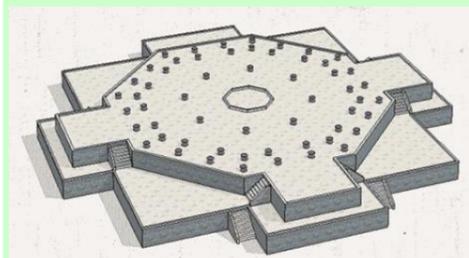


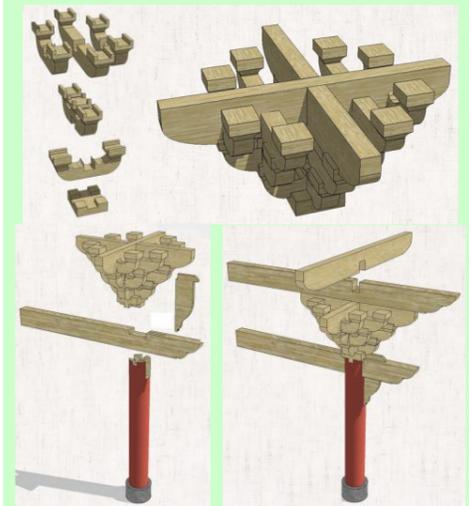
应县木塔再认识

全国重点文物保护单位佛宫寺释迦塔俗称应县木塔，位于山西省朔州市应县城西北。始建于辽清宁二年（公元1056年），是中国现存最高最古的一座木结构塔式建筑。释迦塔塔高67.31米，底层直径30.27米，平面呈八角形。塔身为纯木结构、无钉无铆。全塔耗木料3000立方米，2600多吨。木塔外观六檐五层，首层重檐，各层之间又设暗层，实为九层。

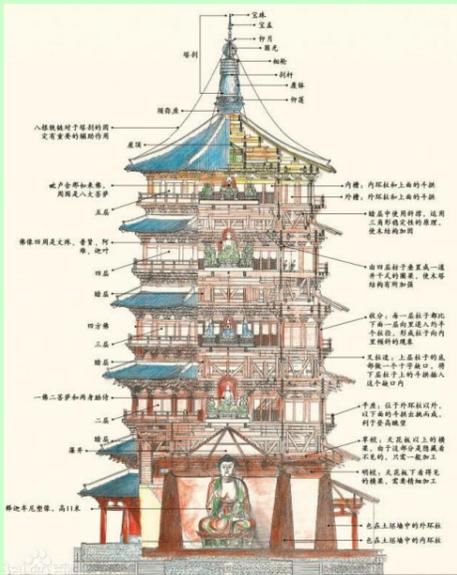
塔基用石料砌成，仅深入地下部分就达2米，总厚度更是超过6.4米。塔基的地上部分分为上下两层，上层为八边形、下层为正方形，对应“天圆地方”，四面再各伸出月台，形成一个稳定的大十字结构。柱下石础没有巢臼，木柱断面直接平立于石础之上。首次有56根木柱，分为三圈，被放置在柱础之上，形成一张八角形的柱网。目前的柱子为辽代原物，历次维修都没有更换。



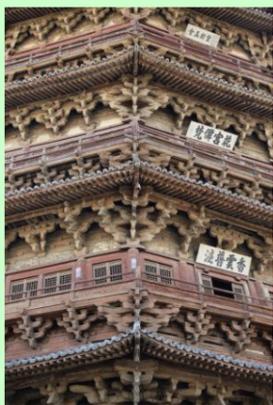
柱与柱之间通过枋、梁横向互连。从上方俯视，它们共同构成了一个筒体，大大提高了建筑的稳定性。柱、梁之间用中国建筑特有的构件“斗拱”连接，它由多个小型木块铺叠而成，可以承上启下。



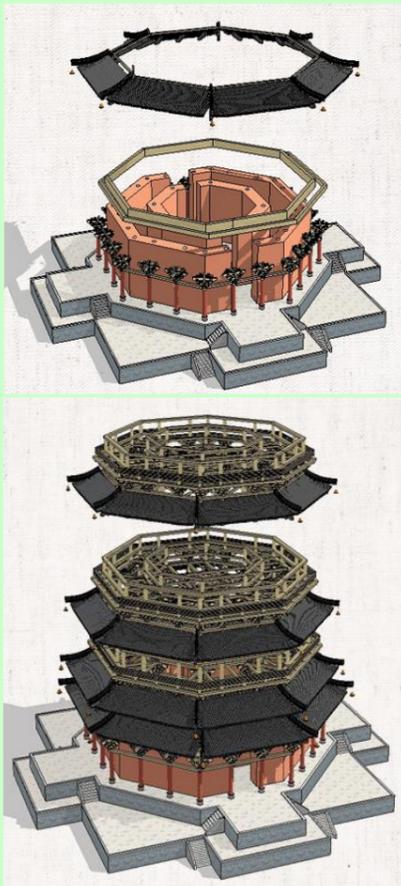
应县木塔共使用斗拱54种、480朵，为中国现存古建筑之最，堪称“斗拱博物馆”。当大风、地震来临时，斗拱木材之



间产生一定的位移和摩擦，从而可吸收和损耗部分能量，保护主体结构不受侵害。从下向上仰望，一朵朵斗拱宛如一簇簇盛开的莲花，在塔身上熠熠生辉，古人称之为“百尺莲开”。



首层之上是一种由支撑木构成的环状结构，该结构被屋檐遮挡从外部无法看出，形成暗层，暗层之上再铺设梁、柱、枋以及斗拱，是为明层。暗层明层结合便是木塔的第二层。之后各层亦按此方式复制叠加，最终形成了五明四暗的塔身。四个暗层有如四道金箍，可以有效约束塔身，防止变形。



木塔柱网两个内外相套的八角形将木塔平面分为内外槽两部分。柱头间有栏额和普柏枋，柱脚间有地伏等水平构件，内外槽之间有梁枋相连接。暗层中用大量斜撑，结构上起圈梁作用，加强木塔结构的整体性。它们共同构成了一个刚性很强的双层筒体结构。

最后，一个八角形的塔顶覆盖其上。各种宗教法器从下至上依次排列，中间由铁刹串联，铁刹充当避雷针，四周八条铁链成了引下线。塔基、塔身、塔顶一起构成了一座巧夺天工的木塔。

木塔地基主要由粘土及砂土组成，工程地质条件非常好，其承载力情况良好。今天的应县木塔虽然仍旧保持着良好的外观，但毕竟年代久远，由于风雨侵蚀、木材老化、人为损坏等，各层出现不同程度的倾斜，一些木构件弯曲开裂比较严重。虽然可以进行小范围的修修补补，但如何才能让它继续挺立千年，依然是需要研究的难题。



2018年第3期
总177期
2018.10

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

第十七届空间结构学术会议即将在西安举行

空间结构分会开展第十一届空间结构奖评审活动

北京纽曼帝承建的澳门励骏大道膜结构罩棚荣获IAA大奖



第十三届全国冬季运动会速滑馆屋盖结构



应县木塔再认识



空间结构分会二维码



学术 活动

第十七届空间结构学术会议即将在西安举行

第十七届空间结构学术会议定于2018年11月16~18日在西安举行。大会由中国建筑科学研究院、中国土木工程学会桥梁及结构工程分会主办，西安建筑科技大学承办，浙江东南网架股份有限公司、陕西建工机械施工集团有限公司、巨力索具股份有限公司、上海通正铝合金结构工程技术有限公司协办。

大会主题是“空间结构：历史与未来”。会议将编撰论文集，供参会人员 and 行业同仁交流。各项会务已基本准备就绪。会议邀请院士、知名专家共十一位围绕大会主题作特邀报告，论文集中的论文均可安排作者在会上做分组报告。

会议地点

会议在位于西安市碑林区雁塔北路1号的西安天域凯莱大饭店举行。会议代表可以入住西安天域凯莱大饭店，也可入住附近宾馆。入住西安天域凯莱大饭店的代表需在会议第二次通知所附的“会议代表登记表”中注明并回复给会务组，由会务组统一预订，会议预订的标准双人间房费约398元/晚/间（单早）、450元/晚/间（双早）。入住其他宾馆的需自行预订。

会务费

每位代表会务费1800元/人，在校学生1000元/人。会议期间食宿费用自理。

空间结构分会开展第十一届“空间结构奖”评审活动

空间结构分会定于2018年12月开展第十一届“空间结构奖”的评审工作。会员单位参与完成的国内外空间结构相关项目均可申报。根据分会“空间结构奖评审办法”，本次评审分为工程类（设计或施工）和技术类。其中工程类设金奖和银奖，旨在奖励在设计或施工技术与质量方面达到国内先进水平的项目；技术类设技术创新奖，旨在奖励在空间结构的材料、设计、加工或安装等方面具有突出创新性、对推动空间结构技术发展具有重要作用的专项技术成果。在申报的工程类项目中包含的相关技术，原则上不再申报技术创新奖。本届评审范围为2016年1月至2017年12月完工的项目（需竣工验收证明材料）。

“空间结构奖”的评审不收取任何评审费

会议日程简表

会议报到		11月15日, 14:00开始, 宾馆大堂	
11月16日	上午	8:30-9:00	开幕式
		9:10-12:00	大会报告
	下午	12:00-13:00	自助午餐
11月17日	上午	14:00-17:30	分组报告
		18:30-20:00	大会晚宴
	下午	8:30-12:00	分组报告
11月18日	上午	12:00-13:00	自助午餐
		14:00-17:30	分组报告
	下午	18:30-19:00	自助晚餐
11月18日	上午	8:00-11:30	大会报告
		11:30-12:00	颁奖、闭幕式
下午		参会代表返程	

会务组联系方式

会务协调：
于金光：13087522728，钟炜辉：13572001720
订房、食宿：
郑江：15339030997，孟宝：15529590932
报到、注册
田黎敏：15319792270，田炜烽：13572471217
传真：029-82205864；E-mail: kjjg2018@126.com

用。为了使这次评审工作顺利进行，请申报单位将申报表逐项如实填写清楚，并附相关材料及时寄交到分会秘书处，申报项目最多为四项。申报截止日期为2018年11月30日。

本次评审后将继续编印《大跨空间结构奖汇编》，在2019年召开的技术交流会上作为资料发给参会代表，并颁发获奖证书和奖杯。请各申报单位将申请表、照片（室内外不少于三张且质量较好）、技术内容（工程概况、结构体系、技术措施以及经济指标等，按照样板文件格式）、主要平立剖面及节点图等以电子文档方式刻录光盘，并与申报材料一起寄交分会秘书处。

更多活动请扫描关注空间结构分会二维码，获取分会有关资讯。

第十三届全国冬季运动会冰上运动中心速滑馆屋盖结构

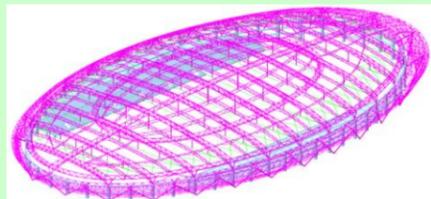
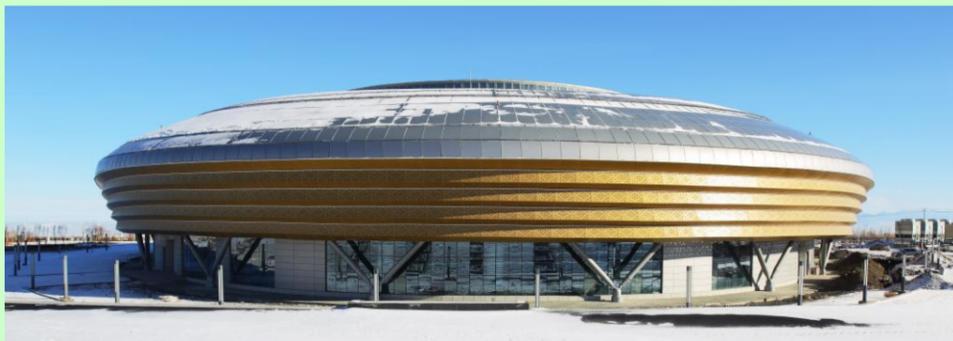
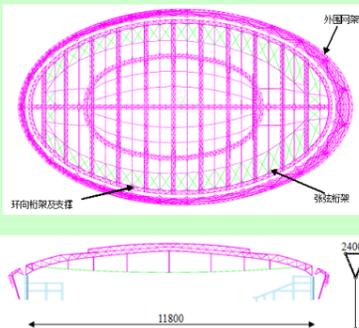
第十三届全国冬季运动会冰上运动中心位于乌鲁木齐县，由速滑馆、冰球馆、冰壶馆、媒体中心等组成，整体呈冰山雪莲造型。速滑馆是其中体量最大的，也是第十三届全国冬运会开幕式主场馆。



速滑馆平面呈椭圆形，长轴 219.4m，短轴 132.3m，建筑高度 33m，建筑面积近 2.88 万平方米，坐席数 3080 个。

速滑馆下部采用钢筋混凝土框架结构，屋盖采用钢结构，边柱以外墙面采用自由曲面造型的网架结构。通过概念设计和选型分析最终确定速滑馆屋盖采用张弦桁架结构。该方案结构形式简洁，传力路径单一，利用张弦结构的自平衡特性消除钢结构对混凝土产生的水平推力，并且利用局部三层的张弦桁架实现了建筑效果要求的有局部球缺穹顶外形，实现了结构与建筑的统一。

速滑馆屋盖结构沿长轴方向布置 9 道张弦桁架，桁架间距 18m，最大跨度为 118m。最大跨张弦桁架的高度为 16m，矢跨比为 1/8，上弦杆间距为 2.4m，桁架高度从边部的 3.8m 变为中部的 2.2m。张弦桁架结构的下弦采用高强度拉索。桁架最大截面为 $\phi 500 \times 25$ ，最小截面为 $\phi 89 \times 4.0$ ，索的截面规格为 $\phi 7 \times 337$ 。



鉴于该工程规模大、形体复杂，分析内容不仅包括结构静力分析、动力分析，还包括一些相对复杂却又十分必要的分析工作：风振响应分析与等效静风荷载确定；基于性能的结构强震动力弹塑性分析；断索分析；铸钢节点分析等。



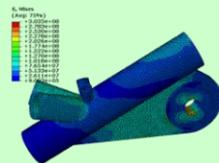
在抗震设计时，除对结构进行小震和中震弹性分析外，还进行了大震弹塑性分析，以确保结构在大震作用下的安全。在罕遇地震作用下的设计性能目标为：结构不发生倒塌，最大节点位移时程收敛；弦支结构环索及斜索应力小于破断应力；钢结构杆件基本弹性，少量进入塑性。

设计时考虑了结构施工全过程模拟，以保证结构在合理施工工序下的安全性。张弦结构分步张拉步骤如下：1) 钢结构桁架安装，中间用两个胎架做为支承；2) 进行初张拉 50%，并使得屋面桁架脱离胎架，观测和记录结构位移及监测索力；3) 张拉至 70%，观测和记录结构位移及监测索力；4) 张拉至 100%，观测和记录结构位移及监测索力。模拟过程中通过施加温度荷载的形式考虑预应力张拉过程，以零应力索长为控制目标计算需要施加的总预应力，通过分级施加总预应力来模拟张拉过程。

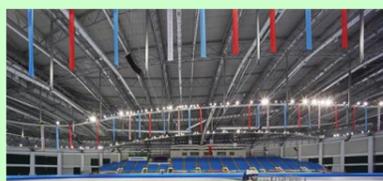
为了考察施工及使用过程中拉索意外破断时结构的受力情况，对最大跨度桁架索失效后结构的应力水平进行了验算。断索后少量杆件超应力，但结构并未出现倒塌，在断索后仍保持了很好的整体稳定性。



索头节点处杆件数目多，连接和受力较复杂，设计了铸钢节点，对节点进行实体建模有限元分析。



该工程墙面采用自由曲面造型，为对曲面进行准确定位和网格划分，在建筑专业提供的 Rhino 软件模型基础上，采用非均匀有理 B 样条曲面 (NURBS) 技术，通过选取关键点对墙面进行二次拟合和网格剖分，建立墙面网架结构的上表面网格模型。针对墙面网格不规则的问题，通过 CAD 二次开发，实现了网架下弦节点自动定位，解决了自由曲面网架的建模问题。在此基础上，通过结构优化分析调整节点位置，使杆件长度和结构内力分布尽量均匀，提高了结构受力性能和经济性。



(第十届空间结构奖设计金奖获奖项目，摘自哈尔滨工业大学建筑设计研究院毛小东提供的资料)

澳门励骏大道膜结构罩棚荣获 IAA 大奖

由北京纽曼帝莱蒙膜建筑技术有限公司设计并承建的澳门励骏大道罩棚索膜工程项目，获得了美国国际产业用纺织品协会 (IFAI) 的 2018 年综合张力结构类国际成就大奖 (IAA)，并在 2018 年美国 IFAI 博览会 (2018.10.16 - 2018.10.18) 上展出。

澳门励骏大道罩棚索膜工程位于澳门渔人码头励骏大道，整个建筑采用了目前极具创意的膜结构设计新理念，钢、索、膜有效结合，造型美观、富于动感、挺拔秀美，与周围不同建筑特色及中西文化有机的结合在一起，为渔人码头这个澳门新地标增加了一抹新的色彩。



该工程总长度 386.025 米，最宽处约为 35.8 米，钢结构最高处距地面 26.44 米。其总投影面积约为 9795 平方米，由北向南分为 A1 至 A10 十个



膜区块，最大的膜区块为 A8 膜区块，投影面积约为 1150 平方米。

该工程结构体系是以骨架支撑为主的张拉膜结构体系，由若干钢柱支撑

的梭形桁架通过若干钢拱梁连接，钢拱梁之间由钢索构成索网，其上紧绷高透光率的 PTFE 膜材，梭形桁架上紧绷白色常规 PTFE 膜材。不同透光率的膜结构顶棚交相辉映，让人赏心悦目。整个膜结构系统充分利用了结构基础的整体承载能力，最大限度的发挥了钢、索、膜不同材料的力学效能，并首次使用了透光率超过 40% 的 PTFE 膜材料，具有设计新颖、结构独特、造型美观等特点。

该项目的建成对吸引游客起了很大的作用，给来澳门励骏大道旅游的客人提供更好的体验，对周边商业的发展起到更好的促进作用，为业主带来了更好的商业收入。

(北京纽曼帝莱蒙膜建筑技术有限公司 张文英)

IASS2020 空间结构会议将在英国萨里大学举行

国际壳体及空间结构协会 2020 年学术会议 IASS2020，将联合第七届国际空间结构会议 (7th ICSS, International Conference on Spatial Structures) 一起，于 2020 年 8 月 24 日至 28 日在英国吉尔福德的萨里大学 (University of Surrey) 举行。会议主题是 “Inspiring the next generation (激励下一代)”。

IASS 会议每年举办一届，分别在不同的国家举行，已经成功举办了 50

多届。而国际空间结构会议 (ICSS) 自 1966 年起每隔九年举办一次，此次将举办的是该系列的第七次会议，由萨里大学的空间结构研究中心主办。

这次会议议题将涵盖：教育和教学；概念设计；建模流程；分析计算方法；优化；结构可靠性；耐久性和维护技术；检验测试；高级材料和生物材料；环境影响；细节和建造；高级制造；破坏、断裂和疲劳；历史结构；临时结构；

玻璃结构；壳体结构；张拉和膜结构；充气结构；自适应体系；网格结构；张拉整体结构；可展开结构；折纸体系；以及其他有关空间结构的话题。

会议论文征集等有关时间点尚未宣布，感兴趣者可持续关注会议网址：www.surrey.ac.uk/spatial-structures-2020，以便及时取得有关信息。如有关于会议的问题可通过邮件联系官方邮箱：iass2020@surrey.ac.uk。