

# 浙江省黄龙体育中心 主体育场挑蓬斜拉网壳结构设计

焦 俭 宋 涛 赵基达 钱基宏 冯济平 张维焱

**摘 要** 浙江省黄龙体育中心主体育场挑蓬采用斜拉网壳结构,其结构体系由吊塔、内外环梁、斜拉索、网壳、稳定索等组成,设计挑蓬时将它与下部结构结合在一起进行整体受力分析。设计时,在满足结构受力性能要求的前提下,确定结构构件的布置,兼顾考虑了施工的方便性。对于斜拉索、稳定索的预应力张拉控制力根据现场实际进度顺序进行了计算,取得了很好的效果。

**关键词** 体育场挑蓬 斜拉索 稳定索 网壳 预应力

## 一、工程概况

浙江省黄龙体育中心主体育场位于杭州西湖以北的黄龙洞风景区,建成后是国内一流的大型体育设施。该体育场采用大基座双塔悬吊曲线挑蓬的造型,突出体育建筑的力度感和现代建筑的流畅体型,以简洁和均衡的手法反映体育建筑物的个性,充分体现了现代化体育场的功能和风貌。该体育场能容纳观众 53600 人,内设 400m 环形跑道标准田径场、标准足球场,可举办除奥运会之外的其它国内外重大体育比赛。设计时还考虑到综合利用,在不影响比赛要求的前提下,发挥无赛事时建筑物的多功能利用。

该体育场底部为半径 150m 的正圆形,比赛场地为南北向纵轴长、东西向横轴短的椭圆形。在南北两端是两个吊塔,塔地下 2 层,地上 24 层,顶部标高 85m,每塔分东西两肢,在地下室、3~6 层、21~22 层三处将两肢相连。观众席大部分沿东西看台布置,坐席超过 90% 的部分被东西对称的两个挑蓬覆盖,覆盖面积共  $2 \times 11000 = 22000\text{m}^2$ 。挑蓬由内外环梁支撑,其平面投影为月牙形,中间处最宽为 50m。内环梁中心线为处于倾斜平面上的圆弧,半径为 137.042m,中间最高点标高为 39m。内环梁在南北两端伸入吊塔内部并相连形成封闭的环形。外环梁内中心线是一个椭

圆形,由平面斜切半径为 122m 的圆柱面而得,中间最高点标高 31.8m。外环梁在南北两端也伸入吊塔内封闭成环形。在内环梁上南北各布置 9 根斜拉索来将环梁悬吊于吊塔上,索上端锚固节点在吊塔内部。为使挑蓬能抵抗负压风荷载并增加结构刚度,在屋面网壳上沿其曲面布置 9 条稳定索,两端均锚固于外环梁上,见图 1。

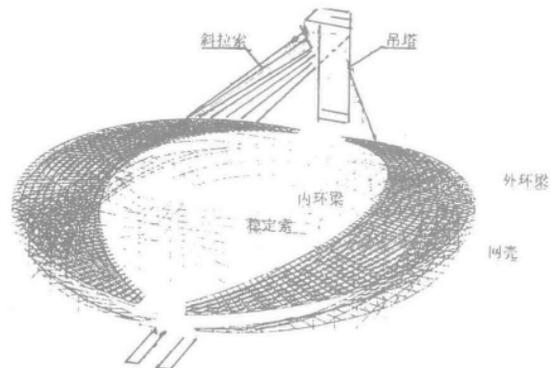


图 1 体育场结构模型图

挑蓬结构是一个由多种结构形式组合成的复杂的空间结构体系,为对其受力性能和构造有深入的了解,除了进行细致的的力学计算分析<sup>[1]</sup>外,还进行了风洞试验<sup>[2]</sup>、整体模型试验<sup>[3]</sup>、节点试验<sup>[4]</sup>等试验工作,为设计积累了大量的宝贵数据。设计中充分考虑了不同结构形式的交接转换、各

焦 俭 冯济平 浙江省建筑设计研究院  
宋 涛 赵基达 钱基宏 张维焱 中国建筑科学研究院

道施工工序的相互影响,尽量为施工创造有利条件。设计考虑了主要构件在施工过程中的受力状态,尤其是在现场按照实际状态和挂索顺序计算斜拉索和稳定索的张拉控制力,保证了结构各部分处于正确的受力状态。

## 二、挑蓬结构体系

黄龙体育中心主体育场第一次大胆地将斜拉桥的结构概念运用于体育场的挑蓬结构之中,将斜拉索结构与网壳结构有机结合,结构新颖、造型优美,使建筑美与结构美达到和谐统一。挑蓬结构由吊塔、斜拉索、内环梁、外环梁、网壳和稳定索组成,成为一个复杂的空间杂交结构体系,见图1。

该挑蓬结构中网壳一端支撑在外环梁上,一端支撑在内环梁上,而内环梁由斜拉索吊拉在南北两个吊塔上,外环梁由下部看台框架悬臂外挑。为使挑蓬结构能够承受可能的荷载作用,特别是正负风荷载的作用,并为了满足结构刚度的要求,在屋面上设置了稳定索系统。挑蓬结构设计经过多种方案的分析比较,最后确定了各组成部分的结构形式、断面、材料、预应力值等的最终实施方案。

吊塔为85m高的预应力钢筋混凝土高层结构,斜拉索的上锚固端从上往下排列在吊塔上,锚固节点穿过吊塔外墙设在塔内部。为保证作为悬臂结构的吊塔的强度和刚度,在塔外侧施加预应力。

网壳杆件内力较大,并且空间角度关系复杂,确定采用焊接球节点类正放四角锥形式。网壳两端分别支撑在钢筋混凝土外环梁和内环钢梁上,支座受力情况和构造均比较复杂。内环梁作为网壳的支撑构件,同时又是斜拉索下锚固节点所在处,处于复杂的受力状态下且内力较大,为满足受力要求并为了方便构造和施工,内环梁采用箱形钢梁,斜拉索锚固节点位于梁中腹内。外环梁由下部钢筋混凝土框架梁悬臂外挑,因其要求有较大的刚度,同时希望重量尽可能减轻,因而采用钢筋混凝土箱形截面,稳定索锚固节点位于箱形内部,其中空部分兼做稳定索施工通道。

斜拉索和稳定索是该挑蓬结构形式成立的关键,设计时经过充分论证比较,选择了合理的拉索布置形式和截面规格,并在施工时按现场实际进

度顺序计算张拉控制索力。

## 三、力学性能分析研究

该体育场挑蓬结构属于复杂的空间结构,为深入了解其力学性能,进行了体育场的整体分析,计算挑蓬及下部看台框架结构的共同作用<sup>[1]</sup>。该挑蓬属于风敏感结构,为了解体育场在风荷载下的响应,进行了风洞试验<sup>[2]</sup>。另外还进行了挑蓬结构模型试验<sup>[3]</sup>、斜拉索锚固节点试验<sup>[4]</sup>等,为挑蓬结构设计提供了大量有用的试验数据。

风洞试验用体育场的1:140缩尺模型在北京大学的大气边界层风洞中进行,测量了不同风速、各种风向角下挑蓬屋面的风压系数,为确定体育场挑蓬结构的风荷载体形系数提供了依据,试验还测量了外场风对内场风环境的影响。

屋盖挑蓬结构是由多种结构单元组合的杂交结构,计有斜拉索单元、稳定索单元、网壳杆单元、内外环梁和框架的空间梁单元等。众多结构单元形式的组合为结构分析时力学模型的建立与处理带来了一定的难度,具体处理见另述<sup>[1]</sup>。

挑蓬上的荷载作用有屋面及结构自重、风荷载、活荷载、预应力作用及温度作用等,其中风荷载对该结构具有决定性的影响。设计中为保证结构安全性并使结构受力合理,对斜拉索稳定索预应力值、内环梁在预应力态的位移、网壳位移进行了适当的控制。

挑蓬结构的受力特性可分为预应力态、负风压态、正风压态三种典型状态。在预应力态,控制斜拉索和稳定索的预应力大小和分布使得内环梁挠度在零左右。当负风压作用时,内环梁和网壳向上位移,稳定索索力增大,斜拉索索力减少。当风吸力大到一定程度时内环梁整跨受拉,而外环梁受网壳和稳定索作用整跨受压,当正风压作用时,内环梁和网壳向下位移,斜拉索索力增大,稳定索索力减少,内环梁基本处于受压状态,外环梁在网壳推力作用下出现较大的拉力。

总结挑蓬结构体在各种荷载情况下的工作性能,内、外环梁要始终承受较大的弯矩、剪力和部分扭矩,在外荷载变化时会出现变化的拉压轴力。当有风荷载作用时,斜拉索和稳定索的索力在预应力态附近波动,通过调整索分布和断面规格,将索力的最大波动控制在25%范围内。网壳的受力

情况也很复杂,需要承受屋面自重、风荷载、稳定索压力等,还要将斜拉索的部分水平分力传递至外环梁。

挑蓬结构模型静力试验在中国建筑科学研究院结构所大型结构实验室进行,模型比例为1:40。试验按照结构计算考虑的多种荷载组合情况进行加卸载,量测索力和主要结构构件的位移内力。试验不但验证了设计计算方法和计算模型的正确性,而且为设计施工提供了大量宝贵的参考数据。

斜拉索锚固节点试验按1:3缩尺比例进行破坏试验,研究了设计节点构造在斜拉索加卸载过程中的内力变形性能,结果表明这种节点构造具有足够的强度储备,能将斜拉索拉力可靠地传递到内环梁。

#### 四、结构设计

##### (一)吊塔结构设计

吊塔作为挑蓬结构体系的一部分其主要作用是吊拉斜拉索,需要承受斜拉索较大拉力产生的倾覆力矩。吊塔共24层,总高度85m,层高3.6m,采用现浇钢筋混凝土变截面筒体结构。设计中为满足构件抗裂要求并加强其整体刚度以控制拉索作用下层间位移和塔顶位移,在塔外侧施加预应力。预应力筋采用1860级 $\Phi 15.20$ 钢绞线束,以标高40m为界分段张拉。斜拉索在塔内的锚固节点从23层到15层依次布设,虽然各索的倾斜角度都不相同,但索在塔外墙的出口排列是均匀的,以达到一致的外观效果。

##### (二)内环梁设计

内环梁需承受较大的弯剪扭和轴力作用,设计时要考虑与网壳的连接构造,在内环梁内需设计斜拉索锚固节点。

内环梁设计用箱形钢梁,截面尺寸2100×1600,钢板厚25mm(局部30mm),内壁设纵横向加劲板,可以满足受力、构造、施工等方面的要求:

- 1)满足构件受力复杂、内力较大的情况,具有足够的抵抗拉压、弯、剪、扭的刚度;
- 2)网壳杆件易于焊在梁侧面和底面;
- 3)斜拉索锚固节点可设于环梁内部,通过适当的构造措施保证索力可靠地传递到内环梁;
- 4)箱梁内部空间可作为施工通道,并具备一定的工作面,能满足箱梁分段拼接、斜拉索张

- 拉所需小型设备机具的运送和操作;
- 5)钢箱梁整体是一个倾斜放置的平面构件,易于下料加工制作;
- 6)箱梁内部封闭利于防腐,外表平整光洁利于涂装。
- 7)箱梁外形尺寸与网壳及体育场的整体尺度协调。

内环梁在根部伸入吊塔内部并形成封闭环,塔内部分为钢筋混凝土箱形梁,在钢与混凝土交接截面采用预应力筋将两端拉接在一起形成嵌固端。

##### (三)外环梁设计

外环梁由下部框架悬挑出的斜梁支撑,它对于整个体育场结构起重要的作用:作为强有力的环箍将看台框架、网壳、吊塔联系在一起,形成结构良好的整体性;作为挑蓬网壳在外侧的支撑构件;作为稳定索的锚固端。设计需要外环梁具有很大的刚度而又要尽量减小自重,为此选择采用预应力钢筋混凝土箱形截面,为满足建筑造型需要,最终确定的截面如图2示。

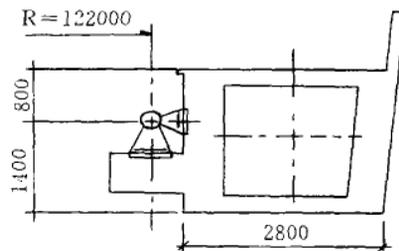


图2 外环梁截面

外环梁预应力钢筋用1860级钢绞线,约隔50m留出后浇带,在预应力筋连接外用连接器连接。梁侧面在网壳支座节点位置设牛腿和预埋件,承受网壳传来的复杂的三向反力。稳定索锚固节点在箱梁内壁上,通过预埋钢管与网壳上的套管连接。箱梁内部空间可作为稳定索的穿索、张拉工作面。

##### (四)斜拉索稳定索设计

在东南、东北、西南、西北四区各设9条斜拉索共36条,由中央向两边依次编号为一、二……、九号索。各索下端在内环梁上等距离分布,上端在吊塔上按相同的出口高差布置,索长度从32m到143m不等,见图3。索采用桥梁用1860级 $\Phi 15.20$ 钢绞线,各条索中钢绞线数量依据计算

分析并考虑锚具规格确定,计有 49,31,17,12,7 等规格,中央索拉力最大,向两侧依次减小。设计时考虑到今后可能需要换索的实际情况,针对通常荷载条件下一次换一根索的状态进行了受力验算,在构造上也采取了措施,为以后更换创造了条件。



图3 斜拉索布置

稳定索分布在网壳上弦曲面上,见图4。9条稳定索受力状态比较接近,都采用 1860 级  $5 \times \Phi 15.20$  钢绞线束。稳定索长度均在 190m 左右,设计考虑需要在两端进行张拉。稳定索从钢管套管中穿过,而套管从屋面檩条上的开孔通过,这样的构造可保证屋面网壳和稳定索共同受力。张拉施工完成后往套管内灌浆形成钢绞线保护层。

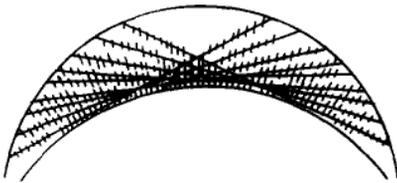


图4 稳定索布置

#### (五)网壳设计

网壳介于内、外环梁之间,是由一个斜放圆锥面被两个斜平面所截得的曲面,其平面为月牙形,见图5。网壳采用焊接空心球节点、正放四角锥形式,基本网格尺寸约  $3.5\text{m} \times 3.5\text{m}$ ,结构厚度为 3.0m,杆件采用钢管,截面规格  $\Phi 75.5 \times 3.75 \sim \Phi 219 \times 16$ ,材质 Q235-BF。网壳单方设计用钢量  $47.2\text{kg}/\text{m}^2$  (按展开面积)。

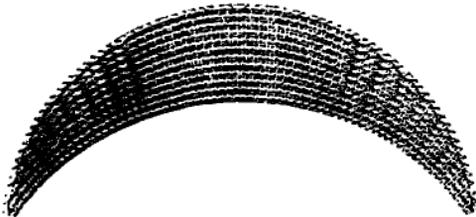


图5 网壳平面

在网壳与内环梁交接处,上弦杆通过半球焊接在钢梁侧面,腹杆通过半球焊接在梁下表面,杆件延长线通过梁形心,这样可减小网壳对梁的扭转作用。网壳在外环梁上的支座要传递三向反力,在外环梁侧面和牛腿顶面预埋钢板,支座球节点上伸出二根短管分别与预埋件焊接。

#### 五、拉索张拉计算

斜拉索和稳定索是本工程挑蓬结构的关键部件,设计除了考虑在各种极限情况下其承载能力外,对于施工张拉过程也给予了充分的重视,采取措施保证张拉完成后索和整体结构处于正确的受力状态,其中关键步骤是施工张拉力的现场计算。

挑蓬结构中斜拉索、内环梁、外环梁、网壳和稳定索的受力状态互相关联,在施工时因为进度关系,外环梁混凝土的浇注、钢梁和网壳的焊接等工序同时进行,各构件的支撑条件也很复杂,很多因素会对拉索张拉力产生影响。根据施工安排,斜拉索采取逐根张拉方案。为保持挑蓬结构尤其是吊塔的受力大体平衡,每一轮在东南、东北、西南、西北四个区中选择相同位置的索依次张拉。斜拉索张拉控制力受张拉顺序的影响,例如,其它条件相同时,按计算张拉力先张拉东南四号索,此时整个东区挑蓬结构处于该索的偏心力作用下,当张拉东北四号索时,应使挑蓬结构恢复到对称受力状态,因初始条件不同,此时的张拉控制力当然也就与前一个四号索不同,这种张拉力差别通过计算给出。

计算张拉控制力时,以前述力学分拼模型为基本模型,综合考虑现场屋面荷载、内外环梁状态、内环梁和网壳的支撑情况、先张拉索的影响等情况,计算出当前张拉索需要达到的张拉力,进而换算成千斤顶油表读数进行控制。

稳定索在斜拉索张拉完成后张拉,其张拉控制力也按实际情况计算并考虑曲线套管摩阻影响。稳定索张拉使网壳向下移位,斜拉索索力比张拉时增加。

在全部斜拉索、稳定索张拉完成后,进行调索,对每一条索的索力进行实测,并将索力调整到设计要求值。调索前挑蓬结构受力状态与张拉时又有所不同。实测结果显示,索力与设计要求值很接近,最大差别也在 5% 以内。(下转第 11 页)

撕烂的可能,甚至还会危及到施工人员的人身安全。这就要求我们在安装膜片时,时刻注意天气的变化,安装前做好充分的准备工作,每一片膜的安装时间要尽量缩短,保证当天收工前最后一块膜片安装固定到位。

这里还需要提及的是张拉膜结构对钢索拉锚点与柱脚的定位以及钢索与钢结构的制作误差都有很严格的要求,因为膜片的尺寸、钢索的长度都是事先在工厂严格下料加工好的,上述尺寸的偏差将会影响索膜体系中应力的分布,甚至会导致应力集中引起索膜的局部破坏,也有可能索膜根本就安装不上。对于张拉膜结构支撑体系的制作与施工,一定要满足具体工程施工图中说明的误差范围要求,保证索膜安装按原设计预应力的分布与分布顺利进行。

该中心剧场膜结构穹顶是一个典型的张拉膜结构体系,在顶升柱子(即施加预应力)之前,结构体系没有刚度,是个机动体系,在顶升的过程中各结构构件相对运动,索膜体系中预应力重新分布,最后达到各自设计预应力状态,各结构构件达到设计位置(工作点位置),整个体系具备设计的刚度及稳定性。杰克柱设计顶升距离为800mm,15根钢柱最终位置均在误差范围以内,整个顶升过程采用位移、应力双重控制,因此保证了结构体系最终时的几何、应力状态的正确性。

## 5 结语

张拉膜结构一开始从找形分析到荷载分析最

后到裁剪分析,都需要较深的数学与力学知识,充分体现了现代膜建筑的科技含量;它拥有优美的造型、卓越的性能和其它常规结构形式无法比拟的特点,受到建筑业人士的普遍欢迎,近几年在我国也得到了越来越广泛的应用。该中心剧场张拉膜结构穹顶的应用成功,标志着我国膜结构专业公司的科技人员已基本掌握了膜结构设计的关键技术与施工技术,有能力独立完成大型膜结构的设计与施工安装。但由于膜结构在我国应用实例不是很多,一些数据资料积累不够,目前设计还需借鉴国外一些标准与规定。因此,还需我国建筑业各方人士更多的关心与支持,齐心协力共同努力,尽快完善和解决膜结构在我国应用中遇到的各种技术和体制问题,才能保证我国膜结构事业沿着正确的方向迅速发展。

## 参考文献

- (1) 李中立. 张拉膜结构全过程分析及实验验证: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 1997.
- (2) R. E. Shaeffer. TENSIONED FABRIC STRUCTURES. Published by the American Society of Civil Engineers, 1996.
- (3) Horst Berger. Light Structures Structures of Light. Printed in Italy, 1996.
- (4) KAZUO ISHII. MEMBRANE STRUCTURES IN JAPAN. SPS PUBLISHING COMPANY, 1995.
- (5) 混凝土结构设计规范(GBJ10-89)
- (6) 钢结构设计规范(GBJ17-88)

(上接第19页)

经过调整,索力误差控制在3%以内。<sup>[5]</sup>

## 六、总结

该体育场挑篷采用斜拉网壳结构,其结构体系复杂,设计挑篷时将挑篷与下部结构结合在一起进行整体受力分析。设计时在满足结构受力性能要求的前提下,在结构构件规格、布置形式、节点构造等方面考虑了施工的方便性。对于斜拉索、稳定索的预应力张拉控制力根据现场实际进度顺序进行了计算,取得了很好的效果。该体育场结构现已完工。

## 参考文献

- [1] 赵基达等, 浙江黄龙体育中心主体育场挑篷结构计算分析, 第八届空间结构学术会议论文集, 1997
- [2] 钱基宏等, 浙江省黄龙体育中心体育场挑篷风荷载及内场风环境模拟实验研究, 第八届空间结构学术会议论文集, 1997
- [3] 赵鹏飞等, 浙江省黄龙体育中心主体育场挑篷结构模型试验研究, 建筑结构学报, 第20卷第5期, 1999
- [4] 中国建筑科学研究院结构所, 浙江省黄龙体育中心主体育场斜拉索锚固节点模型试验报告, 1999
- [5] 钱基宏等, 浙江省黄龙体育中心主体育场挑篷预应力斜拉索结构的施工建造, 第九届空间结构学术会议论文集, 2000