

# 国家体育馆双向张弦空间网格结构设计

章 阳 朱忠义 陈金科 冯 阳 柯长华 许 硕 秦 凯  
王 毅 周 凯 曾丽荣 杜申瑞 薛慧立 甘 明

(北京市建筑设计研究院 北京 100045)

**摘 要:**介绍了国家体育馆双向张弦空间网格结构的设计理念和设计方法。如新型结构的布置、大跨度空间结构防火计算、防连续倒塌分析、双向索预应力特性研究、沿短向带索累积滑移施工方法以及监测、试验情况。

**关键词:**双向张弦空间网格结构 结构防火 防连续倒塌分析 带索累积滑移施工 健康监测

## 1 工程概况

国家体育馆座落于奥林匹克公园中心区的南部,是中心区最重要的建筑之一。国家馆是第29届奥林匹克运动会主要比赛场馆之一,奥运会及残奥会期间主要进行体操(不包括艺术体操)、蹦床、手球、轮椅篮球四个项目的比赛。

国家体育馆是奥运中心区唯一的一座我国自行设计、自行施工、全部采用国产建材建设的场馆,也是亚洲目前最大的室内体育馆,整个工程充分体现出中国特色。设计中强调用成熟理性的思维去塑造设计一个“经济,合理,美观”的奥运场馆,将“科技奥运,绿色奥运,人文奥运”的三大理念,实实在在落在建筑中,同时设计时注重充分考虑它的赛后运营模式,将实用性贯穿融汇在建筑设计的各个方面。

国家体育馆建设用地南北长约335m,东西长约207.5m,总用地面积6.87ha。体育馆由主体建筑和与之相连的热身馆以及室外环境组成,建筑高度42.747m,建筑面积80890m<sup>2</sup>,室外绿化及道路面积44000m<sup>2</sup>,总投资约8.5亿元。体育馆屋顶曲面近似扇形如行云流水般飘逸又富于动感,四周竖向分部的钢骨架与大面积晶莹剔透的玻璃幕墙相映衬,犹如一把张开的中国折扇,空间投影为秦朝的刀形古币,彰显出中国文化的内涵,是目前国内设施最完善的体育馆。体育馆平面布置见图1,建筑全貌见图2。

国家体育馆地下一层,地上四层,其中地下

注:《国家体育馆双向张弦空间网格结构设计》项目获第三届欧维姆预应力技术奖一等奖

一层为车库、人防及设备机房,首层为比赛馆、热身馆和办公用房,二层、四层为观众看台和休息大厅,三层为VIP包厢。

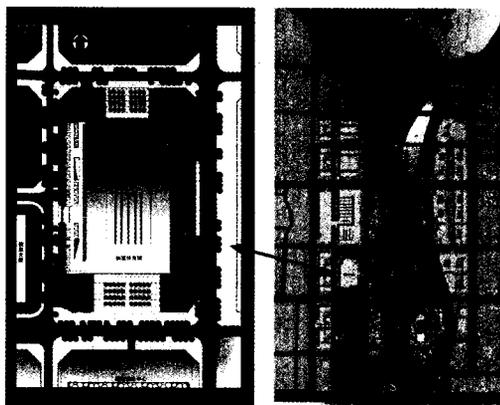


图1 总平面图

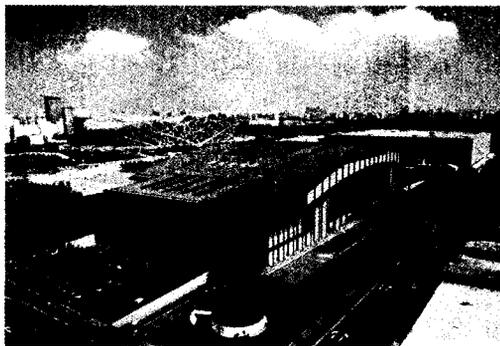


图2 国家体育馆全景

工程外立面采用横向水平玻璃肋竖向吊杆结构体系的中空low-e节能玻璃幕墙,具有保温、隔热、防紫外线等效果,保证场馆内人员不受外面气候影响,并充分利用自然采光,有效降低场馆运营成本;钢屋盖双向跨度达114.5m×195.5m呈南高北低的弧形曲线,最高点为43米,金属屋面覆盖外壳由铝镁锰合金板和玻璃条形采光窗组

成的体系,符合防雨、抗风、降噪、保温、大雪荷载和暴雨虹吸等众多的设计标准,满足了奥运比赛的需要,又兼顾了多功能性演出的需要。

## 2 技术指标和创新特点

国家体育馆的比赛区域结构跨度为 $144.5\text{m} \times 114\text{m}$ ,在屋盖结构设计中首次提出并应用了“双向张弦空间网格结构体系”。

1) 该体系即由正交正放桁架系组成的空间网格结构通过桅杆与下层双向索网构成的一种新型的空间结构体系,是刚性网格结构和柔性索结构的合理组合,由于其利用空间网格结构代替传统的梁,可以采用满应力方法对结构优化设计,大幅度减小结构用钢量;该体系克服了单向张弦结构钢索出平面外稳定性差的缺点,使结构空间受力,整体刚度好,防连续倒塌能力强;其自平衡体系的特点大大减少屋盖对下部结构的反力,避免了柔性结构如索穹顶等对下部结构产生的巨大压力;该结构具有较高的结构效率,经济技术效益明显,代表着大跨度空间结构的发展方向。

2) 针对新型大跨度双向张弦空间网格结构体系,目前国内外没有现成的、能够满足要求的节点形式。经过科研攻关和试验研究,课题组开发了三种适用性强、安全可靠又极具推广价值新型节点,获得了两项国家专利。

3) 在设计中首次对大型双向张弦结构进行消防性能分析研究,通过进行结构抗火分析,从理论上解决了大跨屋盖结构取消防火涂料的问题,获得较好的经济效益。

4) 首次在大型空间结构设计中应用防连续倒塌分析,确保在发生意外事件时结构安全可靠。

5) 对双向索的预应力特性进行了系统研究,解决了先进结构体系的可实施问题,确保结构成型,使施工支撑的‘卸载’自然形成。

6) 创新的提出了沿短向带索累积滑移施工方法和在结构设计中考虑施工全过程的结构优化设计方法,节约大量吊具和支撑架,安全、自动地完成支撑“卸载”,屋架施工减短工期3个月。

7) 实施了支座两阶段固定方法和施工全过

程监测措施。

8) 进行了国内最大规模的1:10新型双向张弦空间结构整体模型试验和新型球夹节点足尺抗滑移试验,为设计和施工安装提供验证和技术参数。

9) 开发完成了“国家体育馆双向张弦空间结构远程健康监测系统”,首次在民用建筑中综合应用远程监测技术,确保了对屋盖结构时时进行着健康监测。结构纵向结构见图3。



图3 结构纵剖断面图

对于国家体育馆工程的半重型屋面系统,其屋盖结构成功应用了国内外首创的新型双向张弦空间网格结构体系、新型节点以及系列新技术,创造了世界上跨度最大的双向张弦结构,单位面积用钢量仅 $95\text{kg}/\text{m}^2$ (含节点),类比同规模工程节约用钢量近40%,节约工程费用2600万元,取得了显著的经济效益,填补了国内外空白,向世界展示了我国的建筑技术水平,充分体现了“科技奥运”“绿色奥运”“人文奥运”的理念和勤俭办奥运的精神。

## 3 详细技术内容

### 3.1 结构概况

国家体育馆根据建筑功能从空间上划分为两个馆:即由比赛场地、看台、休息厅构成的比赛馆和由热身场地及配套用房构成的热身馆。比赛馆平面轴线尺寸为 $114 \times 144.5$ 米,地下一层、地上四层,其中二~四层含有看台;热身馆平面轴线尺寸为 $51 \times 63$ 米,主要为一层空间,局部两层。各层层高分别为4.0、6.0、6.0、4.0、4.0米,主要柱网尺寸为 $8.5 \times 8.5\text{m}$ ,另有 $8.5 \times 12\text{m}$ 、 $8.5 \times 4.25\text{m}$ 柱网。

国家体育馆建筑采用下沉式设计,室内比赛场地标高被确定为 $\pm 0.000$ ,建筑物东、西、北侧的下沉广场地坪标高为 $-0.150$ (相当于该场地自然地坪下3.5米),南侧室外地坪标高为 $+5.850$ ,建筑物最高点约为43米(以 $\pm 0.00$ 计)。

体育馆的屋盖呈单向波浪形覆盖比赛馆与热身馆,投影面积约为23700平方米,屋面标高约为38~43~28米,其中比赛馆的外轮廓尺寸为123×172m,包括南端9.2m、北端9.8m、东西两侧各4.5m的四周悬挑部分;训练馆的外轮廓尺寸为57×63m,包括北端6.0m的悬挑部分。

国家体育馆下部主体结构采用钢筋混凝土框架-抗震墙与型钢混凝土框架-钢支撑组合的结构体系;屋盖采用大跨度双向张弦空间网格结构,由设于体育馆外围的78根型钢混凝土柱支撑;整个结构未设永久性结构缝。

### 3.2 屋盖结构体系

屋盖表面由南北方向不同的柱面组合形成。热身馆区域为下凸的柱面,柱面半径为230m。比赛区域由三个上凸的柱面组成,中间63m即与热身区域同宽部分的柱面半径为372m,并与热身区域的柱面相切;东西两侧柱面半径为302m;中间柱面与两侧柱面在最南端相交。

虽然体育馆在功能上划分为比赛馆和热身馆两部分,但屋盖结构在两个区域连成整体,即采用正交正放的空间网架结构连续跨越比赛馆和热身馆两个区域,形成一个连续跨结构。空间网架结构在南北方向的网格尺寸为8.5m、东西方向的网格有两种尺寸,其中在J轴和K轴之间的网格尺寸为12.0m,其它轴的网格尺寸为8.5m。按照建筑造型要求,网架结构厚度在1.518~3.973m之间。不包括悬挑结构在内,比赛馆的平面尺寸为114m×144m,跨度较大,为减小结构用钢量、增加结构刚度,充分发挥结构的空问受力性能,在空间网架结构的下部还布置了双向正交正放的钢索,钢索通过钢桅杆与其上部的网架结构相连,形成双向张弦空间网格结构。其中最长的桅杆的长度为9.237m,钢索形状根据桅杆高度通过圆弧拟合确定。在训练馆区域,不包括悬挑结构,结构跨度为51m×63m,跨度较小,空间网架结构的高度与跨度比较协调,不需要在空间网架下部布置钢索。

在网架结构的上弦平面内,除布置正交正放的上弦杆件外,还布置了菱形支撑杆件。菱形支

撑的四个角点均位于上弦节间的中点,该点也是网架斜腹杆的上弦点。其中在比赛馆的四周边界满布菱形支撑,在内部跳格布置菱形支撑;在热身馆区域,仅在四周边界布置菱形支撑。由于比赛馆内的菱形支撑没有连续布置,为进一步提高上弦面的稳定性,通过隅撑和檩条系统将菱形支撑连成整体,组成完整的上弦面内支撑体系。上弦杆件布置见图4。

在网架结构的下弦面内,沿四周边界布置交叉支撑。

屋盖结构为下弦支承,如图5所示。除在四周边界设有支座外,在热身区域和比赛区域交界处还有一排柱子支承,整个屋盖结构为东西方向单跨简支,南北方向两跨简支。具体支座的方式为在屋盖结构的8个角点为三向固定球铰支座,其余为单向(法向)滑动球铰支座或双向滑动支座。

上弦面内所有杆件、腹杆以及桅杆为圆钢管,下弦面内所有杆件为矩形钢管,钢索采用挤包双保护层大节距扭绞型缆索。上弦杆件相交点采用焊接球节点、上弦节间内和腹杆以及支撑相交的节点采用直接相贯节点;为满足建筑效果要求,下弦采用铸钢节点;桅杆上端与网架结构的下弦采用万向球铰节点连接、下端与钢索采用夹板节点连接,钢索张拉和锚固端采用铸钢节点。钢索与桅杆布置见图6。

### 3.3 分析模型

为了比较全面、准确分析下部结构和屋顶结构的相互影响,特别是罕遇地震下,整体结构的抗震性能,建立了考虑下部混凝土结构的整体分析模型。分析模型中主要包括以下三部分:第一部分为屋顶钢结构,网架结构的弦杆采用梁单元,腹杆、支撑以及桅杆采用杆单元,钢索采用索单元计算;第二部分为下部钢筋混凝土结构,使用杆单元、梁单元以及板单元模拟了下部混凝土结构的支撑、柱、梁及楼板和看台;第三部分为模拟屋顶不同类型的支座而建立的与下部混凝土结构的各种连接单元。

采用MIDAS和ANSYS两个软件对整体结构进行计算、对受力和构造复杂的节点进行有限元分

析,采用我院自编的相关程序对杆件截面优化、校核以及节点验算。

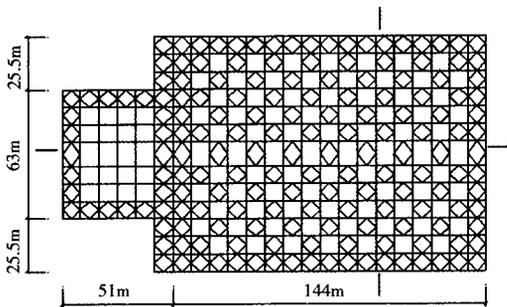


图4 上弦杆件布置图

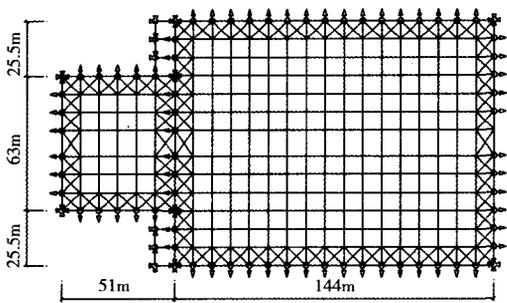


图5 下弦杆件布置图

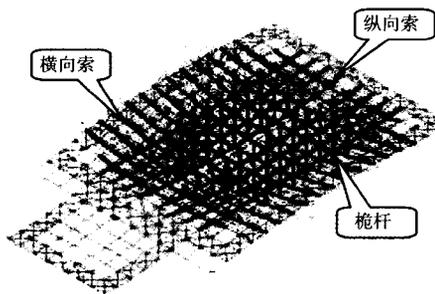


图6 钢索和桅杆布置图

### 3.4 屋盖双向张弦空间网格结构设计

#### 3.4.1 屋盖结构设计标准

总体控制标准为:屋顶结构设计基准期为50年,结构安全等级为一级,结构重要性系数 $\gamma_0=1.1$ ;抗震设防等级为乙类。结构刚度控制标准为:内部屋顶挠度控制1/400,周边悬挑挠度控制1/125。构件强度控制标准为:非抗震组合和常遇地震下构件(不包括钢索)的应力与材料设计强度之比控制在0.85以内,中震下构件的应力与材料的屈服强度之比控制在1.0以内。钢索控制标准:非抗震组合和常遇地震下钢索最大内力与其破断力之比控制在0.4以内,中震下钢索最大内力

与其破断力之比控制在0.6以内;在各工况下,钢索的最小应力大于50MPa。

#### 3.4.2 预应力确定准则

预应力度确定是张弦结构设计的一个重要步骤。本工程按照以下原则确定初始预应力的水平:1)在任何荷载工况下,钢索不退出工作,并且保持一定的张力水平;2)满足结构变形要求;3)调整结构构件的应力水平满足设计标准;4)保证施工过程中,钢索能够张紧;5)钢索张拉完成后,能够使结构自然脱离施工支撑。本工程的施工支撑为结构整体累积滑移的中间滑轨。最终确定最大预应力值为2000kN,最小预应力值为1100kN。

#### 3.4.3 防止连续倒塌或钢索更换对结构承载力的影响

按照正常结构状态,考虑正常荷载设计的屋顶结构,在不增加结构用钢量的前提下,发挥结构的空问受力性能和内力重分布能力,以致在突发或意外情况下、结构不会丧失承载力,发生倒塌事故,也是重要建筑结构设计的要求,是防止连续倒塌在空间结构设计中的体现。本工程中钢索是最主要的受力构件,在结构100年的使用期内,考虑各种因素,包括检修而进行钢索更换或由于意外事故引起钢索破断,结构发生变化,引起结构内力重分布,需要验算结构是否可以承担恒荷载和部分活荷载,不发生倒塌事故。

对完成优化的屋顶结构,取消部分关键部位的钢索,验算结构的承载能力。验算时,考虑的荷载组合为:1)恒荷载+活荷载1+预应力;2)恒荷载+活荷载2+预应力;3)0.9倍恒荷载+风荷载+预应力;4)恒荷载+温度荷载+预应力。其中活荷载1为屋顶均布活荷载和非均匀分布的雪荷载,共8种类型,活荷载2为满足不同类型的演出而布置的活荷载,共7种类型。采用不同的取消钢索的方案,例如横向取消一根、两根、甚至三根或纵向取消一根、两根甚至三根钢索或者横向、纵向同时取消两根。图7是取消钢索的一种模式,即在图中的阴影区域取消横向三根钢索。

由于屋盖的空间受力性能好，内力重分布的能力强，经计算各模式下构件的应力比均小于1.0，图8是图7取消钢索模式下，各构件的应力比。验算时，强度指标取材料的屈服强度。

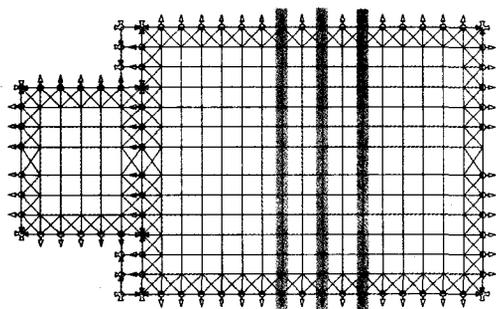


图7 取消三根横向钢索模式

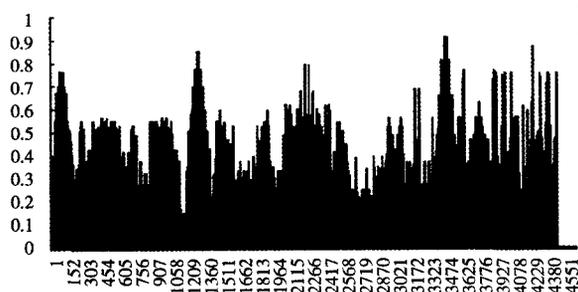


图8 构件应力比

#### 3.4.4 屋盖钢结构抗火设计

国家体育馆屋盖采用了双向张弦空间结构，主要受力构件为由高强钢丝扭绞而成的外包双层PE的钢索，钢索承载力高、便于施加预应力、美观是其最大的优点，但对于这种索体如何对其进行防火保护一直是摆在建筑师和结构工程师面前的一个难题。

按照传统的防火设计方法是根据《建筑设计防火规范》中要求的建筑物构件的燃烧性能和耐火极限，建筑物防火等级为一级的屋顶承重构件的耐火极限为1.5小时，选择屋盖结构构件的防火保护方法以保证结构构件在火灾中的温升不超过其临界温度而确保耐火稳定性，满足承载能力的规定。

一般常用的结构防火保护有以下几种方法：

- 1) 喷涂防火涂料法；
- 2) 包封防火材料法；
- 3) 屏蔽法；
- 4) 水冷却法；
- 5) 组合法。

对于本工程屋盖的双向张弦空间网格结构，主要的受力构件中含有大量的钢索，而钢索采用以上这些方法进行防火保护处理均不妥当。钢索

的防腐保护层双层PE与防火涂料之间的粘结力很差，PE材料在温度超过120℃时软化，必将造成防火涂料脱落，钢丝完全暴露防火涂料根本起不到作用；包裹其它防火材料会增加重量，影响美观，施工难度大；屏蔽法不能满足建筑功能使用要求；采用自动喷淋系统费用高，可操作性不强。为此，我们必须另辟途径找出解决方法——进行建筑物的消防性能化设计。即根据建筑物的具体情况制定消防目标，从而确定工程的各项消防性能指标，进行科学的分析论证，找出能达到要求的可接受的多种途径。这与传统的结构抗火设计不管任何个体情况差异均先明确规定某项解决方案有着根本的区别。

基于这种手段，我们首先明确屋盖结构消防性能目标为钢结构构件均不喷涂防火涂料，且选定屋盖体系的控制温度为200℃。之所以确定此温度是因为：第一，体育馆具有空间较高的有利条件，钢屋盖结构构件距火灾源较远。第二，在该温度即使使用防火涂料进行保护，涂层在该温度还没有膨胀。第三，依据当时国内仅有的一部相关标准上海市工程建设规范《建筑钢结构防火技术规程》DG/TJ08-008-2000，高温下钢材的强度和弹性模量如下：

$$\text{强度: } f_{yT} = \eta f_y \quad (1)$$

$$\text{弹性模量: } E_T = \chi E \quad (2)$$

表1 不同温度下强度和弹性模量折减系数

温度 $T_s$ (°C)	50	110	150	200	250	300	350
强度折减系数 $\eta^T$	0.982	0.948	0.920	<b>0.880</b>	0.832	0.778	0.716
弹性模量折减系数 $\chi^T$	1.000	0.989	0.977	<b>0.961</b>	0.941	0.916	0.881

升温至200℃时，钢材的强度和弹性模量变化不大。因此，将工程性能化分析的钢材控制温度定为200℃。当钢结构区域的温度高于200℃时，将采用对钢结构有火灾危险影响的区域做可燃物控制。

建研防火设计性能化评估中心对本工程的比赛馆场地火灾、看台火灾和热身馆场地火灾进行了温度计算分析，在《国家体育馆消防性能化设计报告》中给出了用于屋盖结构整体分析的温场分布，如图9三个火灾区域，即对应三个火灾工

况,分别描述如下:1)火灾工况1:可能发生在沿观众看台最外环9.2m×10m的区域,即两榀桁架间距内的构件和钢索,火灾发生区域内钢索升温200℃,钢构件升温82℃,撑杆升温120℃。2)火灾工况2:可能发生在在比赛馆43m×74m内的26m×26m的区域,火灾中心区域内钢索升温

65℃,钢构件升温54℃,火灾边缘区域内钢索升温32℃,钢构件升温15℃。3)火灾工况3:可能发生在热身馆51m×63m内的18m×18m的区域,火灾中心区钢构件升温95℃,火灾边缘区钢构件升温48℃。在抗火分析时,取此三种情况中最不利位置。

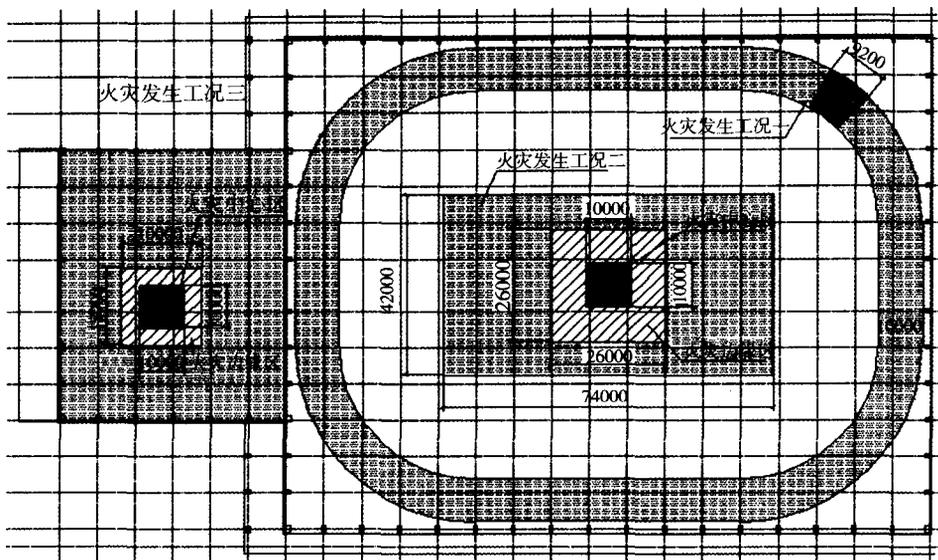


图9 火灾工况分布

在抗火验算中,采用下式对荷载效应进行组合:

$$S = \gamma_G C_G G_k + \sum \gamma_{Q_i} C_{Q_i} Q_{k_i} + \gamma_w C_w W_k + \gamma_F C_F \Delta T \quad (3)$$

式中:  $S$  - 荷载组合效应;

$G_k$  - 永久荷载标准值;

$Q_{k_i}$  - 楼面或屋面活载(不考虑屋面雪载)标准值;

$W_k$  - 风荷载标准值;

$\Delta T$  - 构件或结构的温度变化(考虑温度效应);

$\gamma_G$  - 永久荷载分项系数,取1.0;

$\gamma_{Q_i}$  - 楼面或屋面活载分项系数,取0.7;

$\gamma_w$  - 风荷载分项系数,取0或0.3,选不利情况;

$\gamma_F$  - 温度效应的分项系数,取1.0,选不利情况;

$C_G$ 、 $C_{Q_i}$ 、 $C_w$ 、 $C_F$  - 分别为永久荷载、楼面或屋面活载、风载和温度影响效应的效应系数。

弹性模量和强度指标随温度变化的关系按照《建筑钢结构防火技术规程》(上海标准)取值。

因火灾发生时,屋顶结构温度升高幅值较小,相应的材料弹性模量和强度折减不多。经复核,构件满足强度要求,应力比如图10。

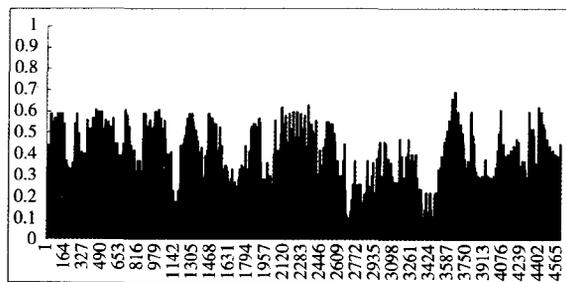


图10 火荷载工况二,构件应力比

经复核,屋盖双向张弦空间结构在火灾时能够满足预定目标要求,且此目标与采用膨胀型防火涂料的防火安全水平一致。对于双向张弦空间结构由于其空间作用明显,内力重分布能力强,有利于结构抗火。省去防火涂料,节约工程造

价,节省工期,为建筑提供了更好的艺术效果。

### 3.4.5 关键节点设计

针对新型双向空间结构,其索节点的受力要求较单向张弦结构有较大区别,因本项目是国内、外第一个大型双向张弦结构,国内外没有类似节点供参考,为此研制了新型索节点,并成功应用,现已经获得了国家专利。

单向张弦梁(桁架)结构为平面体系,桅杆上、下端节点仅要求在受力平面内转动,本工程采用双向张弦结构,桅杆的上、下端节点应能够空间转动,这样就增加了节点构造的复杂性。另外,本工程中钢索张拉端和锚固端节点受力复杂,内力特别大,关系到整体结构的安全,也是本工程中的关键节点。

1) 桅杆(撑杆)下端节点—索夹节点(见图11)

桅杆下端节点除连接桅杆外,还连接钢索,是非常关键和重要的节点。其中在比赛馆中间区域,桅杆下端节点连接东西方向双根钢索和南北方向单根钢索;在比赛馆角部区域,桅杆下端节点仅连接东西方向双根钢索。桅杆下端节点应具有如下必要的特性:可连接双向钢索;可万向转动,承载力高,节点的受力及变形能力均符合合理理论计算分析模型;构造简单;标准化程度高,易于制作;便于施工安装、就位;具有较强的推广应用价值。

基于以上要求,我们开发了万向转动索夹节点。图12是中心区域典型桅杆下端节点示意图。节点由以下部分组成:a)机加工件一~三,平面为直径550mm的圆形,机加工件一、三在单面机械加工成内凹的半球面和半锥形槽,机加工件二在双面机械加工成内凹的半球面;b)机加工的空心半球,通过高强螺栓固定钢索;c)聚四氟乙烯板,设置在半球和机加工件之间,减小摩擦力;d)高强螺栓,用于机加工件之间的连接和空心半球之间的连接。图13是机加工件三和东西方向钢索及半球的关系示意图。由于机加工件一~三之间组合成锥形长孔,使钢索可以空间转

动,不会在桅杆下端产生弯矩。图13为球与球夹施工的局面。

另外,撑杆下端节点的拉索和钢球之间的还必须具备足够的抗滑移能力。根据建筑师对体育馆内部空间效果的要求,撑杆的方向垂直于地面,而不是垂直于拉索,这样,撑杆的轴向压力会在节点处对拉索产生一个切向力,根据整体计算结果,单根钢索的切向力最大值可达到35kN。钢球与拉索的连接如图15所示,两个半球之间靠4个M16高强螺栓夹紧,切向力主要靠钢球和拉索之间的摩擦力来抵抗。为了保证钢球与拉索之间不产生滑动,要求钢球与拉索PE层之间、PE层与拉索内部钢丝束之间的摩擦力能够抵抗切向力的作用。图16为索节点与悬挂马道。

经对节点的局部承压、抗剪、抗滑移验算,节点满足强度要求。

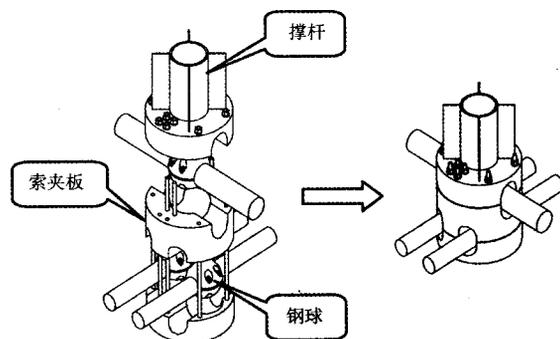


图11 撑杆下端节点组

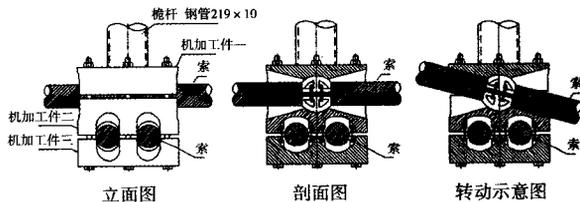


图12 下端节点剖面图

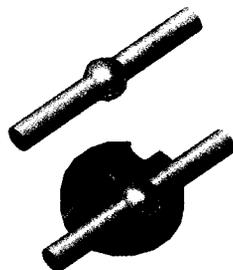


图13 索夹与球夹



图14 球与球夹施工照片

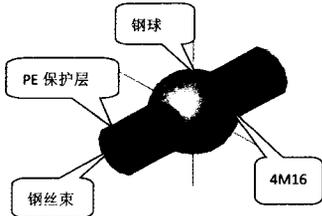


图15 钢球与拉索连示意图

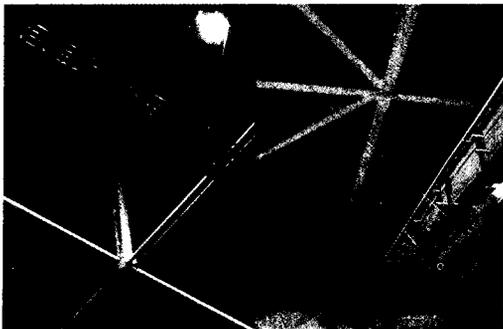


图16 索节点与悬挂马道

### 2) 桅杆上端节点

撑杆上端与桁架下弦矩形钢管相交处相连。由于下弦拉索沿两个方向布置，所以在施工过程中和使用状态下，当荷载变化时，撑杆有可能同时沿两个方向发生转动，因而要求撑杆上端与矩形钢管的连接节点具有双向转动能力。桅杆上端节点设计为万向球铰节点，具体构造如图17所示，主要由三个机加工件组成。图18是机加工件一的实体图，顶部为球面，下面平板连接桅杆上端，其中球面镀铬；机加工件三焊接于网架的下弦杆件上，其内凹球面与机加工件一的球面配合，满足空间转动要求；机加工件二的作用为固定机加工件一，桅杆一般受压，只有在桅杆受拉的特殊情况下机加工件二才起到固定作用。对节点进行局部承压计算，满足强度要求。在实际施工中，为了减小球面之间的摩擦力，在机加工件一和件三之间增加了一层很薄的聚四氟乙烯板。节点构造简单、安装很方便，转动灵活。

### 3) 索端铸钢节点

钢索端部节点构造复杂，受力特别大，采用了铸钢节点。根据钢索端部位置，索端节点有以下三类：第一类为连在支座上、东西方向的索端节点；第二类为跨中东西方向的索端节点；第三类为跨中南北方向的索端节点。节点强度由有限元分析确定。

在此类节点设计时，有几个问题必须注意：预留的穿索孔直径必须大于钢索锚头的外径；端部承压面应与钢索方向垂直；跨中的索端必须预留出足够的张拉锚固施工操作空间；对铸钢节点的空腔内部喷射防腐涂料，并在钢索施工完毕后对穿索孔口部进行柔性封闭。图19、20是铸钢节点，从图中可以看出对直径较大的钢索端部节点，下弦矩形截面有所加宽，这样既满足了节点合理受力的要求又协调好了索管相交的关系，同时保证了建筑美观。

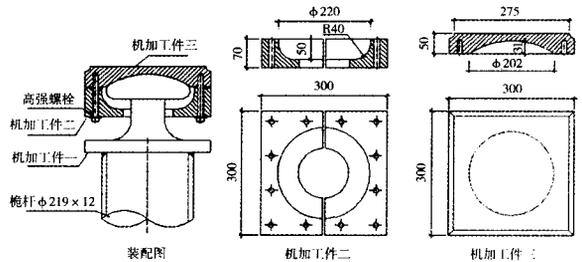


图17 桅杆上端节点

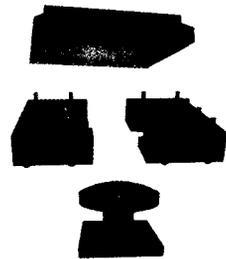


图18 桅杆上节点实体图



图19 三类索端节点



图20 索端铸钢节点实物照片

### 3.4.6 屋盖结构带索累积滑移的施工过程

根据现场施工条件、施工工期和钢结构屋盖的外形特点,我们提出了沿屋盖短跨方向带索同步累积滑移的施工工艺,主要流程如下:地面分段拼装→高空逐榀组装→预紧纵索→携带横索同步累积滑移→分步对称张拉钢索→固定支座。

屋盖结构在滑移过程中,其受力状态是变化的,它与设计状态完全不一样,整个结构体系是逐步建立的过程,期间存在着结构转换,部分杆件受力特性可能发生较大改变,因此为保证屋盖结构在累积滑移施工过程中的安全,我们将施工工况作为屋盖结构设计中的重要部分,对其进行了详细的计算分析,对某些杆件截面进行了调整。图21~图24为施工滑移示意图,图25为第一榀桁架最大变形情况。

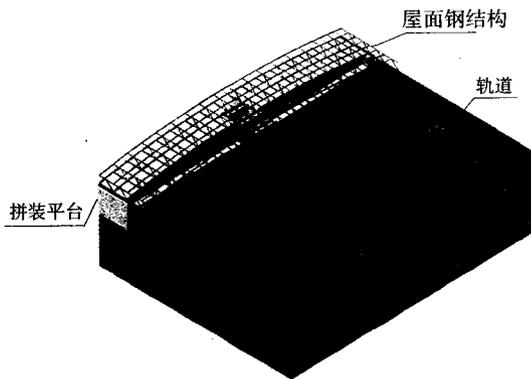


图21 施工滑移示意图

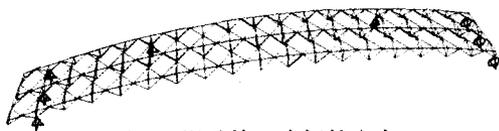


图22 滑移第二步杆件应力

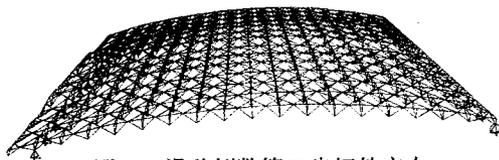


图23 滑移倒数第二步杆件应力

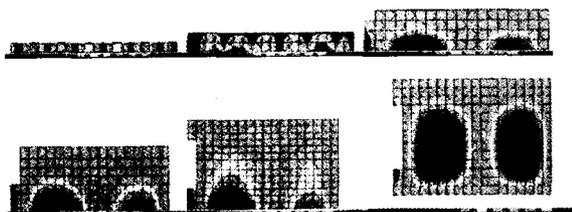


图24 滑移过程结构竖向位移

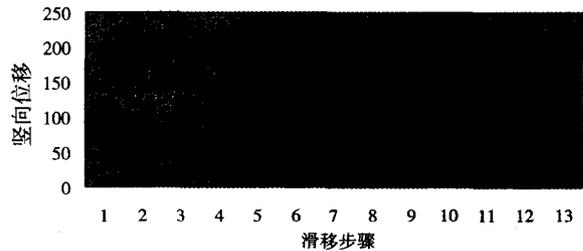


图25 第一榀桁架最大竖向变形

在累积滑移过程中南北向索的预紧力为索预紧力值的10%。在比赛馆和热身馆屋盖结构全部安装到位后,开始张拉预应力。预应力施加分2级,第一级施加80%,第二级施加20%。第一级由两边往中间对称张拉,第二级由中间往两边对称张拉。

预应力张拉前为避免屋盖结构的刚体位移,减少预应力张拉对屋盖结构及下部结构的影响,仅将两点支座固定,其余水平方向约束均暂时放松,对于在张拉阶段有可能产生竖向拉力的支座特别处理,见图26;预应力张拉完毕后,各个支座处均发生了相应的水平位移,此时再根据实际所发生的位移以及屋盖结构各工况的分析结果确定支座固定就位的合理位置。

本工程采取累计滑移的施工方法在下部主体框架结构施工完成但大量看台结构未施工时,提前三~四个月插入钢屋架安装,钢屋架的高空滑移组装,与下方现浇混凝土看台板同步施工,立体交叉作业,缩短了总体工期。图27、图28为施工实景图。

### 3.4.7 屋盖结构模型试验介绍

为了解本工程新型空间结构的受力性能,验证设计的正确性,为施工过程提供可靠依据,对比赛馆屋顶进行了1:10的整体模型试验,试验模型如图29所示。主要试验研究内容如下:

1) 通过静力试验研究在不同荷载工况下屋顶结构的变形、应力性能等。

2) 对结构基本动力特性进行试验,如自振频率、基本振型等。

3) 通过模型试验,研究不同的预应力钢索张拉方案的特点,根据试验结果确定安全、有

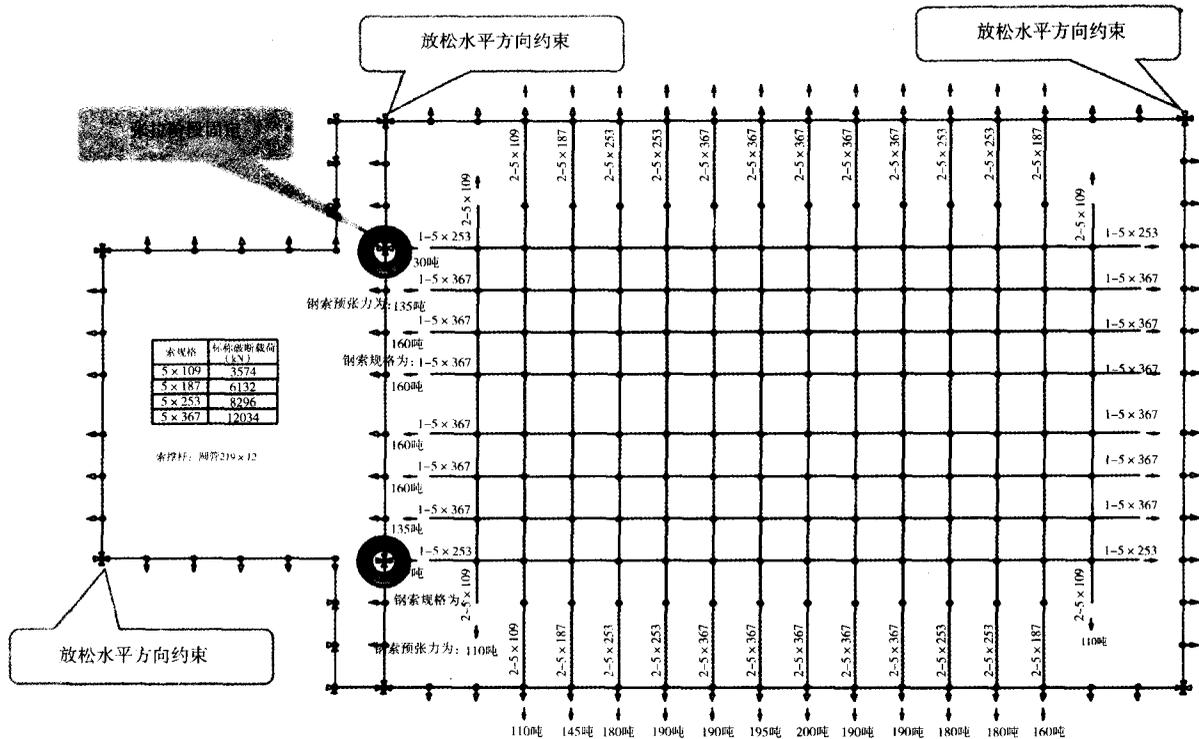


图26 屋盖结构张拉阶段支座固定情况

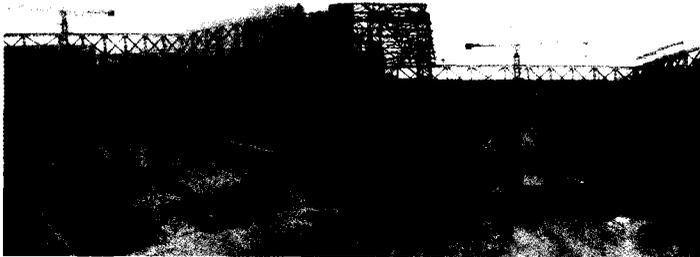


图27 现场搭设支撑胎架和屋架在中滑道滑移

效、经济的预应力张拉方案。

4) 进行结构极限承载力试验, 研究双向张弦网格结构的破坏机理, 找出结构的薄弱环节。

5) 通过模型试验模拟施工的支撑状态, 验证预定预应力张拉后的自然卸载方案的可行性。

6) 通过模型试验模拟预应力施工安装情况, 为制定本工程预应力部分施工验收标准提供依据。

7) 研究更换钢索时双向张弦空间结构的特性及安全性。图30~图32为试验过程实录。

对国家体育馆屋盖双向张弦桁架结构进行1:10缩尺模型试验研究, 验证分析模型的正确性, 内力、变形、应力的试验结果和理论分析结果比较吻合, 测试了结果的动力特性。对不同预



图28 施工滑移中

应力张拉方案进行测试, 均能达到预期理论计算结果, 为确定实际张拉方案提供了可靠的依据。通过超载试验, 得到了结构的承载力, 找出结构的薄弱环节, 验证实际施工预应力张拉后的卸载方案的可行性, 为制定本工程预应力部分施工验收标准提供依据。

对屋盖结构所涉及的部分节点进行足尺试验研究, 进行了撑杆下节点的抗滑移、转动、承载力性能足尺试验研究以及钢索用高密度聚乙烯护套材料(PE)的抗压、抗剪、抗压弹性模量等性能试验、进行钢索与高密度聚乙烯护套材料(PE)粘结力试验、进行索夹与PE材料的摩擦试验, 验证节点的安全性。图33为抗滑移试验, 图34为拉力变形曲线。



图29 模型试验



图30 加载



图31 测索力



图32 监测、记录



图33 抗滑移试验

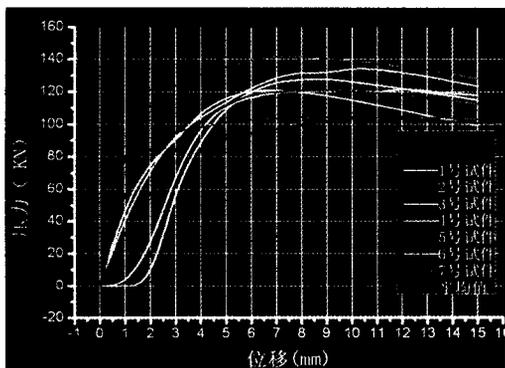


图34 拉力变形曲线

### 3.4.8 施工现场监测

为保证屋盖双向张弦结构的安装精度及结构在施工过程中的安全、保证钢索的预应力状态与设计相符、保证各项创新技术的可靠实施、保证整个结构始终处于受控状态，我们对屋盖结构在施工的累积滑移过程、预应力张拉过程、铺设屋盖覆盖材料和安装吊挂物过程的应力与变形进行了监测。这也有助于研究结构的受力反应，将实测数据与各阶段的理论计算分析进行比较验证，找出相关规律，积累经验。

#### 1) 屋盖结构竖向位移实测

由图35、图36中可以看出，预应力张拉前后

各点的挠度变化量即反拱作用是很明显的，其中的16轴为施工滑移是的中滑道支撑轴，所以其张拉前挠度为零，张拉后反拱使其脱离了中滑道，达到了自然“卸载”。

#### 2) 屋盖结构实测竖向位移与计算比较

实测结果与理论结果吻合较好，变化规律一致，如图37~图39。

### 3.4.9 长期健康监测

#### (1) 长期健康监测目的和意义

国家体育馆屋盖双向张弦空间网格结构跨度为114×144.5米，建成后成为目前国内外同类结构中跨度最大的双向张弦桁架结构。由于缺少相关研究成果和其它工程应用经验，为确保本工程的安全先进和顺利实施，深入研究此类型结构在施工过程及正常使用时的受力和变形特点，有必要进行结构永久健康监测；在北京奥运会期间，国家体育馆担负着重要比赛任务，在结构上布置永久监测设备，可以随时查看结构的受力，从而有效地保证奥运会的顺利进行；除了在奥运会期间担负重要比赛任务外，国家体育馆赛后还需要满足多功能的使用要求，将承担重要的纪念性集会 and 大型文艺、体育演出任务，因而预期吊挂物重量大、分布广、不确定因素多。对结构进行永久健康监测，则可以监测在设计不可预见的荷载作用下结构的受力情况，从而保证国家体育馆能够长久地为社会服务。

综上所述，在使用过程中对重要的结构杆件、钢索进行长期的监测（平时定期监测，重要活动时加强监测）是非常必要的，它可使屋盖结构始终处于有序的掌控之中，使用者可以根据构件的状态随时调整，必要时进行相应的处理，使屋盖结构始终处于健康状态。

#### (2) 监测方案

##### 1) 测点布置

国家体育馆屋盖为双向张弦结构，拉索和钢结构为主要受力构件，所以选取适当的测点对索力和钢结构应力进行安全监测，就显得尤为重要。测点布置主要遵循三个原则：第一，

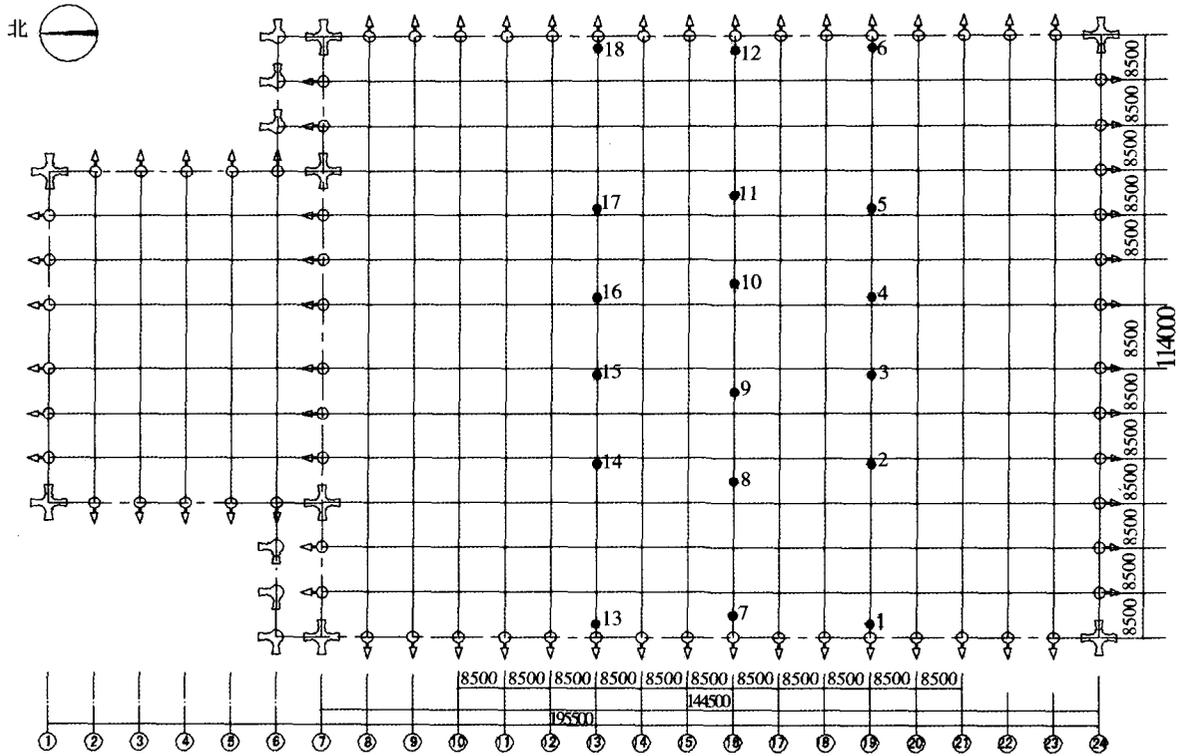


图35 钢屋架下弦竖向位移观测点布置

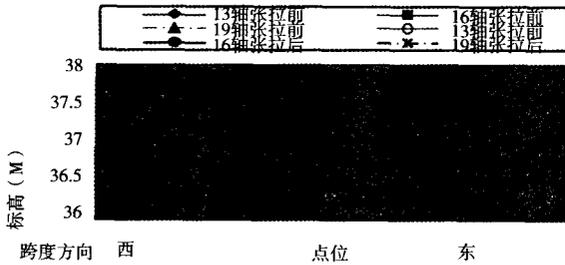


图36 张拉前后实测挠度比较

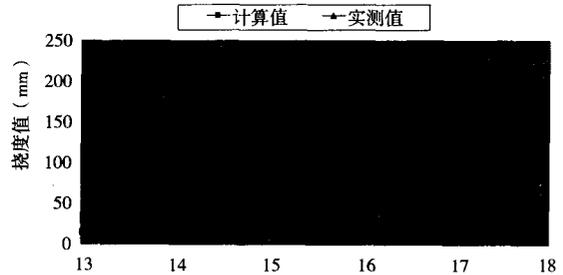


图37 13轴实测与计算竖向位移对比

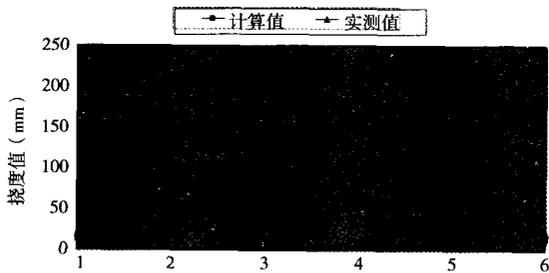


图38 16轴实测与计算竖向位移对比

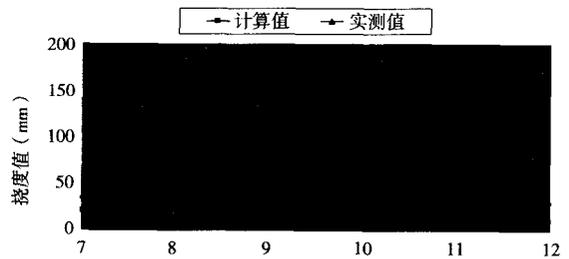


图39 19轴实测与计算竖向位移对比

测点布置首先要涵盖整个钢结构应力及索力出现最大值的位置。这些位置可以通过理论计算获得；第二，通过对整体结构应力最大值以外的地方布置测点，用以描述整个结构的受力分布及其变化趋势。通过这些测点，可以从宏观上把握结构的整体受力情况；第三，测点布置应该能够监测整体结构下的某一完整的子结

构。具体起来，索力测点和钢结构测点应尽可能放在同一榀张弦结构上，这样通过对几榀张弦结构比较系统的监测及局部分析，可以推测剩余各榀的受力情况，进而把握整个双向张弦结构的受力分布及变化趋势。

共布置测点94个，其中：钢构件应力监测点88个，索力监测仪器6个。索力监测仪器布置在

15、19、J和M轴索端，这些轴的钢索长度因安装压力传感器而增加，锚固端需要增加空间。图40、图41分别为15轴与J轴测点布置。

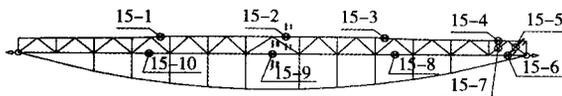


图40 15轴钢结构应力测点布置及其编号

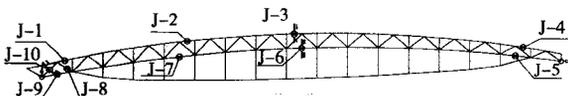


图41 J轴钢结构应力测点布置及其编号

## 2) 监测仪器

### ① 应力监测

国家体育馆永久健康监测所使用的应力监测仪器由两类组成：锚索测力计和振弦式应变仪。均为美国基康公司生产的仪器。

### ② 变形监测

建筑物在使用过程中的变形能够反映结构的宏观受力情况，因此需要对建筑物进行变形监测。对于国家体育馆屋盖结构，其竖向变形为监测重点。

竖向变形监测采用两种方法，一种方法为传统的全站仪监测，另一种为连通器式竖向变形测定仪。根据理论分析结合模型试验，在采用第二种监测方法时测点的布置如图42。

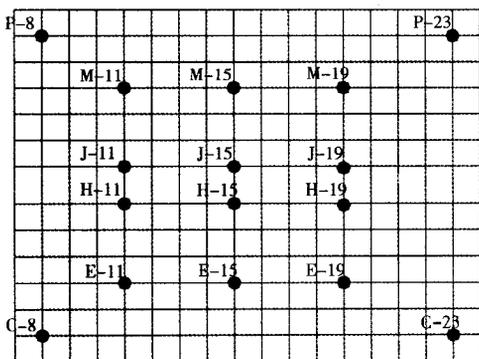


图42 竖向位移测点布置（编号按照“横轴-纵轴”进行）

## 3) 数据采集系统

由于建筑物永久健康监测的周期与建筑物使用年限匹配，所使用的数据采集设备需要永久地放置在建筑物上，从而对数据采集设备提出了较高的要求。鉴于此，国家体育馆永久健康监测使

用了澳大利亚DATATAKER系列数采设备。

数据传输采用两种模式，一种为通过计算机串口直接与DT615通讯端口连接，在现场直接获得数据；一种为远程通过GPRS手机网络无线数据透明传输获取数据。

另外，专门为国家体育馆工程监测编制了系统性能稳定、可靠性高，测试精度满足要求的数据采集与处理软件。生成的数据能够以数据库形式保存并可进行历史数据查询，还可以直接生成EXCEL或其他形式报表，同时具有数据超限报警功能，如图43。

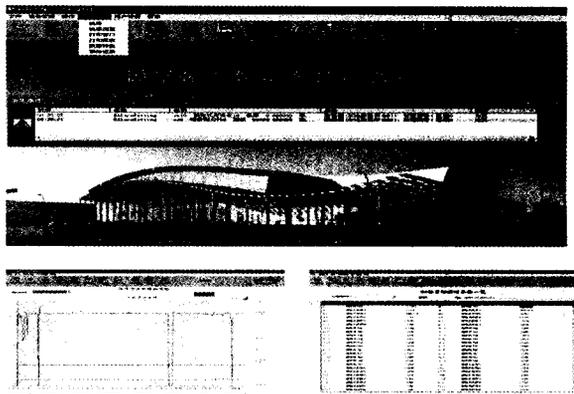


图43 永久健康监测界面

国家体育馆的永久健康监测通过应用GPRS通讯技术来自动采集监测数据，确保了通讯数据的可靠性和实时性，实现真正意义上的远程监测。

## 4) 监测时间点设置

健康监测的目的是保证结构建成后的安全运行，通过分析监测数据能够对结构出现的特殊情况作出反映，尤其是在奥运会举行期间，必须确保结构安全。

根据实际需要，我们从以下几方面考虑制定监测时间点及监测频率：

健康监测的开始点为钢结构在东侧胎架上时，此时钢结构受力较小，可以作为结构零应力状态。预应力施工完成后，屋面安装和各种荷载变化较大，此时增加采集频率，对结构应力、变形和索力进行重点监测，为每小时采集数据一次；结构完全成型以后的正常承载情况下，实行24小时不间断监测，但频率适当降低，为每天采集数据四次；国家体育馆是为奥运服务的重点场

馆,因此在奥运会召开前一个月提高数据采集频率,一直持续到奥运会结束,为每30分钟采集数据一次,对结构进行实时监测;当出现特殊荷载时,比如出现演出吊挂、地震、大风、大雨、大雪、冰雹等自然灾害时,需要临时设定监测时间及监测频率,基本为特殊荷载发生的期间及前后,以期了解结构的安全状态。

#### 4 结语

国家体育馆是奥运重点工程,其屋盖结构采用了新型的大型预应力结构体系——双向张弦空间网格结构。项目组对该新型结构体系展开了系列研究,解决了国家体育馆屋盖结构设计中的系列关键技术问题,例如新型结构体系的布置、大跨度空间结构的防火计算、新型空间结构的防连续倒塌,新型结构的预应力模态及其张拉相互影响;提出了沿短向累积滑移的施工方法、考虑施工全过程的结构优化方法,另外还结合结构优

(上接第5页)

#### 5 耐久性设计

由于结构处于腐蚀强烈的海洋环境,因而需采取高标准的防腐措施以确保结构在设计使用寿命年限内的安全和满足正常的使用功能。本桥在方案构思时即从设计概念上采用有利于提高耐久性的结构形式和构造细节,并选择合理的施工方法,以使施工容易达到设计要求。

钢-混凝土箱形结合梁钢结构部分外表面采用电弧喷铝长效防腐,其组成为电弧喷铝底层、环氧铁封闭漆和聚氨酯面漆。钢箱梁内表面采用重防腐涂料涂装体系,同时将钢箱梁封闭起来使其成为一个密封的空间,安装抽湿系统来控制内部湿度,有效阻止钢箱梁内表面的腐蚀。混凝土桥面板同时采用高性能混凝土和保证最外层钢筋净保护层等措施进行防腐。钢和混凝土的结合界面是主梁防腐的薄弱地方,除采用预应力结构和高配筋率等措施提高混凝土板自身的抗裂、抗冲击能力外,在结合界面涂刷环氧涂层以提高结合面钢结构的耐久性,并沿所有结合面周边在混凝土上切缝,填充高强防水密封材料,以确保结合部位的密封。

化,提出了多项施工措施,如支座两阶段固定方法等;开发了适合新型空间结构的新型节点形式;进行了1:10的模型试验,验证了分析理论和设计方法,并且开发了“国家体育馆远程健康监测系统”,对国家体育馆进行健康监测。这一系列研究成果确保了国家体育馆工程的顺利实施,相关研究技术成果达到了国际先进水平。

对于国家体育馆工程的半重型屋面系统,其屋盖结构成功应用了国内外首创的新型双向张弦空间网格结构体系、新型节点以及系列新技术,创造了世界上跨度最大的双向张弦结构,取得了显著的经济效益和社会效益,填补了国内外空白。

国家体育馆是奥运中心区三大奥运场馆中,唯一由国内设计师独立完成的项目。被誉为奥运工程的“争气馆”,代表了我国建筑技术的发展水平,受到国内外各方赞誉,体现了“科技奥运、绿色奥运”的理念和勤俭办奥运的精神。

主塔墩、边墩和辅助墩墩身和承台的防腐采用和混凝土桥面板同样的措施。上塔柱内有锚固斜拉索用的钢锚梁,和主梁内部一样,除自身采用重防腐涂料涂装外,还在上塔柱内采用抽湿防腐。

钻孔灌注桩采取提高混凝土密实性和加大最外层钢筋的混凝土净保护层厚度等措施进行防腐,钢管桩采取牺牲阳极的阴极保护法+环氧重防护涂层+钢管桩富裕厚度+桩内混凝土填芯等措施防腐。

#### 6 结语

东海大桥主航道桥作为我国第一座真正在海外建造的大跨度斜拉桥,其设计及工程实践也就具有了开拓性的意义。为满足东海大桥特定条件而提出的钢-混凝土箱形结合梁,丰富了斜拉桥的结构形式。东海大桥工程已于2002年6月开工,2005年底建成。本桥的实践为今后的跨海大桥工程设计提供了有益的经验。

#### 参考文献

- [1] 严国敏. 现代斜拉桥[M]. 成都:西南交通大学出版社
- [2] 项海帆. 大跨度桥梁概念设计中的若干问题[C]. 中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第十六届年会论文集, 2004.
- [3] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室. 东海大桥主航道桥抗风性能及颤振控制研究. 2003.