

# 2008年奥运会羽毛球馆弦支穹顶结构 预应力施工技术

王泽强 秦杰 徐瑞龙 张然 李国立 陈新礼

(北京市建筑工程研究院 北京 100039)

**摘要:**北京工业大学羽毛球馆为2008年奥运会比赛场馆之一,采用弦支穹顶结构。详细介绍了该工程的预应力施工技术,结合施工仿真计算和实测结果,提出了结构的预应力施工技术和特点。

**关键词:**奥运会羽毛球馆 弦支穹顶 仿真计算 预应力施工技术

2008年奥运会羽毛球馆位于北京工业大学校内,总建筑面积24383m<sup>2</sup>,屋盖最大跨度93m,矢高9.3m,下部为钢筋混凝土框架结构,上部采用新型空间结构体系—弦支穹顶结构。建筑效果如图1所示。

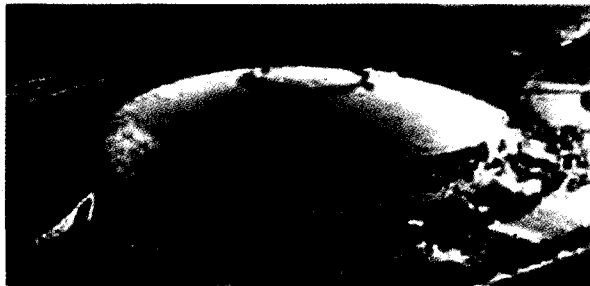


图1 2008年奥运会羽毛球馆建筑效果

## 1 结构体系

本工程屋顶为弦支穹顶结构,上层为单层网壳,下部为索杆结构。下部结构主要由环向索和径向拉杆组成。环向索采用预应力钢索,规格为: $\phi 7 \times 199$ 、 $\phi 5 \times 139$ 、 $\phi 5 \times 61$  3种类型,缆索材料采用包双层PE保护套,锚具采用热铸锚具的索头和调节套筒,调节套筒的调节量 $\pm 300$ mm;钢索内钢丝直径7mm、5mm,采用高强度普通松弛冷拔镀锌钢丝,抗拉强度 $\geq 1670$ MPa,屈服强度 $\geq 1410$ MPa,钢索抗拉弹性模量 $\geq 119 \times 10^5$ MPa。径向索采用钢拉杆,规格为: $\phi 60$ mm和 $\phi 40$ mm,屈服强度 $\geq 835$ MPa,抗拉强度 $\geq 1030$ MPa,理论屈服荷载1775kN。

《2008年北京奥运会羽毛球馆弦支穹顶结构预应力施工技术》获第三届欧维姆预应力技术奖二等奖。本文原载《施工技术》2007年第11期

## 2 预应力施工技术

### 2.1 施工流程

搭设球承重支墩和满堂红支撑架进行网壳安装→搭设2个5m×5m操作平台→将预制的环向索及径向钢拉杆运至现场→将环向索和放索盘吊至操作平台→在撑杆下部铺设脚手板作为放索马道→放索(环向索)→安装径向钢拉杆→挂索(环向索)→第1级张拉环索到70%设计张拉力(由外向里)→第2级张拉环索到90%设计张拉力(由外向里)→第3级张拉环索到110%设计张拉力(由里向外)→调整索力。在张拉过程中,通过仿真计算进行校核,并用全站仪监测结构变形,用振弦应变计监测结构应力。

### 2.2 预应力施加方案

弦支穹顶结构拉索预应力的建立通常有3种基本方法:

#### 2.2.1 通过径向索施加预应力

调整好环向索初始索长和撑杆长度后,直接对径向索建立预应力。本工程径向钢拉杆轴力适中,伸长量也较小,因此对张拉设备要求不高。但是,径向钢拉杆数量比较多,若每环同步张拉,需要多套张拉设备,受张拉设备数量限制,采取拉索成对循环张拉与调整则工作量大,工期较长,且钢拉杆轴力不易控制。

#### 2.2.2 通过调节撑杆长度施加预应力

是一种间接施加预应力的方法。本工程撑杆数量较多,其需设备较多,并且该方法要求拉索

预先精确确定初始索长,并根据现场钢结构安装误差,确定拉索初始无应力长度,技术难度比较高。

### 2.2.3 通过环向索施加预应力

此方法可以保证施工进度,通过对撑杆下节点进行处理后,能够保证环向索索力很好传递,且尽量均匀。

通过对比,本工程弦支穹顶拉索预应力采用张拉环向索的方法来建立。合理设计张拉工装,张拉过程中合理分级,使张拉完成后钢结构各项指标满足设计要求。张拉前将各圈环向索进行预紧,然后进行正式张拉。

## 2.3 预应力施工技术要点

### 2.3.1 预应力设备选用

本工程通过环向索施加预应力,经过仿真计算,环向索最大张拉力约2660kN,需要2台150t千斤顶,同一圈环向索有4个张拉端,故选用8台150t千斤顶,即同时使用4套张拉设备。张拉设备如图2所示。

张拉设备采用预应力钢结构专用千斤顶和配套油泵、油压传感器、读数仪。根据设计和预应力工艺要求的实际张拉力对油压传感器及读数仪进行标定。标定书在张拉资料中给出。

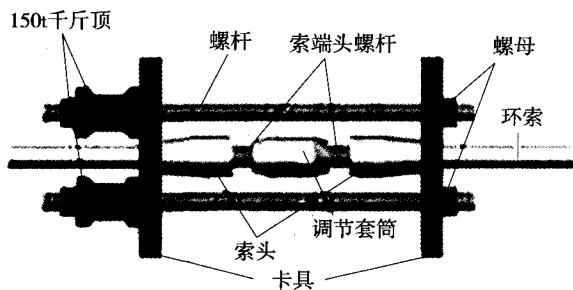


图2 张拉设备示意

### 2.3.2 预应力控制参数

张拉时采取双控原则:索力控制为主,伸长值控制为辅,同时考虑网壳变形。

### 2.3.3 预应力操作要点

张拉前将各圈环向索进行预紧,然后进行正式张拉。总体张拉过程分为3级:分别张拉到设计张拉力的70%、90%、110%。总体张拉顺序

为:前2级张拉都是由外圈向内圈依次张拉,第3级是由内圈向外圈依次张拉完成。

由于本工程张拉设备组件较多,在进行安装时必须小心安放,使张拉设备形心与钢索重合,以保证预应力钢索在张拉时不产生偏心,预应力钢索张拉要保证油泵启动供油正常后开始加压,张拉时,要控制给油速度,给油时间应 $\geq 0.15\text{min}$ ,每圈环向索在张拉过程中要保证同步性。

## 3 预应力施工仿真计算

### 3.1 仿真计算目的

在施加预应力完成前结构尚未成形,弦支穹顶的结构整体刚度较差,因此必须使用有限元计算软件进行弦支穹顶结构的施工仿真计算,以保证结构施工及使用安全。

### 3.2 施工仿真计算结果

本工程采用ANSYS软件对该结构张拉过程进行仿真计算,计算模型如图3所示。

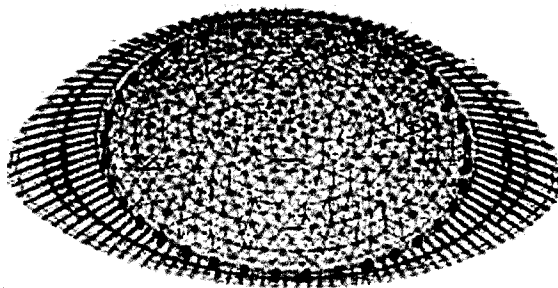


图3 有限元计算模型示意

由仿真计算,张拉完成后结构最大起拱值为79mm;钢索及钢拉杆最大轴力2661kN,发生于屋盖边缘;钢结构最大压应力148MPa,最大拉应力96MPa,均发生在屋盖边缘部位。

根据张拉过程仿真计算结果,确定环向索预应力张拉值如表1所示。

表1 环向索张拉力 kN

| 位置        | 第1圈  | 第2圈  | 第3圈 | 第4圈 | 第5圈 |
|-----------|------|------|-----|-----|-----|
| 70%设计张拉力  | 1693 | 860  | 534 | 249 | 118 |
| 90%设计张拉力  | 2177 | 1106 | 687 | 320 | 152 |
| 110%设计张拉力 | 2661 | 1351 | 839 | 391 | 185 |

## 4 施工监测

### 4.1 施工监测目的

在未施加预应力之前,结构还不具有稳定的刚度。为使结构受力均匀,并且满足设计要求,使得同一圈的每段环向索都能够施加相同的预应力值,必须在张拉过程中进行施工监测。

### 4.2 测点布置

本工程监测主要有索力监测和起拱值监测。其中索力监测时,张拉端的油压传感器、径向钢拉杆、撑杆3种监测索力的方法同时使用。使用全站仪监测结构变形,应力和变形监测点布置如图4所示。

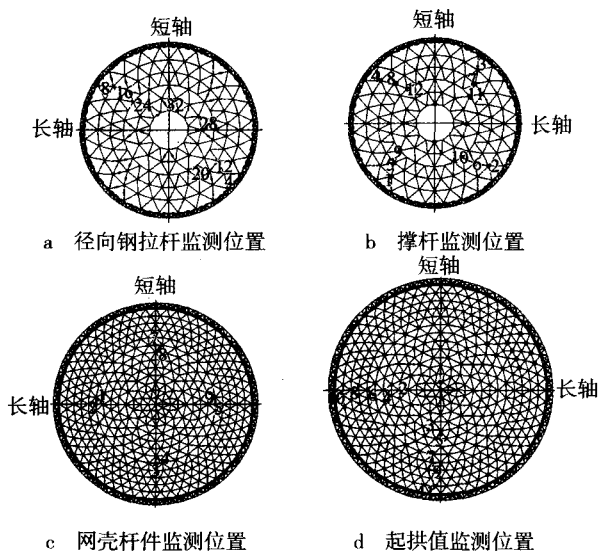


图4 测点布置示意

### 4.3 监测结果

在张拉过程及完成后对监测点进行了监测,实测结果如图5所示。起拱值是从设计张拉力70%张拉到设计张拉力110%的起拱变化量。

从图5可以看出,钢拉杆实测轴力值比理论计算值小,撑杆和网壳杆件实测应力在理论计算值附近,起拱的实测值比理论计算值小。其主要原因是撑杆下节点存在索力损失,理论计算模型刚度小于实际网壳刚度等。

## 5 结语

1) 2008年奥运会羽毛球馆为弦支穹顶结构,结构新颖,构思巧妙,受力合理,但是跨度较大,没有现成的工程经验可以借鉴,所以施工

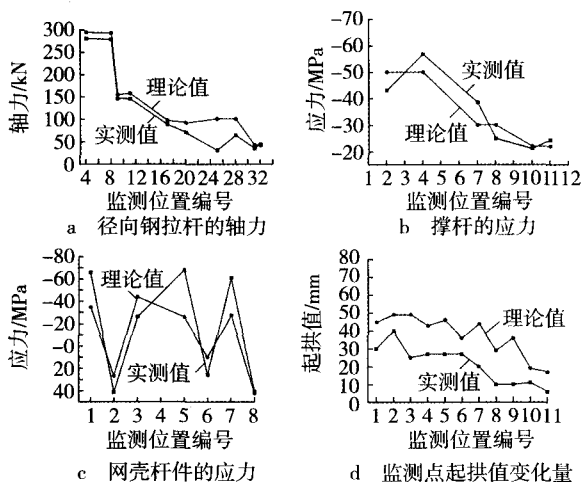


图5 张拉完成后监测结果

难度较大。

2) 本工程选择环向索来施加预应力,技术上较合理,施工周期较短,工程造价较低,是较合理的方案。

3) 预应力施加过程分为3级,降低了预应力损失,对设备要求相对较低,比1级张拉到位要合理。

4) 由于本工程的特殊性,在施工前进行了充分的准备工作,对结构在张拉过程进行了施工仿真计算,同时布置了大量的应力和变形监测点,以保证工程的顺利进行。

5) 预应力施工仿真计算采用ANSYS进行,并采用APDL语言编写仿真计算程序,能够很好的模拟该类结构的施工过程。

6) 从监测结果来看,实测结果很好的验证了理论计算结果,同时说明了通过有限元计算软件进行施工仿真计算是比较可信的。本工程的施工方法可以为同类工程施工提供借鉴。

### 参考文献

- [1] 陆赐麟,尹思明,刘锡良. 现代预应力钢结构[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [2] 吕晶,徐国彬. 鞍山体育中心劲柔索张拉穹顶屋盖设计与施工[A]//第十届空间结构学术会议论文集[C]. 北京:中国建材工业出版社,2002,757-763.
- [3] 王泽强. 双椭圆型弦支穹顶张拉成形试验研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京校区),2005.
- [4] 边广生,郭正兴. 广州大学城中心体育场斜拉网格屋盖张拉施工[J]. 施工技术,2007,36(6):50-52.