

大跨度非对称马鞍形索网结构 关键施工技术研究与应用

王泽强^{1,2} 王 丰¹ 尤德清¹ 周黎光¹ 吕 品¹

(1 北京市建筑工程研究院有限责任公司 北京 100039 2 天津大学建筑工程学院 天津 300072)

摘 要:大跨度非对称马鞍形索网结构作为空间结构的新型结构形式,具有造型新颖、跨度大及用钢量省等特点,主要用作大型公建或体育场馆屋盖等。本文以盘锦体育场屋盖工程为载体,针对大跨度非对称马鞍形索网结构的结构特点,进行了大量仿真计算与方案比选,提出了“地面组装、同步提升、整体张拉成形”的施工方法。并在1:10的结构模型上进行了张拉成形试验,验证了仿真计算的正确性和施工方法的可行性;对该施工方法的全过程施工仿真计算分析、拉索下料、同步提升技术、整体张拉成形技术、施工监控技术等5项关键技术进行了比较深入研究。该研究成果成功应用于盘锦体育场屋盖、佛山家具城屋盖和徐州体育场屋盖空间索结构施工,取得了良好的效果,可为该类结构的张拉成形提供有益的借鉴。

关键词:索网结构 模型试验 张拉成形 施工仿真计算分析 施工监控

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2016.06.001

引 言

大跨度非对称马鞍形索网结构源自车轮辐条概念的全张拉结构,由强大的外压环、内拉环和一系列的径向索组合而成,具有独特的造型、跨度大、用钢量省等特点,主要用作大型公建或体育场馆屋盖。由于结构为柔性结构,成形之前结构基本没有刚度,结构成形过程难度比较大。国外建成这种结构形式不是很多,像德国斯图加特体育场、罗马尼亚的布加勒斯特列-玛努柳体育场及巴西的贝洛奥里藏特市大米内罗体育场等,由于国外技术保密性,其施工技术方面资料比较少。近十几年,国内该类结构形式已经突破了空白,并兴建了几座大型体育场及公共建筑,如佛山世纪莲体育场、盘锦体育场、佛山家具城等。

盘锦体育场为十二届全运会女子足球场,其屋盖为大跨度非对称马鞍形索网结构,平面呈椭圆环形,平面尺寸约为270m×238m,屋盖悬挑长度为29m~41m,在长轴方向悬挑量小,短轴方向悬挑量大。主索系包括内圈环向索一道、144道吊索、72道脊索和72道谷索,其中环向索由10圈直径115mm和110mm的Z型密封进口拉索组成,径向索最大直径为120mm。结构三维示意图及剖面图如图1所示。

结合大跨度非对称马鞍形索网结构的结构形式特点,针对其张拉成形关键技术,并以盘锦体育场屋盖为载体,进行一些研究与探讨。针对盘锦体育场屋盖的结构特点,进行了大量仿真计算与方案比选;提出了“地面组装、同步提升、整体张拉成形”的施工方法,并在1:10的结构模

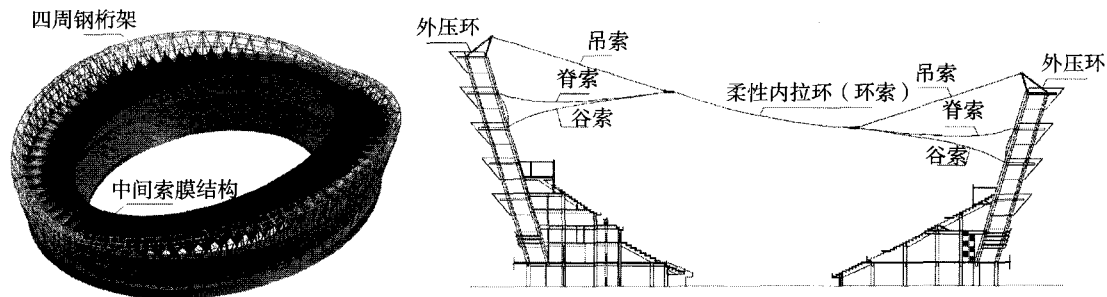


图1 结构三维示意图和剖面图

型上进行了张拉成形试验；并对该施工方法的五项关键技术进行了深入研究，具体如下：拉索下料、全过程施工仿真计算分析、同步提升技术、整体张拉成形技术、施工监控技术。

1 成形方案比选

1.1 张拉方案选择原则

张拉成形是索网结构施工的核心，好的张拉方案能够省时、省力、安全，故确定合理的张拉方案对于工程具有至关重要的作用，合理的张拉方案应具备以下条件：（1）张拉过程中结构构件必须处于弹性阶段，且在张拉过程中要避免内力出现峰值。（2）对称性原则：大部分空间索网结构均呈现对称性，采用对称的张拉方法能使索力更加均匀，可以采取对称分级张拉的方法。

（3）考虑张拉过程中的经济性和安全性。尽量减少高空作业，能在地面拼装的尽量不在高空安装；少使用工装索；减少张拉次数；考虑提升千斤顶的张拉吨位等问题。

根据盘锦体育场屋盖特点选择吊索为张拉索，通过吊索的提升与张拉将预应力引入结构。具体施工步骤为：（1）安装外环钢结构，搭设放索通道及环索提升平台，将吊索及环索在放索通道上展开，并安装相关连接节点；（2）同步提升各组吊索；（3）将各组吊索张拉到耳板位置，并固定；（4）安装谷索、脊索及膜等构件。

1.2 仿真计算分析与方案优化选择

对于吊索的张拉可以选择所有吊索同步张拉，也可以将吊索间隔分为几组，分批次张拉。一般来说，采用所有吊索同步张拉的方案施工过程中张拉力较小施工方法较容易，但同时张拉机具及人工成本消耗较高；间隔分为几组张拉的施工方案施工过程中张拉力较大且需要倒换张拉工装，但对张拉机具及人工成本消耗较低。本文从张拉吨位以及工程成本的角度进行综合考虑，选择3种张拉方案进行比较分析：方案一，所有吊索同步张拉；方案二，吊索间隔一榀张拉；方案三，吊索间隔三榀张拉。

采用目前通用的有限元软件建立整体有限元

计算模型，根据实际施工工况进行仿真计算分析。模型中采用梁单元模拟四周钢桁架和看台混凝土梁，只受拉单元模拟所有拉索，壳单元模拟看台板；采用初应变和温度相结合的方法施加预应力；索夹节点、吊索固定端索头重量作为节点荷载进行考虑。采用重启动法对施工过程进行分析，与设计的成形态进行对比，分析张拉方案的合理性。其中张拉步0为结构在地面拼装完成状态，结构处于松弛状态，最后一步为索结构施工完成阶段。本文吊索为主要张拉索，故本文仅选各种索索力较大的一根吊索进行分析，张拉全程中索力变化见图2。各个施工方案吊索施工最大张拉力见图3所示。

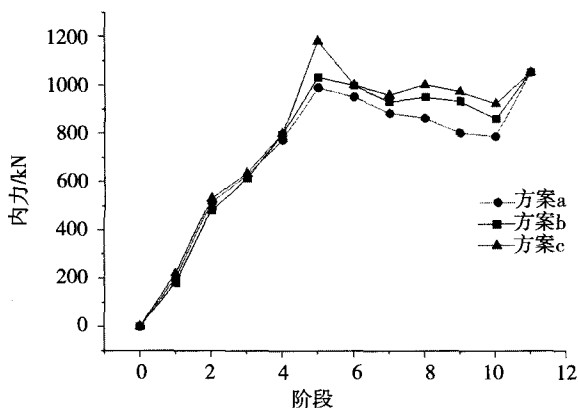


图2 吊索内力最大值

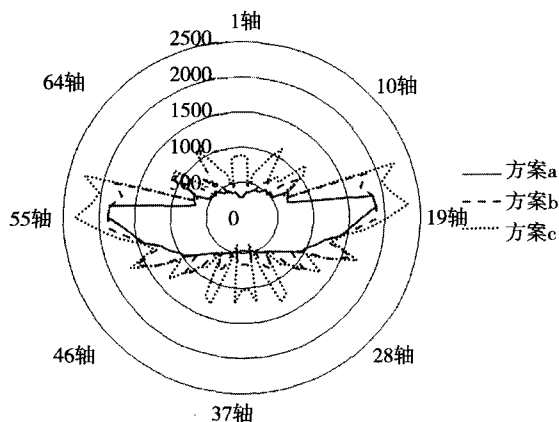


图3 不同方案各轴线吊索最大张拉力/kN

通过图2，图3可以看出：

（1）对于方案一、方案二、方案三，在张拉完成阶段结构受力状态完全相同，故在索长度确定的情况下，采用何种张拉吊索方案对最终成型的结果不会产生影响。这是与常规预应力大跨

度钢结构体系完全不同的几何力学特征，故为该类型工程施工方法提供了灵活创造空间。

(2) 在提升张拉过程中吊索的内力逐步增加，其中方案一，方案二在施工完成阶段内力达到最大，方案三在施工过程阶段内力达到最大。对于此工程，吊索张拉力最大状态可能出现在于施工阶段。

(3) 图2可以看出，方案一张拉过程中吊索张拉力最小，最大张拉力约为1900kN，方案二张拉力相比方案一略有增加，方案三张拉力相比前2个方案张拉力增幅约为20%，最大张拉力约为2300kN。

进一步分析可以看出，对于吊索的张拉方案一需要144根拉索同步张拉，需要大量机具及人工，成本较高。相对于方案一，方案二只需72根拉索同步张拉，减少了人员及机具投入量，且张拉力仅小幅度增加，方案三虽然成本较低但吊索张拉力增幅较大。由于吊索是张拉索，张拉过程中内力峰值越小对结构的安全及降低张拉难度有利。故综合考虑施工过程中选择方案二吊索间隔一榀张拉的方案为最终实施方案。

2 模型试验研究

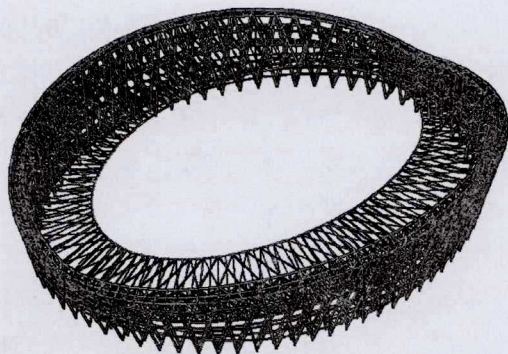
为验证施工仿真计算结果的正确性和施工方法的可行性，以大跨度非对称马鞍形索网结构的盘锦体育场屋盖为依托，建立了1:10的大比尺试验模型，并在模型上进行了施工方法模拟。

2.1 模型设计与制作

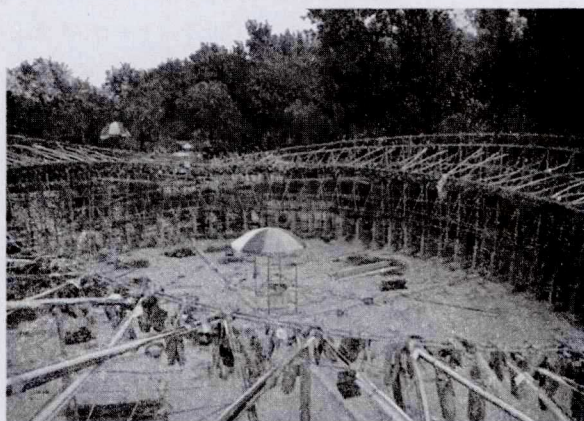
模型试件按盘锦体育场屋盖结构以1:10进行缩尺，平面尺寸为27.0m×23.8m，环索长度为52.7m，结构模型如图1所示，节点构造如图4所示。

2.2 成形过程试验结构及分析

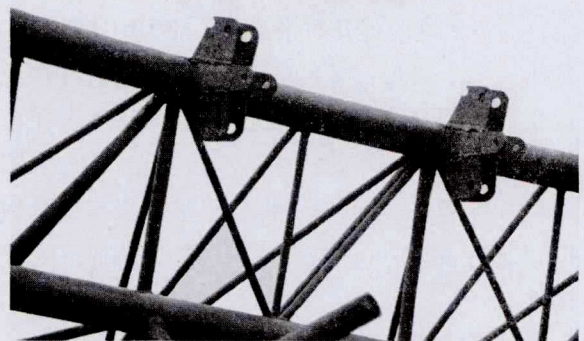
实际安装过程中各阶段的模型形状如图4所示。试验模型中，在吊索及环索处布置了拉力传感器，全过程监测安装过程中的索力。施工过程如图5所示，结构成形过程中各吊索索力变化历程如图6所示，环索索力变化图如图7所示，提升结束最终的结构标高与理论标高对比结果如图8所示。



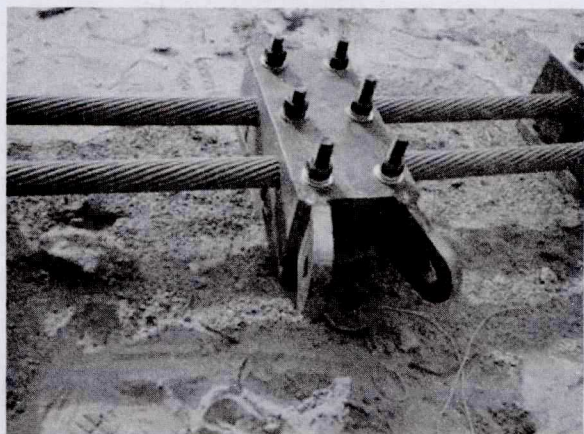
(a) 结构试验模型示意图



(b) 结构试验模型实物照片

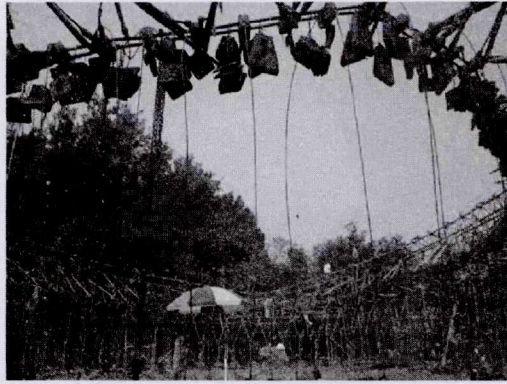


(c) 吊索耳板

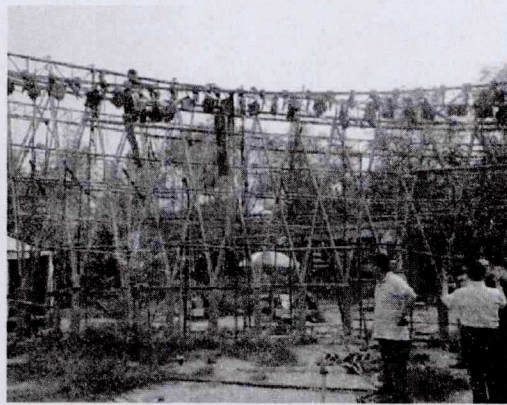


(d) 环索与吊索谷索结构模型

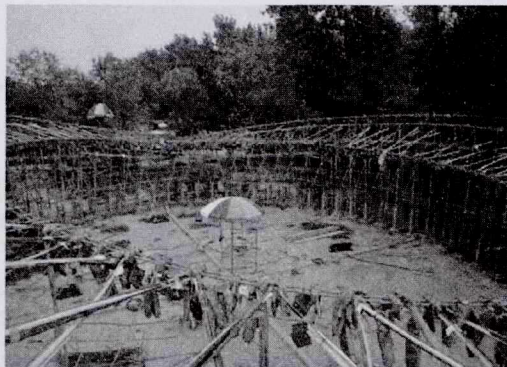
图4 结构模型及实物照片



(a) 第1批拉索提升到位

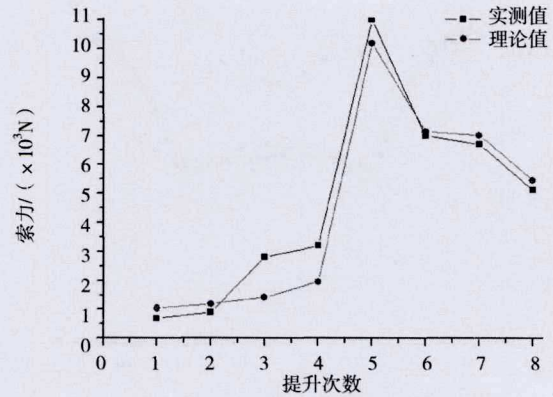


(b) 第2批拉索提升到位

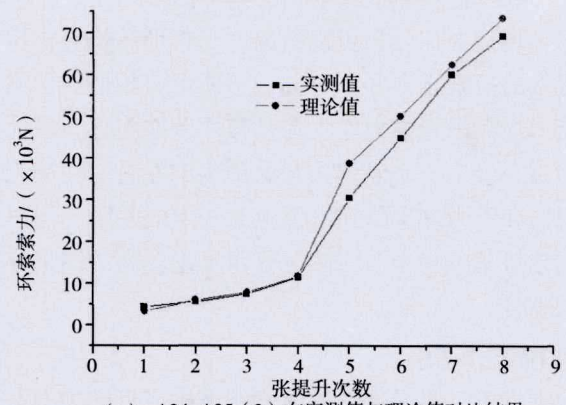


(c) 张拉结束

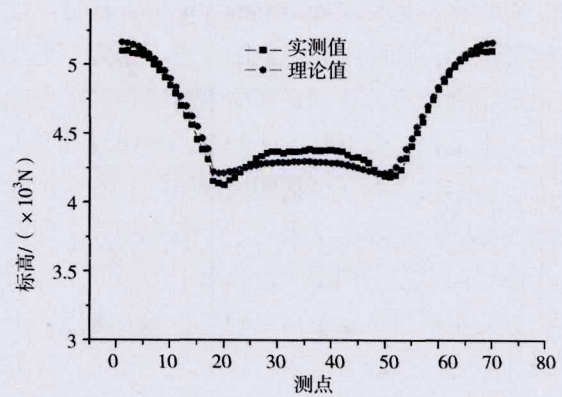
图5 张拉成形过程照片



(b) A10-A11 (1) 左侧实测值与理论值

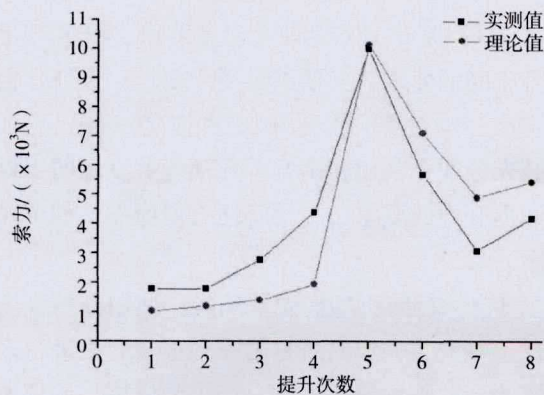


(c) A24-A25 (2) 右实测值与理论值对比结果

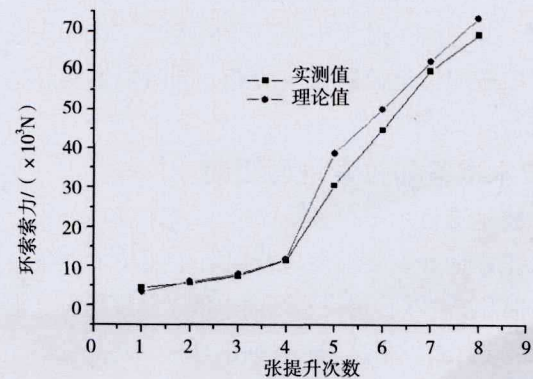


(d) A24-A25 (2) 左实测值与理论值对比结果

图6 吊索索力变化图



(a) A10-A11 (1) 右实测值与理论值对比结果



(c) 环索实测值与理论值对比结果

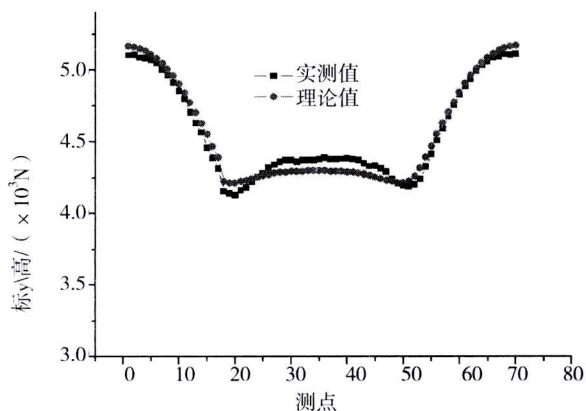


图8 提升完成环索标高与实际标高的对比结果

通过对比分析可以看出，马鞍形结构对称位置处的拉索索力并不对称，整体走势相似。拉索受力最大吊索索力发生在马鞍面低端附近，最大为11kN左右。环索索力最大值为8t左右。实测索力值和索力理论值在数值上有一定的差距，但总体趋势基本吻合。实测位移跟理论标高的结果亦较吻合。

3 拉索下料

钢索下料是保证整体索网结构成形的关键一步，只有将拉索长度确定准确才能够保证最终成形能够满足设计图纸和规范的要求。钢索下料长度需要精确计算，特别是环向索对结构成形影响更大。本工程拉索下料方法如下：按照设计图纸建立整体结构模型，包括四周钢结构、看台、索网结构等，其中环向索采用“十索模型”，即考虑十圈环向索在不同预应力状态下的不同下料长度，这是本项目拉索下料精确与否的关键点；根据设计给定的预应力值进行施工全过程仿真计算分析，最终确定每圈环向索及其它径向拉索的下料标记力，并在环向索与径向所相连节点处做出标记，并在施工过程中进行严格控制，保证安装过程中按照标记位置安装节点，同时根据实际情况进行局部调整。

4 技术准备和拉索地面组装

4.1 技术准备

拉索地面安装前要进行以下主要技术准备：吊索提升操作平台搭设、环向索放索马道搭设、提升工装设计及设备选用和径向索耳板误差测量等。

(1) 吊索提升操作平台：要满足吊索提升

至对应耳板附近的操作空间要求，同时要有一定的承载能力。吊索提升操作平台位于四周环桁架上，最大悬挑近4m，由于工程位于海边而且位置比较高（离地面约60m），风荷载影响特别大，因此，既要满足受力要求，又要满足保证平面外稳定的要求。搭设完成的吊索操作平台见图9所示。

(2) 环向索放索马道搭设要求：合理布置环向索马道的位置，准确测量定位；保证马道周长与环向索下料长度尽量接近；满足马道承载力要求，保证整体稳定性；在环向索节点处要满足安装节点的要求。搭设完成的环向索马道见图9所示。

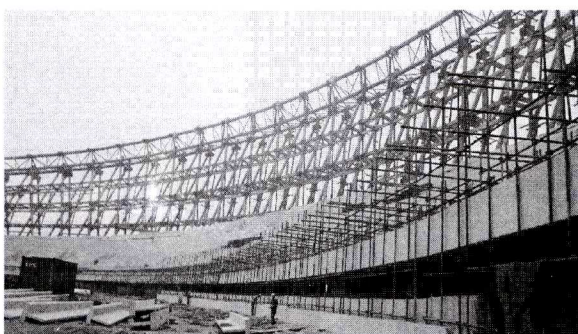
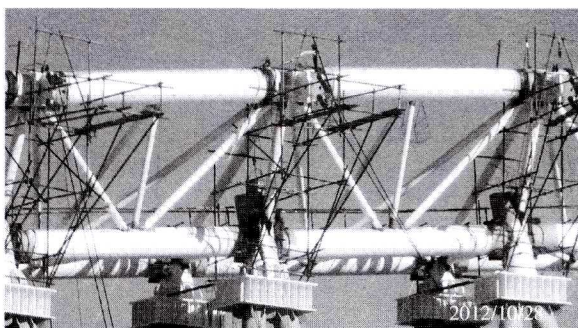


图9 吊索操作平台和环向索马道

(3) 提升工装设计及设备要求：既要满足提升空间的要求，又要满足受力要求；保证耳板固定点、拉索及工装受力中心，三点一线，保证工装充分安全利用；提升千斤顶能够满足同步控制和提升力的要求，又要轻便方便操作。如图10所示。

(4) 径向所耳板误差测量：使用高精度全站仪，将安装完成的所有吊索和谷索耳板进行多次复测，取平均值，以测量结果为依据，调整所

有谷索和吊索调节端,达到调整由于耳板误差引起的索长变化,保证结构受力和位形的准确性。

4.2 拉索地面组装

(1) 环向索组装:先将成盘拉索吊至放索盘,并将二者固定在平板车上,地面放开环向索,然后将放开后的环向索分段放置放索马道;下层环向索放置完成后,进行节点安装,一定要按照标记点进行安装,最后进行上层索放开和节点安装;最后进行同一圈环向索连接,环向索放开和节点安装见图11所示。

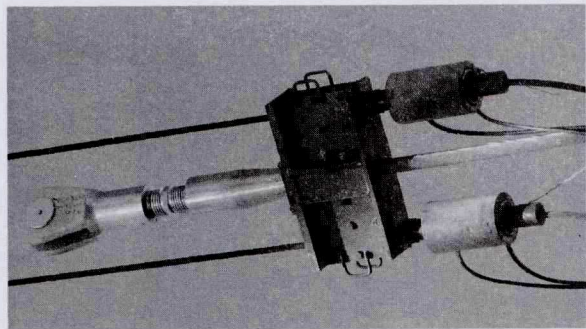
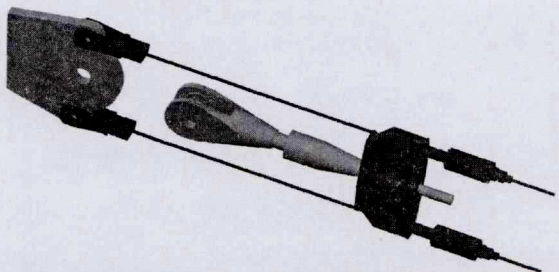


图10 工装设计三维示意图和实物照片

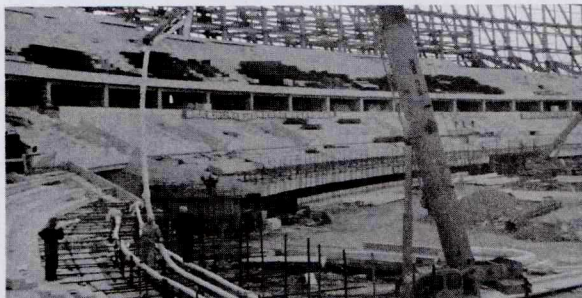


图11 环向索放开和节点安装

(2) 径向索(吊索、脊索和谷索)组装:将成盘径向索放置放索盘,使用履带吊将径向索放开,然后借助履带吊将径向索完全提直,先将固定端与环向索节点连接起来,并轻轻将径向索放置于看台,另一端与四周钢结构暂时固定连接。放置完成的环向索和径向索见图12所示。

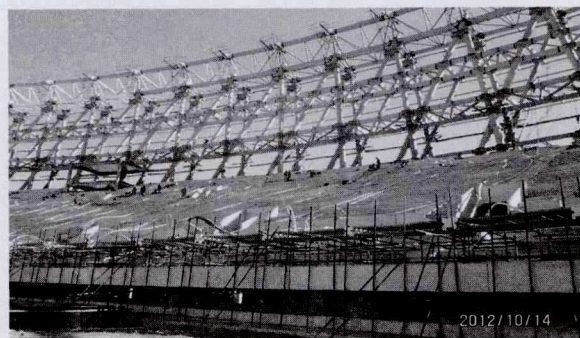


图12 环向索和径向索放置完成

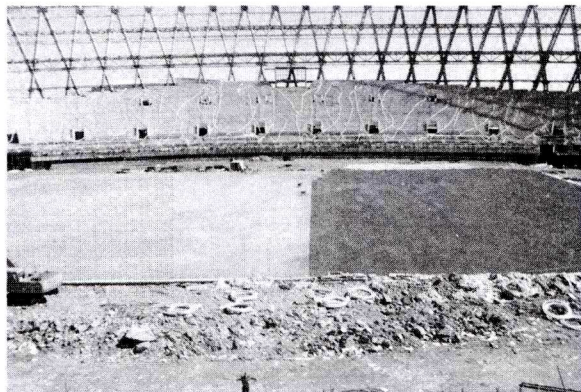
5 同步提升和张拉成形技术

5.1 总体方案

由于吊索数量比较多,通过方案比选,并辅助仿真计算分析,最终确定了如下提升和张拉方案:第1批72根吊索提升张拉到位;将提升工装转移至剩余第2批72根吊索上,进行提升,并张拉到位;最后进行72根谷索提升和张拉工作。

5.2 提升设备选用

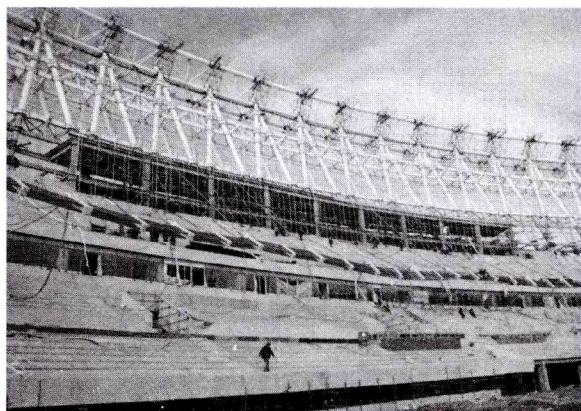
根据施工仿真计算分析结果可知,张拉成形过程中,吊索最大提升力为1880kN,结合现有设备并考虑成本情况,选择4根 $\phi 28$ 的钢绞线,其中 $\phi 28$ 钢绞线破断力为960kN。千斤顶采用了600kN和1000kN等2种类型,该千斤顶均为我院基于现有张拉千斤顶研制开发的爬升千斤顶,并申请了国家专利。提升千斤顶及标定见图13所示。



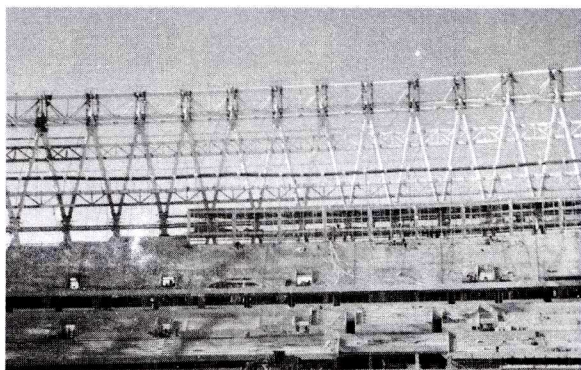
(a) 地面组装



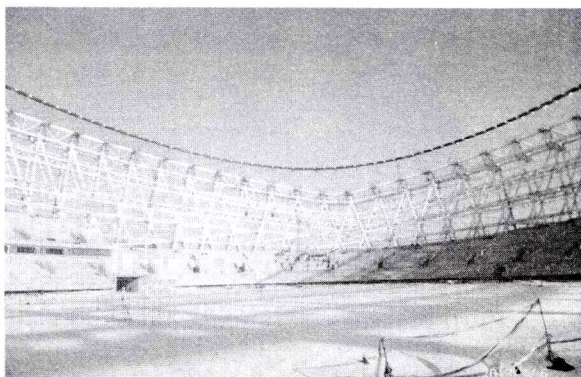
图13 提升千斤顶及标定



(b) 环向索提升至10m



(c) 环向索提升至20m



(d) 吊索和谷索全部安装完成

图14 提升张拉过程

5.3 提升与张拉成形

本工程前期技术准备中已经根据耳板测量误差调整了吊索和谷索调节端，因此，提升与张拉是同一过程，即吊索和谷索提升到位，安装完成后结构成形完成。具体过程如下：将第1批吊索与提升设备、工装等连接完成后，并将吊索调节螺杆调整至要求位置，进行整体提升；提升过程中，由于提升力不大，以结构位形控制为主，吊索索头孔中心离对应耳板孔中心距离约0.5m时，张拉力迅速变大，此时以索力控制为主，结构位形控制为辅；工装转移至第2批吊索，并安装完成；最后将72根谷索安装完成。如图14所示。

6 施工监测技术

为了确保工程在整个施工过程中的安全性以及考察施工过程中结构的变形和内力变化规律，需要对结构张拉成形过程中进行现场施工监测。

本工程主要通过3个方面进行监测控制：吊索和谷索提升张拉索力监控、环向索索力监控、结构位移监控，如图15、图16所示。

张拉完成后，所有吊索提升力与设计索力偏差在 $\pm 8\%$ 以内；由于监测设备精度不高，环向索监测的索力偏差较大，但是索力变化趋势与理论计算值基本相同；环向索节点处监测坐标值与理论计算值相差较小，满足设计和验收标准要求。

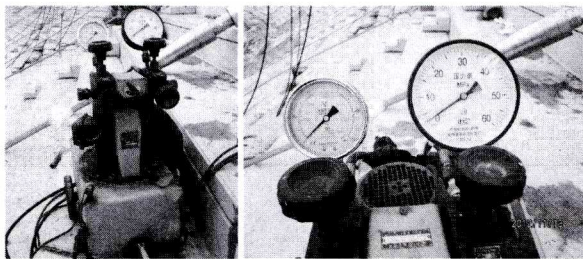


图15 拉索提升油泵及油压表

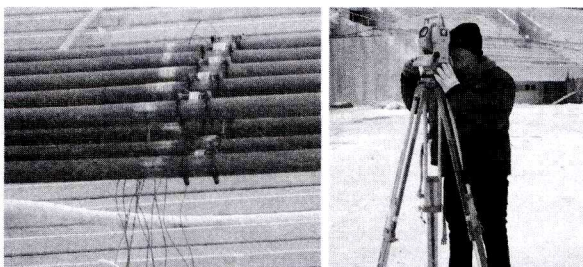


图16 环向索监测装置及全站仪

7 小结

(1) 大跨度非对称马鞍形索网结构，成形难度大。根据其结构特点，提出了索网结构“地面组装、同步提升、整体张拉成形”的施工方法，经实际工程应用证明，该施工方法不仅满足大跨度索网结构的安装，避免了高空作业，保证了施工过程中的安全，而且减少了支撑塔架、大型履带吊等辅助措施，降低了施工成本，成功应用于盘锦体育场屋盖索网的施工。

(2) 大量施工仿真计算分析是大跨度非对称马鞍形索网结构成形分析必不可少的过程，通过计算结果分析对比，并结合施工成本、安全及工期等，进行施工方案比选，最终确定了“地面组装、同步提升、整体张拉成形”的施

工方法。

(3) 通过1:10大比尺张拉成形模型试验，验证了施工仿真计算结果的正确性和施工方法的可行性。通过试验结果可以看出，提升过程中应该以结构位移控制为主，提升力控制为辅助；而整体张拉过程中以张拉力控制为主，结构变形控制为辅助。

(4) 钢索下料是保证整体索网结构成形的关键一步，只有将拉索长度确定准确才能够保证最终成形能够满足设计图纸和规范的要求。钢索下料长度需要精确计算，特别是环向索对结构成形影响更大。

(5) 根据施工仿真计算结果，设计了合理的提升工装，研发了爬升千斤顶，既满足了提升受力要求，又满足了可操作性强的要求。

(6) 通过对提升索力和变形的监测，可以发现施工过程中的安全隐患，寻找原因并分析解决问题，保证结构成形精确性。

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] 王泽强, 程书华, 尤德清等. 索穹顶结构施工技术研究[J]. 建筑结构学报, 2012(4):67-76.
- [3] 王泽强, 尤德清, 吕品等. 盘锦体育场屋盖马鞍形索网结构张拉成型关键技术[J]. 施工技术, 2014, 43(14): 124-127.
- [4] 王泽强, 秦杰, 陈新礼等. 金沙遗址采光顶预应力悬索结构施工技术[J]. 施工技术, 2008, 37(3): 20-22.
- [5] 尤德清, 王泽强, 段有恒. AL-mena 体育场柔性索网整体提升施工技术[J]. 工业建筑, 2014(S1): 213-218.
- [6] 秦杰, 王泽强, 张然等. 2008奥运会羽毛球馆预应力施工监测研究[J]. 建筑结构学报, 2007(6):83-91.
- [7] 周丽君, 梁存之, 冯大斌. 大跨度环形空间索结构施工成型方法研究[J]. 施工技术, 2014, 43(9): 74-80.
- [8] 葛家琪, 张爱林, 刘鑫刚等. 索穹顶结构张拉找形与承载全过程仿真分析[J]. 建筑结构学报, 2012(4): 1-11.
- [9] 杨维国, 洪国松, 王明珠. 多层大悬挑钢结构施工全过程仿真分析研究[J]. 建筑结构学报, 2012(4): 87-94.
- [10] 葛家琪, 张爱林, 刘鑫刚. 索穹顶结构张拉找形与承载全过程仿真分析[J]. 建筑结构学报, 2012(4): 1-11.