学术 活动

第六届全国索结构技术交流会胜利召开

2024 年 6 月 21—23 日，第六届全国索结构技术交流会在福建德化成功召开，来自全国各地 160 余名代表参加了本次会议。会议期间召开了 2024 年索结构工作会议。

图 1 第六届全国索结构技术交流会现场

会议开幕式由空间结构分会副秘书长孙国军主持，空间结构分会理事长薛素铎、德化县政协副主席程德强、索结构主任委员陈志华、中建海峡建设发展有限公司厦门公司党委书记、董事长林小强先后致辞。

本次会议共邀请崔愷院士、曾滨院士、孙一民大师等专家做了 15 个精彩的大会报告。吴金志、周健等主持了大会报告。

6 月 22 日的闭幕式由空间结构分会秘书长吴金志主持。本次会议特别感谢会议各承办单位的大力支持。

图 2 索结构工作会议合影留念

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。与会专家从结构轻量化设计、预应力索结构服役性能控制、建筑与结构相互成就、新型索结构体系以及拉索特性的研究等多个方面对行业特点以及新技术、新趋势进行了分析；围绕霞田文体园项目从建筑设计理念、结构体系确定、索结构和膜结构建造、索节点和膜材的研制等多个方面对霞田文体园项目进行介绍。最后根据空间结构系列图书《索结构典型工程集（2013-2023）》，简单介绍了索结构体系的发展和演变过程，希望我国索结构体系不断创新，设计建造不断发展，探索不止，不断推进我国空间结构事业从大国向强国迈进。

6 月 23 日，会议组织了参观活动。霞田文体园（体育场、体育馆、游泳馆）项目由中国工程院崔愷院士主笔设计。体育馆、游泳馆建筑由屋面钢结构与下部混凝土框架结构组成，屋盖结构采用一边刚性边界+三边柔性线边界单层索网屋盖，跨度 215m×54m，整个屋面体系为双向悬垂屋面体系，属国内首创特殊类型大跨度钢结构屋面，施工过程中首次采用“反向张拉”刚性预应力加载技术施工成型。

（上接第一版）

可以毫不夸张的说，《简讯》作为空间结构的专门刊物，记载了中国空间结构四十年发展的每一步，从中几乎可以查询到所有对中国空间结构有影响力的工程，几乎可以查询到所有中国空间结构的重要事件，重要会议，同时，也可以看到许多热心空间结构发展事业的前辈、专家在空间结构领域的身影。

通过《简讯》这个小小的载体，您可以深深感受到，空间结构对我们敬仰的老专家们来说绝不是一份职业，甚至不能用“事业”两个字来简单概况。中国的空间结构更像是他们的孩子，在这里记录了他们无怨无悔的光辉岁月，是他们看着中国的空间结构从一个嗷嗷待哺的小婴儿成长为一个空间结构巨人。

图 5 第 181 期《空间结构简讯》（2019.09）

2011 年 9 月 6 日，蓝工将整理完备的“《简讯》备忘录”交给了宋涛总工，接力棒交到了新一代空间人手中。2019 年 9 月，宋总又把这一重任交给了更年轻的空间人，从第 181 期开始（图 5），《简讯》开始同步微信发布（https://e.eqxiu.com/s/ePMT35l9?adpop=1），空间新生代尝试用新媒体的方式继续传播空间好声音，大家可以轻轻松松听着音乐看《简讯》。

应当承认，随着高科技和互联网的发展，人们获得信息的手段越来越多，纸媒逐渐衰落，《简讯》早已经不是人们获取空间结构信息的主要手段。但因为一种传承的执念，我们却始终舍不得放下《简讯》的出版工作，就让《简讯》发挥承载记录的作用，让它继续成为中国空间结构发展的一位记录者和见证者吧。

图 6 《空间结构简讯》全集

前段时间，来自河南省院一位年轻的空间结构工作者自发制作了一个《简讯》的视频，并制作了网络版《简讯》全集，可对历期涉及到的空间结构案例、结构体系、施工技术等内容进行浏览和标注，并开放了全集阅读链接（https://docs.qq.com/aio/DTUxOTlRGTWNDRkJU）。他说自己工作以来，特别受益于这份小报，而且把《简讯》的每一篇文章都仔细阅读了，他钦佩《简讯》可以四十年如一日的保持高水准，并免费提供给读者，所以也想尽自己的绵薄之力，让更多人方便阅读《简讯》。这件事真的让我感到意外，也感受到满满的幸福感和成就感。

也许很多时候就是这样，我们也不知道我们发出的那一点点光亮，不经意间会照亮了谁。也许还有一些空间人在默默地关注着《简讯》，在认真地阅读它，被它潜移默化地影响着。真心希望《简讯》对热爱空间结构的同仁们有所助益！这会让我们明白，我们所做的事情是一件有价值有意义的事情。

图 7 《空间结构简讯》200 期纪念

我是否可以这么说，作为中国空间结构的工作者，如果没有在《简讯》中留下一笔，这不能不说是一个遗憾。所以，各位从事空间结构工作的同仁们，请拿出您手中的笔，为《空间结构简讯》踊跃投稿，在中国空间结构发展的历史长河中留下您的脚印，让我们共同续写中国空间结构的辉煌！

中建研科技股份有限公司 刘枫

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

2024 年第 2 期　总 200 期　2024. 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

纪念《空间结构简讯》出版 200 期

北京副中心大运河畔“京帆”屋盖即将亮相

第六届全国索结构技术交流会胜利召开

纪念《空间结构简讯》出版 200 期

当您或有心，或无意地翻开本期《空间结构简讯》（以下简称《简讯》）时，您已经和我们共同见证了《简讯》第 200 期的诞生，数十载岁月流转，二百次精彩绽放，从 1982 年 7 月创刊号开始（图 1），《简讯》至今已出版 200 期，感谢您一路的陪伴。对于《简讯》，作为空间结构人的您不会感到陌生，虽然它只是一份没有任何刊号的非正式小报，而且每期只有两页 A3 纸的内容，但它却是一代代空间结构人共同的记忆。

图 1 第 1 期《空间结构简讯》（1982.07）

2002 年初，作为中国建研院空间结构研究室的新成员，我被安排承担空间结构委员会的秘书工作，其中一项重要工作内容就是配合蓝天先生进行《简讯》的编辑，那一年，恰逢《简讯》出版第 100 期（图 2）。

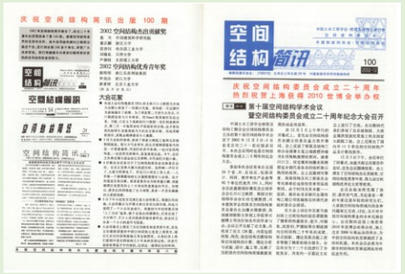

图 2 第 100 期《空间结构简讯》（2002.12）

记得刚刚开始接手这份工作，蓝工交给我两本专业书，一本书是简装的出版工作者指南，一本书是全部印刷字体的样本，蓝工显然是把《简讯》当作一份正式出版物在运营，蓝工会用一 A4 大小的纸、用红蓝铅笔和尺子把每篇文章按字数划分成一个个小小的豆腐块，画在纸上，上面密密麻麻写着他对这篇稿件的排版要求，您真的很难把这些工整的隽秀小字，和一位耄耋老人联系到一起。

2012 年是空间结构委员会成立的三十周年，当时秘书处策划刻制了“《简讯》三十周年纪念珍藏版”光盘，因为要进行全部《简讯》的扫描工作，我给蓝工打电话求助。第二天一早我来到单位，看到一个大大的文件夹已经摆在我的办公桌上，里面是排的整整齐齐的 152 期纸质版《简讯》。这让我联想起太原理工大学尹德钰老师的一件小事，有一次我们耽误了一期《简讯》的出版时间，为了不让后续每一期都延期，我们把后面的一期提前出版了，也就是说刊号跳过了一期，准备随后再补发前一期。就在这个间歇，尹老师打来电话，询问是否给他少寄了一期《简讯》，因为他也收集了全套的《简讯》，发现刊号不连续了。当时这件事真的让我有些吃惊，同时也让我感觉到沉甸甸的责任。

图 3 第 83 期《空间结构简讯》（2000.02）

翻看《简讯》，就好像在翻阅中国空间结构史。从最初简单的黑白胶印，到 2000 年 2 月开始的彩色报头激光印刷（图 3），再到 2008 年 2 月开始的全彩色印刷（图 4），无论印刷条件如何，《简讯》的内容质量一直保持着始终如一的高水准。

图 4 第 131 期《空间结构简讯》（2008.02）

（下接第四版）

北京副中心大运河畔“京帆”屋盖即将亮相

北京城市副中心城际车站属于北京城市副中心站综合交通枢纽的一部分，是京唐/京滨城际铁路近期始发终到站，也是城际铁路联络线全线的重要车站，该车站地下共 3 层，是亚洲最大的地下综合交通枢纽。

一座藏身地下的综合交通枢纽，如何才能让旅客舒适地沐浴在阳光之下？

在“地下枢纽地上城、上下高度融合”的总体格局下，以“运河之帆”为意象的北京副中心站“京帆”屋盖方案脱颖而出，千年大运河畔的 7 片“主帆”、3 片“辅帆”的设计，可以把阳光直接引到地下 32m 深的候车站台。

图 1 项目整体鸟瞰效果图

该方案融入区域历史文化元素，突出传统车站建筑与城市空间的融合，在延续阳光引入地下空间理念基础上，构建畅通的立体慢行系统；通过双层表皮设计，营造出公共活力空间，提供管理清晰的运营界面，在引入阳光的同时，合理规划室内光热环境、优化运营成本。

“京帆”屋盖，既作为车站的建筑造型表达了对通州大运河的文化致敬，也是践行了“双碳”战略的地下车站采光通道。上层帆形屋盖采用 ETFE 张拉膜结构，投影面积 25552 m^2，膜结构下方采用了开孔铝板吊顶，控制阳光穿透量；下层泡泡采光顶采用 ETFE 气枕膜结构围护，投影面积 12169 m^2。本文以其中最大的结构单体为例，对项目结构设计特点进行介绍。

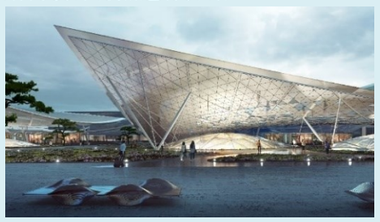

图 2 西侧入口处屋盖单体效果图

结构体系

最西侧帆屋盖为本工程尺寸最大的结构单体，是进入地下车站的通道之一。该结构单体由上层帆屋盖（面积 4391m^2）、下层泡泡采光顶（面积 2731 m^2）构成，两层结构中间通过弹簧单元连接为一体。上层屋面采用透明的 ETFE 膜结构围护及铝板吊顶，下层屋面采用 ETFE 气枕膜结构。

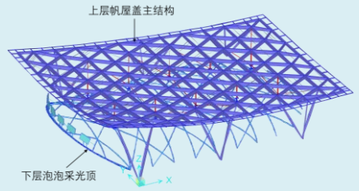

图 3 双层屋盖结构

上层帆屋盖为索撑张弦体系，屋面为空间双曲形态，最大边长约 77m，最高点距地约 27m；杆件采用三向交叉梁，梁间距约 6m，钢梁截面均为箱形，中部梁高均为 1000mm，边梁高为 600mm，与边梁相连的杆件采用变截面。屋面下方设置 5 组索撑体系，间距 12m；边索 Φ65，长约 13.5~17m，中索 Φ75，长约 16.1m，均采用 1570MPa 密闭高钒索；撑杆截面 Φ250×16。

帆屋盖整体由 6 组分杈柱支承于地面。X 向柱距 24m、Y 向柱距 46m，每组分杈柱均由内倾 V 柱和外倾柱构成；内倾 V 柱为梭形柱，截面为 Φ550~300×25、Φ600~300×30、Φ700~300×30；外倾柱截面为 Φ300×16、Φ350×20、Φ380×25。

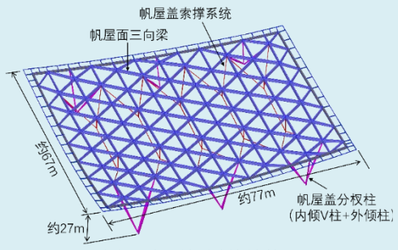

图 4 上层帆屋盖结构

泡泡采光顶为单层网壳体系，平面尺寸约 70m×41m，三边落地与地下结构构件连接，西侧开口处设置边拱加强。为满足建筑效果的要求，泡泡网壳杆件截面尽量小。短跨 Y 向 6 榀杆件采用箱形截面高 240~285mm，截面高跨比达 1/170。杆件以单曲为主，局部杆件采用平行四边形截面、双曲构件。

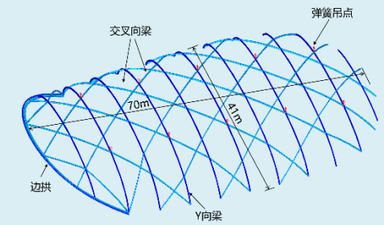

图 5 下层泡泡采光顶结构

结构受力特点

上层屋盖索撑体系刚度较好，而下层屋盖因建筑的杆件纤细要求导致网壳面的抗弯刚度小而拱效应明显。分析表明，连接构件若采用普通杆件，则在上层屋盖的可变荷载作用下，下层泡泡采光顶纤细的拱形梁难以承受连接构件传递的压力作用。

通过详细的比选分析，在刚与柔的博弈之下，萌生了采用单向受压弹簧的想法（受拉刚度较大、受压刚度 2kN/mm），一方面可以使上部帆屋盖对刚度相对较小的泡泡采光顶起到吊挂的作用，另一方面也可以减小帆屋盖在可变荷载下对泡泡采光顶的压力。

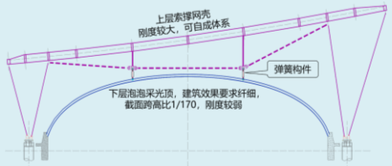

图 6 结构典型剖面及弹簧构件位置

设计中考虑了施工过程对结构受力的影响，施工完成后的状态作为结构成形态，在此基础上考虑其他可变荷载作用。通过“先施工上层屋盖、卸载，后施工下层采光顶、挂弹簧”、并适时调整拉索索力、设置合理的预拱与预偏等方式，对结构成形态的拉索索力、结构竖向与水平变形、弹簧受力与垂直度等多方面进行控制和优化。

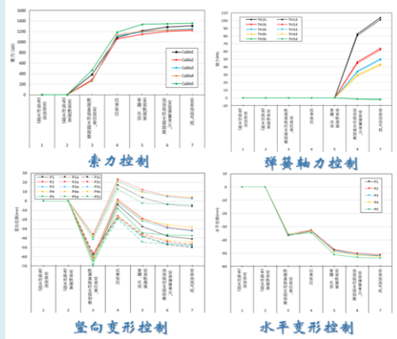

图 7 施工过程分析的多项指标控制

工程 报道

北京副中心大运河畔“京帆”屋盖即将亮相

弹簧构件的创新应用

为实现本项目的单向弹簧需求，设计单位与弹簧厂家深度配合，最终采用了如图所示的构造形式。弹簧构件受拉时由零件接触传力，刚度较大；受压时，其中的碟簧组件发挥作用，刚度 2.0kN/mm。弹簧设计中，采用的碟形弹簧片为弹性受力元件，满足《碟形弹簧》GB/T 1972 系列规范的要求。承载力设计时，除常规的受拉、受压的静力设计内容外，还需要重点关注防腐性能、耐磨性能、疲劳性能、噪声等。

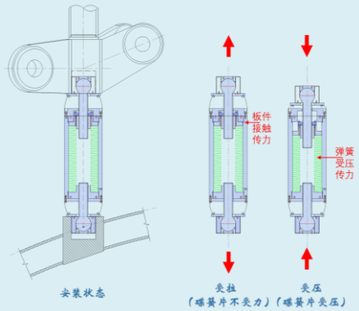

图 8 弹簧构件受力机理

对于疲劳性能，经过详细计算，推断在北京对疲劳有影响的风力等级七级以下风荷载作用下，碟形弹簧片受力仅为其承载力的 12%左右，理论上自然满足无限次疲劳的要求。

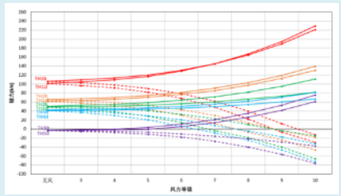

图 9 弹簧构件在各级风力作用下的受力

弹簧构件是本项目中的创新应用，为保证其可靠性，甲方委托清华大学开展了弹簧构件静力性能、疲劳性能的试验研究工作。试验结果表明，弹簧构件的设计满足本项目的安全使用要求。

图 10 弹簧构件试验

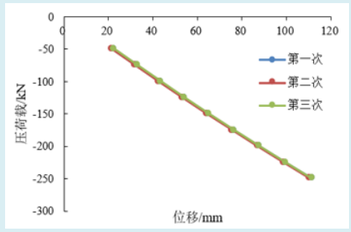

图 11 弹簧构件静力试验的荷载-位移曲线

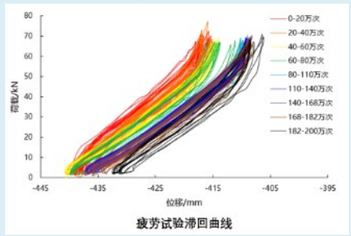

图 12 弹簧构件疲劳试验的滞回曲线

匠心铸就精品

本工程上层屋盖，杆件均为直杆，典型节点由空间多扭角的六杆件相交，建筑专业力求自然过渡，拒绝了一切“看得见”的节点元素，原设计在屋面曲率较大位置的节点区，采用了大量的双曲板件。经过与钢结构深化单位的深入配合，节点优化为焊接的板式节点，上、下板为六爪平板，腹板多为平板、仅局部采用弧形板。采用该节点构造，避免了弧形板的大量使用，节省了工期和造价。

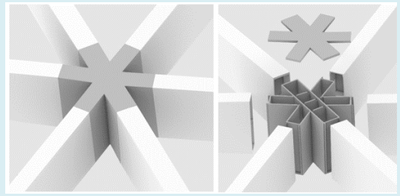

图 13 上层屋盖多杆件交汇节点构造

弹簧构件设计时，通过不断优化设计方案和厂家工艺配合，最终实现了弹簧构件与上部拉索节点、下部泡泡节点一体化设计，简洁、流畅、美观。弹簧构件的设计，同时也考虑了安装、拆卸、更换的可能性。

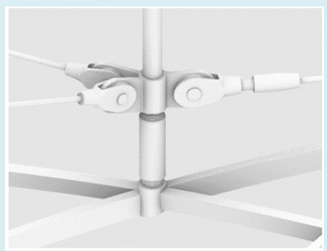

图 14 弹簧构件一体化节点构造

本工程立柱、撑杆及拉索的相关节点，均经过了细节、尺寸的反复详细推敲、优化，柱脚采用了球铰铸钢，实现了建筑效果的同时也展现了结构之美。

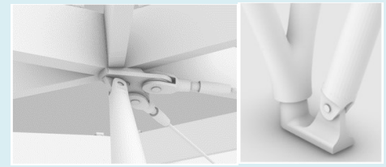

图 15 铰接柱顶、柱底节点构造

工程进度

截至目前，本项目单体 1 已基本完工，其他单体也在紧锣密鼓的施工中，2024 年底所有“京帆”将全部亮相。2025 年项目整体竣工后，从副中心站出发，15 分钟可达首都国际机场和中心城区，35 分钟到达大兴国际机场和河北唐山，一个小时到达河北雄安新区和天津滨海新区。届时，“京帆”屋盖必将成为大运河畔的一道亮丽的风景线。

图 16 单体 1 主钢结构完成（2023.12）

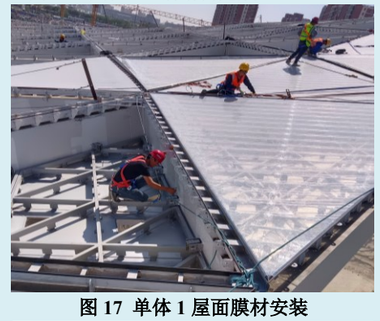

图 17 单体 1 屋面膜材安装

图 18 单体 1 围护结构完成（2024.5）

中建研科技股份有限公司 张强
中国铁路设计集团有限公司 唐虎