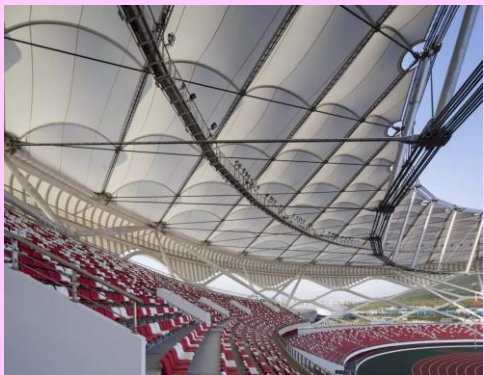


## 枣庄体育场空间结构简介

枣庄体育场是目前国内最大的平面椭圆形、空间马鞍形索桁结构之一，项目荣获鲁班奖和中国钢结构金奖。该工程应用大型弧形钢结构和大跨度索膜结构，这是继鸟巢、水立方之后，对该技术的又一大规模使用和探索。屋面采用大跨度车辐式索膜结构体系，索系由 320 根索组成，单根索最长达 240 米。现场采用地面组装后一次整体提升到位的施工方法，施工难度极大。外围护采用镂空弧形拉花钢结构，立面与地面水平夹角呈 80°。406 个双曲面弯扭构件上下弯曲且左右扭转，纵横交叉、十分复杂。



日前，全球知名专业体育场数据网站 StadiumDB 发起的 2018 年度全球最佳球场评选结果揭晓，通过“价值、功能、创新”三个维度的综合评比，山东省枣庄体育场位居第四名。

整个体育场如同一个中国传统的纸灯笼，不同曲度的波浪线形的结构，围合形成整体立面造型。这些波浪线从纸灯笼上的拉花纹理抽象而成。屋面同样延续波浪形拉花的设计。

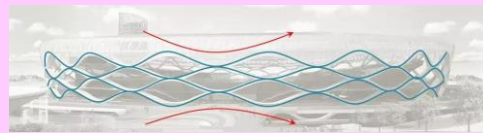


屋面结构采用整体张拉索膜轻型结构，看台遮盖部分采用白色 PTFE 膜材，营造出一个轻盈典雅，半透明的屋顶造型，加上拉花立面的通透性，整个体育场显得极其轻盈，通透。远远看去，体育场半掩在高低错落的景观中，白色屋面若隐若现，如同漂浮于绿茵之中。

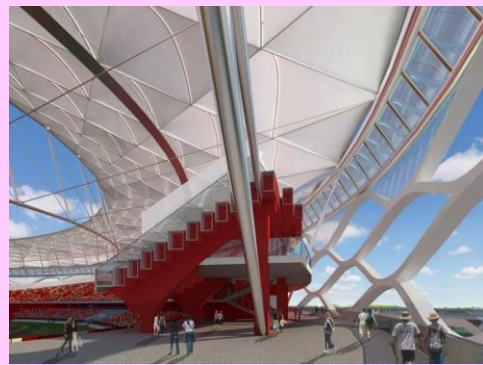
外围护结构独特的镂空造型如水一



般律动，实现了刚与柔的完美结合。除了与运河所象征的水的意向契合，作为承办体育活动的公共建筑，体育场的设计蕴含了动态的理念。运动时身体的舞动，力与美的展现，均为建筑的外表面和内部空间注入灵感。



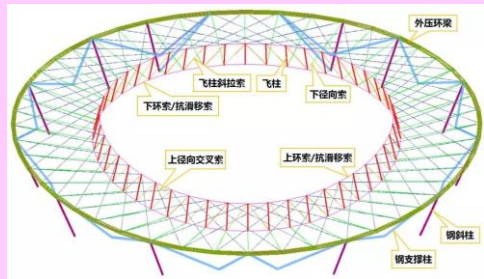
在体育场内透过建筑看公园或城市，波浪形的围护结构提供了一个戏剧性印象深刻的体验。体育场内外视线和声响互通，让建筑与环境、城市有更好的互动。红色涂料和铝合金材料与白色外层表皮形成鲜明对比，增强了建筑富于动感活力的特征。



枣庄体育场采用的创新技术主要包括：轮辐式马鞍形整体张拉索结构设计、自锁式抗滑移索夹设计、超长混凝土结构设计、预制清水混凝土看台设计等。其中，轮辐式整体张拉结构，以其合理的受力特性和极高的结构效率，使建筑中的“力与美”达到了高度统一，体现了当代先进建筑技术和施工水平。

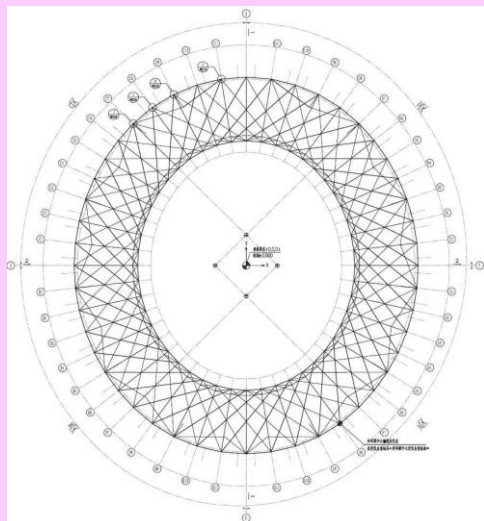
屋盖结构采用轮辐式马鞍形整体张拉结构体系，该结构通过对传统的轮辐式索桁结构体系进行改进，从而形成全新的整体张拉结构体系。屋盖结构模型示意图如下。

在内环上、下索及飞柱之间设置斜拉索，通过控制斜拉索的长度和预应力分布以实现屋面马鞍造型。一方面，实现了建

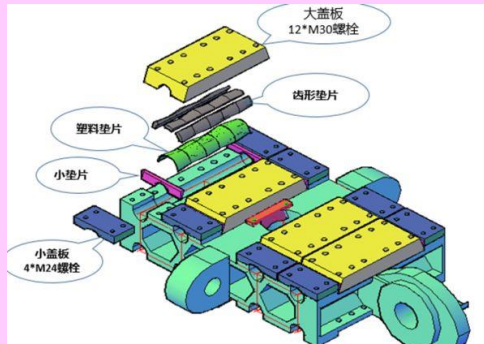


筑马鞍造型和结构布置的统一；另一方面，通过设置内环斜拉索，提高了内环和整体结构的抗扭刚度和整体稳定性。

为实现建筑膜屋面造型的灵活多样性，以及提高结构在不均匀荷载下的受力性能和稳定性，将上部径向索布置为双向交叉索网形式。

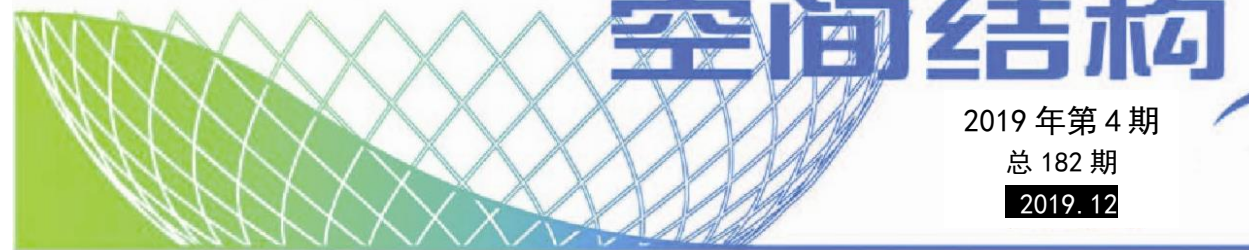


通过计算分析和节点试验证明，自锁式抗滑移索夹的抗滑移极限承载力达到 800kN 以上，滑移量小于 0.1mm。采用自锁式抗滑移索夹，提高了结构的受力性能，并为实现屋盖结构的马鞍造型提供重要的支撑作用，取得了良好的综合效益。



施工创新技术主要包括拉花钢结构网状 X 节点组装技术、网状 X 节点构件空间扭曲度加工技术、梭形构件加工技术、筒体焊接防裂缝技术、钢环梁构件组拼一体化加工技术、弧形拉花钢结构构件定位测量技术、PTFE 索膜结构张拉固定技术、大跨度索结构整体张拉提升技术等。

(转自《钢结构》公众号)



2019 年第 4 期

总 182 期

2019. 12

简讯

编辑部通讯地址：[100013] 北京北三环东路 30 号 中国建筑科学研究院结构所

本期内容

学术 活动

## 2019 年空间结构专题研讨会“空间结构应用领域的传承与拓展”在合肥顺利召开

2019 年空间结构专题研讨会“空间结构应用领域的传承与拓展”在合肥顺利召开

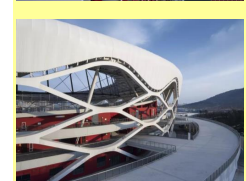
北京工业大学与中国钢结构协会空间结构分会将联合承办国际壳体与空间结构 2021 年学术交流会 (IASS2021)

70 年，中国空间结构取得了哪些傲人成就？

青岛世界博览城荣获 The Structural Awards



枣庄体育场空间结构简介



由中国土木工程学会桥梁及结构工程分会、中国建筑科学研究院有限公司主办，合肥工业大学承办，安徽富煌钢构股份有限公司协办的空间结构专题研讨会“空间结构应用领域的传承与拓展”，于 2019 年 11 月 1 日~2 日在安徽合肥召开。参加会议的有来自全国各地空间结构专业领域的专家学者、承办协办单位的领导和技术人员等，共计 50 余人。

11 月 2 日上午，研讨会首先举行了简短而热烈的开幕式，开幕式由北京工业大学薛素铎教授主持，浙江大学董石麟院士、中国建筑科学研究院蓝天研究员、合肥工业大学校长梁樑教授、富煌集团董事长杨俊斌先生和中国建筑科学研究院宋涛研究员在主席台就坐，合肥工业大学校长梁樑、富煌集团董事长杨俊斌为大会致辞。

简短的开幕式后，10 位空间结构专家围绕空间结构理论与实践创新、应用领域传承与拓展作了精彩的报告。半天的专题研讨会结束后，与会人员参观了富煌钢构智能制造基地、富煌集团展厅，对富煌的发展历程与发展状况进行了细致、深入的了解。

## 北京工业大学与中国钢结构协会空间结构分会将联合承办国际壳体与空间结构 2021 年学术交流会 (IASS2021)

在 2019 年 10 月 6 日召开的 IASS 执委会上，IASS 执委、中国钢结构协会空间结构分会理事长、北京工业大学薛素铎教授详细汇报了 IASS2021 的各项筹备工作，经讨论，会议完全同意了承办单位提出的会议主题、时间、地点、日程安排以及费用等，并完全同意由北京工业大学和空间结构分会承办。

IASS 成立于 1959 年，经历 60 年的发展，是国际空间结构领域最有影响力的学术组织。伴随我国经济技术水平和社会的快速发展，空间结构建设规模居全球首位。结合 2008 年北京奥运会和 2010 年上海世博会，IASS2006 和 IASS2010 分别在中国的北京市和上海市成功举办，有力地推动了我国空间结构与国际同行的交流与合作。

近十年来，我国空间结构在建设规模和技术水平上再跃新台阶。以 2022 冬奥会工程建设为契机，北京工业大学和中国钢结构协会空间结构分会经过认真的策划和筹备，并经与各方沟通和积极申请，于 2018 年 IASS2018 会议期间获得了执委会的认可，并原则同意 IASS2021 会议在北京召开。

各位空间结构专家的报告，涉及了商业综合体、住宅、游乐设施、体育、工业等领域的多种形式空间结构体系、装配式结构体系以及空间结构节点的研究与应用的前沿性工作，展现了空间结构应用领域的传承与拓展，充满了浓厚的学术气氛。

大会报告完成后举行了简短的闭幕式，宋涛研究员致闭幕辞，并对本次专题会议进行了总结。他以空间结构在不同领域的应用出发，从超大型工程（如 FAST）到小型科学仪器中应用，从传统结构到空间结构与数学的关系，阐述了空间结构的实践与传承。最后他对承办、协办单位周到细致的组织工作表示了衷心的感谢。

到会的空间结构专家学者还于 11 月 1 日晚召开了关于空间结构发展的座谈会。河南大学杜文风教授对 2020 年第十八届空间结构学术会议的初步筹备情况作了报告。与会代表一致同意 2020 年在河南开封召开第十八届空间结构学术会议，由河南大学与天津大学中原先进技术研究院承办，会议主题拟定为“空间结构：传承与发展”。

IASS2021 学术交流会成功申办，是北京工业大学空间结构研究中心和空间结构分会秘书处共同努力的结果。IASS 荣誉会员、空间结构分会名誉理事长蓝天教授、空间结构分会前理事长张毅刚教授一直关注会议的申办工作，并提出了很多宝贵建议，为 IASS2021 申办成功发挥了重要作用；空间结构分会秘书处为申办成功完成了大量准备工作，并印发了精美的宣传册。

IASS2021 的成功申办也是全体会员单位支持分会开展各项工作的成果之一，当然也离不开北京工业大学的大力支持。目前，北京工业大学空间结构研究中心与空间结构分会秘书处已启动会议筹备工作。相信在各方的共同努力下，IASS2021 必将是一次高质量的国际空间结构学术盛会。



## 70年，中国空间结构取得了哪些傲人成就？

2019年，伟大的中华人民共和国成立七十周年。在这七十年间，中国的各项建设事业都取得了辉煌的成就，建筑结构也得到了飞跃发展。其中特别值得一提的是空间结构，21世纪以来，中国空间结构的发展已经初具规模，呈现一片蓬勃向上的景象，它从无到有，迅猛成长，如今已跻身于世界先进的行列，受到世人的瞩目。

## 薄壳与折板

中国在空间结构方面应用最早的当属薄壳结构。从20世纪50年代开始就对薄壳结构开展了大量的理论研究工作，也有一些工程实践，特别是一些大跨度屋盖，例如新疆某机械工厂金工车间直径60m椭圆旋转面薄壳，广东番禺人民大会堂直径55m八角形圆球壳，北京火车站35m×35m和北京网球馆42m×42m方形双曲扁壳等，均采用现浇混凝土薄壳结构。

## 空间网格结构

## (网架结构)

中国网架结构的发展一开始就和体育馆建设息息相关。20世纪60年代中期，北京首都体育馆屋盖首次采用了正交斜放的平面桁架系网架，平面尺寸为99m×112m。

网架结构还经常应用于诸如会堂、影剧院、展览馆、车站、码头、候机大厅等公共建筑，最早的如长沙火车站。此外网架结构还用于飞机库，如1990年北京首都机场的四机位机库。随着大规模工业的发展，网架结构以其大柱网、大跨度以及屋盖可悬挂设备的特点，在工业厂房中也得到了广泛的应用，如2006年广东肇庆亚洲铝材工业园型材挤压车间。



## (网壳结构)

在中国空间结构发展的早期，网壳结构应用不多，网壳结构首先是应用在体育建筑中。1990年第十一届

亚洲运动会新建的体育馆中就有两个造型各异的网壳结构。为了召开1996年冬季亚洲运动会，哈尔滨建造了黑龙江速滑馆，主体结构采用由中央圆柱和两端半球壳组成的双层网壳。近年来，网壳在工业建筑的散料仓库中也得到了广泛应用，与传统刚架或拱相比，其在材料消耗与造价上都有优势，典型的如河南鸭河口电厂干煤棚。



## (铝合金结构)

铝合金材料具有结构自重轻、耐腐蚀性能好等优点，其密度只有钢材的1/3，抗拉强度可达300MPa。一般不需做表面处理即可达到建筑防腐要求，适用于高温高湿、海边及重度污染环境。自20世纪50年代以来，欧美发达国家开始研究在建筑结构中应用铝合金网格结构，我国在1997年就引进了中国第一个铝合金穹顶体育建筑—上海国际体操中心。进入21世纪以来，铝合金结构在我国得到长足发展，如2015年的南京牛首山佛顶宫，其跨度、单个体积均居世界第一。

## 索结构

中国对索结构的研究起步比较早，1958年起一些科研机构就开始对不同索结构形式进行理论计算、模型试验等方面的研究，并在大跨度体育建筑中推广应用，如北京工人体育馆的圆形双层悬索体系。进入21世纪以来，索结构出现了令人瞩目的进展。张弦结构是由刚度较大的刚性构件和柔性索通过撑杆连接而组成，由于索的参与，大大地增强了结构的整体刚度。



最早用于大跨度的单向张弦桁架是上海浦东机场一期航站楼，其后又在不少体育馆、展览馆上采用，如山东东营的黄河

口模型试验大厅，跨度达到了148m。另外，中国近年来开始新建高速铁路，为此建造了大量的火车站，其车站大厅和站台雨棚也采用了数量可观的张弦桁架，例如新广州站。张弦桁架还向双向发展，2008年北京奥运会国家体育馆的比赛区上覆盖144.5m×114m的双向张弦桁架。张弦结构向空间发展，就形成张弦网壳，近年来在体育馆中得到广泛应用，如北京奥运会羽毛球馆。近年来索结构也被广泛应用于玻璃幕墙，如北京新保利大厦的玻璃幕墙和重庆江北国际机场T2航站楼。

## 膜结构

膜结构是建筑结构中最新发展起来的一种形式。中国膜结构的发展起步较晚，体育建筑可以说是膜结构应用的突破口。1997年在上海举行的第七届全国运动会，膜结构被用在八万人体育场的看台挑篷，这是中国第一次将膜结构用在大面积的永久性建筑上，具有深远的影响，青岛颐中体育场是中国第一个靠自己力量设计与施工的大型体育场。上海世博会充分展示了膜结构在建筑领域的广泛应用与良好发展前景。中国早期膜结构所采用的膜材主要是P类以及G类，2008年北京奥运会的国家游泳中心又开始采用E类膜材，国家游泳中心外形为尺寸177m×177m×31m的立方体，其外墙和屋面结构全部由异形空间刚接网架构成，网架内外均按照多边形网格的外形铺设透明的ETFE充气枕，赋予整个建筑以晶莹剔透的外表，故称之为“水立方”。



## 结语

七十年来，中国空间结构的应用范围和尺度都不断在更新和扩大，在各种文体体育、交通运输和工业建筑中无不见到形式各异的空间结构。中国每年所建的空间结构，不论是数量、跨度和面积都是全球领先的。

中国的空间结构已取得了巨大进步，但距离空间结构强国还有差距，在中国经济不断发展的前提下，中国大地必将出现更加美好强大的空间结构。

(中国建筑科学研究院 蓝天研究员)

2019世界结构大奖 The Structural Awards 获奖名单揭晓，由中国建筑设计研究院设计的“青岛世界博览城”项目在经过“结构艺术奖”、“大跨度结构奖”两项提名后，最终荣获“结构艺术奖(建筑物类)”。

青岛世界博览城位于青岛市黄岛区，处于整个博览城的核心区域，紧邻黄海海面。建筑通过中央十字展廊，将12个独立展厅联系起来，同时展廊空间向周边道路、环境打开，形成开放式布局，让博览建筑成为独具魅力的新型城市景观。

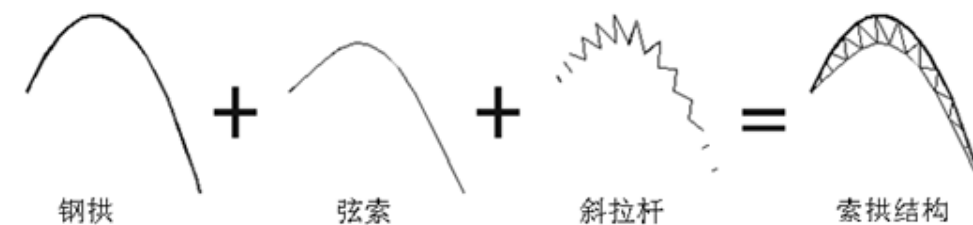
建筑内在的空间结构形成了外部形态的美学韵律和视觉冲击力，使建筑形象真实而动人。包括展廊与展厅两部分，以中央十字展廊为功能组织核心，南北各布置6个、共12个独立展厅单元(尺寸74.4m×136.4m，采用变标高的空间桁架钢结构)。展廊平面呈十字型布置，东西向长507m，南北向长287m，主拱和次拱方向分别设置两道温度缝，最高点标高为35.0m。



下部主体结构为混凝土框架体系，地上一层，局部设置一层地下室。十字展廊屋盖结构为预应力索拱结构，索拱平面外顺柱面网壳沿纵向利用高强钢拉杆通长设置交叉支撑，以保障索拱面外的稳定。

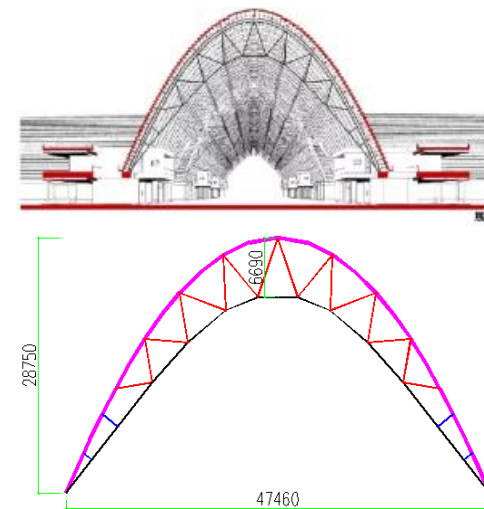
结构设计使用年限为50年，抗震设防烈度为7度(0.1g)，II类场地土。50年重现期基本风压0.6kN/m<sup>2</sup>(用于变形计算)，100年重现期基本风压0.7kN/m<sup>2</sup>(用于承载力计算)，地面粗糙度类别A类。

拱方向跨度为47.46m，矢高为28.75m，矢跨比为1:1.6。次拱方向跨度为31.56m，矢高为19.15m，矢跨比为1:1.6，均属高矢跨比拱形。主次拱沿其



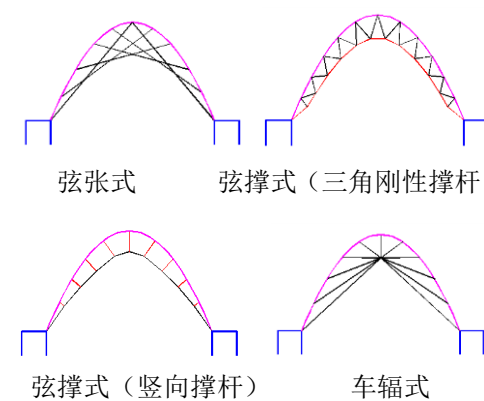
## 青岛世界博览城荣获 The Structural Awards

纵向，每隔4.5m布置一榀，典型榀主拱如下图所示。



对于拱而言，随着其矢高的逐步增大，水平向抗侧刚度明显减弱，风荷载引起的跨中弯矩剧增，横向风荷载逐渐成为其主要控制荷载工况。

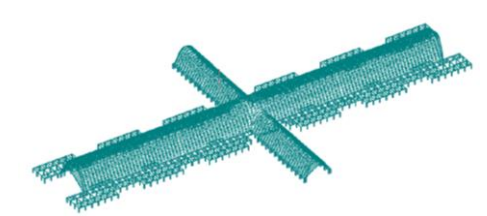
本工程进行了多种典型体系对比，最后采用一种新型的三角形柔性撑杆的弦撑式索拱结构。该新体系采用单榀索拱采用钢拱(上弦)+拉杆+拉索(下弦)的空间结构体系。



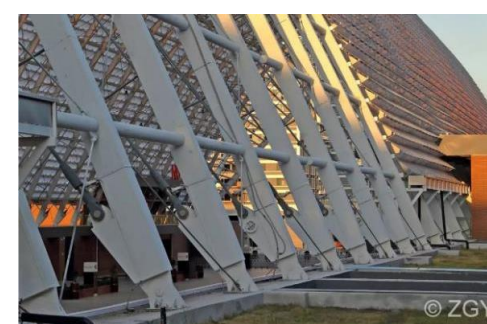
展廊结构由主拱、次拱、交叉拱、拱间的联系杆和斜拉杆组成，主次拱端设置端拱；每榀索拱结构由钢拱、弦索和两者之间的钢拉杆组成，索拱结构是索和拱组成的一种杂交结构。利用索的拉力或撑杆提供的支承作用以调整结构内力分布并限制其变形的发展，进而有效提高结构的刚度和稳定性。拉索与撑杆相比于传统的桁架杆件，截面更为纤细轻盈，从而营造

出通透美观的室内观感，展现结构的自身美。

下弦拉索采用高钒索，采用热铸的索头和调节套筒，钢拱和弦索之间拉杆采用等强钢拉杆，主拱拉杆直径为φ50和φ35，次拱拉杆直径为φ45和φ30，主拱拉索为φ68，次拱拉索为φ56。拱脚根部的斜腹索对索拱结构力学性能改善微弱，且风荷载作用下，索力易松弛。本项目取消了靠近拱脚区域的斜腹索并替换成刚性撑杆(φ50x4.5)。主拱主要梁截面箱500x300x20x25，次拱主要梁截面400x250x20x25。



设计时进一步探讨了影响此结构形式力学性能的多个关键因素(索桁架顶部结构、网格数量拱脚支座水平刚度、支座是否允许滑动等)。进行了多项专项分析并进行了试验，如索拱稳定分析、施工张拉过程分析、温度分析、索夹节点试验等。对索夹及拱脚进行有限元分析并进行优化，与建筑达到最完美融合。



高雅、轻巧的结构构件，勾勒出整个中央展廊的宏大的场所空间，均匀布置的结构杆件体现出强烈的韵律感，巧妙优化的结构节点，充分融入了整个建筑空间，丰富而不杂乱，同时轻盈的结构系统也减少了对空间的压抑感。



(中国建筑设计研究院有限公司 孙海林)