场地须进行夯实、硬化，胎架立柱下设混凝土基础并埋设胎架底座埋件。

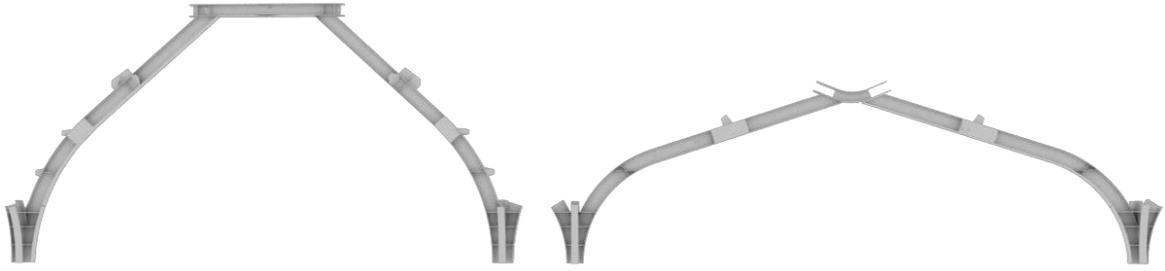


图 5.2.2-1 门式钢架单元

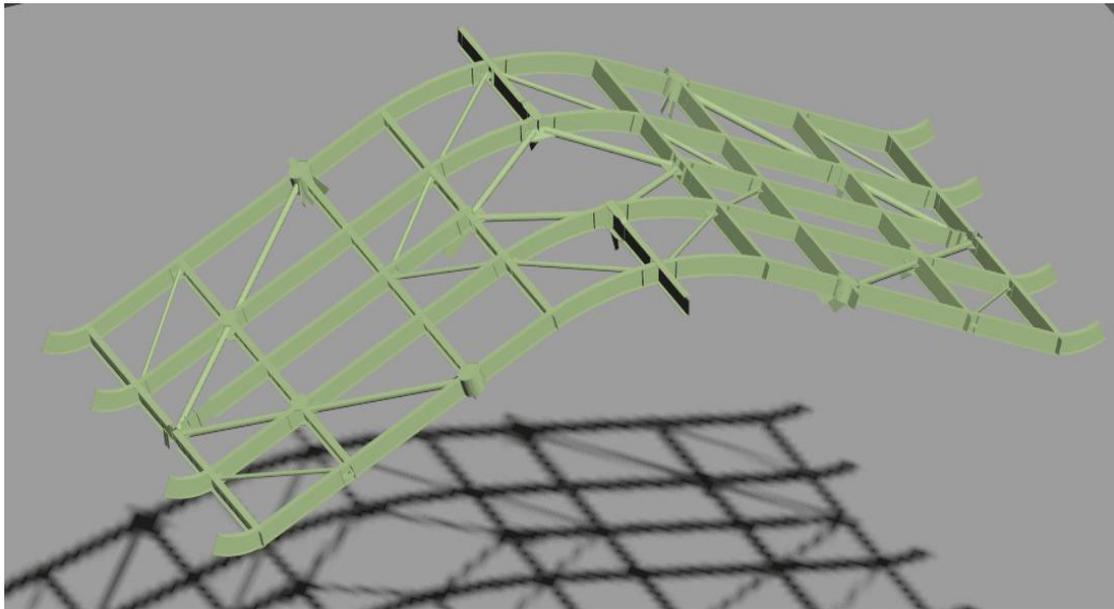


图 5.2.2-2 “马鞍形”屋盖单元

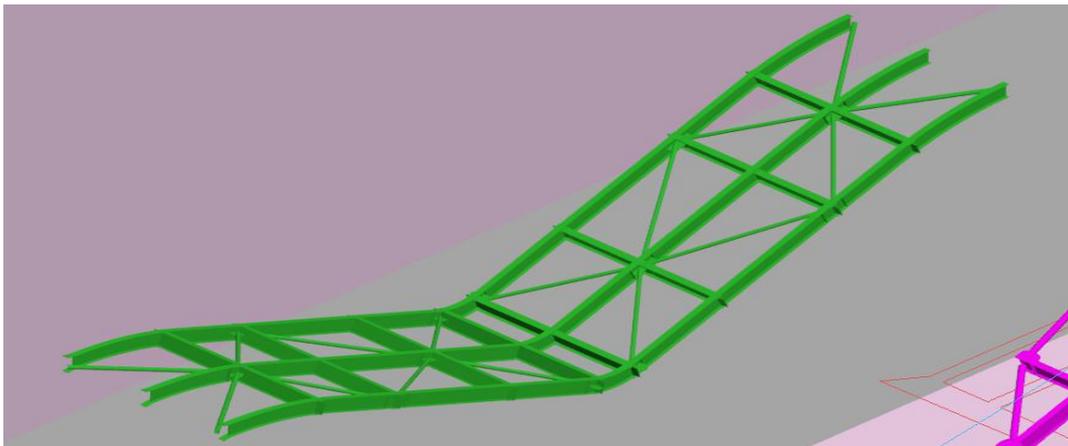


图 5.2.2-3 “雁翅形”屋盖单元

### 5.2.3 临时支撑安装

随州南站钢结构临时支撑本着安全可靠、搭拆方便、成本节约的原则进行设计及

加工。临时支撑采用格构式，每 3m 或 1.5m 为一个小单元，类似塔吊标准节，现场运输、周转方便，且在本工程施工完成后可在其他钢结构工程中重复利用，避免材料浪费及降低工程成本。同时，为方便工人操作，在临时支撑内部设爬梯，临时支撑安拆及钢结构施工阶段作为工人上下的通道。

主体混凝土结构施工阶段，在结构梁板内预埋临时支撑安装螺栓，混凝土结构施工完成并达到设计强度及钢结构立柱安装完成后，开始安装临时支撑立柱，临时支柱安装在门式钢架跨中位置，每榀门式钢架设一处临时支撑，由塔吊配合临时支撑的安装工作，为保证临时支撑的稳固，在顶部沿 X/Y 轴方向设 4 根缆风绳。临时支撑缆风绳设置见图 5.2.3-1。

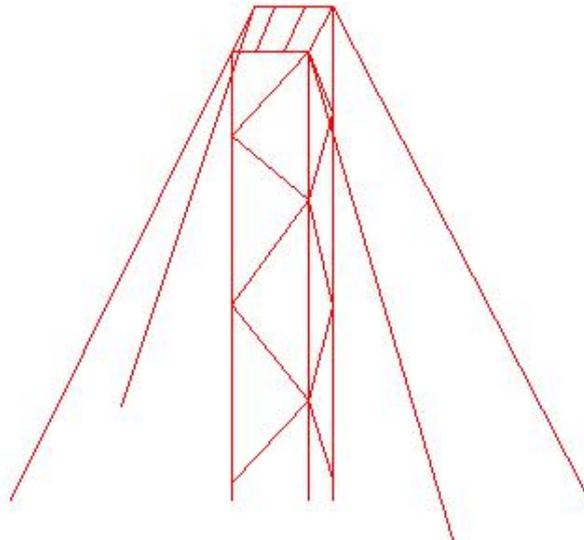
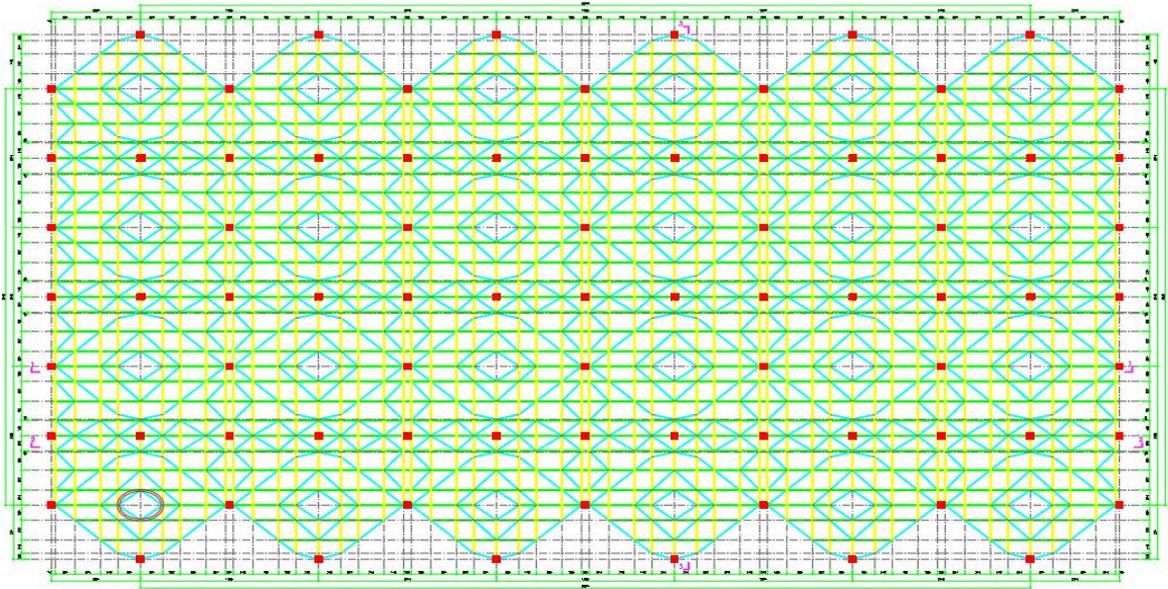


图 5.2.3-1 临时支撑缆风绳设置

临时支撑最上面一节设沙箱底座，用于沙箱支座的定位安装。为保证钢结构的安装精度，在临时支撑安装完毕并拉设好缆风绳后，用全站仪在沙箱支座上定位门式钢架跨中位置坐标及轴线，方便门式钢架安装时的定位。

为降低施工成本，临时支撑的安拆根据施工流水分段搭设，并由前一施工段向后周转使用。本工程钢结构共 6 跨，临时支撑按 3 跨加工，所有临时支撑周转使用一次。

随州南站钢结构临时支撑布置位置见图 5.2.3-2。



临时支撑平面布置图

图 5.2.3-2 临时支撑布置图



图 5.2.3-3 格构式临时支撑体系实例

#### 5.2.4 门式钢架及屋盖吊装

随州南站站房钢结构平面尺寸为  $162\text{m} \times 90.7\text{m}$ ，24 个伞状单元撑起波浪形的屋面，

结构形式新颖复杂，结构中部无伸缩缝。为减少钢结构安装时的累积误差，保证钢结构精确安装，钢结构安装时自中部开始向两侧对称开展施工。

临时支撑安装完成并拉好缆风绳、沙箱支座放好门式钢架控制线后开始门式钢架的吊装，吊装作业采用 500 吨履带吊。两种尺寸门式钢架的跨度分别为 24m 和 27m，因构件跨度较大且为拱形，构件刚度小，吊装过程易出现变形。为防止吊装作业对构件可能造成的损坏，门式钢架吊装时采用扁担形吊具吊装，吊具下均布四个吊点，吊装钢丝绳根据门式钢架形态精确控制长度，使每根钢丝绳均匀受力并分散吊装过程门式钢架受力，同时通过吊装扁担使吊装钢丝绳始终处于同一平面内，避免门式钢架因平面外受力而出现侧弯、扭转等形变。

安装门式钢架时自中部开始向两侧对称开展安装，首先安装 10-11 轴门式钢架，然后安装 8-10/11-13 轴门式钢架，随后安装 6-8/13-15 轴门式钢架，最后安装悬挑部分钢梁。门式钢架就位后按沙箱支座上的定位线精确定位，随后在钢架跨度 1/3 处张拉缆风绳进行稳固，缆风绳张拉时均匀受力，并采用全站仪对钢架轴线位置进行复测，完成定位及复测工作后施焊支座焊缝。

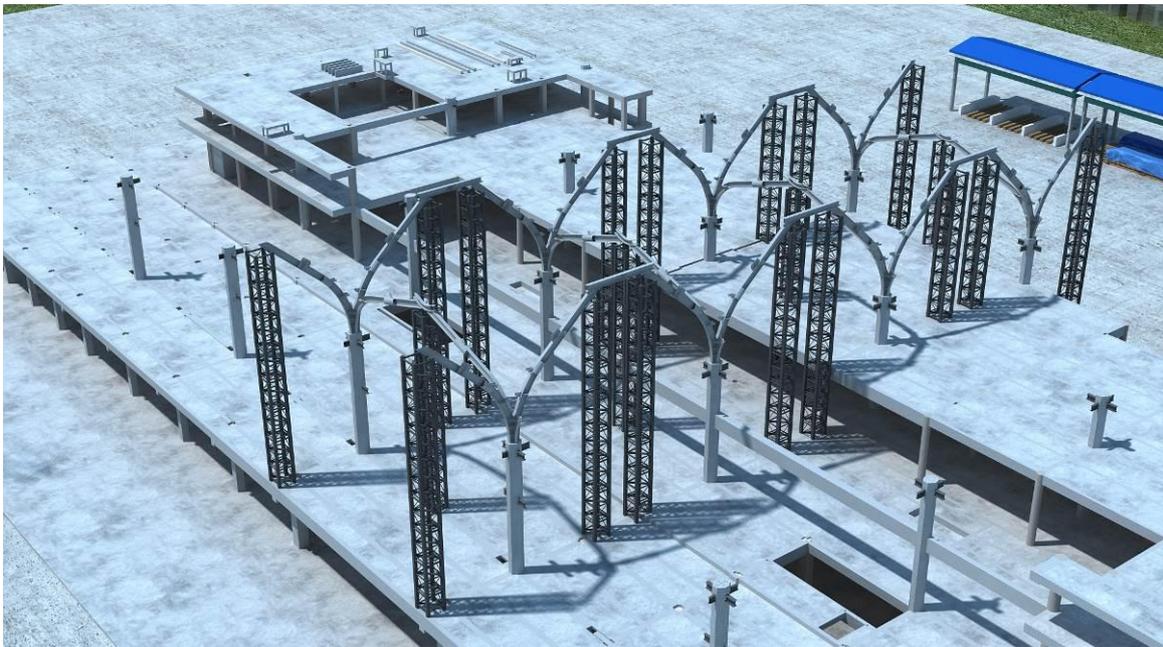


图 5.2.4-1 门式钢架安装示意图

门式钢架形成网格状稳定受力体系后开始安装屋盖构件，为减少安装过程误差累计，屋盖钢结构单元同样自中部开始向两侧对称安装，因相同类型的屋面单元程纵向布置，屋盖单元安装沿长边方向安装。首先安装中部纵向列“雁翅型屋盖”，中部“雁

“雁翅型屋盖”安装完成后由中部向两侧对称开展“马鞍型屋盖”及剩余“雁翅型屋盖”的安装，屋架单元采用 500 吨履带吊吊装，吊装就位后高空焊接合拢。

屋架“雁翅型”、“马鞍型”单元为空间构件，较门式钢架形式复杂，为保证拼装成型的吊装模块不发生变形及破坏，门式钢架吊装时同样采用扁担形吊具吊装，吊具下均布四个吊点，每个吊点对称布置两根等长的钢丝绳，共布置 8 根不同长度的吊装钢丝绳，根据屋架单元形态精确控制长度，使每根钢丝绳均匀受力，维持吊装过程屋架单元受力平衡和结构形态并分散吊装过程受力，避免屋架单元因受力不均而出现翘曲、构件弯曲等形变。



图 5.2.4-2 单元体屋盖安装顺序一：安装中间列“雁翅”屋盖



图 5.2.4-3 单元体屋盖安装顺序二：由中间向两侧进行安装

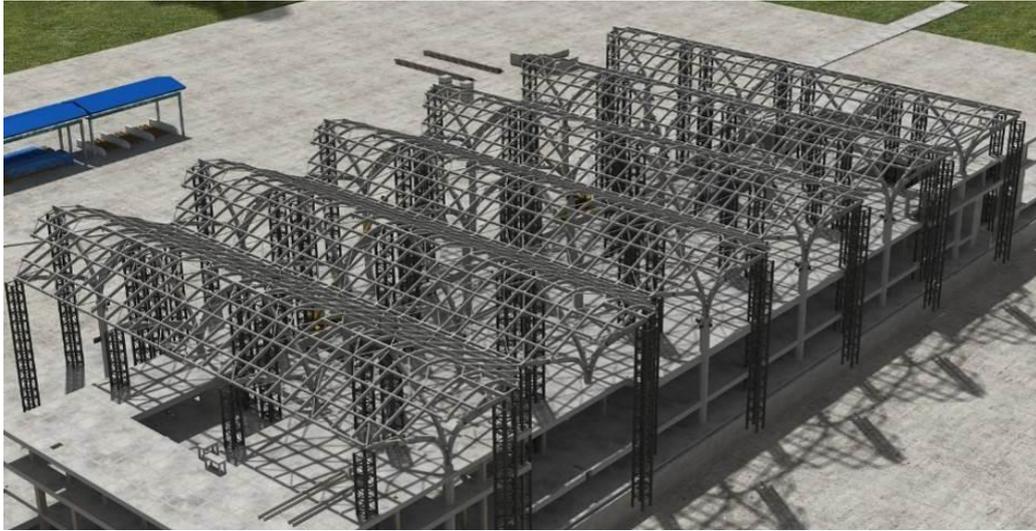


图 5.2.4-3 单元体屋盖安装顺序三：安装最外侧屋盖



图 5.2.4-4 现场吊装实例

### 5.2.5 屋盖单元合龙及单元体内部构件安装

屋盖单元的合拢焊接同样从中部向两侧施焊，以减少焊接过程的累计误差及焊接应力。中部纵向列“雁翅”型单元与两侧“马鞍”型单元单元间构件合拢焊缝首先施焊，然后向外侧单元组织流水施工。

屋盖单元合拢焊接时操作工人通过临时支撑内部爬梯上至屋面，在屋面钢梁悬挂生命线并在作业区临时固定压型钢板搭设行走马道，确保屋面施工的安全。

单元体屋盖合拢的同时使用塔吊及 25T 汽车吊进行伞状单元内水平及竖向支撑安装，由 10 轴、11 轴向两侧对称平推进行安装，使伞状单元及屋面形成稳定的受力体系。单元体内部短小构件重量较轻，为减少大型机械占用，在屋面钢梁上挂滑轮由人工将构件运至单元体内部，在第一道水平支撑焊接完成后借助第一道水平支撑搭设临时操作平台，进行后续构件的安装。

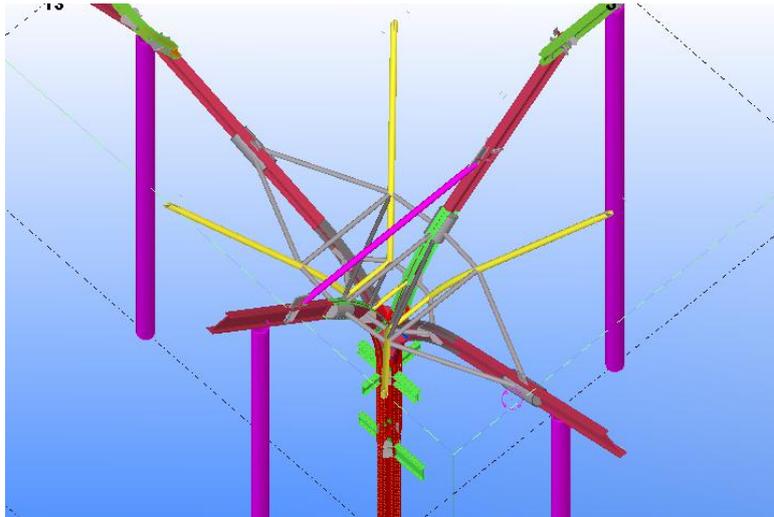


图 5.2.5-1 伞状单元及内部支撑示意图

## 5.2.6 临时支撑拆除及结构变形监测

### (1) 沙箱卸载

沙箱式卸载具有承载力大、经济环保、制作及操作简单重复利用率高等特点，适用于每一批次卸载量小的工程。

在卸载之前，确定主体钢结构已焊接完毕，对结构进行一次系统全面的应力和变形的监测。卸载过程中，将顶部沙箱分多次缓缓卸载，且每次卸载垂直距离不超过 2cm，直至结构承受自身重力。卸载过程结构变形监测单位全程对结构变形进行监测，并实时反馈监测数据，直至卸载完成。卸载过程若结构变形超出设计值则立即停止卸载并会同设计单位共同查找原因制定处理方案，处理完成后重新卸载。



图 5.2.6-1 沙箱式卸载构造设计

### (2) 临时支撑拆除

临时支撑拆除采用塔吊和 16 吨汽车吊作业，结构周边及高架落客平台处临时支撑车辆可以靠近，采用 16 吨汽车吊拆除，候车大厅内部临时支撑采用塔吊拆除。拆除时

在最上面一节格构柱挂吊钩，工人通过临时支撑内部爬梯上到操作面，挂好挂钩后解除临时支撑与结构间的连接，同时拆除揽风绳及与下节格构柱间的连接螺栓，然后将临时支撑单元吊起平移后下放至地面，采用同样的方法拆除剩余支撑。

### (3) 结构变形监测

结构卸载全过程实时监测结构变形并与理论模拟值进行对比，实测数值满足要求之后，方可进行下一次卸载，直至卸载完成沙箱与结构完全脱离，拆除沙箱运至地面。

卸载完成后 24 小时内对钢桁架分阶段进行 4 次监测，4 次监测时间为卸载完后 1 小时、6 小时、12 小时和 24 小时。为了减少温度变化对钢桁架的影响，卸载一般在早晨或晚上完成。

## 5.2.7 索膜支座安装及复测

### (1) 索膜支座概况

膜结构依附于主体钢结构，膜结构受力体系通过索膜支座与主体钢结构连接。因为膜结构需要根据材料类别、使用环境、及结构形态进行深化设计，且在安装前需对主结构进行复测并借助索膜支座对主结构施工偏差进行纠偏，因此无法在主钢构加工时同时完成索膜支座加工。

索膜支座通常采用与主钢构焊接的连接方式，并以每个膜结构张拉支座为单元独立焊接，对于常规形体膜结构有材料用量少施工方便的特点，但对于复杂曲面膜结构，因每个支座点位需进行精确定位，此种安装方式就变得非常不适用。

随州南站索膜结构施工前，通过在现场制作 1:1 实体模型对施工工艺开展研究并进行多次技术改进，最终选定模块化安装索膜支座的方案，即将多个安装支座加工成整体的模块，以模块安装代替大量散件安装，以模块定位代替多个散件定位，同时将焊缝连接优化为螺栓连接，简化安装工艺、提高施工效率。

### (2) 索膜支座钢构加工

本工程为提高膜结构的施工质量，并对主体钢构的尺寸偏差进行纠正，在对主钢构现场复测的基础上，根据已施工完钢结构单元的实际尺寸加工索膜支座。每个主钢构单元的尺寸复核完成后根据主钢构实际尺寸建立三维模型并在此基础上对索膜支座模型进行微调，使索膜支座与主钢构尺寸匹配。索膜支座模型调整完毕后分解成安装模块单元并向工厂下发加工图纸。

索膜支座加工委托技术实力强的专业工厂，并派专业技术人员驻厂监造，提高构件生产加工环节精度。索膜支座加工完成后逐件进行验收，严禁不合格构件进场。

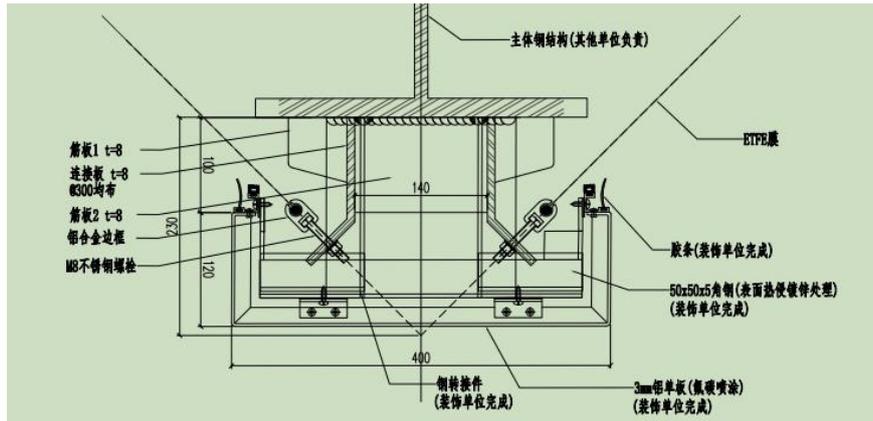


图 5.2.7-1 工字钢位置索膜支座安装节点图



图 5.2.7-2 索膜支座钢构件进场验收

### (3) 索膜支座安装

本工程索膜支座构件数量较多，重量较小，且索膜支座安装时主钢构屋面已施工完成，无法采用吊车作业，所以本工程索膜支座安装通过在主钢构设滑轮采用电动葫芦吊运至安装位置。

滑轮挂钩挂主钢构上并临时固定，电葫芦放置在地面上，并安装配重，防止构件吊装时将电葫芦拉起。吊装前首先检查吊装设备是否正常，在吊装区域设置警戒线。

施工人员在确认安全的条件下，先在主结构上焊接索膜支座的连接耳板，随后进行位置复核，复核合格后通过电动葫芦将工厂预制好的索膜支座构件吊运到指定位置，再由操作人员进行安装，如图 5.2.7-3 所示：

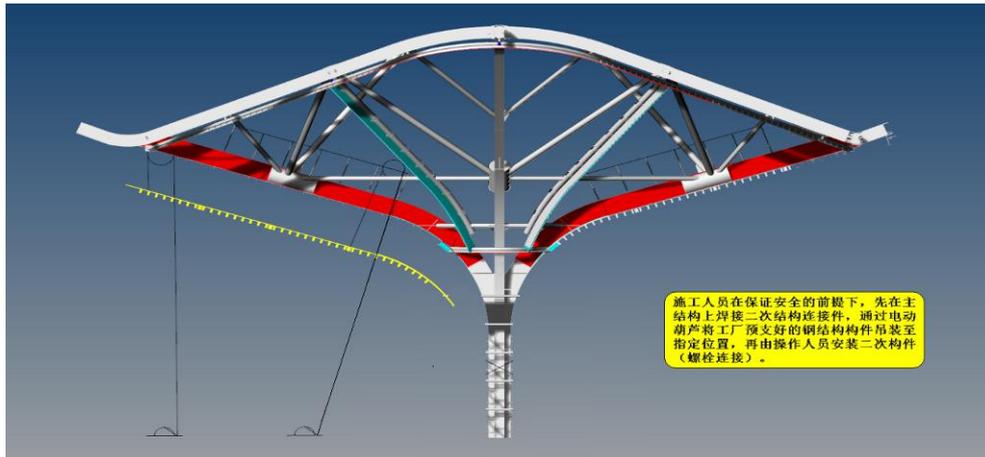


图 5.2.7-3 索膜支座吊装示意图

#### (4) 索膜支座复测

索膜支座复测的目的是复核膜结构安装螺栓孔的空间位置是否准确，因安装螺栓孔位数量众多，且分布在立体空间内，需针对每个孔位进行精度复测，作业量巨大。为提高精度复核效率及质量，经对比不同测量手段，最终选用三维扫描技术开展精度复测。

通过三维扫描对索膜结构支座螺栓孔位进行高精度的扫描，获得所有支座及螺栓孔位的空间信息，利用逆向建模技术复现钢构件的形态，形成结构三维模型，将模型数据导入 BIM 与理论模型进行比对，查找安装支座及螺栓孔位的空间位置偏差，若吻合即说明安装位置正确，若存在偏差则根据偏离方向进行调整。

借助三维扫描技术高效、高精度、自动化的数据处理及数据分析，索膜支座精度复测工作可以在短期内批量完成，大大节省了作业时间并使数据精度更高、精度纠偏作业更直观。

### 5.2.8 膜材加工及安装

#### (1) 建模下料

双曲面索膜结构的加工对精度要求较高，尺寸稍有偏差就会使膜面形态改变或出现褶皱，为提高加工精度，膜材下料前需对索膜支座的安装螺栓孔位进行高精度的复测，并将复测结果建立三维模型，在模型的基础上开展双曲面膜结构的建模及加工图绘制。

本工程采用三维扫描仪复测索膜支座安装螺栓孔位，三维扫描具有精度高、自动化程度高、可与模型设计软件共同使用等优点。已施工完的钢结构经三维扫描生成包含安装螺栓孔位的结构实体模型，将螺栓孔位空间位置作为膜结构边缘限制条件开展

膜面的具体设计。

膜面设计的具体步骤如下

- 1) 将复测结果与设计数据比对无误后进行展膜，即将空间曲面展开为平面图形。
- 2) 确定横索与径索的长度以及万向索夹安装的点位。
- 3) 膜面审核，确认无误后方可出图用于下料加工。下料时需要考虑膜面热合的搭接尺寸。

### (2) 裁剪热合

根据下料图对膜材进行裁剪，采用全自动膜材裁剪机进行立体裁剪，按照空间展膜后的切割曲线一次裁剪完成。膜材裁剪前先对设备进行调试，使设备处于最佳状态，裁剪完成后由质检人员对膜材尺寸进行检验，检验合格的膜材方可进入热和工序。

膜材热合前先将热合平台上的灰尘擦拭干净，否则影响热合质量。热合作业人员依照加工顺序，确认膜片编号、扣件编号及转角编号、准备热合的裁剪片。确认膜材重叠方向及熔接宽度，热合宽度与理论设计值之间偏差不超过 $\pm 1\text{mm}$ 。

### (3) 膜材运输

ETFE 膜材因其特定的工艺性，只可卷装，不可折叠装运，所以膜材需滚轴打包。膜材出厂时依据已编制确定的运输计划操作，运输中必须牢固固定，防止损坏。尽量减少堆积层数，以免膜材出现褶皱。膜材包装、固定方案及运输方式见图 5.2.8-1。

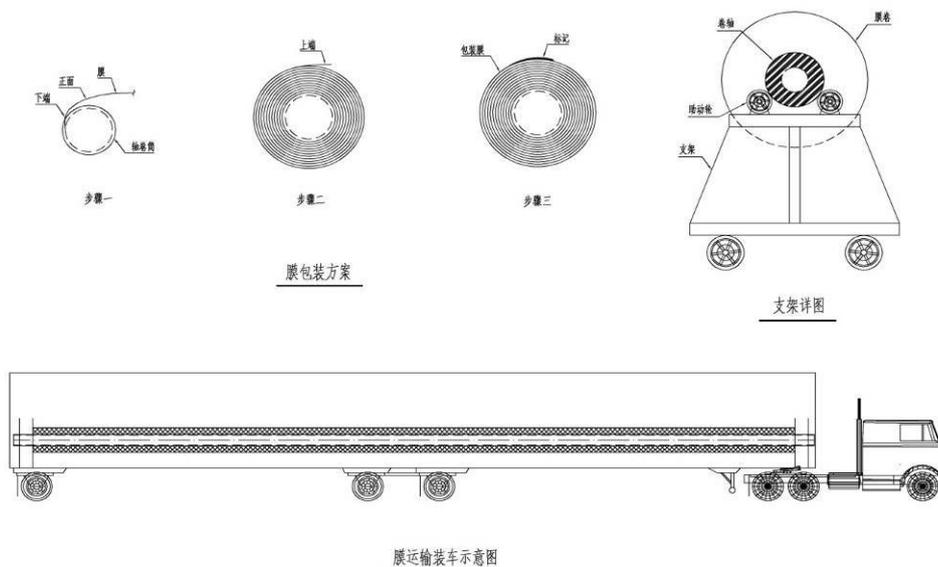


图 5.2.8-1 膜材包装固定及运输方式图

### (4) 展膜穿索，固定万向索夹及安装铝夹具

- 1) 由于 ETFE 膜材不可  $90^\circ$  折叠，所以膜材安装需要在安装位置正下方留有足够

的平面用于展开膜面、穿钢索、固定夹具等工作。

2) 展平前，应先把地面打扫干净，尤其是一些较大的石子、螺丝、工具等凸起的物件。尽量把灰尘打扫干净，避免扬尘污染膜材。在打扫干净的地面铺设彩条布和棉毡，避免地面的垃圾污染膜材。

3) 膜片展开时，特别注意方向，膜片的放置方向要与吊装方向一致，防止反复折叠及移动。

4) 穿索前，把竖向索一端的锚头固定在索上，没有锚头的一端穿过膜的索套，形成索膜一体的构件，见下图。钢索穿过索套时，必须在索端部缠绕胶布，防止钢索的钢丝凸出，损坏膜材。



图 5.2.8-2 现场穿竖向钢索

5) 竖向索穿膜之前，必须先把万向索夹的位置标定好。具体做法为：竖向索一端固定，通过钢索拉直工具将钢索拉直，使用 50m 钢尺，根据设计下料图的数据，将万向索夹的位置标定于竖向索上，见下图。竖向索完全穿过索套后，方可安装固定另一端的锚头。



图 5.2.8-3 标定万向索夹位置

6) 竖向索做好，即可安装横向索和万向索夹，形成索网体系。形成索网时，万向索夹必须对准拉索上的定位线，避免因网格边长长短偏差导致索网变形或受力不均。



图 5.2.8-4 根据竖向索索夹标定位置，安装万向索夹

#### 7) 安装铝夹具

安装完钢索及索夹后安装收边铝夹具，因本工程膜片尺寸较大，膜片边长较长，最大边长达到 15m 左右，铝合金收边夹具最长尺寸为 6m，所有膜片边缘夹具通常由多段组成。为保证膜面边缘线型顺滑，本工程铝夹具根据膜片边缘线型在工厂定制拉弯，

避免采用多段直线夹具模拟曲线形成的折角，因此本工程铝夹具多为较长尺寸曲线型夹具。

夹具安装时首先将要安装夹具的膜边展开、拉直，由两组人分别张拉两端，另外一组人从一端逐段安装铝夹具，将膜边缘张拉软边穿入铝夹具Ω形空腔内。铝夹具安装时必须确保铝夹具前端与膜边缘张拉方向一致，避免铝夹具刮损或戳破膜片。

铝夹具安装完成按设计张紧螺栓数量逐个将螺栓装入铝夹具另一端的凹槽内，并将凹槽端部用胶带临时封闭，防止吊运膜片时螺栓掉落。

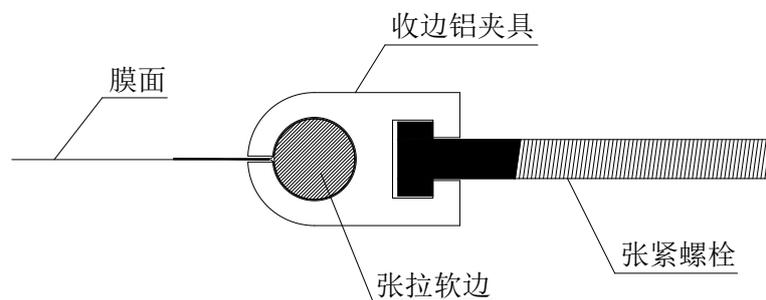


图 5.2.8-5 铝合金夹具安装节点图



图 5.2.8-6 收边铝夹具安装

#### (5) 膜片吊装

膜材地面展开穿好索网后，用小钢管固定边缘，缓慢吊运至指定位置。吊装前注意检查万向索夹与 ETFE 膜接触面胶垫是否脱落，以防万向索夹与膜面硬接触，损坏膜面。吊装工作由人共完成，操作工人分为两组，一组负责膜面顶部提升绳索，将膜吊



随州南站候车大厅为高大空间结构，膜结构单元体标高自 15m~25m，±0.00 层施工高度 15m 至 25m，高架候车层施工高度 7m~18m，均为高空作业，且膜结构与其他专业施工作业面交叉，采用满堂脚手架施工将制约地面石材铺装及其他施工。为减少脚手架作业，尽早向其他工序提供作业面，同时提高膜结构施工效率，膜结构采用高空作业车施工。根据施工高度及所处位置不同，共采用三种类型的高空作业车，分别为轮式高空作业车、蜘蛛式高空作业车、剪刀式升降车。

三种高空作业车的作业分工如下：

施工高度在 18m 以下时采用蜘蛛式高空作业车及剪刀式升降车施工，蜘蛛式高空作业车升降高度可达 18m 左右，负责膜片上部节点安装，剪刀式升降车升降高度在 9m 以内，负责配合蜘蛛式高空作业车完成膜片下部节点安装，施工时 2 台蜘蛛式高空作业车和 2 台剪刀式升降车为一组，蜘蛛式高空作业车及剪刀式升降车体积较小，蜘蛛式高空作业车施工高处节点的同时剪刀式升降车施工低处节点，提高施工速度。

施工高度在 18m 至 32m 时采用轮式高空作业车，考虑到作业面影响及轮式高空作业活动空间，施工时 2 台轮式高空作业车为一组，一台施工高处节点，另一台施工低处节点，两台设备配合进行钢索及边缘张拉。

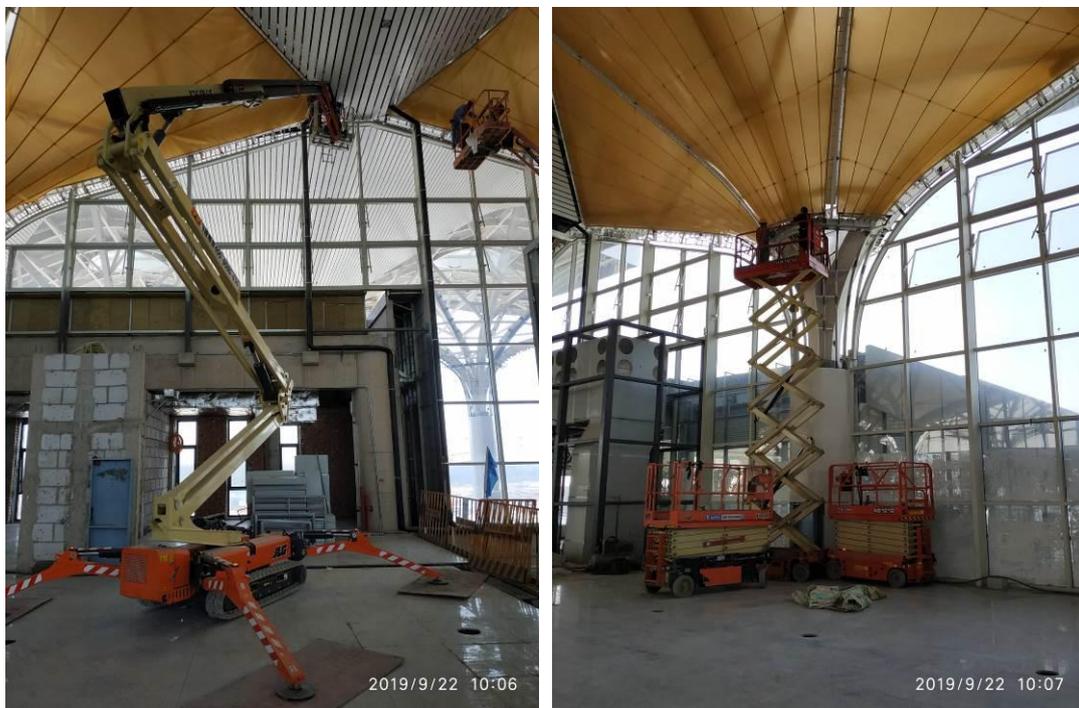


图 5.2.8-8 高空作业车的使用

### 5.2.9 收口铝板加工及安装

#### (1) 收口铝板概况

随州南站 ETFE 索膜结构顶部、底部以及相邻膜片之间，均采用白色铝板装饰，通过铝板的装饰，将伞状单元的轮廓清晰地展示出来，在隐蔽结构构件的同时对单元体膜面进行装饰，使膜结构单元分格与主体结构立柱浑然一体，形成银杏叶叶柄、叶片、叶脉的形态。膜结构单元竖向收边铝夹具处采用 350mm 宽 206mm 高铝单板装饰，伞状单元膜片与吊顶铝条板收口铝板采用 430mm 宽铝板装饰。

## (2) 收口铝板的下料加工

大面积双曲面 ETFE 索膜结构施工难度大，膜材双曲收口铝板的下料加工同样难度巨大。收口铝板的加工尺寸不仅要考虑膜结构的曲面形态还要考虑和膜结构相邻的框架柱铝板和吊顶板的形状，同时，铝板的加工还要考虑对膜结构施工偏差的修正才能与膜结构和周边构件完美结合，这就需要在下料加工前绘制精确的工程实体三维模型，在此基础上设计和加工收口铝板。

随州南站伞状单元膜结构收边铝板的下料加工创新性的引入了三维扫描技术，在对已完工伞状单元膜结构进行三维扫描并建立高精度的工程实体模型的基础上，将工程实体模型导入 BIM 作为收口铝板下料加工的依据。



图 5.2.9-1 伞状单元完工特写

为使收口铝板与每个伞状单元完全匹配，需要考虑每个单元体形态的细微差别，依据逆向建模得到的伞状单元模型，逐个对应的建立每个单元的收口铝板的模型，在此基础上拆分得到细部尺寸略有不同的每块收口铝板的加工模型图并逐块编号，方便

成品铝板的安装。加工厂根据铝板加工模型绘制铝板加工图并组织生产。首先将双曲铝板根据折线位置及形态拆分为小块平面铝板，并绘制详细的铝板加工图。加工车间依据加工图纸将平面铝板切割、弯曲、拼接后加工成可供现场直接使用的双曲面异型铝板。

### (3) 收口铝板的安装

铝板加工好后按每个伞状单元分批发货，并逐块编号，方便进场安装施工。材料进场后由项目部质检员联合监理工程师对照加工图纸进行进场验收，验收不合格的铝板全部退场。

收边铝板安装时每两台高空作业车为一组，每台机械3人，地面指挥、配合1人，高空操作台2人，两组人同时开展一个单元体的收边铝板安装。

铝板安装顺序自下而上，先安装柱头铝板，再安装竖向分格铝板，最后安装膜与吊顶板收口铝板。因膜结构已施工完成，铝板龙骨的安装、铝板的安装全部采用螺栓连接，避免动火作业损坏膜材，并注意安装时动作轻缓，避免铝板及龙骨划伤、划破膜材。

## 6. 材料与设备

### 6.1 材料配置

主要材料以及其参数见下表。

序号	材料名称	规格型号	技术指标	数量	备注
1	钢丝绳	Φ8	6*19+1	8000m	
2	格构型支柱	3m/1.5m	型钢格构式	1900m	
3	ETFE 膜材	厚度 300 μ m	透光率 70%，金色	15000m <sup>2</sup>	
4	钢索	直径 12mm	无油热镀锌钢芯钢丝绳	16000m	
5	索头	根据实际设计	热镀锌	3264 个	
6	万向索夹	根据实际设计	热镀锌，与膜接触面带橡胶垫片	4560 个	
7	定型铝夹具	形状根据设计模型	/	4900m	
8	螺栓	根据实际设计	热镀锌	15700 个	

## 6.2 机械设备配置

主要机械设备配置见下表。

序号	机械名称	规格型号	数量	备注
1	履带吊	500t	2 台	
2	汽车吊	70t	2 台	
3	汽车吊	25t	2 台	
4	塔吊	TCT7520	2 台	
5	二氧化碳焊机	OTC-600	30 台	
6	直流焊机	AX-500-7	3 台	
7	手拉葫芦	2t	20 个	
8	手拉葫芦	10t	2 个	
9	电动葫芦	15t	4	
10	钢卷尺	50 米	2 把	
11	专业 ETFE 高温焊接机	J-1070	2 台	
12	专业 ETFE 膜材热合机	LHP-W709	1 台	
13	膜裁剪机	X-530	3 台	
14	膜材检验机	Cd	2 台	
15	自动仿形切割机	LT2-300A	1 台	
16	水准仪	DS3	3 台	
17	全站仪	TS09	2 台	
18	曲臂车	GTQZ 型	12 台	
19	蜘蛛车	JLG*26JP	4 台	
20	剪刀车	港志	4 台	
21	三维扫描仪	莱卡	1 台	
22	拉力测试仪	BDR-100	2 台	
23	应变应变检测仪	/	1 台	

备注：蜘蛛车、剪刀车主要用于室内作业高度 18m 以下区域施工，曲臂车主要用于作业高度 18-32m 的室内及室外区域。

## 7. 质量控制

### 7.1 钢构件的预检和复检

(1) 构件的预检在钢结构加工厂质检部门检查的基础上，项目部根据现场安装进度安排监督制造部门是否按要求生产加工，避免由于生产不及时造成现场安装间断，影响安装工期和质量。

(2) 预检：钢材材质的成品质量证明书及复验报告，焊条、焊丝的质量证明书及复验报告，构件焊缝外观及超声波探伤报告，以及实际偏差等资料，记录预检的所有资料；构件外观检查包括：钢构件的几何尺寸、连接板零件的位置、角度、螺栓孔直径及位置，焊缝的坡口，节点摩擦面，附件的数量及规格等。

(3) 复检：对进场构件，现场材料员、质量员应按照构件发运清单及相关技术标准、规范及设计文件进行清点，核查。并对构件制作过程中形成的各项技术资料进行核查。

### 7.2 钢结构焊接检验

(1) 所有焊缝均需由焊接工长 100%进行目视检查，并记录成表。

(2) 设计一级焊缝的必须进行 100%超声波无损检测，设计二级焊缝的必须进行 20%的超声波无损检测，检测质量必须达到相应规范要求。

(3) 焊缝表面严禁有裂纹、夹渣、焊瘤、咬肉、气孔等缺陷。

(4) 对焊道尺寸、焊角尺寸、焊喉进行检查记录。

(5) 焊缝探伤应在焊缝外观尺寸检查合格后进行，并必须在焊缝冷却 24 小时后进行。

(6) 探伤人员必须具有二级探伤资格证，出具报告者必须是三级探伤资质人员。

(7) 探伤不合格处必须返修，在探伤确定缺陷位置两端各加 50mm 清除范围，用碳弧气刨进行清除，在深度上也应保证缺陷清理干净，然后再按焊接工艺要求进行补焊。

### 7.3 索膜结构质量控制措施

(1) 膜片生产前，应结合理论模型与现场实测模型比对数据，无误后方可生产。膜片裁剪后应该全面进行检验，10m 以下膜片各向尺寸偏差不应大于 $\pm 3\text{mm}$ ，10m 以上膜片各向尺寸偏差不应大于 $\pm 6\text{mm}$ 。热合后的膜单元，周边尺寸与设计尺寸偏差不大于 1%。

(2) 热合缝应均匀、饱满、平整、线条清晰，热合后膜面不应出现污染、划伤、破损现象；热合缝宽度与设计值误差值不应超过 $\pm 1\text{mm}$ 。出厂前所有膜片全数检查。

(3) 径向、横向索采用无油镀锌钢芯钢丝绳，以防油污污染膜面，影响索膜结构的整体外观以及膜材的性能。

(4) 严格控制索的伸长量，拉索索力及位形应符合设计要求，索力、位形允许偏差宜大于设计值的 10%。

(5) 拉索安装完成后，锚具连接端螺纹咬合丝扣数量和螺母外露丝扣长度应满足索制作技术要求。

(6) 拉索安装完成后，索体表面应无明显破损、污渍，锚具、销轴表面应无明显损伤。

(7) 膜面张力位移允许偏差不应大于设计值的 10%，对于有代表性的部位进行位移抽查。

(8) 膜结构的紧固件、连接件，如万向索夹等，必须安装到位，不得有松动现象。且万向索夹端部的橡胶垫片不得脱落，吊装前需对其一一检查，以防万向索夹与膜面硬接触磨损 ETFE 膜。

(9) 膜面张拉时，要做到膜面无凹坑，膜面顺滑平整。张拉完成后膜面无明显污渍、褶皱、破损、串色等现象。

(10) 索膜结构安装完成后需要对膜内外膜面进行清洁，保证 ETFE 膜的透光率。

## 8. 安全措施

### 8.1 钢结构安装生命线布置使用

生命线的布置：先在屋面钢架的四周布置一圈主生命线，再沿大梁方向每根轴线布置一条次生命线。生命线的高度大约比梁顶面高出 1 米左右。生命线钢丝绳采用 6\*19+1 直径 8 毫米钢丝绳，立柱采用  $\Phi 48*3$  钢管。生命线布置见图 8.1-1。

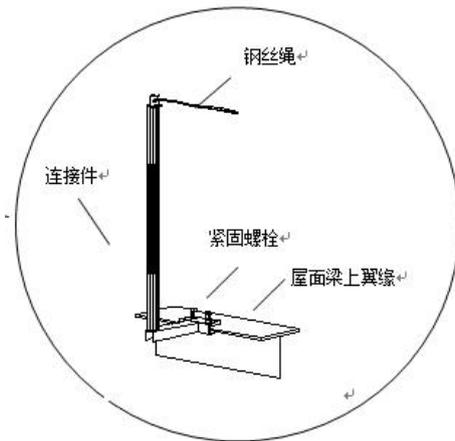


图 8.1-1 生命线安装示意

## 8.2 高空及交叉作业安全措施

钢结构及索膜结构施工有大量高空及交叉作业，危险因素因素较多，特制定如下相应安全技术措施。

- (1) 施工人员进入施工现场必须戴好安全帽；
- (2) 进行高空作业前，检查高空作业机械、防护器具等各项性能是否正常，检查无误后方可进行施工。
- (3) 屋面钢结构焊接施工时必须在作业区域下方张挂防坠落安全网；
- (4) 同一垂直面严禁同时开展作业；
- (5) 使用高空作业机械时，必须由经过教育培训的熟练工人操纵机械，严格限制登高人数以防超载，按照安全教育正确佩戴使用安全带，工器具必须严格放置在器具箱内，以防高空坠落砸伤施工人员；在钢构上进行高空作业的人员，使用的扳手等必须挂绳系于腰间，使用的螺丝、螺杆、垫片等放于腰间的工具袋内，防止高空坠物砸伤其他人员。
- (6) 在主钢构以及索膜支座上施工，必须穿防滑鞋，正确佩戴使用加长安全带；
- (7) 钢构件高空摘勾防护措施

因门式钢架及屋盖吊装时，周围并无脚手架等操作平台，为保证施工安全，在门式钢架上安装临时爬梯及生命线，作业人员通过爬梯沿门式钢架钢梁上到屋面最高处完成摘勾。如图 8.2-1 所示。

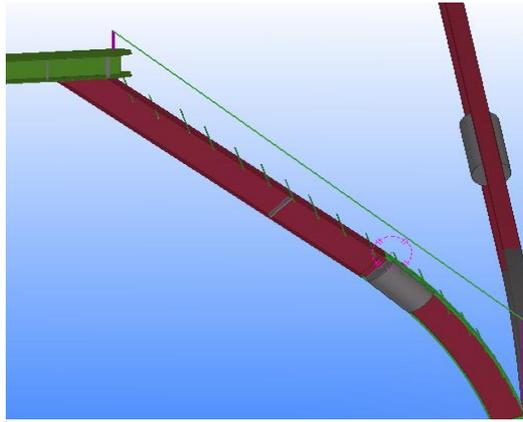


图 8.2-1 摘勾防护示意图

#### (8) 高空安装平台搭设及防护措施

因门式钢架吊装及树状支撑安装时，周围并无脚手架等操作平台；故需在每个焊接节点及安装节点位置搭设钢结构安装临时平台，大样如图 8.2-2。

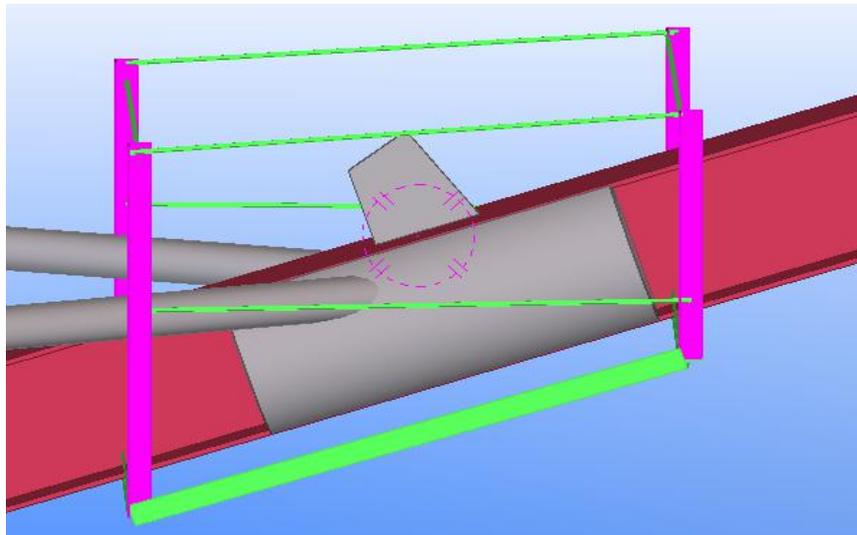


图 8.2-2 屋面各节点安装平台搭设

### 8.3 特种作业人员管理

- (1) 特种作业人员需持证上岗，且证件在有效期内，经项目部安质部检查合格。
- (2) 特种作业人员进场统一接受项目部组织的健康体检，合格方可参与施工。
- (3) 特种作业人员在开始施工前需要接受项目部组织的安全教育及考试，并严格遵守现场安全管理规定，每天上班前各班组负责人对工人进行班前教育，强调安全生产的重要性。

### 8.4 其他安全措施

- (1) 钢构件吊装以及索膜吊装安装时，应选择经验丰富的人作为指挥、司索。
- (2) 在钢构、索网吊装、安装过程中，在地面上拉安全警戒线，设置安全警示牌，

非相关人员禁止入内，且吊装、高空作业设备操作半径下禁止站人。

(3) 配备专门的电工，每天对现场临时用电设施进行检查，做好安全防护措施，安全文明用电。

(4) 动火作业施工前必须由安质部开具动火证明后方可施工。

(5) 施工现场一律禁止吸烟，禁止酒后上岗。

## 9. 环保、节能措施

(1) 设立临时垃圾堆放场，及时清理垃圾及废弃材料。

(2) 施工道路及时洒水禁止扬尘。

(3) 设置排水沟及污水池，废液、废水严禁随便排放。

(4) 采取接火斗、防火布等措施，保证施工过程中的火花不会引起火灾。

(5) 回收利用现场标准件及钢丝绳等，采用可重复使用格构式临时支撑，减少材料投入及消耗。

(6) 提高构件工厂化率，索膜支座件于加工厂焊接成型，减少现场焊接作业，也避免了施工现场出现焊条包装、废弃焊材以及焊渣等垃圾。

(7) 高空作业机械在铺好石材的范围内作业时，需在石材面上满铺吸油纸，充分做好防护，防止机油污染石材。

(8) ETFE 膜材运输包装等产生的其他垃圾，统一放置于施工现场废料池，由项目部统一组织将垃圾清运出施工现场。

(9) 加强对施工人员的培训与教育，提高施工人员的环保意识。

## 10. 技术经济效益等分析

### 10.1 技术效益

(1) 汉十公司组织召开随州南站钢-索膜结构施工技术专家评审会，经过综合评定，专家组一致认为随州南站伞状单元单层复杂双曲面 ETFE 索膜结构施工技术达到国际先进水平。

(2) 随州南站 ETFE 索膜结构是大曲率索膜协同作用伞状单层 ETFE 索膜结构体系在国内的首个成功案例，施工过程中我们发明了一套完整的 ETFE 索膜结构体系及施工工艺，并且定制了专用的五金件。本工程钢结构节点申请专利两项，发表论文一篇，膜结构申请发明专利两项，发表论文三篇，为类似工程施工积累了宝贵的经验。

## 10.2 经济效益

(1) 通过使用重叠式胎架,降低了施工难度、保证了施工质量,解决了场地限制,并且节省胎架材料及拼装成本,相较单榀拼装胎架,总造价节约 70 万元,工期提前 1 个月。

(2) 采用格构式标准节临时支撑,构件可重复利用。在本工程施工完成后,临时支柱可在其他工地钢结构工程中重复使用。本工程共使用临时支撑 230t,按 30%折旧摊销考虑,节约措施费 145 万元。

(3) 随州南站伞状单元钢结构及索膜结构施工期间,通过采用三维扫描技术对施工精度进行检测及纠偏并辅助材料加工,在大大提高施工精度及质量的同时相较传统精度控制措施节省人工 120 工日,节省高空作业车 36 个台班,缩短施工时间 27 天,累计为项目节省成本 330 万元。

## 10.3 社会效益

随州南站作为随州市的新地标和汉十铁路的明星车站,自开工以来受到业主单位、湖北省、随州市和铁路总公司领导的高度关注。在索膜结构技术攻关及施工阶段,铁路总公司领导前后三次莅临项目指导工作。伞状单元索膜结构作为全国首例大面积单层双曲面 ETFE 索膜结构是本工程的点睛之笔,能否成功实现及最终效果的好坏将决定项目整体的成败。项目部通过技术攻关、现场施工 1:1 实体模型和创新施工质量控制手段等措施,最终将随州南站“千年银杏、十里画廊”的艺术形象完美呈现。2019 年 11 月 29 日随州南站正式开通,央视新闻、湖北广电等主流媒体纷纷打卡随州南站,盛赞随州南站的优美造型和过硬的施工质量。12 月 27 日,铁路总公司领导再次光临随州南站,对随州南站伞状单元膜结构施工工艺和施工质量给予了充分肯定,称赞随州南站为中国铁路中型站房施工的典范。

## 11. 工程实例

随州南站站房建筑造型取义“千年银杏、十里画廊”,屋面为钢梁钢桁架结构,设计为“伞状单元体”形式,由 24 根劲性混凝土柱柱支撑,屋面为 24 个伞状单元结构,顶部覆盖铝镁锰合金板,底部为单层金色 ETFE 膜材,通过四周硬边张拉与索网结合的方式,形成上大下小的漏斗形形状,ETFE 膜材表面为顺滑的大曲率双曲面,膜材整体形状和纹路,创意取自银杏叶,银杏叶叶柄向下,叶脉竖向向上伸展,建筑形体多采用曲线表达,外形灵动、优美。同时在膜材选型上采用半透明的膜材,透过膜面能看

到钢结构杆件的大致轮廓，体现结构的力学美。

本工法在随州南站钢结构及索膜结构施工中成功应用并取得良好的效果，得到业主、铁路总公司及社会各界的广泛好评。



图 11-1 完工后的随州南站