

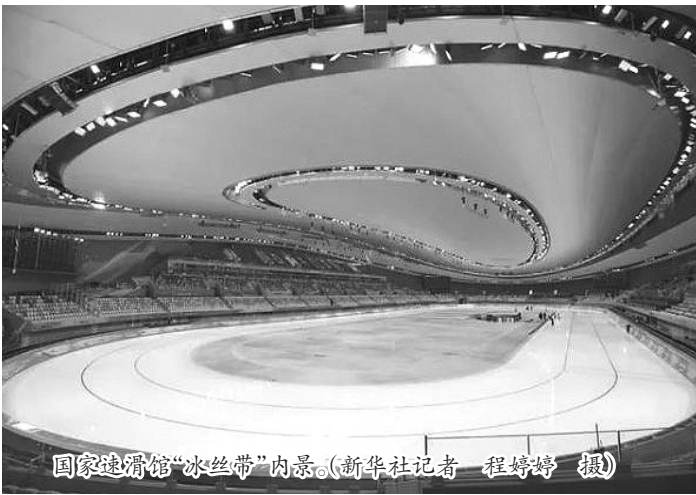
冬奥场馆凝聚中国科技力量

2022年北京冬奥会已圆满落幕。从“冰丝带”到“水立方”，从场馆结构到制冰方案，从满足赛事需要到赛后循环利用……2022年北京冬奥场馆建设处处体现出科技奥运、绿色奥运的理念，也凝聚着中国科技力量。

“冰丝带”建成超大跨度索网结构

国家速滑馆“冰丝带”由22条晶莹的丝带造型曲面玻璃幕墙环绕，远观飘逸，近看宏伟。“冰丝带”的屋盖结构是超大跨度索网结构，跨度大、面积大、空间大，其建设施工与运维保障背后，是中国团队贡献了重要的科技力量。

“所谓的索网结构，简单地说，就是



一张由钢索编织而成的大网。这样一张大网‘扣’在了国家速滑馆的上方，形成一个马鞍形双曲面屋顶。”浙江大学建筑工程学院教授罗尧治介绍，“冰丝带”屋盖结构由49对承重索和30对稳定索编织而成，长跨198米、短跨124米，“冰丝带”也是目前世界上跨度最大的单层双向正交马鞍形索网屋面体育馆。

由于一根索网就有几吨重，只有通过合理的张拉，才能织成一张网。在索网的施工过程中，采取了“先地面拼装、再整体提升”的工序，由于场地空间限制，铺在地面等待张拉的钢索需要微微拱起。倘若没有准确的数据支撑，谁也不能轻易下令弯折动辄几吨的钢索。

“国家速滑馆屋盖跨度大、钢索多、内力协调复杂，这要求结构必须实现高精度的建造。”浙江大学建筑工程学院教授邓华介绍，团队在浙大打造了一个缩小版的“冰丝带”模型，模拟索网结构的建造全过程，并验证结构的设计性能。

浙大团队基于大量的数值仿真结果和试验测试数据，在索网的整体提升、张拉控制、施工验收和预张力监测等方面提出了系统性的方案和建议，为“冰丝带”大跨度索网屋盖结构的高精度建造提供了有力的技术支撑。

此外，团队还通过沙袋等，在张拉好的索网施加荷载。“我们在模型上悬挂

不同的荷载来模拟风吹雪打的环境，验证屋顶的强度和抗形变能力。”邓华说。

为了更好地摸清钢索状态，保障施工质量与安全，罗尧治团队在施工环节就安装上浙大自主开发的无线传感器，用以实时监测和力学分析，不仅在建设时发挥作用，在建成后，也依旧为“冰丝带”测量着“脉搏”与“心跳”。

“拿到数据、传输数据、处理数据，是我们开展监测分析的全过程。”浙江大学罗尧治团队成员、建筑工程学院教授许贤说，团队对速滑馆的应力、位移、加速度、温度、风压、索力六大类参数进行监测，测试点数多达千余个。

相较于传统的刚性屋面结构体系，柔性的索网屋面在满足结构功能的前提下大大减少了结构的用钢量，这样精巧的空间设计为节能环保提供了保障。

“现代空间结构技术水平是一个国家建筑科技水平的重要标志。人们不断追求更大的建筑空间，也促使我们不断研究创

新，来满足工程建设的重大需求。”浙江大学建筑工程学院董石麟院士说。

“冰立方”“水立方”双轮驱动

2022年冬奥会期间，国家游泳中心“水立方”变身了“冰立方”，在泳池上搭建可拆装的冰壶赛道，承接冰壶比赛项目。

冰壶运动对冰面质量、场地环境及赛场保障有严苛的要求。国家游泳中心联合哈尔滨工业大学等组建科研团队，按照“水冰转换，双轮驱动”的策略，开展了结构、温度、湿度、照明、声学等方面的攻关和改造，实现了“冰场—泳池”复合型“双奥场馆”。

“最快可以10至20天完成装配式冰场结构的安装。”2015年以来，经过6年多的科研攻关与现场测试，哈尔滨工业大学土木工程学院教授张文元团队创造性地提出了水冰转换赛场的结构方案、设计详图、性能指标和评价体系。

张文元介绍，“水立方”变身“冰立方”分为“三步走”：首先是设计结构方案，实现在泳池里“盖房子”；其次，将设计好的钢架结构快速搭建起来，避免对泳池的损伤；最后，再将冰面快速精细调平。

“冰壶是比较‘娇气’的运动，任何微小的振动都会影响冰壶的运行轨迹。”

为了保障新结构在比赛中的可靠性，哈尔滨工业大学土木工程学院副教授丁勇带领团队设计了结构健康监测监测系统，采用全面感知、智慧控制等手段，实现对冰面影响因素的全过程监控。

这个系统可以实时观测冰面结构的加速度、位移、应变、倾角等详细情况，并将数据实时传导到计算机监测系统中，方便第一时间掌握变化情况。

目前，“冰立方”结构自振频率不低于20赫兹，经过试验不会影响冰壶的运动，已在2019年全国青少年冰壶公开赛等多项赛事中成功应用。

张文元说，依托国家重点研发计划“科技冬奥”专项课题，团队已获得国家发明和实用新型专利14项，发表相关论文十余篇。

冰在阳光照射下容易融化，因此“水立方”半透明式的房顶，需要拉上一层可移动的窗帘。哈尔滨工业大学建筑学院教授陆诗亮说，为了找到合适的材料，团队反复模拟、实地试验，最终选择一种厚约0.26毫米的膜材材料，能够有效将游泳馆的高温高湿环境变成冰壶场的低温低湿环境，并降低热辐射对制冰系统运转的负荷。

值得一提的是，这层膜并非一张平整的大网，而是由几百块“小窗户”组成的。“‘水立方’的外观是水泡形结构的，设计时就临摹出每个水泡，给每块水泡的膜装上小边框，再完好地覆盖在上面，既美观，又精准。”陆诗亮说。

未来，国家游泳中心既可以举办国际级别的游泳赛事，也能够举办大型冰上赛事，还可以举办多种大众冰水娱乐活动，真正实现了“水立方”“冰立方”双轮驱动。

制冰方案更环保

经过一系列测试活动、测试赛，北京2022年冬奥会冰上场馆的优质冰面受到国内外各项目选手们的好评。此外，北京冬奥会的7座冰上场馆的冰面，还具有环保、环境可持续性的特点，制冰方案从设计到执行，“绿色办奥”的理念贯穿始终。

据了解，北京2022年冬奥会新建、改建了7座冰上场馆、共9块冰面，均使用了环保型制冷系统和制冷剂，其中5块冰面使用了二氧化碳（R744）跨临界直接制冷系统，4块冰面使用了R449A制冷剂。

在冰上场馆制冰方案的设计之初，原计划采用R507制冷剂，该制冷剂在当前全球范围内普遍使用，符合《蒙特利尔议定书》对发展中国家的要求，但其GWP值（全球变暖潜能值）为3985，相对较高。

为使北京冬奥会的场馆更具有环保、可持续性，在国际奥委会和国际专家的支持下，北京冬奥会积极研究制冷剂的国际发展趋势和当前实用技术，与

国内外制冷行业知名专家多次会商讨论，确认了两种制冷系统可以选择：一是二氧化碳跨临界直接制冷系统，适合常年制冰的场馆，如国家速滑馆等；二是传统制冷系统，适合不需要常年制冰的场馆，如水立方、国家体育馆等。

北京大学教授、国际天然工质研究领域知名专家张信荣认为，二氧化碳跨临界直接制冷系统具有安全性高、能耗和运行成本低、环境友好等优点，且全部热量可回收利用，是冰上场馆能源系统中最有前景的工质之一，可使场馆能源系统冷热一体化高效运行，在全球范围内都具有广阔的应用前景。

国家速滑馆制冰技术方案有十多位院士、国内行业协会顶尖专家、建设代表进行反复论证，在与北京冬奥组委、国际奥委会制冰专家的讨论中，二氧化碳跨临界直冷制冰技术被提出。

“国际单项体育组织专家曾说，国家速滑馆使用国际惯用的环保制冰技术就能达到冬奥比赛标准。但经过18个月的摸索，中方团队把历届冬奥会速滑馆制冷系统资料翻了个遍，对世界所有制冷剂优劣特点逐一分析，最终拿出了更先进的制冰技术。”参与国家速滑馆建设的工程师宋家峰说。

在创新的背后，环保考量是最重要的因素。据宋家峰介绍，北京冬奥会中，在全世界范围内，从未在大型冰上场馆中使用过二氧化碳跨临界直接制冷系统。二氧化碳制冷剂ODP（破坏臭氧层潜能值）为0，GWP（全球变暖潜能值）仅为1，使用相同数量的传统制冷剂的碳排放量，是二氧化碳制冷剂的3985倍。二氧化碳制冷产生的余热回收后，可以提供70摄氏度热水用于生活热水和除湿再生等用途。相比传统制冷方式，国家速滑馆采用二氧化碳制冰能效提升30%、一年可节省约200万度电。

在传统制冷剂选择方面，当前国际相关组织，如美国空调制冷学会（ASH-R1），确定了现阶段全球范围内普遍使用的R507所对应的替代制冷剂可为R449A、R449A的GWP值为1282，较R507降低了68%。

北京国家游泳中心和五棵松体育中心均为2008年夏季奥运会的主场馆，并在北京冬奥会承办了冰壶和冰球比赛。为响应“绿色、共享、开放、廉洁”的理念，三场馆在对设备供应商、设计工程师和服务提供商进行调研后，选择了R449A制冷剂。

制冷行业内专家说：“采用R449A制冷剂，是在不影响系统性能和经济可持续性的前提下，采取积极措施向环境可持续发展目标迈进的例证。”

国际奥委会一直十分支持北京冬奥会场馆建设的环保选择，相关官员表示，北京冬奥会冰上场馆采用了节能型制冷系统、环保型制冷剂，积极推动了国际奥委会的可持续发展战略。其中二

氧化碳制冷系统的使用，率先为世界做出了环保和可持续的示范，R449A制冷剂的选择，将使得北京冬奥会成为冬奥会历史上冰上场馆制冷剂GWP值最低的一届冬奥会。

保障冬奥场地安全，地质灾害“侦察卫士”上岗

北京2022年冬奥会的主战场在雪上，其中国家高山滑雪中心位于延庆小海坨山上，共7条雪道，全长21公里，落差约900米。然而，延庆冬奥场地地理条件特殊，大规模的人类工程活动会对周围生态和地质环境产生一定的影响。为保障冬奥场地安全，迫切需要全面覆盖的隐患排查和险情早期识别预警。

“围绕冬奥赛前、赛中、赛后全阶段，在北京市科委、中关村管委会部署下，中关村智连安全科学研究院面向冬奥场地特殊地理条件及基础设施，在延庆冬奥场馆周边重要交通要道等区域，安装微芯智能传感，部署实时监测预警系统，通过专业的安全预警模型综合判断安全稳定程度，能够提前发现安全薄弱环节，进行预警提示，指导相关部门安全加固工作，保障场馆建设的顺利进行。”北京中关村智连安全科学研究院有限公司总经理熊娟表示。

如何对冬奥场馆（地）地理条件及基础设施的安全监测预警？熊娟答道，“我们通过航空航天遥感、远程激光测振、微芯智能传感等技术，基于风险隐患区域早期识别、远程定期检测、现场实时监测技术路线，开展空地一体化安全监测预警服务，搭建安全态势感知网平台，基于专业模型、人工智能技术实现多源信息融合分析，大幅提升风险预测精度、预警有效性及信息送达精准度，实现科技冬奥、安全冬奥的目标。2021年10月，相关技术获得中国测绘学会颁发的测绘科学技术奖二等奖。”

据介绍，针对灾害风险较高的区域，科研人员布设微芯智能传感，采集振动、倾斜、倾向等信息，把握岩土构

筑物动态特征和发展的规律，通过动力学指标与运动学指标的实时监测与分析，确定岩土构筑物的稳定性状态及发展趋势，进行灾害失稳早期预警判断；险情通过手机App传至相关管理人员，为冬奥场地及周边设施安全提供远程监控服务。

奥运期间，已在延庆赛区国家雪车雪橇中心、冰雪小镇、松闫路、综合管廊等区域安装微芯桩，部署实时监测预警系统，实现每秒100—1000Hz的高频采样、数据无线传输、秒级应急响应、属地化报警，并依托云平台与手机App为相关管理单位提供安全态势监控及预警信息推送。提供7×24小时安全监测运维服务，为冬奥场地建设期、赛事服务期、赛后运营期提供全周期安全保障。

具体而言，熊娟介绍说，位于雪车雪橇中心附近的斜坡风险点，为避免大规模工程活动对斜坡稳定性造成影响，研究人员在沿斜坡支护结构布设微芯桩，监测其结构稳定性；在裸露山体表基岩的潜在崩塌风险点，由于风化松散程度大，表面危岩块体极易受山谷强风或降雨影响崩落，布设多套微芯设备，监测岩体变动，自动预警灾害；松闫路是冬奥会的重要赛场联络线之一，经现场勘察，局部路段存在边坡岩石风化、岩石破碎等现象，目前采用远程激光测振对坡面进行振动特征采集和分析，判断不同岩石的稳定程度。另外，部署多套微芯传感，对公路边坡进行灾害监测及预警。

并且，科研人员还运用移动互联网、云计算、大数据等技术，建立安全态势天地感知指挥平台，以信息可视化和决策科学化的方式来实现冬奥场地安全态势，感知管理数字化、智能化、立体化。同时，可接入政府冬奥监管平台，实现数据资源的互通、数据服务的共享。犹如地质灾害“侦察卫士”，这套冬奥场馆（地）岩土构筑物灾害早期识别及自动预警系统为冬奥的圆满举行作出贡献。（经济参考报、科技日报）



我国首次深水犁式挖沟机海试成功

与传统挖沟方式相比，效率可提升三倍

2月9日从中国海油获悉，由海洋石油工程股份有限公司（以下简称海油工程）自主实施的我国首次深水犁式挖沟机海试作业在南海崖城海域取得圆满成功，填补了我国深海底管沟犁式挖沟的技术空白。

据介绍，本次海试的犁式挖沟机是目前国内唯一一台深海底管道犁式挖沟机，也是目前国际上性能最强的犁式挖沟机之一。设备投影面积超过3个标准羽毛球球场，自重达180吨，最大作业水深500米，挖沟最大深度可达2.5米。

“相比传统的喷射式挖沟方式，犁式挖沟机设备土壤剪切力可增强5倍，挖沟效率可提升3倍，是名副其实的海洋油气开发‘利器’，代表着国际上挖沟装备技术发展的先进方向。”海油工程深圳海洋工程技术服务有限公司总工程师林守强介绍说到。

海底管道输送是海洋油气输送最主要、最快捷且经济可靠的方式。此次海试以3000米级多功能深水工程船“海洋石油291”为作业母船，模拟真实海管挖沟场景，进行了无管挖沟、有管单次挖沟、有管二次挖沟、转向挖沟等系列测试作业。

面对测试海域水下能见度低、冬季海况恶劣、海管处于掩埋状态等诸多不利因素，项目团队从作业船适应性改造、挖沟犁及附属设备安装调试、动力定位系统模式升级、大拖力犁式挖沟方法等方面开展了大量技术攻关。

“本次海试在国内没有先例，项目人员攻克了挖沟犁深水下放与精准就位、造坡入泥和出泥、水下精准拖曳及动态重量调整等8项关键技术，成功掌握了深海底管道犁式挖沟成套施工技术，形成了海底管道深水开发作业船队配套能力。”深水犁式挖沟机海试项目负责人夏宝莹表示。

据悉，近年来，海油工程积极推进装备技术能力建设，建成由“海洋石油201”“海洋石油287”“海洋石油289”等多艘3000米级深水工程船领衔、19艘船舶组成的专业化海上施工船队，形成包括3万吨级超大型海洋平台浮托、1500米超深水施工成套技术等一系列核心技术，海上安装与铺管能力达到亚洲领先水平，为保障国家能源安全打下坚实基础。（央视新闻）

伶仃洋大桥东西主塔实现“千米一线牵”

采用船舶拽拉方案 跨越宽达1666米水域

难度大。先导索过江是悬索桥上部结构施工“万里长征”第一步。

深中通道是集“桥、岛、隧、水下互通”为一体的超级跨海集群工程，全长24公里，桥梁工程长17.2公里。

据悉，国内大跨径悬索桥先导索过江施工中，有船舶拽拉、火箭抛送、热气球牵引、无人机牵引等不同方法。而伶仃洋大桥位于珠江口开阔水域，季风、阵风天气频发，施工组织协调难度大，安全风险高。因此，项目经多方案比选、专家论证以及现场实验，最终采用船舶拽拉方案，由中交二航局深中通道S04项目部组织施工。

当天13时，先导索与伶仃洋大桥西主塔下放的钢绳相接，在海事部门的全程护航下，牵引船拽拉着先导索，拖拽至东主塔中跨平台处连接。“水上牵引先导索，关键是要确保放绳速度与船速相匹配。绳索一旦入水并被障碍物缠

国内首座1200吨自升式海上施工平台研发成功

多种专用工装及风机安装方式，形成了一整套风电安装工艺。

近年来，面对我国海上风电开发的重大需求，为解决施工装备紧缺、性能不足以及施工技术瓶颈，天津港航工程有限公司从工程实用性角度出发，开展多功能海上施工自升平台及海上风电施工技术研发应用研究，研发建造了国内首座1200吨自升式海上施工平台“港航平9”。

“港航平9”集风机运输及安装、打桩、浮吊起重等功能于一体，具有设计理念先进、功能全面、数字化和自动化程度高等特点，代表了国内外海上风电施工平台的先进水平。项目自主开发了

多种专用工装及风机安装方式，形成了一整套风电安装工艺。沉桩全自动控制技术解决了海上风电沉桩精度控制等难题，智慧平台控制系统提高了施工安全性和施工效率，为国内乃至世界海洋工程装备制造打造了港航样板。

同时，项目相关技术成果已服务于我国华能江苏大丰海上风电项目等多个海上风电工程建设，累计创造效益超亿元。项目取得了授权发明专利8项、软件著作权3项、论文6篇，经中国水运协会、天津市科委鉴定均达到了国际先进水平。（杨柳 费文源）