

学术 活动

2025 年气承式膜结构行业发展特邀研讨会成功召开

2025 年 6 月 5 日，为促进我国气承式膜结构行业的可持续发展，提升行业技术水平，中国钢结构协会空间结构分会在北京召开了“2025 气承式膜结构行业发展特邀研讨会”，会议邀请气承式膜结构行业会员单位的企业负责人共同出席。

会议针对我国气承式膜结构行业自律、技术研发创新等问题达成了以下

（上接第一版）

林，天津城建大学副校长、天津大学教授陈志华，特邀专家贺明玄、霍文营、束伟农，分会副理事长黄达达、李中立，哈工大教育发展基金会秘书长白杨，哈尔滨工业大学研究生院常务副院长宗影影，哈尔滨工业大学土木工程学院院长陈文礼，中国金属结构协会铝门窗幕墙分会会长王晓军等共同出席开幕式。

**特邀专家聘任仪式**

为进一步提升空间结构分会的社会影响力，分会决定聘任澳大利亚工程院院士、河海大学未来技术学院院长谢亿民，全国工程勘察设计大师、中国电子工程设计院股份有限公司副总工程师/总结构师陈彬磊，清华大学建筑设计研究院有限公司总工程师、清华大学研究员刘彦生，中国建筑设计研究院有限公司总工程师、结构工作室主持人王载，中建钢构股份有限公司总工程师陈振明担任空间结构分会特邀专家。分会理事长薛素铎向到场的特邀专家颁发了聘书。

**沈世钊空间结构菁英奖颁奖**

“沈世钊空间结构菁英奖”由我国空间结构的奠基人之一，沈世钊院士捐资设立，是哈工大教育发展基金会“世钊基金”的一个重要组成部分，旨在表彰在空间结构领域取得突出成绩的优秀青年人才。希望通过这一奖项的激励，能够吸引更多优秀的年轻人投身于空间结构领域的研究和实践中，为我国空间结构事业的发展注入新的活力。

哈尔滨工业大学土木工程学院副院长武岳介绍了“沈世钊空间结构菁英奖”的评审过程，最终评选出哈尔滨工业大学教授支旭东，哈尔滨工业大学（威海）副校长、海洋工程学院院长钱

4 点共识：1、有序竞争、合作共赢，共同维护和提升气承式膜结构行业的经营秩序。2、基于《膜结构工程消耗量标准》（T/CSCS 035-2023），建立完善的市场指导价发布机制。3、依托行业专家，搭建气承式膜结构技术服务平台，提供气膜行业关键技术与工程指导价咨询服务。4、着力解决气承式膜结构防火、建筑物理性能提升、除雪及

宏亮，河北工程大学副校长、天津大学教授刘红波，浙江大学教授许贤，北京市建筑设计研究院股份有限公司结构设计总监、总工程师甄伟，中建研科技股份有限公司副总工程师、工程咨询结构院院长马明 6 位获奖者。沈世钊院士和范峰副校长向获奖者颁奖。

**大会报告**

本次会议共邀请薛素铎教授、洪汉平院士、谢亿民院士、丁洁民大师、范峰副校长等专家做了包括《我国空间结构标准体系发展》、《考虑空间相关性与相干性的地震动模拟及结构响应估算》、《适用于建筑结构设计的广义拓扑优化方法》、《上海崇明自行车馆结构设计思考》、《既有大跨空间结构性能提升技术研究进展》、《高强钢拉杆进展与柔性支撑体系抗震性能研究》、《张弦木拱钢架混合结构体系研究及应用——沈阳王家湾速滑馆屋盖为例》、《既有索结构性能评估与提升改造技术研究》、《机遇与挑战——膜结构发展与未来》、《热轧方矩管结构及高效建造技术研究》、《海外大型体育场大跨度结构设计咨询实践》、《悬索结构传力与工程应用》、《创作驱动创新，研究推动设计——南京未来花园、临沂启阳机场等项目实践》、《“特立方”嵌入式模块化钢结构建筑体系与数字孪生》、《膜建筑与结构的协同创作》、《超大跨度超大进深机库工程建造技术创新研究与应用》、《AI 时代背景下的结构设计》、《关于人工智能赋能建筑设计的思考》、《大跨空间结构抗爆炸研究进展》、《深远海养殖平台关键技术研究与应用》、《绿色低碳胶合木空间网格结构若干研究进展》、《张拉整体结构的拓扑优化与动态控制研究》、《大跨度屋盖隔震结构体系研究与工程实践》、《复杂使用条件下空间结构关键技术问题》、《异形气膜索膜协同分析与设计》、《国产高性能 PVC 膜材发展现状及未来展望》、《多维挑战下的高落差与超大跨气承式膜结构

产品化标准化等制约行业发展的技术瓶颈。

**会议总结**

中国钢结构协会空间结构分会号召全体气承式膜结构企业共同遵守，共同维护和提升气承式膜结构行业的经营秩序。期待在分会和各企业的共同努力下，积极促进我国气承式膜结构行业的健康可持续发展。

工程实践》27 个精彩的大会报告，同时组织了 AI 与空间结构沙龙研讨。郁银泉、王元清等担任大会报告主持。

**分组报告**

会议按网架结构、索结构、膜结构三个主题安排 3 个分会场，共有 57 个报告，涵盖了空间结构理论、计算分析、试验、设计、安装等方面的最新进展。

**闭幕式**

闭幕式由空间结构分会副秘书长李雄彦主持。本次会议特别感谢会议承办单位哈尔滨工业大学、北京工业大学，协办单位浙江锦达膜材科技有限公司、中成空间（深圳）智能技术有限公司、巨力索具股份有限公司、山西清露金华节能科技有限公司、江苏中闽钢构有限公司，支持单位浙江宏泰新材料股份有限公司、深圳市三鑫膜结构有限公司、瑞士法策公司、贵州钢绳股份有限公司、徐州九鼎钢结构有限公司、江苏八方钢构集团有限公司、江苏蓝华建设有限公司、江苏恒久钢构股份有限公司、徐州通域空间结构有限公司、安徽玖环实业有限公司、吴桥盈丰钢结构铸钢件制造有限公司的大力支持。分会领导向各单位赠送礼品答谢。

分会前理事长张毅刚教授对本次大会的成功召开给予充分的肯定，并指出了空间结构未来需要重点关注的四个方面：1、既有大跨空间结构加固改造与运维管理。2、开拓空间结构新的领域，包括功能性的构筑物。3、空间结构国际化的需求。4、AI 在空间结构领域的应用。

**工程参观**

会后，参会代表到第九届亚冬会开幕式场馆哈尔滨国际会展体育中心改造项目和国家重大科研仪器“大跨空间结构风-雨-热-雪全过程联合模拟试验系统”进行了参观。



中国钢结构协会  
空间结构分会

中国工程建设标准化协会  
空间结构专业委员会

中国土木工程学会  
桥梁及结构工程分会

空间结构简讯

2025 年第 2 期    总 204 期    2025. 06

SPATIAL STRUCTURES

通讯地址：【100013】北京 北三环东路30号 中国建筑科学研究院建筑结构研究所    投稿邮箱：spast@cabrtech.com

本期内容

“空间结构的事故、运维与加固”专题研讨会暨空间结构专业委员会第一届第四次工作会议在重庆成功举办



第十九届全国空间结构技术交流会在哈尔滨成功召开



2025 年气承式膜结构行业发展特邀研讨会成功召开

无环索弦支网壳屋盖结构设计——  
瓊海奥体中心体育馆



学术 活动

“空间结构的事故、运维与加固”专题研讨会暨空间结构专业委员会第一届第四次工作会议在重庆成功举办

2025 年 4 月 25-26 日，由中国工程建设标准化协会空间结构专业委员会、中建研科技股份有限公司、国家建筑工程技术研究中心主办，重庆大学承办的“空间结构的事故、运维与加固”专题研讨会在重庆顺利召开。



随着我国建设事业的蓬勃发展，空间结构作为一种高效创新的结构形式，在众多公共建筑、工业建筑中得到了广泛应用，其安全问题已成为关乎公共安全与社会可持续发展的关键议题。来自全国各地的 60 余位空间结构领域的专家学者参加本次会议，共同研讨了空间结构事故分析、运维管理与改造加固等学术问题。

会议开幕式由中国工程建设标准化协会空间结构专委会刘枫主任委员主持，王俊理董事长与杨庆山教授分别致辞。

中国工程院院士、重庆大学周绪红教授，中国工程建设标准化协会王俊理董事长，中国工程院外籍院士、重庆大学田村幸雄教授，中国建筑科学研究院刘枫研究员，中国建筑科学研究院赵基达顾问总工，全国工程勘察设计大师、中国建筑西南设计研究院有限公司冯远总工，全国工程勘察设计大师、

先后致辞。

中国工程院院士、哈尔滨工业大学教授沈世钊，分会前理事长、北京工业大学教授张毅刚，澳大利亚工程院院士、河海大学未来技术学院院长谢亿民，加拿大工程院院士、哈尔滨工业大学（深圳）教授洪汉平，全国工程勘察设计大师郁银泉、范重、冯远、丁洁民、李亚明、朱忠义，北京建筑大学原校长、北京工业大学教授张爱

（下接第四版）

第十九届全国空间结构技术交流会在哈尔滨成功召开

## 无环索弦支网壳屋盖结构设计——瓯海奥体中心体育馆

随着国家大力发展体育事业，近年来各类高层次、大跨度的体育场馆投入建设，场馆内部空间的需求也越来越大，常规钢结构屋盖已不能满足建筑师对结构轻盈性的追求，预应力钢结构广泛运用于各类体育场馆。弦支穹顶/网壳体系作为近年来新兴的结构体系，其受力合理、造型美观、造价经济，备受建筑师的青睐。自 2001 年起，我国建成及建设中的几十个弦支穹顶/网壳屋盖项目中，均采用环索+径索的张拉体系，该体系的运用已十分成熟，但仍存在着抗连续倒塌能力弱、施工张拉端多等弊端。2016 年，北京工业大学薛素铎教授创造性地将常规弦支穹顶结构的环索+径索张拉体系变为环形交叉索系，提出了无环索弦支穹顶结构体系，将结构的受力性能由“整体受力”变为“局部受力为主整体受力为辅”的双重受力体系。该体系相比环索+径索的张拉体系，有着抗连续倒塌能力强、索力平均、施工张拉端少等优点。

## 一、工程概况

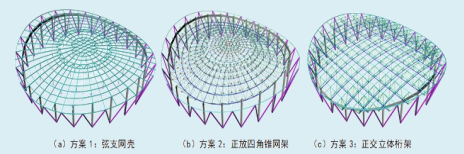
瓯海区奥体中心项目位于浙江省温州市瓯海区娄桥街道商汇路亚运公园南侧。建筑规模 18.2 万 m<sup>2</sup>。瓯海奥体中心体育馆呈曲线型，平面投影呈椭圆形，屋盖型式采用无环索弦支网壳结构，屋盖结构主要由上部网壳、下部无环索交叉索系及竖向撑杆组成，上部网壳部分为曲线型焊接箱型钢结构。屋盖主体支承于 24 根外圈环梁上，屋盖最大跨度约为 100.6m。上弦网壳为圆柱面，矢高 9.5m。设计使用年限 50 年，建筑结构安全等级为一级，抗震设防类别为乙类。建筑效果图如图所示（红圈处为体育馆）。



## 二、结构体系比选

体育馆下部主体结构采用钢筋混凝土框架结构体系，屋盖结构在方案阶段进行了弦支网壳（方案 1）、正放四角锥网架（方案 2）、正交立体桁架

（方案 3）三种结构方案的比选，三种方案采用相同的跨度、结构高度、外部荷载及支承条件。



方案对比结果如下：1、在用钢量方面：方案 1 用钢量最少，相比其他方案节省约 12%，但弦支网壳预应力施工费用较其他方案较高，综合造价相差不大。2、在结构刚度方面：方案 1 挠度最小，整体刚度更好。3、在制作与安装方面：方案 1 杆件数量最少，节点最少，制作及安装较为方便。方案 2 杆件及节点数量过多，焊接工作量大。方案 3 杆件及节点适中。

经与建筑专业沟通配合，本工程屋盖结构需体现轻盈的结构美感，结合上述分析结果，选择方案 1 弦支网壳结构方案。

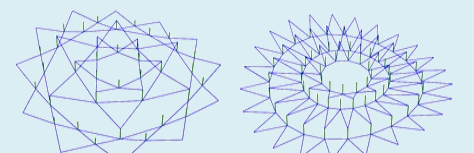
## 三、下弦张拉体系选型

弦支网壳结构由上弦单层网壳及下弦张拉体系组成，对下弦拉索施加预应力以对上部单层网壳提供重力荷载作用反向的内力及变形。设计中对不同的下弦张拉体系进行了对比分析，主要比选重点可归纳为：结构传力途径直接，变形合理，挠度满足要求；结构安全可靠，并存在一定的冗余度，在偶然荷载下不出现连续性倒塌；张拉体系简洁，尽可能采用较少的铸钢节点以减少工程造价；施工张拉简单，尽可能设置较少的张拉端，减少锚具数量及施工张拉费用。

针对上述问题，提出了无环索体系（方案 1）及环索+径索体系（方案 2）如图所示。分析中采用相同的外部荷载、支承条件及上弦网壳布置。方案对比结果如下，1、在传力途径方面：方案 1 布索方式为直线形，受力以局部为主整体为辅，荷载直接通过索传递给支座，相比方案 2 的整体受力结构传力途径较为简洁直接。2、在用钢量方面：两种方案钢材用量基本一致。3、在结构刚度方面：两种方案基本一致，均满足设计要求。4、在结构冗余度方面：断索分析表明，方案 1 即使在断开 5

根拉索的情况下，仅局部变形较大，未有杆件完全退出工作，不会发生连续性倒塌；而方案 2 在断开最外圈 1 根环索的情况下即发生了连续倒塌。5、在节点造价方面：方案 1 铸钢节点数量仅为方案 2 的 50%，将大大减少节点造价及安装费用。6、在施工张拉方面：方案 1 张拉端数仅为方案 2 的 40%，将减少张拉难度及施工张拉费用。

综合以上多方面因素，本工程下弦张拉体系采用方案 1 无环索体系，在保证建筑美感的同时，结构设计合理、安全、经济。

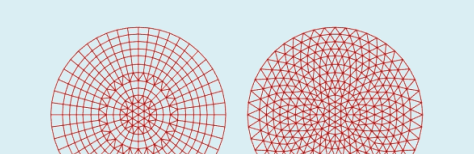


(a) 方案 1：交叉索系（无环索） (b) 方案 2：环索+径索

## 四、无环索体系关键问题

## （一）上弦网壳选择

布置方案上，在相同外部荷载、支承条件、下弦拉索布置及预应力的前提下，对比了两种方案凯威特-肋环型（方案 1）和凯威特-联方型（方案 2）。



(a) 方案 1：凯威特-肋环型 (b) 方案 2：凯威特-联方型

方案 1 及方案 2 在结构刚度和用钢量上基本保持一致，但方案 1 杆件根数比方案二少约 21%，节点数量少约 34%，在施工及杆件加工方面较为方便。且方案 1 多数节点只有四根杆件相连，节点处理较为简单，可采用节点板、筒形节点、鼓型节点或十字板节点；而方案 2 多数节点有 6 根杆件相连，节点形式较为复杂。设计中为方便施工，采用方案 1 凯威特-肋环型上弦网壳布置。

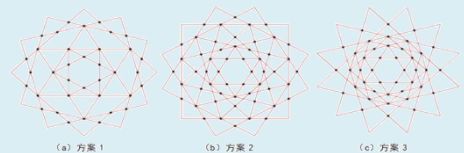
## （二）下弦拉索布置选择

下弦拉索采用无环索体系，无环索体系布置分为三角形及四边形两种布置形式，根据环数可进行四边形及三角形的相互组合。拉索布置方式需遵循以下原则：1、对称性原则，施工张拉一般采用对称张拉，故拉索布置需保证沿两主轴对称。2、简洁性原则：建筑师要求拉索的布置尽量简洁，并且简洁的

## 无环索弦支网壳屋盖结构设计——瓯海奥体中心体育馆

布置将减少撑杆的数量，从而减少撑杆的上下铸钢节点的数量。3、施工便捷性原则：本工程屋盖为柱面网壳，每根拉索曲线及初始拉均不同，为保证施工张拉的便捷性，拉索曲线因尽量统一。设计中根据内中外环不同四边形及三角形的组合，进行了如图所示的三种布置形式的对比分析。

方案对比结果如下：1、三个方案钢材用量基本相同。2、方案 2 及方案 3 索根数相比方案 1 多 25%，将存在更多的施工张拉端，将增加施工难度及施工费用。3、方案 2 及方案 3 撑杆数量较多，撑杆上端万向较及下端索夹均为铸钢节点，将引起工程造价增加。4、方案 2 及方案 3 不同拉索曲线较多，拉索初始拉力种类较多，增加了施工仿真模拟及施工张拉的难度。

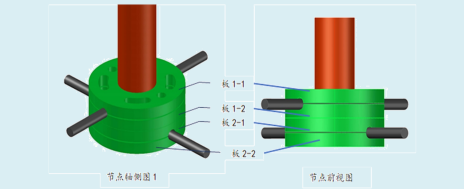


综合以上因素，设计中下弦拉索布置采用方案 1 的布置方式。

## （三）索夹节点

在环索+径索体系中，各圈环索与径索之间的夹角均相同，且在张拉过程中结构会自动调整各环索径索之间的角度达到平衡态。而本工程各层拉索之间不仅水平投影存在多种角度，并且竖向投影也存在多种角度，对施工张拉过程中索夹的允许调整角度提出了较高的要求。索夹设计中，需考虑施工张拉过程中允许拉索水平相对转动以适应施工中的不确定性。

索夹节点如图所示，主要由四块节点板及螺栓组成。



板 1-1 与撑杆之间可采用焊接，可根据实际情况加设肋板以优化受力。板 1-1 和板 1-2 夹持位置在上的索，板 2-1 和板 2-2 夹持位置在下的索。板 1-1 和板 1-2 之间有限位孔 1，板 2-1 和板 2-2 之间有限位孔 2，通过在限位孔处

设置内六角螺栓保证板 1-1 和板 1-2 之间不能相对转动，板 2-1 和板 2-2 之间也不能相对转动。四块板上有四处上下贯通的长圆孔，通过在长圆孔处设置高强螺栓可以将 4 块节点板成为整体，也可以实现板 1-2 和板 2-1 之间的相对转动，从而实现两根索之间的角度可以在一定程度上调整。

## （四）预应力张拉施工

本工程预应力张拉施工存在以下难点：1、同步张拉节点数多，每层索需同步张拉，且每根索需两端张拉，最多 24 个张拉端同时张拉。在张拉单位选择上需严格要求，需有类似多节点同步张拉工程经验。2、拉索分批张拉顺序需合理选择，需要分批次逐步张拉到索力的 100%。由于屋盖受力状态存在整体受力，外圈张拉时也会对中圈及内圈索力有影响，设计中需进行全过程施工仿真计算，事先经过计算确定各批次目标索力。3、撑杆垂直度控制：由于拉索的张拉存在着变形，撑杆会随着拉索的变形产生位移。在张拉施工前需进行施工仿真计算，预先计算出撑杆各个张拉阶段的位置，并进行监测，若在张拉期间与计算位置存在偏差需进行人工复位，保证张拉结束时撑杆垂直。4、拉索精准下料：本工程拉索均采用两段可调节索，结构的最终成形态直接和拉索的下料长度相关，由于拉索的调节长度仅能满足一定的误差，因此拉索需精准下料。设计中尽可能保证拉索下料在钢结构施工完毕后进行，根据现场情况精准测量施工偏差，并对拉索下料图进行相应的修正，保证下料长度误差控制在 0.02%之内。5、拉索的索力及变形监测：拉索张拉过程中需对索力及网壳关键点的位移进行实时监测，并与施工仿真计算得到的理论值进行对比，以此判断结构是否安全。

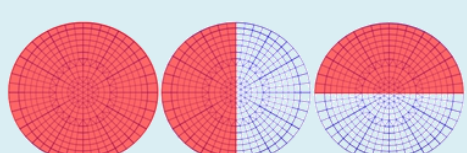
## 五、结构分析结果

## （一）结构变形

屋盖结构在恒荷载+活荷载标准值组合下最大竖向位移 162mm（向下），约为跨度的 1/621；在 0.9 倍恒荷载+最大上吸风荷载组合下跨中最大竖向位移 229mm（向上），约为跨度的 1/560，小于 1/400 的限值，满足要求。

## （二）稳定分析

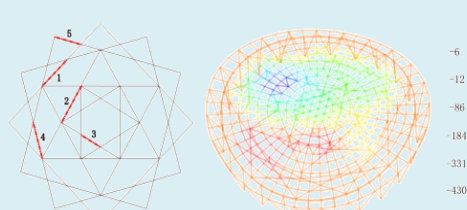
屋盖稳定分析时考虑恒载+满跨活载、恒载+半跨不利活荷载三种工况，并考虑初始几何缺陷影响，初始几何缺陷分布采用结构的一阶屈曲模态，缺陷最大值按结构跨度的 1/300 取值。经计算结构均满足设计要求。



满跨活载 半跨活载-左右 半跨活载-上下

## （三）断索分析

为验证无环索体系优异的抗连续倒塌能力，对屋盖进行了断索分析，分五种工况逐渐断开如图所示的 1~5 根拉索。拉索断开后，结构向断索方向倾斜，产生较大变形，剩余部分索的内力有所增大，但均未破断。当断开 5 根拉索时，结构变形如图所示，最大竖向变形 430mm 约为跨度 1/230，最大索力达 0.4 倍破断荷载，上弦杆件部分进入塑性但没有杆件完全退出工作，结构不会发生连续性倒塌。



## 六、结语

本文以瓯海奥体中心体育馆屋盖结构设计为例，从结构方案选型、张拉体系选型、上弦网壳及下弦拉索的布置选择、索夹节点的优化设计、预应力施工的重难点问题解决等方面对结构设计的过程进行了阐述，设计在保证建筑功能需求和方案效果的同时使结构受力更合理，施工更便捷，建造成本更节约。

本工程为无环索张拉体系实施的首例工程，有着里程碑式的意义，为今后的无环索弦支网壳结构打下了基础，期待该体系在后续工程中能广泛运用，成为代表中国特色的空间张拉结构体系。

中南建筑设计院股份有限公司

纪 晗