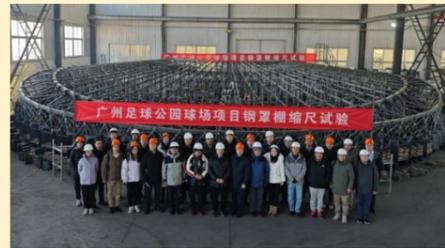


## 广州足球公园项目索承钢罩棚缩尺试验观摩会成功举行

2024年12月14日，中国工程建设标准化协会空间结构专业委员会与中国钢结构协会空间结构分会联合主办的广州足球公园项目索承钢罩棚缩尺试验观摩会在天津成功举行。空间结构专委会主任委员刘枫研究员、空间结构分会理事长薛素铎教授等来自北京、天津、河北的43位空间结构专家参加了本次观摩会。



该项试验由中国建筑科学研究院有限公司负责开展。中国工程建设标准化协会空间结构专业委员会秘书长马明主持了本次观摩。首先由广东省建筑设计研究院有限公司的副总工区彤做了广州足球公园球场屋盖钢结构设计的介绍，然后由中建研科技股份有限公司工程咨询结构院副院长郝玮做了试验设计与进展情况的介绍。

### 1. 结构设计概要



广州足球公园球场位于广东省广州市，地上4层，地下2层，钢屋盖平面尺寸长346m，宽280m，混凝土结构

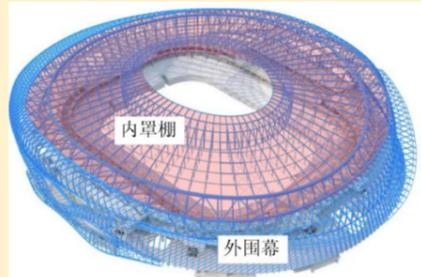
(上接第1版)

本次空间结构学术盛会涉及体育场馆、会展中心、航站楼、火车站、摩天轮和大型钢冷塔等领域，内容包括理论分析、工程设计、索膜结构、网格网壳结构、形态创构及优化、工程施工、特种设备及其它等多个主题，共奉献主题报告35场，分会报告43场，交流最新研究成果与工程实践，深入地探讨技术创新问题，展望空间结构未来发展趋势。

会议的交流日程虽然压缩到两天，非常紧凑，但热烈、严谨的学术氛围贯穿始终，大家意犹未尽，相信此次会议的召开必将为中国空间结构的发展起到良好的促进作用。大会闭幕式向会议承办单位赠送了牌匾，最后在专委会副主任委员宋涛的闭幕致辞中，此次大会圆满落幕。

会议共收录了论文100篇，汇编成《第二十届空间结

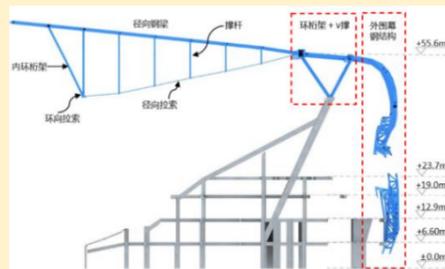
顶标高43.8m，钢屋盖顶标高63.6m。总建筑面积约47.8万 $m^2$ ，建成后座位规模将达到7.3万座，将建设成为国内规模最大、座位数最多，可承办世界杯半决赛、世俱杯等世界顶级赛事的专业足球场。



足球公园的钢罩棚结构采用轮辐式张拉体系，该体系主要结构包括外环桁架和72道径向桁架，外环桁架围绕建筑周围呈马鞍形布置，内罩棚采用半刚性轮辐式索承网格，开口尺寸为85m $\times$ 112m，向内悬挑长度82.5m；外围幕墙结构采用交叉网格结构。

### 2. 试验概要

该项目屋盖为全国第一个无胎架施工的先索后钢施工工艺的预应力半刚性索承结构，创新性地采用了“先索后钢”无胎架施工工艺，施工方法复杂。为保证工程顺利开展，并验证结构安全性，特开展了体育场罩棚屋盖缩尺试验。



为充分验证工程关注的技术问题，本次试验长度相似比采用了1:12.5，模型最大尺寸达到21.77m，最大高度2.48m。从9月份开始模型设计，试验已经历时3个半月，完成了3662根杆件的加工，1296个节点的焊接与安装，720个加载箱的加工与吊挂。观摩会当日试验正处于模拟施工阶段，屋盖模型已经完成最后一榀径向梁的安装，正在安装环向构件。



试验模型环索与3根径向索采用了智慧索，同时还采用了多种索力测量手段与光纤光栅结果进行验证对比，为智慧索的技术应用积累经验。



根据试验安排，屋盖模型在12月20日之前合拢，完成施工模拟阶段工作，之后进行加载试验。试验共加载约200吨质量，对不同荷载布置情况进行试验研究，来验证结构体系承载特性与结构安全性，研究结构的受力模式和可能出现的破坏形态。

中国建筑科学研究院有限公司

构学术会议论文集》，内容涵盖空间网格结构、索膜结构、特殊结构、板壳结构等的计算、理论分析与试验，选型、设计与施工检测等各个方面，对空间结构技术在行业高质量发展进行探索，研究未来发展方向，迎接更广阔的发展空间。

会议得到了以下协办单位和赞助单位的支持：上海通正铝结构建设科技有限公司、中国建筑第八工程局有限公司华南分公司、吴桥盈丰钢结构铸钢件制造有限公司、天津市金万方钢结构有限公司、浙江精工钢结构集团有限公司、巨力索具股份有限公司、天津市钢结构学会、广东坚朗五金制品股份有限公司。

本次会议自始至终都充满了浓厚的学术氛围，呈现出一派欣欣向荣的景象。会议的召开必将为我国空间结构的发展起到良好的促进作用。

# 空间结构 简讯

2024年第4期 总202期 2024.12

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

## 第二十届空间结构学术会议在天津顺利召开

### 本期内容

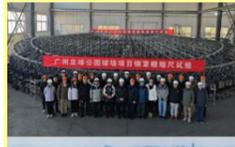
### 第二十届空间结构学术会议在天津顺利召开



### 我国建筑索结构的发展与工程实践



### 广州足球公园项目索承钢罩棚缩尺试验观摩会成功举行



2024年11月9日-10日，由中国建筑科学研究院有限公司、中国工程建设标准化协会空间结构专业委员会（以下简称“专委会”）、国家建筑工程技术研究中心、中建研科技股份有限公司主办，由天津大学、天津城建大学、河北工程大学承办的第二十届空间结构学术会议在天津顺利召开，大会主题为“空间结构技术助力高质量发展”。全国各地参会代表共311人，场面热闹非凡。

中国工程院院士崔愷、岳清瑞，中国工程院外籍院士田村幸雄，中国工程建设标准化协会理事长王俊，天津市科协党组成员、副主席、机关党委书记王亚群，天津大学党委副书记韩庆华，专委会主任委员、中国建筑科学研究院副总工程师刘枫等嘉宾出席会议。大会开幕式由天津大学教授、天津城建大学党委常委副校长陈志华主持。

王亚群党委书记代表天津市科协，热烈欢迎远道而来的各位专家学者，她希望各参会代表依托会议平台，抓住新时代机遇，加强合作，促进成果和技术的转化应用，为实现中国式现代化发展贡献智慧和力量。

韩庆华党委副书记代表天津大学致辞，他提到空间结构作为支撑现代化公共设施的核心体系，正朝着更大覆盖面积、更广跨度以及更加多元化的形态演变，天津大学将加强与各兄弟院校、企业和科研机构的交流合作，携手为我国空间结构高质量发展做出更大贡献。

王俊理事长代表中国工程建设标准化协会致辞，今年恰逢协会45周年，而空间结构专委会也在周年庆典上被评为优秀分支机构。在新时代、新征程中，专委会还需积极发挥专业优势、深化专业融合创新、聚焦城市更新、面向国际舞台，打造新

标杆，塑造新风貌，在工程建设标准化事业中开创空间结构高质量发展新局面。

刘枫主任委员代表主办单位致辞，她在致辞中分享了“以科技创新为主线”、“以高质量发展为核心”两点感受，并提到中建研院未来将始终如一支持空间结构的各项工作，与各位同仁携手同行，共同推进空间结构的发展，为我国建筑行业和城市进步做出新的、更大的贡献。

大会邀请了我国建筑结构领域、建筑领域的院士、大师和专家学者，以专题报告、特邀报告、主题报告、学术沙龙等方式，交流最新研究成果、探讨技术创新、展望未来发展趋势，为我国空间结构的高质量发展搭建一个高水平、高层次的交流平台。

专题及学术报告阶段，工程院院士崔愷、岳清瑞、田村幸雄和全国勘察设计大师范重、朱忠义等空间结构行业专家应邀作报告，为空间结构的高质量发展提供了路径指引。本次会议也邀请了行业建筑专家崔愷、郑方分享研究成果，希望在空间结构学术会议这个平台上，能看到大家一起携手创造更多的空间结构精品。会议特邀两位国际空间结构专家进行交流分享，汇聚全球智慧，书写全球高质量发展与合作的新篇章。

伴随着我国经济转型和产业结构调整，许多空间结构面临着改造更新。会议特围绕该背景举办学术沙龙1场，专家们就空间结构检测与损伤识别、加固改造与性能提升、绿色拆除与循环利用等相关问题的研究成果及设计经验进行交流、讨论，以期汇聚行业智慧、探索适合空间结构特点的改造和更新方法、提升相应的水平与效率。

(下转第4版)

## 我国建筑索结构的发展与工程实践

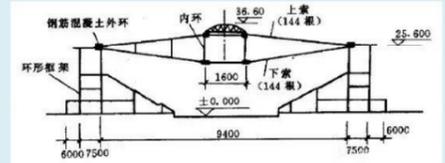
建筑索结构是由拉索作为主要承重构件而形成的预应力建筑结构体系。建筑索结构充分发挥了高强拉索的受拉性能,通过施加预应力来改善结构的内力分布和变形特征,使结构更为经济高效。伴随着拉索索体制作技术的提高以及拉索预应力张拉施工技术日益成熟,建筑索结构已成为现代大跨度建筑结构的首选结构体系之一。

### 一、建筑索结构发展过程

按照建筑索结构发展规律,我国建筑索结构发展过程可分为起步、缓慢发展和快速发展三个阶段。

#### 1. 起步阶段

二十世纪五十年代初期,美国雷里竞技场开启了现代索结构的历史。紧随其后,我国建筑索结构进入了起步阶段。建成于1961年的北京工人体育馆首次采用双层悬索的屋盖,是新中国成立初期的悬索结构代表性工程,采用双层轮辐式索结构,平面形状为圆形,跨度94m。

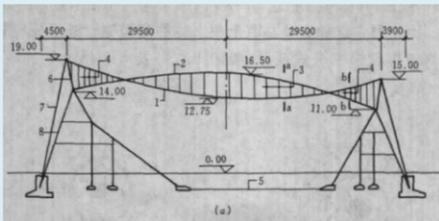


#### 2. 缓慢发展阶段

二十世纪八十年代,由于我国经济、技术基础薄弱,国内外政治局势复杂,建筑索结构工程应用进入了一段积蓄力量的时期,该阶段我国的建筑索结构工程无论是数量和规模都未得到较大的发展,相较于世界建筑索结构发展的速度相对滞后。尽管如此,该阶段基于索结构方面的科研、工程人员在分析理论、构件加工及施工技术等方面持续努力,仍出现了少量的建筑索结构工程,这些工程多是由于体育赛事的需求。

1987年建成的吉林滑冰馆是第六届全国运动会冰上运动场馆,该工程

采用正负曲率索悬索屋盖和钢筋混凝土支承结构体系,底层轮廓平面尺寸为67.4m×76.8m。



#### 3. 快速发展阶段

2000年前后,我国经济快速腾飞,建筑索结构发展也进入新阶段,由刚性子结构与柔性拉索协同受力的复合型索结构得到了快速发展与广泛应用。1998年,天津大学开始进行张弦梁结构相关研究。1999年建成的浦东国际机场T1航站楼是国内第一次应用张弦梁的大型公共建筑工程,跨度最大为82.6m。



2010年至今,国内建筑索结构的发展呈现新趋势,类型由半刚性索结构向柔性索结构过渡,众多大跨度索穹顶结构、悬索结构及索网结构逐渐落成。



2010年,我国第一个大跨度穹顶结构工程——鄂尔多斯伊金霍洛旗体育中心索穹顶结构建成;2016年,国内首个百米级索穹顶——天津理工大学体育馆建成。



2018年,采用悬索结构的会展中

心——石家庄国际会展中心建成;2020年,国家速滑馆建成,是目前世界上类似结构中跨度和规模最大的索网结构。

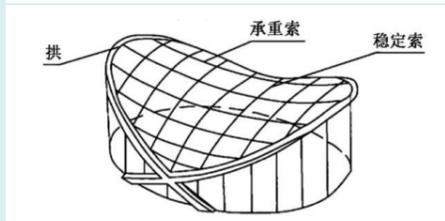
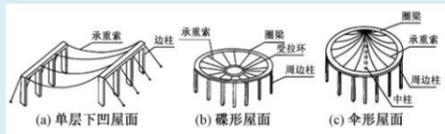


该阶段我国建筑索结构蓬勃发展,无论是数量还是规模均实现了质的突破,在大跨度建筑索结构领域步入了世界大国的行列。

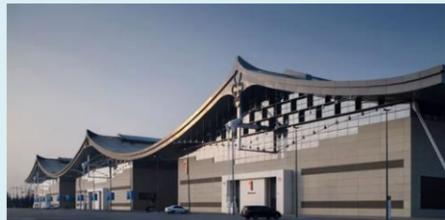
### 二、建筑索结构类型及工程应用

目前工程中常用建筑索结构主要有以下几种形式:悬索结构、索膜结构、张弦(弦支)结构、索穹顶结构等。

#### 1. 悬索结构



单悬索通过索的轴向拉伸来抵抗外荷载作用,结构中不出现弯矩和剪力效应,可充分利用钢材的抗拉强度。同时若利用多根悬索相互交叉组成索网,就形成了多向受力的空间结构——索网结构。悬索结构形式多样,布置灵活,并能适应多种建筑平面,由于屋盖较轻,安装不需要大型起重设备。因此,悬索结构是大跨度屋盖的一种理想的空



间结构形式。我国首次采用双层悬索屋盖的结构是1961年建成的北京工人体育馆,之后又相继应用于天津大学健身房和浙江省人民体育馆等工程中。2018年建成的石家庄国际会展中心,是全球最大

## 我国建筑索结构的发展与工程实践

的双向悬索结构,7个标准展厅全部采用双向悬索结构,主承重结构最大跨度105m,次承重结构最大跨度108m。

### 2. 索膜结构



索膜结构是由多种高强薄膜及辅助结构通过一定的方式施加预应力而形成的一种空间整体张拉体系,具有足够的刚度以抵御外部荷载作用。近年来,索膜结构作为一种新型的结构形式,在体育场馆、展览厅、旅游设施等各种建筑中应用越来越多,这主要是两方面的原因:一方面索膜结构是一种独特、新颖和极富动感的现代建筑形式,使得建筑师可以充分发挥他们的艺术创造力和想象力;另一方面,从结构性能角度看,结构的主要受力构件为高强度受拉索和轻质受拉膜材,通过在索和膜中施加预应力可以提高结构整体抵抗外部效应作用的能力,使得结构可以轻易达到较大的跨度。

表1 我国索膜结构代表性工程应用

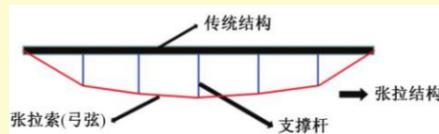
工程名称	建成年份	结构体系类型	规格
威海市体育中心体育场	1997	全张拉空间索膜结构	长轴外缘236m 短轴外缘206m
佛山世纪莲体育场	2006	索系支撑式膜结构	圆环外径310m 内环直径125m
青岛颐中体育场	2007	索膜结构	外包尺寸266m×180m
上海世博会世博轴工程	2009	索膜结构	长约840m 宽约97m
深圳宝安体育场	2011	马鞍形辐式张拉索膜结构	内直径102m
苏州工业园区体育中心体育场	2017	辐式单层索网+膜结构屋面结构	最大跨度260m
枣庄体育场	2017	辐式索膜结构	平面尺寸260m×238m
长春奥林匹克公园	2020	整体张拉索膜结构	平面直径260m
大连梭鱼湾体育馆	2023	双层辐式索结构+膜结构屋面结构	长轴253m 短轴235m

1997年建成的威海市体育中心体育场挑篷采用全张拉空间索膜结构。2006年,采用索系支撑式膜结构建成的超大跨度的佛山世纪莲体育场具有里程碑意义。青岛颐中体育场是我国第一个靠自己力量设计与施工的大型体育场,该建筑由下部钢筋混凝土结构和上部整体张拉式索膜结构屋盖组成。而后索膜结构被先后运用于上海世博会世博轴工程、深圳宝安体育场、苏州工业园区体育中心工程、枣庄体育场、长

春奥林匹克公园和大连梭鱼湾体育馆等代表性大跨度建筑结构中。

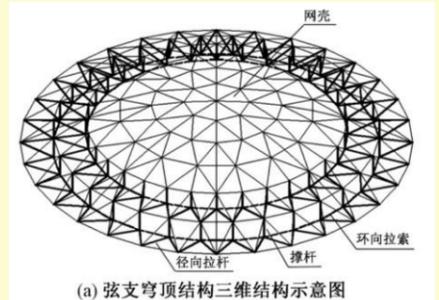
### 3. 张弦(弦支)结构

张弦(弦支)结构在传统刚性结构下方设置柔性钢索,达到了刚柔并济的效果,相较传统刚性结构形式受力更加合理,相较索网、索膜及索穹顶等结构施工更加便捷。在国内,张弦结构经过二十余年的不断发展,已经出现了近十种不同的结构形式,以上部刚性结构形式的不同作为分类标准,张弦结构主要包括:张弦梁、张弦桁架、张弦刚架、弦支穹顶、弦支筒壳、弦支混凝土楼盖、弦支网架、弦支拱壳以及其他张弦结构。



目前,张弦(弦支)结构在各种大型文化会展中心、体育场馆、重大交通枢纽、大型厂房仓库等国家重要工程中得到广泛应用,如当前跨度最大的双向张弦梁结构——国家体育馆。

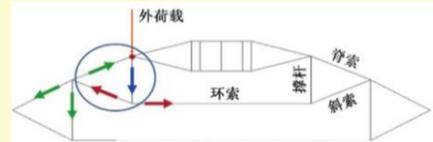
弦支穹顶结构是日本川口卫(M. Kawagucki)教授提出的一种新型预应力大跨结构,此新型复合结构典型结构组成包括上部网壳、中间撑杆及径向拉杆以及下部的环向拉索。



在工程实践中,将“弦支”概念与其他刚性受弯结构组合可以得到一些施工方便、结构受力合理的新型弦支结构,如弦支筒壳、张弦刚架、弦支网架、弦支拱壳、弦支混凝土楼板等。弦支筒壳结构已经应用于广西柳州奇石博物馆屋盖中,弦支网架结构被推广应用于山东广饶国际博览中心、黄河口试验模型大厅等工程中。

### 4. 索穹顶结构

索穹顶结构来源于美国建筑师R. B. Fuller于1962年提出的张拉整体思想。索穹顶主要由环索、斜索、脊索、竖向撑杆、内拉环以及外压环组成,整体结构在对拉索施加预应力的过程中逐渐获得刚度,在这一过程中,结构不断对施加的预应力进行自平衡,从而不断通过改变结构几何外形来调整结构内部预应力分布状态,达到预定形状。



根据几何拓扑形式的不同,索穹顶结构分为Geiger型、Levy型、Kiewitt型、鸟巢型、混合型等多种形式。由于造型新颖、受力合理、结构轻盈等优点,被成功应用在一些大跨度、超大跨度建筑的屋盖设计中。

表2 我国索穹顶结构代表性工程应用

工程名称	建成年份	结构体系类型	规格
无锡新区科技交流中心	2009	Geiger型索穹顶	屋盖中心采光顶,平面直径24m
鄂尔多斯伊金霍洛旗体育中心	2010	Geiger型索穹顶	平面呈圆形,直径72m
太原煤炭交易中心	2011	Geiger型索穹顶	平面呈圆形,直径36m
天津理工大学体育馆	2016	外圈Levy,内圈Geiger复合式索穹顶	长轴跨度约102m,短轴跨度约82m
四川雅安天全县体育馆	2017	Levy型索穹顶	平面呈圆形,直径77.3m
顺德德胜体育中心体育馆	2022	Geiger+Levy型组合索穹顶	长轴方向结构净跨124m,短轴方向结构净跨105m

### 三、结语

随着拉索材料制造技术的进步和施工张拉技术的成熟,我国建筑索结构快速发展,应用范围和尺度不断拓展,形成了以悬索结构、索膜结构、张弦结构、索穹顶结构等多种结构形式为代表的索结构体系,兴建了一批标志性、创新性工程,积累了众多科学技术成果,形成了从设计到施工再到运营的全生命周期的技术体系。

过去,索结构的发展和应用证明了自身的先进性、经济性和科学性。未来,在可持续绿色发展背景下,随着分析技术进步、建筑材料性能提升及建造技术的发展,融合数字化、信息化技术,索结构具有广阔的应用空间和良好前景。

天津大学/天津城建大学 陈志华