



土木工程应用技术系列丛书



中国土木工程学会 编

土木工程 应用技术^⑤

CIVIL ENGINEERING
APPLICATION TECHNOLOGY

中国城市出版社
CHINA CITY PRESS



土木工程应用技术系列丛书

土木工程 应用技术^⑤

CIVIL ENGINEERING
APPLICATION TECHNOLOGY

中国土木工程学会 编

中国城市出版社

图书在版编目(CIP)数据

土木工程 5, 应用技术 / 中国土木工程学会编. —北京: 中国城市出版社, 2017.12

(土木工程应用技术系列丛书)

ISBN 978-7-5074-3125-4

I. ①土… II. ①中… III. ①土木工程—文集 IV. ①TU-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 275759 号

责任编辑: 徐昌强 陈夕涛

责任校对: 王 瑞 李欣慰

土木工程应用技术系列丛书

土木工程 5

应用技术

中国土木工程学会 编

*

中国城市出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

逸品书装设计制版

北京京华铭诚工贸有限公司印刷

*

开本: 880×1230 毫米 1/16 印张: 5½ 字数: 183 千字

2018 年 1 月第一版 2018 年 1 月第一次印刷

定价: 45.00 元

ISBN 978-7-5074-3125-4

(904083)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书编委会

主任委员：刘士杰

编委：（以汉语拼音为序）

白国良	白 云	陈祖煜	邓健儿	方 秦
冯爱军	冯大斌	傅鹤林	葛耀君	金新阳
李 辉	李 娟	梁存之	林家祥	吝红育
刘士杰	刘西拉	刘亚非	鲁卫东	马士伟
聂建国	欧阳东	谭立新	王爱勋	王 俊
王长祥	王梦恕	王明洋	吴明军	肖汝诚
邢侗慧	杨 娜	杨 煜	叶昌元	叶 磊
张冬梅	张晋勋	张可文	张同亿	张 雁
赵基达	周红波	朱合华	朱晓东	

第十四届中国土木工程詹天佑奖入选工程名单

一、建筑工程（9项）

国家会展中心（上海）；哈尔滨大剧院；望京 SOHO 中心 T1、T2、T3 工程；杭州国际会议中心；敦煌莫高窟保护利用工程——游客服务设施建安工程；郑州东站；广东海上丝绸之路博物馆；鄂尔多斯市体育中心；济南天地广场（贵和）工程。

二、桥梁工程（4项）

九江长江公路大桥；天津海河吉兆桥工程；六盘水至盘县高速公路北盘江特大桥；兰州市深安黄河大桥工程。

三、铁道工程（2项）

新建铁路哈尔滨至大连铁路客运专线；武汉至广州客运专线新建武汉动车段。

四、隧道工程（2项）

广深港高铁狮子洋隧道；上海外滩通道工程（北段）。

五、公路工程（3项）

上瑞国道主干线湖南省邵阳至怀化高速公路；崇明至启东长江公路通道工程；福建省泉州至三明高速公路。

六、水利水电工程（1项）

四川大渡河瀑布沟水电站工程。

七、水运工程（1项）

日照—仪征原油管道及配套工程项目（日照港岚山港区 30 万吨级原油码头工程）。

八、轨道交通工程（3项）

上海市轨道交通 16 号线工程；北京地铁 15 号线工程；深圳地铁 2 号线工程。

九、市政工程（1项）

老港再生能源利用中心工程。

十、燃气工程（1项）

郑州市天然气利用工程。

十一、住宅小区工程（2项）

南京燕子矶新城保障性住房一期工程（E、Q、S、G 地块）；北京大兴旧宫朗润园住宅小区。

CONTENTS 目录

哈尔滨大剧院 >>>

- 04 多类型异型扭曲钢结构施工技术研究及应用
任玉章 刘海良 张弛 霍家振
- 09 四棱锥玻璃采光顶安装技术
任玉章 刘海良 张弛 郑佰卫
- 13 任意曲面 GRC 装配复合实木装饰构造施工技术
任玉章 刘海良 张弛 易辉

望京 SOHO 中心 T1、T2、T3 工程 >>>

- 20 望京 SOHO 中心 T1、T2、T3 工程主要科技创新
周予启 于戈 郑群 史壮志

郑州东站 >>>

- 30 郑州东站主要科技创新及新技术应用
王福全 李玉琴

南京燕子矶新城保障性住房一期工程 >>>

- 42 南京燕子矶新城保障性住房一期工程（E、Q、S、G 地块）主要科技创新
鲁开明 唐家杰 黄国林

上海外滩通道工程（北段） >>>

- 50 上海外滩通道工程（北段）主要科技创新
金国鑫 周振

北京地铁十五号线工程

>>>

- 58 暗挖导洞内大直径桩施工关键技术研究
韩竹青 张 宏 胡宏彪 程 松 卞正涛 王 生
- 63 既有高架车站改造扩建关键技术研究
刘 力 卞晓芳 周春锋

上海市轨道交通 16 号线工程

>>>

- 70 上海市轨道交通 16 号线的创新与实践
徐正良 谢 炯

天津海河吉兆桥工程

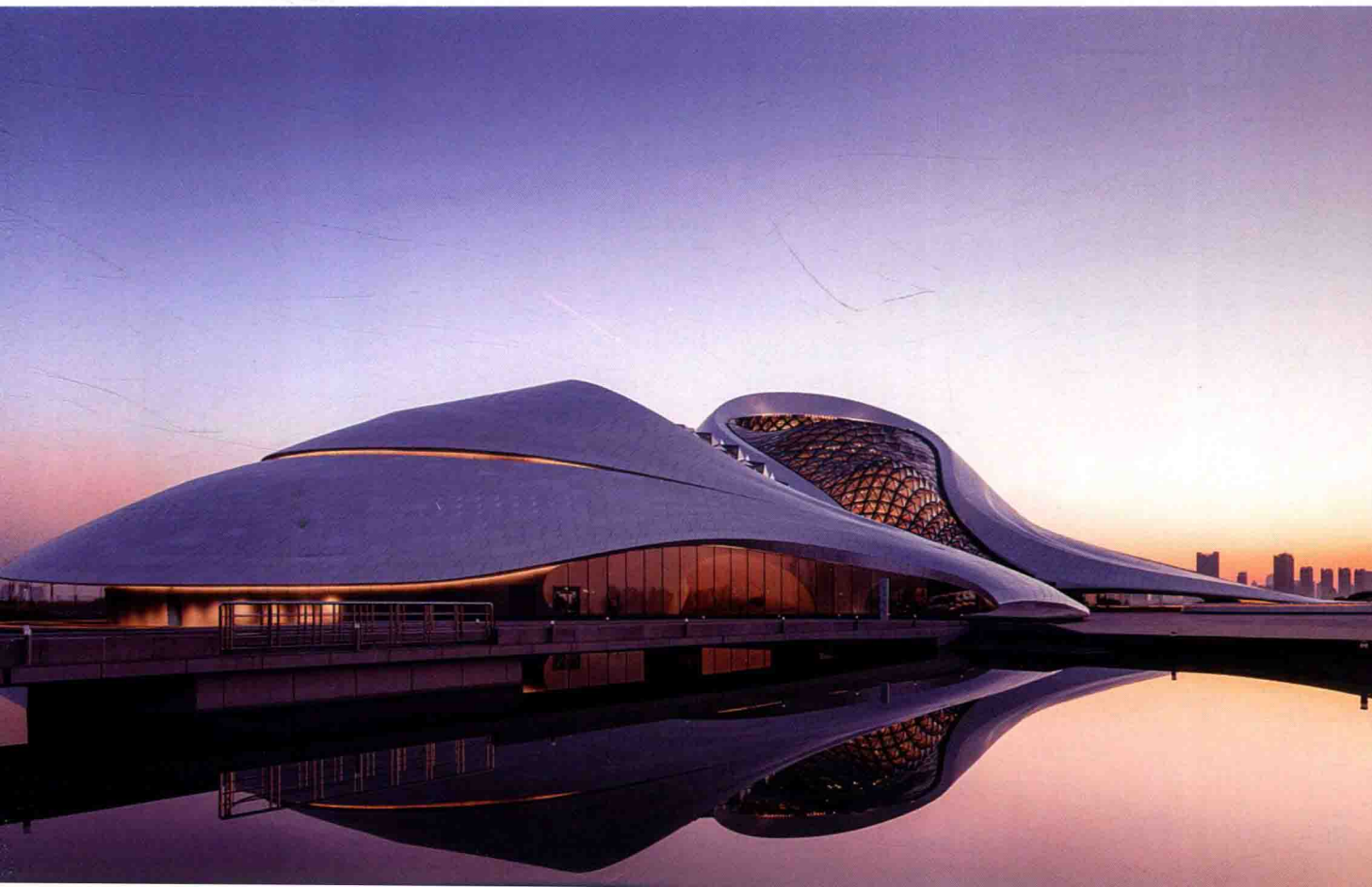
>>>

- 80 天津海河吉兆桥工程主要技术创新
韩振勇 聂建国 张振学 汤洪雁 袁 涌



第十四届中国土木工程詹天佑奖获奖工程

哈尔滨大剧院





工程概况

哈尔滨大剧院位于松花江北岸，与太阳岛隔江相望，是国内唯一一座由中国建筑师提供整体设计方案，集演艺、湿地观光于一体的国际一流观演建筑，是黑龙江省规模最大、功能最完善的标志性文化设施。工程总建筑面积 79396m²，大剧院 1600 座，地下 2 层、地上 8 层；小剧场 400 座，地下 2 层、地上 3 层。建筑高度 56.48m。

工程于 2011 年 3 月 15 日开工建设，2015 年 5 月 29 日竣工，总投资 10.03 亿元。

工程特点与难点

(1) 大剧院作为中国建筑师的原创作品，以松花江在河床上刻画的流线为设计灵感，运用大地艺术景观手法对原有自然湿地、水系合理保留利用，将建筑与环境相互融合，使建筑本身成为景观的组成部分。

(2) 曲面空间设计独特，外部如行云流水，内部如冰雪溶洞，结构、装修均需依形而建，施工难度大。

(3) 为满足建筑流线外形的需要，本工程采用多种空间体系组合的结构，包括自由曲面箱型弯扭网壳、复杂异型多层焊接球节点网架、扇形变曲面屋面折弯梁、平台网架。为协调变形，采用了 27 种不常见的支座和节点形式。结构复杂，精度要求高。

(4) 金属屋面 4 万余块铝板类型、尺寸无一相同，并创造性地采用倒插叠瓦式构造，不仅分散排水避免形成雨幕，而且自下而上不会形成阴影。浮动式连接解决了 80 摄氏度温差作用下铝板变形的影响，工艺复杂。

(5) 公共核心区域采用仿型地貌雕塑设计手法，空间曲面多变，大厅使用 GRC 实木复合装饰板、GRG 装饰板、FRP 玻璃纤维板，观众厅采用 GRG 混浆 + 彩绘做法，保证整体流线形态，展现不同材质纹理效果，精细化施工要求高。



主要科技创新

(1) 运用大地艺术景观手法对原有自然湿地、水系合理保留利用，有效实现了建筑与自然的融合；将自然光引入剧场的方式丰富了非演出时段的照明方式，创造了节能环保新模式。

(2) 剧场内采用多岛式看台的流线造型较好实现了与建筑外造型的整体风格相统一；立体纹理异形曲面结构金属幕墙，形成了皮肤状呼气式建筑表皮，有效保证结构外形效果和建筑功能；屋面设置了步行式观光环廊，并与不同高度观光平台进行了有机结合，创造性地将整座大剧院变成了全天候 360 度的观景平台，开拓了游人观光视角。

(3) BIM 与三维快速测量装置相结合施工技术，解决了自由曲面网架结构的拼装与吊装难题；8 耳板转接件安装技术，实现了采光顶钢龙骨水平（倾斜）方向、垂直方向和平面内安装角度的多维度调节，较好适应了采光顶系统玻璃板块多种安装角度的要求；逆施工法，有效解决了曲面金属幕墙的安装技术难题。

(4) 工厂模块化加工与现场制作相结合的公共区域任意曲面 GRC 复合木装饰施工技术，有效提高了施工工效与质量，绿色工业化施工理念显著。



多种类异型扭曲钢结构 施工技术研究及应用

任玉章¹ 刘海良¹ 张弛¹
霍家振²

- 1. 北京市第三建筑工程有限公司
北京 100044
- 2. 上海宝冶集团有限公司
上海 610031

摘要：多种类异型扭曲钢结构施工技术通过 BIM 技术划分网架小拼装单元，再组成大吊装单元，采用可自由组合的拼装平台及网架焊接球三维快速测量装置，完成模块化拼装与吊装，实现了网架安装空间位置与 BIM 模型的高度吻合。该技术解决了拼装误差累积和焊接残余应力的控制问题，经鉴定达到国际先进水平。

关键词：异型曲面；单元划分；标准化拼装；模块化吊装

1 工程概况

该工程钢结构设计总用钢量 7000 余吨，其中大剧场约 5480 吨，小剧场约 1100 吨，售票厅约 60 吨及成品支座 70 吨。

大剧场屋顶结构分为后区、35m 平台区、前区钢结构三个独立部分，后区钢结构为弯折的连续钢梁，35m 平台区由网架和单层斜交钢梁组成，前区钢结构包括侧面的多层网壳和玻璃顶单层网壳，大剧场旋转楼梯为支撑于混凝土结构和侧面钢结构上的折梁和曲梁。小剧场屋顶钢结构从空间关系上划分为后区和公共区域两部分。后区为悬挑管桁架，侧面为工字型钢架。前区包括多层网壳和玻璃顶单层网壳两部分。售票厅顶部为 H 型钢组成的单层网壳、下部由箱型钢柱支撑（图 1）。



图 1 哈尔滨大剧院屋顶

2 结构特点及施工难点

- （1）工程钢结构复杂多变，拼装单元的划分要使加工、拼装、吊装单元简单化、模块化和统一化，尽可能减少胎架支撑点的数量，降低施工成本，这是该部分结构施工顺利的关键因素，也是工程的重点难点。
- （2）该工程钢结构接口多，施工精度要求高，在拼装和吊装过程

>>> 作者简介 <<<

任玉章（1960—），男，工程师，北京市第三建筑工程有限公司项目经理。

刘海良（1985—），男，助理工程师，北京市第三建筑工程有限公司项目总工。

张弛（1990—），男，助理工程师，北京市第三建筑工程有限公司部门主管。

霍家振（1981—），男，高级工程师，上海宝冶集团有限公司项目经理。

中,如何减少施工误差,保证施工质量成为重中之重。

(3) 剧院钢构件形状不规则,吊装重心难以控制,如何避免大吊装单元的翻身焊接,提高施工安全系数,保证组装精度和构件平面度成为该工程又一重点难点。

3 主要施工要点

哈尔滨大剧院屋面施工,以分区模块化施工为核心、空间定位详图技术为支撑、高效拼装为中枢、高精度测控为关键,通过对施工过程进行科学分析与判断,巧妙划分基本拼装和吊装单元,使得整体上差异巨大的空间结构在经过单元划分后,各个单体差异变小,达到了易于形成加工和安装的模块化施工的效果;利用软件辅助确定构件控制点的三维坐标,在计算机工况模拟和高精度测量技术的配合下,保证了拼装和吊装的精度,实施模块化的拼装和吊装工艺,并根据现场条件确定合理的作业流水和大型机械,应用该成果创新技术,完成了自由曲面高精度玻璃顶箱型弯扭网壳、复杂异型多层焊接球节点网架结构、扇形变曲面屋面折弯梁以及相关的多种功能性连接支撑件的施工,克服了复杂异型结构中的施工烦琐、措施成本投入大的困难(图2)。

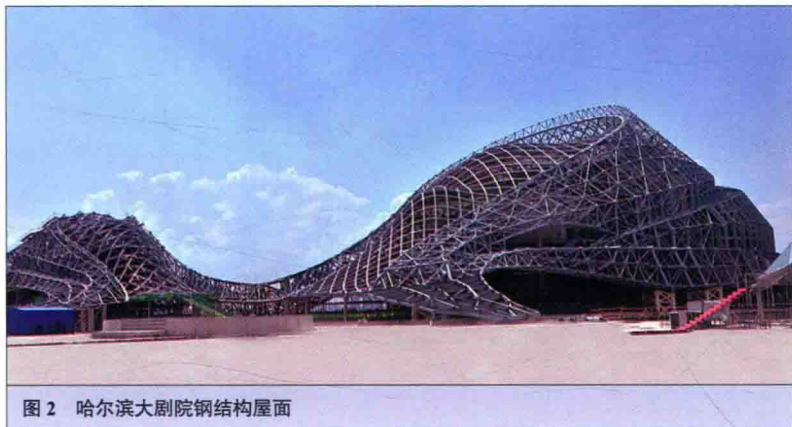


图2 哈尔滨大剧院钢结构屋面

3.1 单元划分

运用 BIM 技术划分拼装小单元,再将小拼装单元组装成大拼装单元(图3—图5)。

吊装单元的划分主要考虑以下几个方面:

(1) 复杂的结构体系简单化、模块化和统一化。本身已经够复杂的结构,加工、拼装、吊装单元必须简单化、模块化和统一化,易于制作和施工。

(2) 用最少的分块,减少支撑胎架的数量,降低施工成本。

(3) 利于加工和运输。缩小大单元差异化,基本做到模块化和统一化,长度相对固定且在运输长度范围内易于打包和运输。

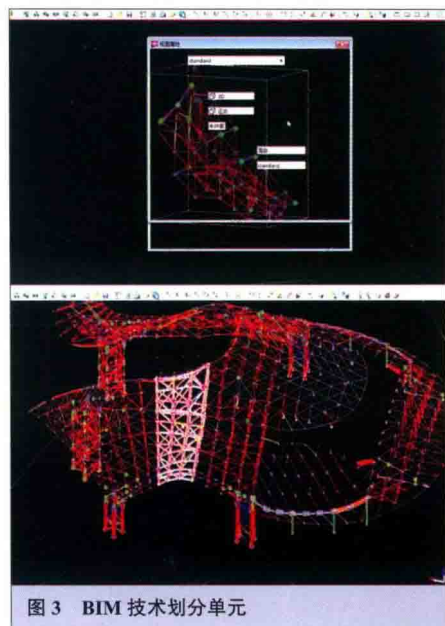


图3 BIM技术划分单元

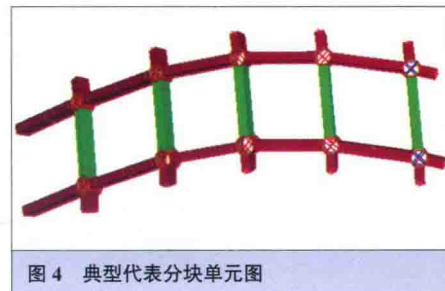


图4 典型代表分块单元图

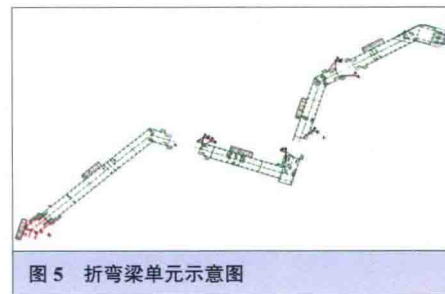


图5 折弯梁单元示意图

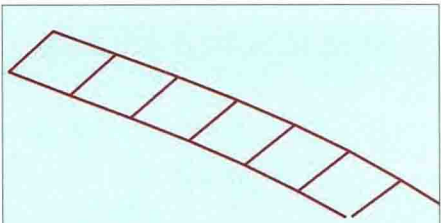


图6 划出拼装单元地样线

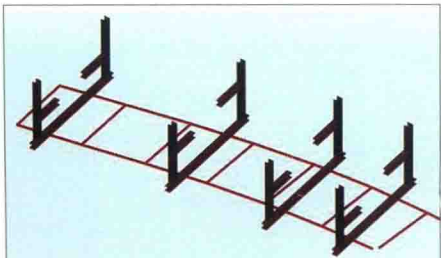


图7 搭设拼装胎架

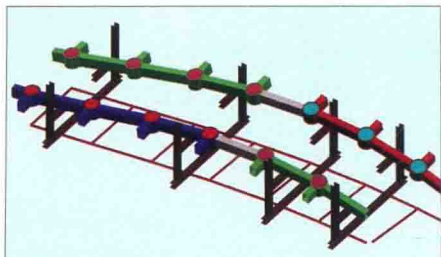


图8 箱型拼装单元弦杆组装

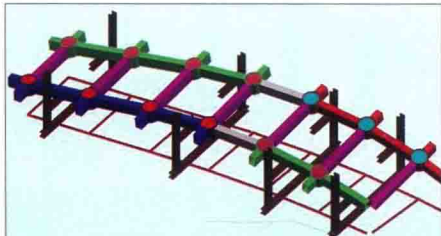


图9 箱型拼装单元腹杆组装

(4) 易于现场拼装和吊装。吊装单元结构基本统一,做到结构难易程度一致,使现场技术人员和作业人员易于熟悉和掌握,利于控制施工质量。

3.2 标准化拼装

该项目自由曲面高精度玻璃顶箱型扭曲网壳采用两种拼装方式:一种为地面整体拼装,一种为地面分单元拼装。分段拼装前,需先设置安全合理的拼装平台,在经过平整夯实的拼装场地进行拼装,搭设拼装胎架。支撑胎架设置避开节点位置,满足焊工的施焊空间。拼装单元箱型梁在组装平台上划出各杆件端面定位线、中心线及分段长度位置线,作为构件拼装验收的依据,另外为防止胎架的沉降不均匀,须在胎架旁设置一沉降观察点,作为平台沉降的检查依据(图6—图9)。

针对该项目复杂异型多层焊接球节点网架结构特点,采用地面模块拼装,胎架采用自由组合钢平台加可移动球托,此结构拼装胎架针对每个拼装单元的不同,组合方便、快捷、结构稳定、保证拼装质量,形成网架小拼及大拼单元。安装临时支撑胎架,依据分块单元结构形式合理选取多层网架分块吊装单元支撑点位置和数量,通过空间三维实体模型放样,利用全站仪定位各支撑点空间坐标,然后在地面上用十字线标记各定位点地面投影坐标。安装临时支撑胎架,要求胎架底面中心与地面十字线中心重合,胎架顶端设置1米高的胎架高度微调装置。为保证胎架的侧向稳定性,除胎架柱脚与埋件连接外,现场每个胎架四面拉设缆风绳(图10—图13)。

针对扇形变曲面屋面折弯梁的拼装,在拼装场地先设置组装平台,组装平台必须稳定结实,摆放平整,折梁在平台上放平组装,以



图10 焊接球的拼装



图 11 球间杆件的安装



图 13 小单元的拼装效果 b



图 12 小单元的拼装效果 a

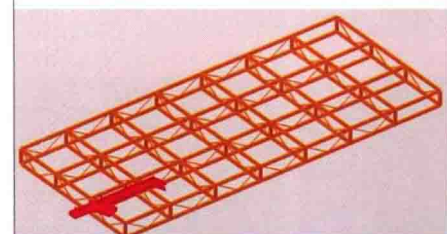
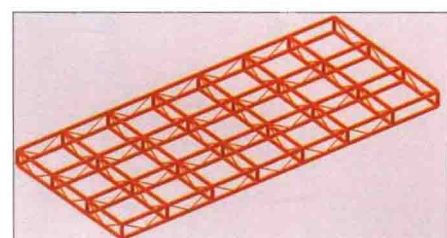


图 14 制作组平台, 折弯梁分段上组平台

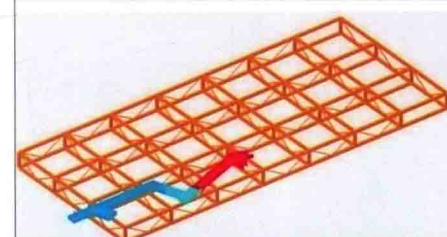
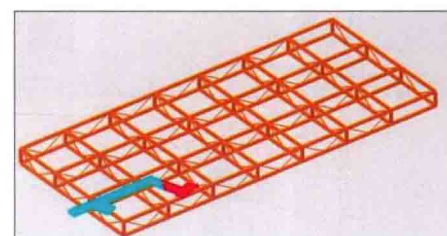


图 15 折弯梁分段上台组装并检查尺寸, 合格后焊接

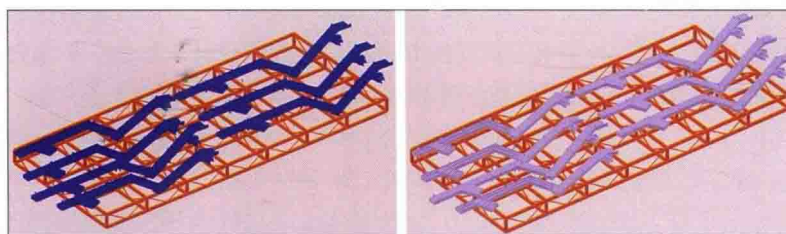


图 16 相同施工工艺组装后续折弯梁

保证组装精度和构件平面度。采用 25t 汽车吊将折弯梁分段单元按顺序上胎, 固定定位后, 安装定位耳板。待四面连接板、螺栓装好后, 用卡板、千斤顶等措施调整钢梁对接位置, 用钢尺、角尺检查钢梁确保对接错口尺寸不大于 $\pm 2\text{mm}$ (图 14—图 16)。

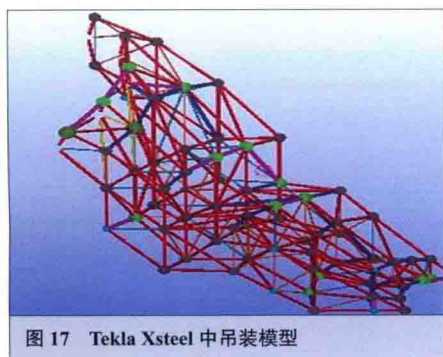


图 17 Tekla Xsteel 中吊装模型



图 18 模块吊装



图 19 折弯梁吊装

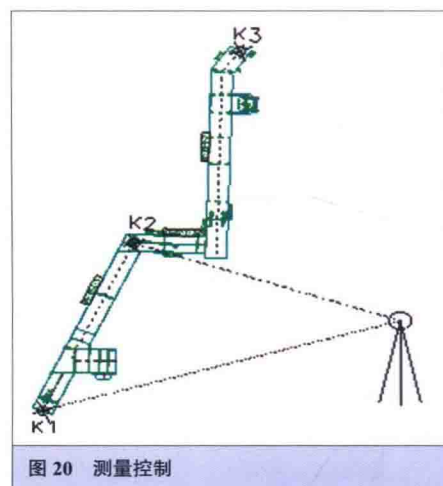


图 20 测量控制

3.3 模块化吊装

该项目吊装模块重心采用钢结构建模软件 Tekla Xsteel 选取，模块与模块之间采用塔吊进行散件补档，杆件补档完成后按照轴线顺序依次焊接。

模块定位不准确直接影响补档管件的安装质量，模块吊装初步就位后进行精确定位，通过测量仪控制，在构件上将反光片黏贴在测量控制点位置上，测量结果出来后进行分析就位情况，与 BIM 模型进行对比，通过对比对模块进行微调定位，保证吊装精度（图 17—图 21）。

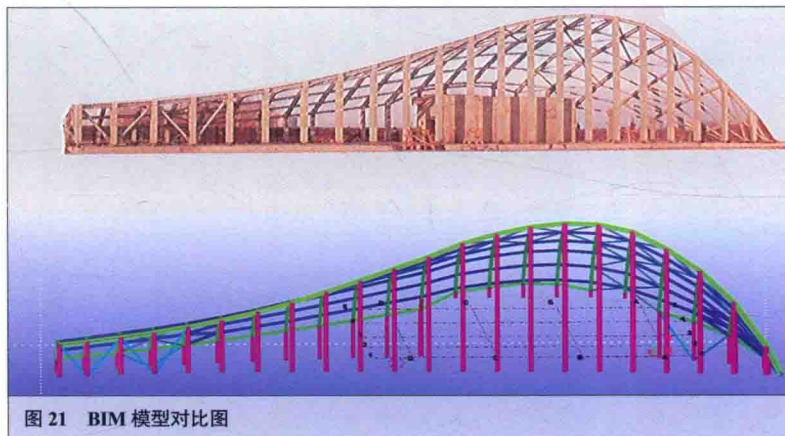


图 21 BIM 模型对比图

4 小结

该项目应用多种类型扭曲钢结构安装技术，巧妙利用施工单元的划分促使施工形成了模块化批量作业，解决了复杂异型结构施工中作业烦琐、施工措施投入巨大的先天不足；计算机三维模型软件的成熟应用解决了空间弯扭构件在制造、拼装、吊装中的精确定位问题，保证了施工的精度和质量。其多种施工技术的组合应用，在国内外复杂异型结构施工领域达到了较高的水平。本技术经鉴定综合水平达到国际先进水平。

该技术可以在造型复杂的民用大跨度空间钢结构领域开展推广应用。随着绿色建筑的兴起，钢结构以其环保和造型能力强的特点，将在建筑市场上占据更大的比例，类似于这种组合各种较高难度的构造来形成统一建筑外形和不同功能划分区域的建筑设计，将是一个重要的趋势。因此，多种类型扭曲钢结构施工技术的应用前景十分广阔。

四棱锥玻璃采光顶 安装技术

任玉章¹ 刘海良¹ 张 弛¹
郑佰卫²

1. 北京市第三建筑工程有限公司
北京 100044
2. 沈阳远大铝业工程有限公司
沈阳 610031

摘要: 本工程的幕墙设计承载着实现建筑易于识别、安全可靠、易于维护、节能环保、保温隔热、隔噪音等多方面的要求的任务。由于本工程造型复杂,项目通过独创的8耳板转接件实现采光顶龙骨不同角度的调节,完成多种规格棱锥龙骨、四棱锥玻璃的安装。重点在于安装后的效果要同设计效果吻合,线条流畅。其多线条不规则造型决定了面材制作安装充满挑战。

关键词: 四棱锥玻璃采光顶;8耳板转接件;钢龙骨

1 工程概况

该工程屋面采用隐框结构双层中空玻璃四棱锥造型采光顶,主体结构为钢网架,采光顶系统由转接件连接到主体结构网架的节点上,横竖龙骨均采用钢龙骨,龙骨表面热浸镀锌处理,龙骨外层用铝合金扣板装饰,玻璃采用10+12A+8+12A+8+1.52PVB+8mmLow-E双中空夹胶超白玻璃。由于采光顶造型特点,采光顶玻璃之间的夹角并非统一的角度,针对相邻板块夹角的不同,设计不同的玻璃合片方式,以满足系统密封构造的需要(图1)。



图1 屋面采光玻璃顶

2 结构特点及施工重难点

(1) 大剧院完整的四棱锥有335个,边角部位一半的棱锥有88个;小剧院完整的四棱锥有62个,边角部位一半的棱锥有28个,总计513个不同形状的玻璃棱锥,1820块不同形状的玻璃板块。棱锥的斜边夹角范围在102~198度之间,底边的夹角范围在102~210度之间,每个棱锥形状和空间角度以及玻璃尺寸都是不同的,施工

>>> 作者简介 <<<

任玉章(1960年—),男,工程师,北京市第三建筑工程有限公司项目经理。

刘海良(1985年—),男,助理工程师,北京市第三建筑工程有限公司项目总工。

张 弛(1990年—),男,助理工程师,北京市第三建筑工程有限公司部门主管。

郑佰卫(1985年—),男,助理工程师,沈阳远大铝业工程有限公司项目经理。

难度大。

(2) 所有钢结构均需要校核实际的安装尺寸并修正玻璃棱锥的施工尺寸。

(3) 棱锥安装需要在三维空间里确定安装位置, 精度要求高、难度大。

(4) 采光顶底部, 主体钢结构由于空间角度不同, 交点位置的形状也不同, 交点处的包柱施工难度大。

3 主要施工要点

3.1 采光顶分区

哈尔滨大剧院玻璃采光顶总体分为大小剧院两部分, 每部分均以中轴线对称形成四个分区, 每个分区由不同的四棱锥构成(图2)。

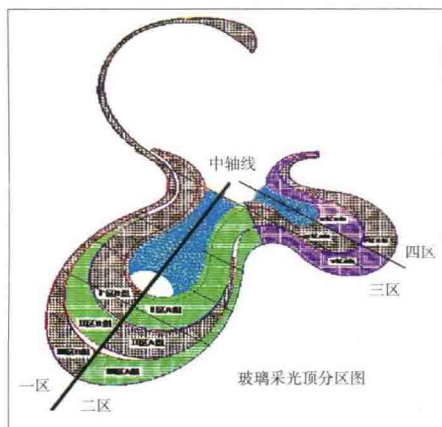


图2 玻璃采光顶分区图

3.2 脚手架搭设

由于采光顶系统的复杂, 施工中采用了满堂红脚手架。脚手架的搭设严格遵循了以下顺序: 摆放扫地杆→逐根树立立杆并与扫地杆扣紧→装扫地小横杆并与立杆和扫地杆扣紧→装第一步大横杆并与各立杆扣紧→安第一步小横杆→安第二步大横杆→安第三、四步大横杆和小横杆→安连接杆→接立杆。

屋面室外平台立面的玻璃幕墙采用双排脚手架, 双排脚手架搭设设置标准为立杆纵距 1500mm, 横距 1200mm, 步距为 1700mm; 搭设高度 7m—16m, 小横杆端部距结构立面距离不小于 500mm, 双排架与立面网架结构设置拉结点。

3.3 钢龙骨转接件放样

本工程四棱锥采光顶依附于主体钢结构网架, 该网架为不规则结构, 组成网架的杆件的长度和两个相邻的杆件的夹角几乎都不一致, 因此四棱锥体的各边的夹角也无法统一。因此, 在设计安装方案中首先要解决如何通过转接结构来适应不同夹角的安装问题。工程设计了一套独特的转接件结构, 它的特点在于能将多个杆件按照特定的 X 平面内和 Y 平面的角度连接于此转接件上, 并可实现 Z 方向的高度调节(图3)。

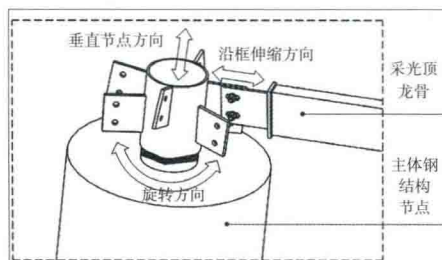


图3 转接件结构示意图

3.4 钢龙骨转接件安装

钢龙骨转接件分两段安装, 安装下段圆管时定位圆管的中心位置为转接件的预安装位置, 安装上段圆管时核对定位高度。转接件焊接, 转接件为 Q235 镀锌钢管, 厚 8mm, 所采用焊条的直径为 4.0mm, 焊条型号为 E4303。焊接时焊接处油漆层要用角磨机磨掉, 电流要适当, 焊缝成形后不能出现气孔和裂纹, 也不能出现咬边和焊