



JIANZHU GANGJIEGOU

SHI GONG XIN JI SHU

# 建筑钢结构

## 施工新技术

施工技术杂志社 编

中国建筑工业出版社

# 建筑钢结构施工新技术

施工技术杂志社 编



中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

建筑钢结构施工新技术/施工技术杂志社编. —北京:  
中国建筑工业出版社, 2009  
ISBN 978-7-112-10745-2

I. 建… II. 施… III. 钢结构-工程施工 IV. TU758.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 013427 号

近年来,大型体育场馆、会展中心、大型公共建筑的建设方兴未艾,在这些大型、复杂的钢结构工程施工中,遇到了许多前所未有的难题,也因此涌现了一系列先进的施工技术和宝贵的经验,本书将典型建筑工程钢结构施工安装及制作加工技术进行了总结和提炼,共包括四个部分:体育场馆安装技术、大型公共建筑施工技术、其他类型钢结构安装技术、钢结构构件加工制作。这些技术资料以具体的工程实践为背景,详细介绍工程各自的特点、技术难点、方案及材料选择、施工安装工艺及方法、制作及加工技术,希望能给广大工程技术人员以有益的借鉴,起到抛砖引玉的作用。

\* \* \*

责任编辑:郇锁林 曾 威  
责任设计:赵明霞  
责任校对:兰曼利 王雪竹

## 建筑钢结构施工新技术

施工技术杂志社 编

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京永峥排版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

\*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:23½ 字数:572千字

2009年4月第一版 2009年4月第一次印刷

定价:50.00元

ISBN 978-7-112-10745-2

(17678)

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)

# 《建筑钢结构施工新技术》 编委会

主任：郭彦林  
委员：（按姓氏笔画排序）  
毛志兵 王宏 石荣金 刘洪亮  
张可文 杨强跃 周观根 贺明玄  
郭正兴 黄明鑫  
主审：郭彦林 张可文  
主稿：梅阳 闫继红 周巍

# 前 言

近年来，伴随着我国改革开放和经济建设的不断发展，大型体育场馆、会展中心、大型公共建筑的建设方兴未艾，使我国钢结构产业蓬勃发展，也给钢结构施工企业带来了前所未有的机遇和挑战。在这些大型、复杂的钢结构施工中，遇到了许多技术难题，其难度有些是难以想象的。在专家和施工技术人员艰苦卓绝的努力下，克服了一道道难关，交上了满意的答卷，也谱写了钢结构施工的新篇章。

在这些工程实践中涌现了很多先进的施工技术，有的达到了国际领先水平甚至赶超了世界先进水平。这些技术经验极其宝贵，把国内有代表性的钢结构工程的施工安装技术、制作加工工艺加以总结是非常有必要的，施工技术杂志社在建筑施工界有着极大的影响力，与钢结构施工企业、行业专家和一线工程技术人员有着广泛而密切的联系，并成功地举办了两届钢结构施工技术交流会，为推动钢结构行业的发展起到了积极的作用。在施工技术杂志社的大力支持下，精选了国内钢结构施工的典型工程，编写了这本《建筑钢结构施工新技术》，以展示建筑钢结构领域的先进施工技术水平和钢结构技术理念，反映钢结构领域的热点和难点问题，加速钢结构施工技术的创新和发展。

本书包括四个部分：体育场馆安装技术、大型公共建筑施工技术、其他类型钢结构安装技术、钢结构构件加工制作，均是以具体的工程为背景，详细介绍各工程的特点、技术难点、方案及材料选择、施工安装工艺及方法、制作及加工技术，希望能给广大工程技术人员以有益的借鉴。在今后的钢结构施工领域中还会不断遇到新的问题和新的挑战，这本书也可以起到抛砖引玉的作用，在总结经验、探讨问题的基础上，将我国钢结构施工技术推向新的阶段，全面提升我国建筑钢结构从业人员的整体技术水平。

本书编委会

# 目 录

一、体育场馆安装技术 .....	1
国家体育场钢结构施工技术及其研究 .....	2
无线温度测试系统在鸟巢钢结构合拢和卸载施工中的应用 .....	12
国家体育场 PTFE 声学吊顶膜安装技术 .....	18
五棵松体育馆整体累积滑移技术 .....	23
北京奥运会射击馆超长结构预应力空心板施工技术 .....	29
济南奥体中心体育馆大跨度弦支穹顶预应力拉索施工 .....	35
武汉体育馆索承网壳钢屋盖顶升安装及预应力拉索施工 .....	40
南京奥体主体育场屋盖钢结构施工技术 .....	46
南通体育场空间钢结构的制作与安装技术 .....	52
岭南明珠体育馆屋盖钢结构制作与施工技术 .....	58
澳门科技大学室内体育馆屋面弧形钢管桁架制造安装技术 .....	66
弦支穹顶钢结构体育馆的结构体系与施工技术 .....	73
葵花型索穹顶结构的一种施工方法及其试验验证 .....	79
二、大型公共建筑施工技术 .....	85
中央电视台新台址 CCTV 主楼钢结构施工技术 .....	86
央视新台址主楼悬臂钢结构安装技术 .....	94
中央电视台新址电视文化中心网架施工关键技术 .....	103
北京南站中央站房结构及安装方案介绍 .....	112
中国国际展览中心新馆钢结构综合施工技术 .....	121
巨型框架结构体系超高层钢结构施工技术 .....	126
上海环球金融中心钢结构施工技术 .....	133
广州珠江新城西塔施工过程中内外筒竖向变形差值研究 .....	138
广州歌剧院复杂钢结构施工技术 .....	145
广东省博物馆新馆钢结构工程施工技术 .....	150
青岛地区大型钢结构工程施工方案选择 .....	157
山东青岛国际会展中心点支式索桁架玻璃幕墙设计与施工 .....	163
烟台火车站拱形网壳施工方案选择及关键技术 .....	169
郑州新郑国际机杨钢结构滑移施工技术 .....	175
“空间多轨道旋转滑移”施工工艺的研究 .....	183

河南省广播电视发射塔钢结构安装技术 .....	190
中山博览中心综合展厅大跨度钢结构施工技术 .....	194
大跨度空间钢结构逐段累积滑移技术 .....	201
厦门海峡交流中心·国际会议中心大跨度钢结构跨外安装技术 .....	207
保利国际广场钢结构安装施工技术 .....	212
温州市工人文化宫工程钢结构弧形梁吊装技术 .....	216
大型工程钢结构冬期施工技术 .....	221
钢筋桁架楼承板在钢结构建筑中的应用 .....	227
钢结构压型钢板安装及栓钉焊接施工技术 .....	232
中庭屋面张弦梁索桁架施工技术 .....	238
<b>三、其他类型钢结构安装技术 .....</b>	<b>245</b>
空客 A320 系列飞机中国总装线总装厂房钢结构制作安装技术 .....	246
超高、大跨度单层厂房钢结构安装技术 .....	252
钢结构工业厂房制作安装施工工艺 .....	259
工人日报社轮转机房加层钢结构工程施工技术 .....	267
$\phi 110\text{m}$ 柔性索结构摩天轮转盘竖向分瓣单向旋转安装法 .....	272
67m 高 3200t 重钢结构人字塔架的安装 .....	285
特大型高炉炉体快速安装施工技术 .....	295
上海市共和新路立交桥施工技术 .....	301
<b>四、钢结构构件加工制作 .....</b>	<b>309</b>
中央电视台新台址主楼钢结构构件加工制作与深化设计 .....	310
Q460E 钢材在钢结构建筑中的焊接应用 .....	319
郑州新郑国际机场弧形箱梁加工技术 .....	329
螺旋形屋盖钢结构加工制作与施工技术 .....	334
杭萧多高层钢结构住宅体系的制作和施工 .....	341
特大叠合工字形大板梁的焊接制造 .....	351
大型钢构件焊接变形与控制 .....	360
厚壁套筒层状撕裂的产生与防止 .....	366

# 一、体育场馆安装技术



# 国家体育场钢结构施工技术及研究

国家体育场规模巨大，占地面积  $20.42\text{hm}^2$ ，总建筑面积（含看台面积的一半以及立面楼梯） $257989\text{m}^2$ ，屋面投影面积  $59814\text{m}^2$ ，基底面积  $69548\text{m}^2$ ，地下1层，地上7层，3层看台。奥运会期间，可容纳观众91000人，其中临时座席11000个（赛后拆除），主要承担奥运会开幕式、闭幕式和田径比赛；奥运会后，可承担特殊重大比赛、各类常规赛事以及非竞赛项目。

## 1 结构形式

国家体育场钢结构建筑顶面呈马鞍形，长轴为332.3m，短轴为297.3m，最高点高度为68.5m，最低点高度为40.1m。屋盖中间开洞长度为185.3m，宽度为127.5m。主要由48榀主桁架围绕屋盖中间的开口放射形布置而成，主桁架与顶面及立面杂乱无章的次结构一起形成了“鸟巢”的特殊建筑造型（图1），大跨度空间钢屋盖支撑在周边的24根桁架柱之上，并将荷载传至基础。

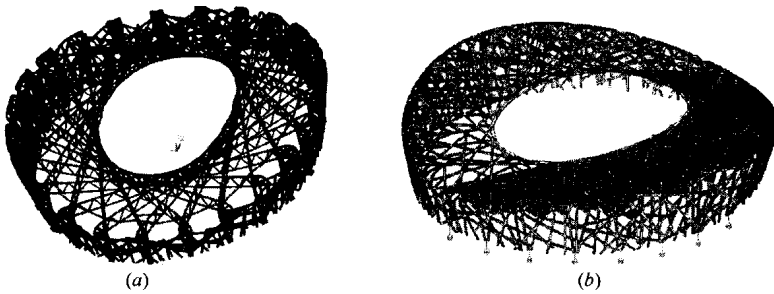


图1 国家体育场轴侧图

(a) 主结构；(b) 次结构

为达到预定的视觉效果，编织鸟巢用的杆件均为箱形构件，其中，主桁架断面高度为12m，上弦杆截面为  $1200\text{mm} \times 1200\text{mm} \sim 1000\text{mm} \times 1000\text{mm}$ ，下弦杆截面为  $1000\text{mm} \times 1200\text{mm} \sim 800\text{mm} \times 800\text{mm}$ ，腹杆截面基本为  $600\text{mm} \times 600\text{mm}$ 。桁架柱为三角形格构柱，每根格构柱由2根  $1200\text{mm} \times 1200\text{mm}$  箱形外柱和1根  $1200\text{mm} \times 1200\text{mm}$  菱形内柱组成，腹杆截面为  $1000\text{mm} \times 1200\text{mm}$ 。立面次结构的截面为  $1200\text{mm} \times 1200\text{mm}$ ，顶面次结构的截面主要为  $1000\text{mm} \times 1000\text{mm}$ 。

## 2 钢材选用

国家体育场钢结构为全焊接结构，设计用钢量约 42000t，所使用的材料种类包括 Gs20Mn5V 铸钢、Q345C、Q345D、Q345GJD 及 Q460E-Z35 等高强度钢。其中，Q460E-Z35 为国内建筑钢结构工程首次采用，共计约 900t，应用在 4 个柱脚和 6 根桁架柱中。在主体受力结构中大量采用 Q345GJD 及 Q460E-Z35 材质的厚板，钢板的最大厚度达到 110mm。

除 C19 柱外，所有桁架柱的菱形内柱下端（标高 1.5m）采用了 Gs20Mn5V 铸钢件。铸钢件高 2020mm，壁厚最厚为 130mm，单件最重为 18.09t，共计 276t。

## 3 工程特点与难点

### 3.1 工程组织管理难度大

本工程规模巨大，工程组织管理体系相当复杂，从市政府到业主、设计、监理、总包，从总包到土建施工单位、机电设备安装单位、装饰装潢单位、钢结构分部，从钢结构分部到钢结构加工单位、钢结构安装单位及膜结构施工单位，层次众多，项目管理极其复杂。

同时，钢结构安装与土建、钢结构现场拼装等存在多方施工交叉作业现象，现场场地狭小，施工场地布置、构件运输及大型吊机行走路线等受到限制。施工各方需合理协调、统筹管理，工程组织管理难度大。

### 3.2 结构复杂，造型奇特，安装精度控制难度大

由于国家体育场特殊的建筑造型，造成主、次结构之间存在多杆空间交汇现象。而次结构的复杂多变和规律性少，更增加了结构节点构造的复杂性。安装时，经常存在多个管口同时对接现象。对于箱形断面，要保证多个管口的对口精度，难度巨大。同时，对于大跨度空间结构，构件长度受温度变化的影响较大，安装精度极难控制。

### 3.3 构件体型大、重量重、形体怪异，安装难度大

本工程中，桁架柱的最大断面达 25m×20m，高度为 67m，单榀最重达 700t。主桁架高度 12m，双榀贯通最大跨度 258.365m，构件体型庞大，单体重量重，加之桁架柱和立面次结构的形体怪异，吊装难度大。

同时，根据设计要求，本工程的顶面次结构需在支撑塔架卸载完毕后再进行安装。由于在支撑塔架的卸载过程中，屋盖钢结构会产生一定的变形，从而导致顶面次结构的安装边界条件发生了改变，但考虑到工期和设计难度，顶面次结构仍是按照卸载前的边界条件（即原设计坐标）进行加工和拼装的，这两者之间存在一定程度的尺寸偏差，从而导致顶面次结构的安装对口和精度控制难度增大。

### 3.4 厚板焊接、高强度钢焊接及低温焊接难度大

本工程中，厚板数量较多（最厚达 110mm），且均为高强度钢（材质最高为 Q460E），

厚板焊接、高强钢焊接、铸钢件焊接等居多，现场焊接工作量相当大，难度高，高空焊接仰焊多。同时，主结构安装与厚板焊接正值冬期施工，焊前预热、焊后保温、高空防风、防滑、防寒措施必不可少，施工难度大。

### 3.5 合拢难度大

国家体育场屋盖钢结构属于特大型大跨度钢结构，双楹主桁架贯通最大跨度258.365m。由于结构形成过程和使用过程存在较大的温差，使用过程中，结构会产生较大的温度变形和温度应力。因此，根据北京地区的极限最低温度和极限最高温度，设计上设置了合拢温度，即屋盖结构最终形成时的温度，以减少温度变形和温度应力。根据设计要求，本工程中的主桁架和立面次结构各设置了4条合拢线，其中，主桁架合拢口96个，立面次结构的合拢口28个，合拢口数量众多。为确保合拢线上的对接口同时合拢，需组织大量的人力和物力。同时，根据钢结构施工进度和北京历年来的气温情况，要确保设计要求的合拢温度，难度甚大，必须进行周密的部署和施工安排，合拢组织难度大。

### 3.6 卸载难度大

国家体育场钢结构受力体系为中央大开口的斜交桁架双层网壳，表现出很强的空间非几何线性作用。根据总体施工方案，结构安装阶段，整个屋盖设置了80个支撑塔架，作为主桁架安装时的临时支撑，主结构安装完毕后，再进行卸载和拆除。在进行支撑塔架的卸载过程中，结构体系逐步转换，结构本身和支撑塔架的受力均产生变化，卸载的先后顺序、卸载等级及工艺都会对其产生影响，需进行详细的工况分析。对于如此复杂的结构体系，工况分析及同步卸载控制难度大。

### 3.7 工期压力大

本工程的工期以钢结构施工为主线，其施工的进度直接影响体育场看台、基座、膜结构以及其他相关工程的施工，工期压力相当大。对于本工程钢结构的安装，无论就工程量，还是从施工难度来说，工期都相当紧张。加上冬期低温施工的效率低下和北京春季风沙对吊装作业的影响，更加大了工期压力。

## 4 施工技术及研究

### 4.1 支撑塔架设置

为实施屋盖钢结构的安装和施工，根据钢结构特点、吊装分段形式和下部混凝土看台结构的布置情况，在主桁架下弦交叉节点的位置设置80个3m×3m格构式支撑塔架（图2）。为提高支撑塔架的整体刚度和稳定性，防止支撑塔架的沉降，支撑塔架的顶部设置桁架式水平支撑体系，底部设置6m×6m的桩基承台。根据主桁架的总体安装顺序将整体支撑塔架分成四大块，长短轴各两个区块，四个区块所有支撑塔架连成整体。

为方便现场加工制作和安装，提高其经济性，支撑塔架和柱顶连系桁架的设计均采用标准节方式。支撑塔架的柱肢采用D528×12和D609×12的螺旋焊管，水平腹杆采用2 L

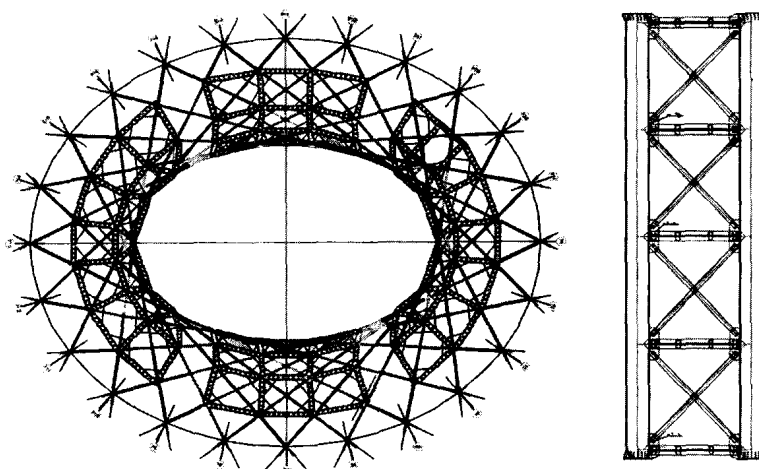


图2 支撑塔架布置与标准节形式

125 × 8 十字形布置，斜腹杆采用 L125 × 8X 形交叉体系。为提高支撑塔架柱身的抗扭刚度，在每节标准段的两端和中间区域设置角钢交叉横榻。同时，为便于主桁架的安装和支撑塔架的整体卸载，支撑塔架顶部设置十字形箱梁和 H 型钢支顶装置。

#### 4.2 柱脚施工技术

国家体育场桁架柱柱脚共计 24 件，次结构（包括立面次结构、楼梯柱和排水柱）柱脚共计 106 件，所有柱脚通过  $\delta = 30\text{mm}$  过渡板与混凝土承台中的预埋件相连。柱脚底部标高最低为  $-8.72\text{m}$ ，顶部标高为  $1.5\text{m}$ （其中 C19 为  $-0.8\text{m}$ ），最重为 189t。柱脚单体重量大，50、80、100mm 的厚板较多，厚板焊缝密集，焊接变形和残余应力控制难度大。同时，柱脚部分与土建单位的交叉施工集中，柱脚安装时，土建施工还未结束，现场施工条件较差并受到限制。加之，柱脚周围存在大量的插筋，情况复杂，柱脚安装操作空间相当狭窄，施工难度大。柱脚安装完毕后，土建单位还需进行承台钢筋绑扎和混凝土的二次浇筑工作。所以，本工程柱脚特别是桁架柱柱脚无论从结构形式还是在受力上都不同于其他工程，安装时，不但要确保柱脚的垂直度、水平偏移、上口标高，为上部结构施工创造条件，还要确保焊接质量，以保证整个屋盖结构的安全。

根据柱脚的结构特点及现场实际情况，针对不同位置的柱脚采用不同的施工技术。对于桁架柱柱脚，采用分块安装方法，并尽量减少现场焊缝的数量，保证焊接操作空间和位置，降低焊接难度。为此，所有柱脚的锚梁单独安装，并辅以垫板调节标高和垂直度，加设限位板以减少水平偏移。安装完毕后，采取稳定加固措施，避免土建施工对柱脚的影响。同时，对影响柱脚安装的钢筋，待柱脚安装就位后再进行绑扎。而柱脚的锚梁段以上部分，北区选择 500t 履带式起重机分段或整体进行安装，南区选择 800t 履带式起重机整体进行安装。

为满足现场安装时的作业条件，立面次结构、楼梯柱、排水柱柱脚与柱身分段对接口设置在二次混凝土顶面以上 1.2m 左右，相邻断口的最小距离大于 0.6m。次结构、楼梯

柱、排水柱柱脚均采用整体安装，最大吊装重量为 24t。

### 4.3 桁架柱安装技术

桁架柱支撑着整个屋盖，受力大，施工质量要求高。安装时，不但要确保内柱的垂直度、水平偏移、上口坐标及上节柱和下节柱的对口偏差，而且还要确保桁架柱上各牛腿的管口坐标，为主桁架和立面次结构的安装创造条件。但是，桁架柱对接管口多，刚度大，拼装时很难保证各管口的精度，这势必给安装带来困难，特别是柱脚与桁架柱对接处，因未进行预拼装且钢板较厚，对口调节困难。

为降低构件的拼装难度，桁架柱采用卧拼法。由于桁架柱体形庞大，整根吊装难度极大，且既不经济，又不安全。为此，根据桁架柱的特点、现场场地条件及安装精度要求、工期要求等实际情况，桁架柱采用就近整体拼装、分段吊装的方法，即桁架柱在指定的位置整体拼装完成并经验收合格后，采用分段双机抬吊、起吊直立、主吊车回转就位的吊装方法。每根桁架柱均分为两段：下节柱和上节柱。

由于桁架柱较重，且重心偏向内柱，吊装过程中吊点与吊耳受力较大，为此，根据桁架柱重心位置、拼装形态及结构形式，下柱吊装时，内柱设置主吊点和圆管吊耳，以便于起吊直立过程中钢丝绳的转动；两外柱设置副吊点和板式吊耳，以便于桁架柱吊装时的平衡调节。同时，为保证桁架柱外观的美观及起吊后钢丝绳的受力，外柱上的吊耳均设置在桁架柱内侧，内柱上的吊耳设在菱形内柱两侧。上柱吊装时的吊点均设置在外柱弯扭段顶面，靠内柱一侧为主吊点，两主吊点距离较近，外侧为副吊点，主副吊耳均采用板式吊耳。

在桁架柱的吊装过程中，吊耳将承受较大的集中荷载。由于吊耳的受力较为复杂，采用通常的方法难以确定吊耳的内力分布情况，只能通过实体有限元的方法来确定，并会涉及接触非线性与材料非线性问题。为便于吊耳的重复利用，吊耳设计时，可适当加长，并根据最重的吊装分段和最不利工况作为计算分析依据。根据计算分析，内柱圆管吊耳选用 D500×34 和 D610×32 两种，圆管内设厚度为 20mm 的内加劲板。为了防止吊绳上滑，圆管外加限位环板，环板上设置加劲板来保证其强度与稳定性。板式吊耳则采用 50mm 厚钢板。

桁架柱安装需要进行脱胎、起吊直立、吊装就位等一系列工艺程序，对于桁架柱此类特大型构件的安装，吊装前的各项准备工作尤为重要，如现场平面规划与清理：包括吊机站位点与行走路线、800t 吊车配重摆放位置、吊机行走路线、超起配重的回转范围及桁架柱的起吊直立区域内构件、工器具、杂物等的清理工作、影响桁架柱脱胎的拼装平台、拼装定位板及其他杂物、垃圾的清理；柱脚上口处操作平台、安全通道搭设；内部加强支撑、外部刚性拉撑、刚性拉撑包箍、缆风绳耳板的装设；柱脚上口和桁架柱下端处的工装件、定位板的安装。为防止钢丝绳的损坏，500t 辅助吊车吊点处需增设圆弧形钢板保护套。起吊直立和吊装就位时，通过倒链及滑轮组对桁架柱进行平衡调节，并确保桁架柱内柱垂直于大地。

桁架柱起吊直立时，动作要平稳，并须进行全过程监测。直到桁架柱内、外柱下端口保持水平。下柱吊装就位时，因内柱下端为铸钢件，且铸钢件以插入形式与柱脚连接，所以在进行对口就位时，首先进行内柱的对口定位，然后再调整外柱的对口偏差。

桁架柱就位后，先进行临时固定，然后通过经纬仪、全站仪进行内柱垂直度的控制测量及控制点坐标的测量，根据偏差情况进行调整，直到满足要求。调整时，先调整内柱垂直度，后调整每个箱形柱管口坐标。调整好桁架柱后及时利用卡马进行固定，然后三个管口同时施焊，对称焊接，待焊缝完成2/3以上后，吊车方可松钩。

为确保桁架柱的侧向稳定，根据吊装工况分析和变形计算结果，桁架柱就位后，在内柱与混凝土看台之间设置圆管刚性拉撑，外柱内侧拉设稳定缆风。

#### 4.4 主桁架安装技术

根据散装总体思路，即分段吊装方案，主桁架共分为182个吊装分段，其中平面桁架共166段，立体桁架共16段。除内圈主桁架外，主桁架均采用平拼法。由于主桁架分段形态和重心分布各不一样，故吊点的布置也会互不相同。根据主桁架的分段形式，吊点设置总体分为两种：外圈和中圈的平面主桁架采用两点吊装，局部牛腿较长的桁架增设一个稳定吊点；内圈立体主桁架采用三点吊装，一个主吊点和两个辅助吊点。所有吊点均设在桁架上弦节点区域对应内加劲或靠近内加劲的位置，以确保桁架上弦的局部受力要求。

由于主桁架吊装单元分为平面主桁架和立体主桁架，平面主桁架采取卧式组拼，而立体主桁架拼装形态与吊装时相同，所以平面主桁架与立体主桁架的吊装过程不尽相同。①立体主桁架：脱胎→就位→校正→焊接；②平面主桁架：脱胎→翻身→就位→校正→焊接。

为便于对位，主桁架安装时需在主桁架下弦下表面和上弦上表面标出质量控制基准点，基准点选择支撑塔架处主桁架两个方向轴线的交点，并将基准点投影到支撑塔架顶部十字梁上。当主桁架就位时，首先确保主桁架下弦下表面的基准点与支撑塔架顶部的基准点重合，然后通过经纬仪、全站仪进行主桁架的垂直度测量和主桁架上弦上表面基准点的坐标测量，如不符合设计和规范要求，可在支撑塔架顶部架设千斤顶来进行调整，直到基准点的坐标达到设计和规范要求。主桁架就位后，进行相关管口的坐标测量，如偏差不符合设计和规范要求，进行相应的处理，并作为相邻主桁架分段的安装依据。

主桁架安装前通过建模确定支顶点的标高，并根据计算结果加工和安装好支顶装置，确保支托位置和顶部标高符合预定的尺寸要求。确定标高时要考虑支撑塔架的压缩变形量（约5mm），确保主桁架就位后自重作用下的安装实测标高符合设计要求。为防止垫板和支托在主桁架就位时滑动，采用压马将垫板和支托固定在短柱上。就位过程中，如主桁架管口标高未达到设计坐标，可通过气割调整支托高度，满足要求后，将支托上端与主桁架下弦底板焊接固定。

主桁架高度高，且搁置在支撑塔架上，分段吊装时，高空构件的风载较大，在分段未连成整体或结构未形成整体之前，稳定性较差，尤其是最先吊装的主桁架分段，侧向稳定性差。所以，主桁架安装遵循分区对称安装原则，尽早形成独立稳定的区域，并按照三个阶段八个区域的吊装顺序，进行安装。主桁架就位完毕后，及时进行固定，对接口设置卡马，自由端设置侧向稳定撑杆和缆风绳。对于首件吊装的主桁架，必须待所有固定措施和侧向稳定措施做好后方可松钩，松钩时要缓慢，以确保首件吊装的主桁架的安全和支撑塔架的安全。同时，松钩过程中，要加强对主桁架的变形（主要为挠度）和支撑塔架垂直度的监测。

根据吊装工况分析和变形计算结果，起吊前局部悬臂杆件之间加设临时内支撑，支撑形式为 [20（用于长度较短的支撑）和用 [20 拼成的方通（用于长度较长的支撑）。

#### 4.5 立面次结构及钢楼梯安装技术

国家体育场的结构特色的主要体现就是次结构的布置，因其看似杂乱的布置，真正体现了“鸟巢”的结构主题。为确保管口对接质量，在施工总体思路上，立面次结构和钢楼梯分区间整体预拼装，分段进行安装。根据结构布置和吊车选用情况，立面次结构共分为 418 个吊装分段。在施工总体程序上，立面次结构安装遵循分区对称安装原则，尽早与桁架柱形成独立稳定的区域。同时，立面次结构及钢楼梯安装遵循由内向外的施工顺序：楼梯柱安装→内楼梯安装→立面次结构安装→外楼梯安装。

因立面次结构倾斜向外，在结构未形成整体稳定区块之前，自身稳定性很差。为防止侧向失稳，立面次结构吊装时，往看台方向拉设缆风绳。

#### 4.6 冬期焊接与低温焊接技术

国家体育场钢结构工程量大，厚板焊接、高强度钢焊接众多。根据散装总体施工方案，现场焊接、特别是高空焊接工作量相当大。受钢结构开工时间的影响及总体工期压力的制约，大量钢结构必须在冬期进行焊接，冬期焊接和低温焊接不可避免。为了能够既确保工期，又确保工程焊接质量，必须研究相应的焊接技术。针对国家体育场冬期施工这一实际情况，特在哈尔滨进行了低温焊接试验，根据试验结果，结合国内外的相关工程经验，制定冬期焊接与低温焊接技术方案。

对于低温焊接，钢材的预热、层间温度控制及热处理十分重要。 $t \geq 30\text{mm}$ ，采用电加热； $t \leq 25\text{mm}$ ，采用火焰预热。预热温度要求如表 1 所示。

钢材的预热温度要求（℃）

表 1

钢材牌号	接头最厚部件的厚度（mm）				
	$t \leq 25$	$25 < t \leq 40$	$40 < t \leq 60$	$60 < t \leq 80$	$t > 80$
Q345	20 ~ 40	60 ~ 80	80 ~ 100	100 ~ 120	150
Q460E				> 150	

在拘束度大的情况下，预热温度需提高 15 ~ 30℃。异种钢焊接，预热温度执行强度级别高的钢种的预热温度。不同板厚对接，预热温度执行板厚较厚的钢板预热温度。由于本工程均为箱形构件，预热时在正面加热，测温点设置在坡口底部垫板中心。采用电加热方式进行预热的构件，应进行伴随预热，层间温度不得低于预热温度，且 Q345 钢不超过 250℃，Q460E 钢不超过 200℃，层间温度测温点在焊道的起始点。采用火焰加热的主要目的是烤干焊接区域水汽，实现正温焊接。烘烤范围是焊缝两边各 50mm，烘烤温度为 20 ~ 40℃。

低温焊接时需连续施焊，焊接工作结束后，立即进行紧急后热或保温。 $t < 40\text{mm}$  需紧急保温，采用岩棉包裹焊接接头，自然冷却； $t \geq 40\text{mm}$  进行后热处理，后热温度 250 ~ 350℃，后热时间 1 ~ 2h，然后采用岩棉保温缓冷。

为确保低温焊接质量和安全，明确低温焊接环境温度范围为 $0 \sim -15^{\circ}\text{C}$ 。低于 $-15^{\circ}\text{C}$ ，需停止焊接作业。同时，低温焊接时需搭设防风装置。高空焊接作业时，防风装置要严密保温，特别是防风棚底部要密实，防止沿焊道形成穿堂风。雪天及雪后进行作业时，焊缝两端 $1\text{m}$ 处设置密封装置，防止雪水进入焊接区。

焊机尽量集中摆放在可移动的焊机防护棚内，防护棚内设置加热设备，使焊机在正温状态下工作。使用前，气瓶尽可能集中存放，在气瓶存放棚设加热装置，确保气体随用随有；气瓶在使用时，放置在焊机棚内，实现正温管理，单机使用时，气瓶必须采取加热保温措施，采用电热毯加热外包岩棉或其他保温材料进行保温保证液态气正常气化，使保护气体稳定通畅。冬期施工采用接触式测温仪控制预热、后热及层间温度，环境温度使用普通温度计监控。保护气体使用纯度为 $99.9\%$ 的 $\text{CO}_2$ 气体，以保证焊接接头的抗裂性能。

#### 4.7 合拢技术

北京地区的气候类型属典型的温带大陆性气候，季节气温变化很大。由于“鸟巢”结构的钢构件直接暴露于室外，冬季时钢构件的温度与室外气温基本相同。夏季室外气温最高，同时太阳照射强度也最大，太阳照射将引起构件温度显著升高。由于屋架上、下弦膜材之间的空气流动性较差，屋架内部温度明显高于室外气温，形成“温箱”效应。另外，结构在迎光面与背光面的温差，以及屋面、立面钢构件的温差将形成梯度较大的温度场分布。由于国家体育场大跨度钢结构的平面尺度很大，温度变化将在结构中引起很大的内力和变形，对结构的安全性与用钢量将产生显著的影响。加之，国家体育场钢结构工程量大，结构安装需经历较长的时间跨度，为控制安装过程的变形，减少结构使用过程中的极限温度变形和温度应力，在安装主桁架的过程中，采用了分块安装法，即先将各分段主桁架在高空依次拼接为4个对称、均匀布置的独立板块，然后再将各独立板块连成一个整体，这一分块连成整体的过程就叫做合拢。合拢时的钢构件平均温度即为合拢温度，它有别于合拢时的大气温度，它是结构使用过程中温度的基准点。为保证使用过程中的安全，特别是北京地区极限最高温度和极限最低温度时的安全，必须选择合适的合拢温度，以减少结构使用过程中的温度变形和温度应力。根据原设计要求，主桁架的合拢温度为 $(14 \pm 4)^{\circ}\text{C}$ ，立面结构与顶面次结构的合拢温度为 $(14 \pm 8)^{\circ}\text{C}$ 。考虑到全球气温变暖趋势、极限最高温度和极限最低温度的取值偏低及施工进度等诸多实际情况，设计对合拢温度进行了微调，调整后的合拢温度和要求为：①钢结构合拢温度 $15 \sim 23^{\circ}\text{C}$ ；②次结构合拢温度 $11 \sim 23^{\circ}\text{C}$ ；③设计合拢温度为钢结构的平均温度，在合拢时钢结构尽量做到温度均匀，在立面次结构后合拢情况下，顶面主结构温度允许偏差为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

国家体育场钢屋盖结构复杂，跨度较大，主桁架相互交错，合拢线的选择比较困难。在确定合拢线时，不但要考虑结构本身的受力和变形情况，同时还应考虑钢结构的整体安装顺序和主桁架的安装分段情况，尽量减少合拢点的数量，特别是合拢口的数量，以方便施工，减少合拢时的人员、设备及其他资源的投入，并确保施工过程的安全。根据设计要求，并结合现场

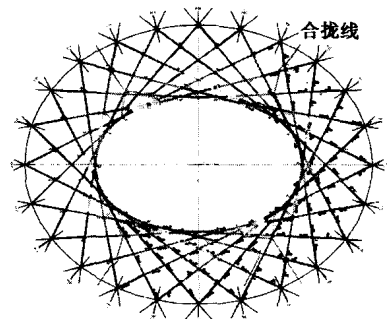


图3 主桁架安装合拢线



施工的实际情况，主桁架、立面结构及顶面次结构的合拢线确定如下：①主桁架沿屋盖环向设置4条合拢线，主桁架的合拢线充分利用钢结构的两条分区施工线，另增设两条合拢线；②为保证整个结构的合拢，立面结构与顶面次结构沿屋盖环向在与主体钢结构合拢断面相应的位置设置4条合拢线；③安装时，合拢线处所有钢结构杆件均断开，采用卡马临时搭接，并保证合拢口的伸缩自由。根据以上情况，主桁架共有96个合拢口，立面次结构共有28个合拢口，合拢点具体位置如图3、图4所示。

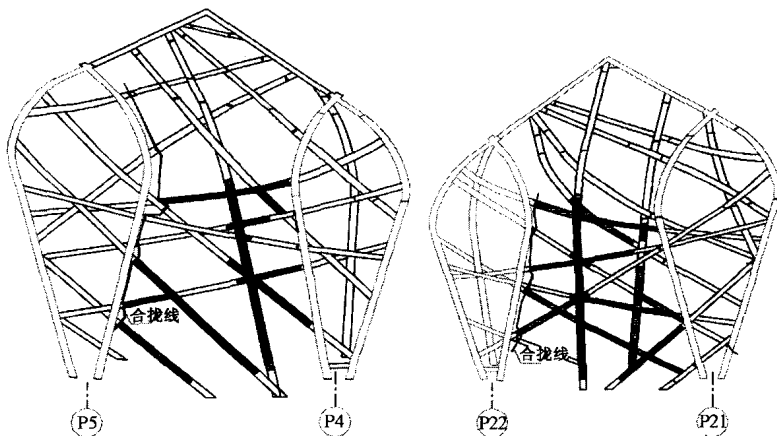


图4 立面结构安装合拢线

由设计要求和选定的合拢线可知，本工程的合拢口数量众多，牵系到的合拢段较多。根据总体施工进度安排，合拢段安装的时间跨度相对较大，因此，各合拢段安装时的温度差别较大，受温度变化的影响也较大。为确保合拢段的顺利安装和施工过程中的安全，同时确保合拢口合拢时的最终间隙大小，在进行合拢段的安装时，必须遵循以下原则：①尽量选择在与合拢时相近的温度条件下或低于该温度的条件下进行安装，以方便构件的进档，控制合拢时的坡口间隙，该间隙大小要考虑温度变形计算结果和焊接收缩变形，以减少合拢口的焊接量和焊接残余应力，确保合拢口的焊接质量。如达不到预定的要求，可调整合拢段先焊一端的坡口间隙。同时，对合拢口的错边量也要加以严格控制，保证合拢的顺利进行；②尽量采用小间隙安装法，避免合拢时合拢口间隙过大；③为确保合拢段施工过程中的安全，合拢段安装就位后，除设计要求的合拢口不进行焊接连接外，其他接口部位均需及时焊接完毕，以增强结构的整体稳定性；④为确保合拢口在施工过程中因温度变化而自由伸缩，合拢口采用卡马搭接连接，卡马的大小和数量需根据该接口部位的受力计算确定。此受力计算不但要考虑合拢段安装过程中搭接受力要求，而且要考虑合拢过程中合拢口的受力要求，包括构件本体的受力。

因合拢口数量众多，如一次合拢，则需投入大量的人力和物力，且施工组织管理也相当困难，根据现场实际情况，结合设计提出的先行合拢构件需纳入后续合拢线合拢温度要求范围这一基本原则，本工程的合拢按合拢线依次进行合拢。先进行主桁架的合拢，再进行立面结构的合拢，主桁架合拢时，先进行两大施工区域内部合拢线的合拢，再进行两大施工分区间合拢线的合拢，同一合拢线的各合拢口同时、同步合拢。在进行主桁架4条合