

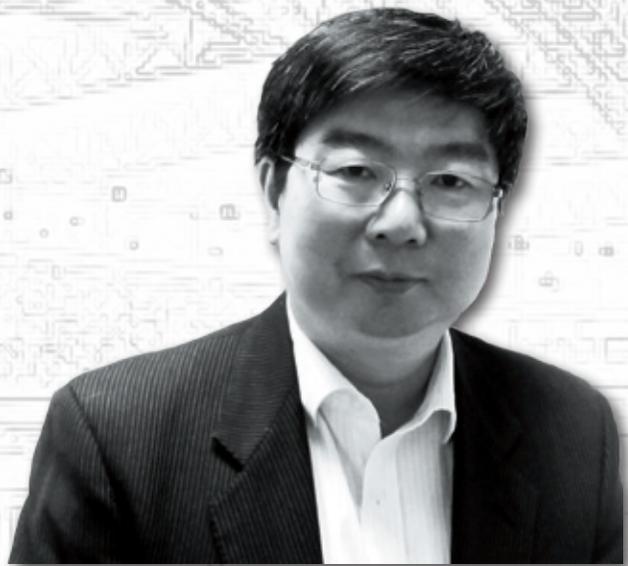
Structure

Architecture

『2013 建筑、结构巅峰对话 · 结构成就建筑之美』
2ND DIALOGUE OF ARCHITECTURE AND STRUCTURE

Improving Architecture Design by Creating Structure Innovation

结构技术创新助力建筑创作



范重

Fan Zhong / Vice Chief Engineer / CAG

中国建筑设计研究院（集团）副总工程师

代表作品：全国政协办公楼、北京大学 100 周年纪念讲堂、宁波国际会议展览中心、首都博物馆新馆、中关村金融中心、国家体育场、苏州火车站、国家网球馆、奥运瞭望塔、天津国际金融会议酒店等。



扫描二维码
可进入报告视频

建筑师与结构工程师工作的侧重点不同，配合的时候往往也会出现一些分歧。尤其是目前建筑本身的表现力越来越强，结构如何通过提升自身的能力去适应建筑方案创作，确实是需要面对的挑战。在近年来与我院崔愷院士等国内建筑师及境外建筑师共同合作完成的一些项目中，我们通过在结构设计中不断进行技术创新，配合建筑创作，达到了比较理想的效果，在此与各位同行分享。

1 用创新的结构形式表现建筑造型

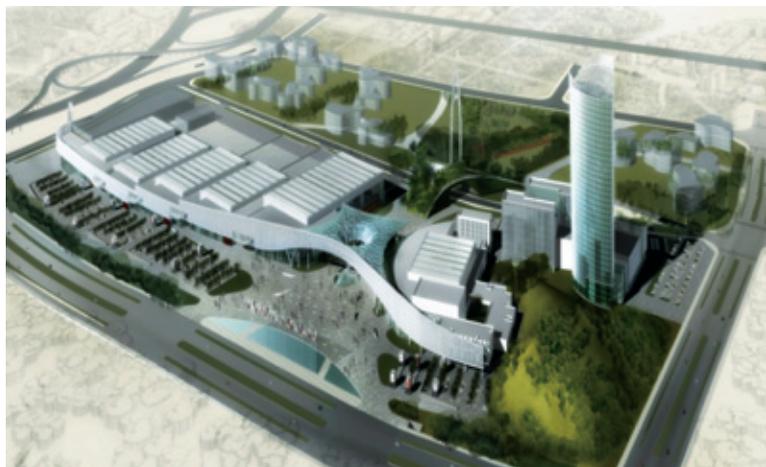
近年来，建筑方案创作越来越丰富，设计的复杂性大大提高，传统的单一结构形式很难满足实际工程的需要。为了满足建筑功能的要求，取得良好的技术经济效果，需要结合建筑创意，对结构体系进行创新。结构形式应与建筑造型紧密结合，实现建筑与结构的和谐统一，尽量避免采用二次结构。

1.1 晋江市品牌博览广场

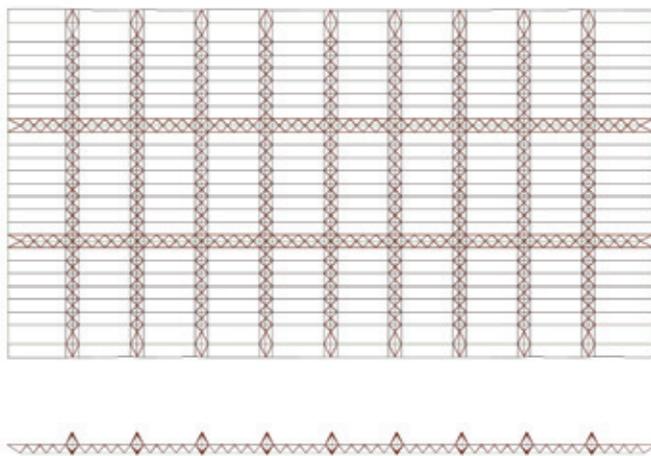
晋江市品牌博览广场总建筑面积约 100 000m²，主要包括展厅、入口广场、多功能厅、会议楼及附属用房等部分。展厅主体结构采用侧向刚度较大、经济性较好的钢筋混凝土框架结构体系，内部不设柱，以满足建筑对大空间的使用要求。展厅大跨度屋盖采用富有现代气息的空间管桁架钢结构体系，不同于展厅屋盖常见的空间三角形桁架或张弦桁架。在该工程中改用菱形截面形式、总高度为 4m 的桁架，沿纵向设置两道截面为倒三角形的桁架，屋面板布置在菱形的腰部标高，在室内人视觉的范围内高度仅为 2m，室内净空高大。此外，桁架凸出屋面的三角形形成了具有一定韵律的脊线，建筑造型别致。通过上述简单的改进，在传统的三角形空间桁架的基础上，取得了较好的效果，且施工方便，经济合理。

1.2 苏州火车站改造工程

苏州火车站改造工程属原址改扩建项目，地下 3 层，地上 2 层。地面以上由北站房、南站房与候车大厅组成。北站房广厅的室内空间非常高大，南站房结合广场，为开放式的半室外空间。大跨度屋盖平面呈“工”



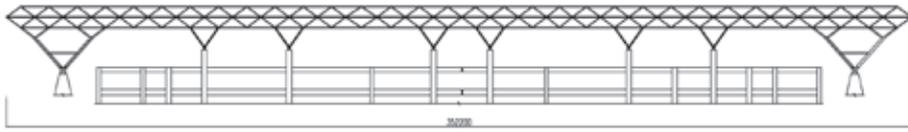
晋江市品牌博览广场



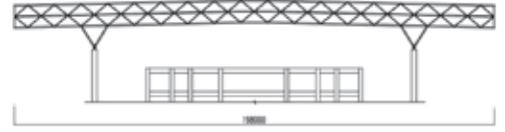
结构平面布置和剖面图



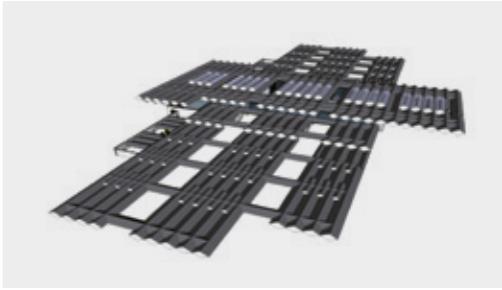
苏州火车站



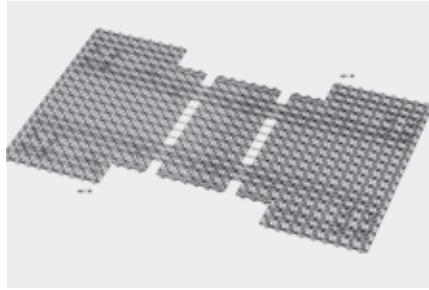
纵向剖面图



横向剖面图



苏州火车站房屋盖



苏州火车站房屋盖结构布置图



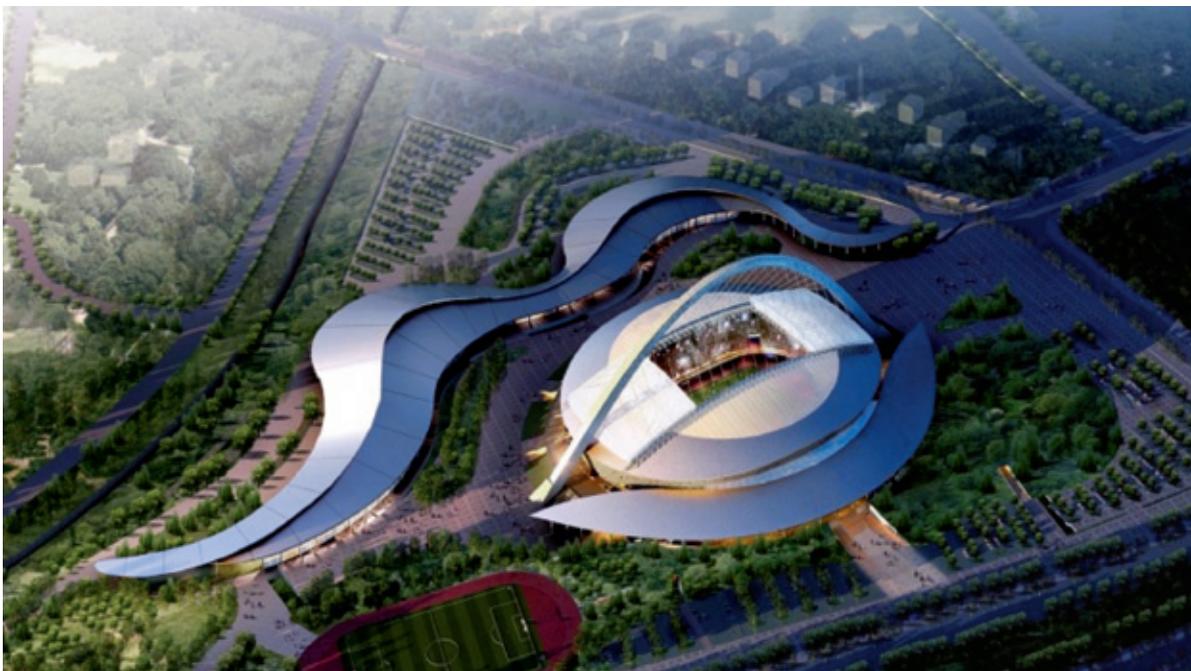
屋盖实景照片

字形，南北方向最大长度为 352.2m，东西方向最大长度为 198m，屋盖最高为 31.855m，屋盖钢结构覆盖面积达 60 000m² 左右。建筑师在方案创作中，从苏州园林借景窗的造园艺术中汲取灵感，用菱形窗格表现站房的屋顶。为了完美表现建筑创意，大跨度屋盖结构采用密排菱形桁架形成的空间结构，结合铁路轨距的模数，桁架宽度为 11m，高度为 8m，很好地满足了建筑造型与采光的要求。该工程建成投入使用后，被评为苏州的十大建筑之一。

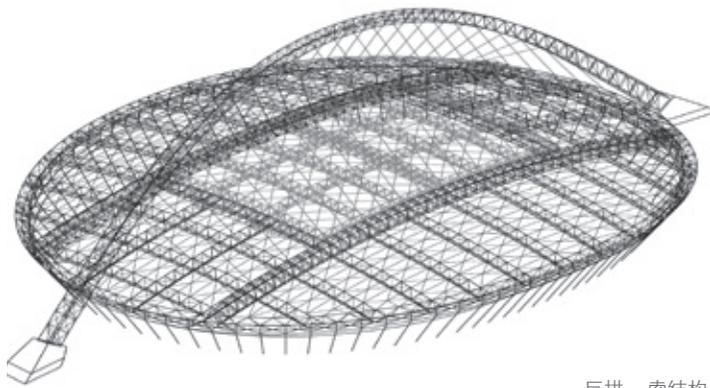
1.3 鄂尔多斯东胜体育场

鄂尔多斯东胜体育场共有观众席 40 500 座，总建筑面积为 100 451m²。体育场固定屋盖投影为椭圆形，长轴为 268m，短轴为 220m。巨拱跨度达 330m，最大高度 129m，旁边飘带形状建筑长 1 000m 左右，是它的附属场馆，包括游泳馆、体育馆及展厅。体育场带有可开闭屋顶，最大可开启面积（水平投影）为 10 076.2m²。

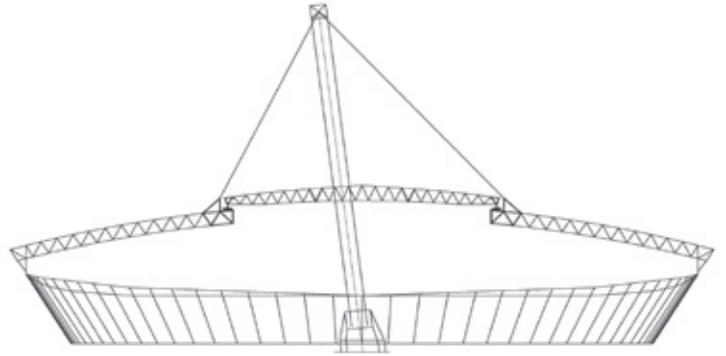
鄂尔多斯东胜体育场建筑方案寓意了内蒙古草原的弓箭、琴弦。设计中巧妙地借鉴了钢管拱桥的设计理念，通过钢索将屋盖大部分重力荷载传给巨拱，结构体系合理、新颖。巨拱采用近似悬链线形钢管桁架，通过多根钢索与屋盖主桁架上弦节点相连，有效减小了固定屋盖在活动屋盖运行时的变形量，桁架高度大大降低，建筑美观，用钢量小。关于巨拱是否倾斜的问题，建筑师与结构工程师的看法明显不同。建筑师认为带有一定倾斜角度的巨拱整体更为灵动，但是从结构专业的角度来看，活动屋盖两边的轨道不易保持平衡，技术难度很大。最终经过反复推敲，将巨拱整体倾斜减小为 6.1°，既满足了建筑效果，又控制技术难度不致过大。目前活动屋盖运行情况良好，体育场已经成功举办过包括第 62 届世界小姐总决赛在内的多项重大活动，赢得了很好的国际声誉。



鄂尔多斯东胜体育中心



巨拱 - 索结构



空间桁架架活动屋盖



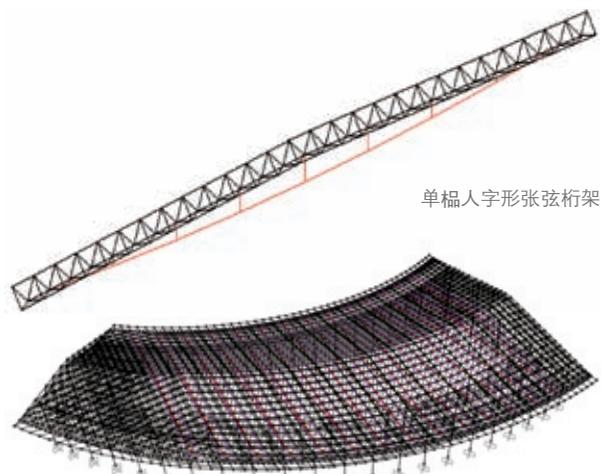
鄂尔多斯东胜体育场室内实景照片



东胜体育场实景照片



鄂尔多斯东胜体育馆室内效果



单楹人字形张弦桁架

展厅屋盖模型

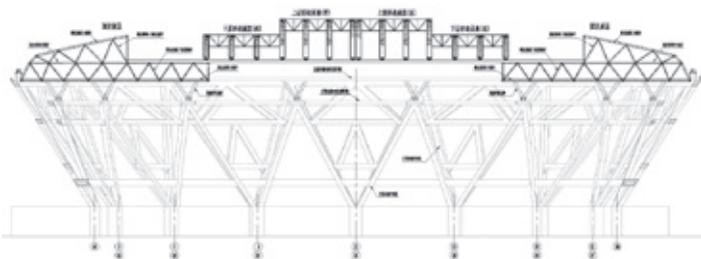
1.4 鄂尔多斯东胜体育馆、游泳馆

鄂尔多斯东胜体育馆、游泳馆的屋盖建筑造型类似飘带，屋盖为坡度 10° 的双坡顶，屋脊为连续光滑曲线，最大跨度达 72m，周边悬挑长度为 12m。为了满足建筑造型与受力合理性的要求，屋盖采用张弦结构，受压构件为空间管桁架，下弦为钢索，垂跨比为 1/25 左右，在上、下弦之间设置圆钢管作为撑杆。与传统的张弦桁架不同，在相邻空间管桁架之间设置双层网壳，增加桁架的稳定性与刚度，适应不规则屋盖曲面与周边悬挑，管桁架与网壳杆件均采用热轧无缝圆钢管，管桁架采用腹杆与弦杆相贯焊接节点，网壳采用焊接球节点。由于张弦结构的下弦钢索有效平衡了双坡屋盖对柱顶的水平推力，屋盖结构总高度增加，使用钢量大为减少。由于张弦撑杆排列有致，钢索尺寸纤细，室内有效高度增加，建筑效果简洁明快，取得了很好的技术经济效果。

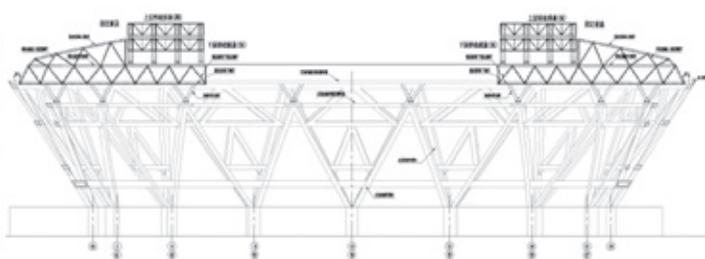
1.5 国家网球馆

国家网球馆（钻石球场）位于北京市朝阳区奥林匹克公园北区，赛时看台区总座席数为 13 598 个，总建筑面积约 51 199m²。国家网球馆固定屋盖最大直径为 140m，中间带有可开启的活动屋盖，开启面积约为 70m × 60m。结构师与建筑师密切配合，结合建筑立面效果，设置 16 组 V 形柱，使结构的刚度大大增强。

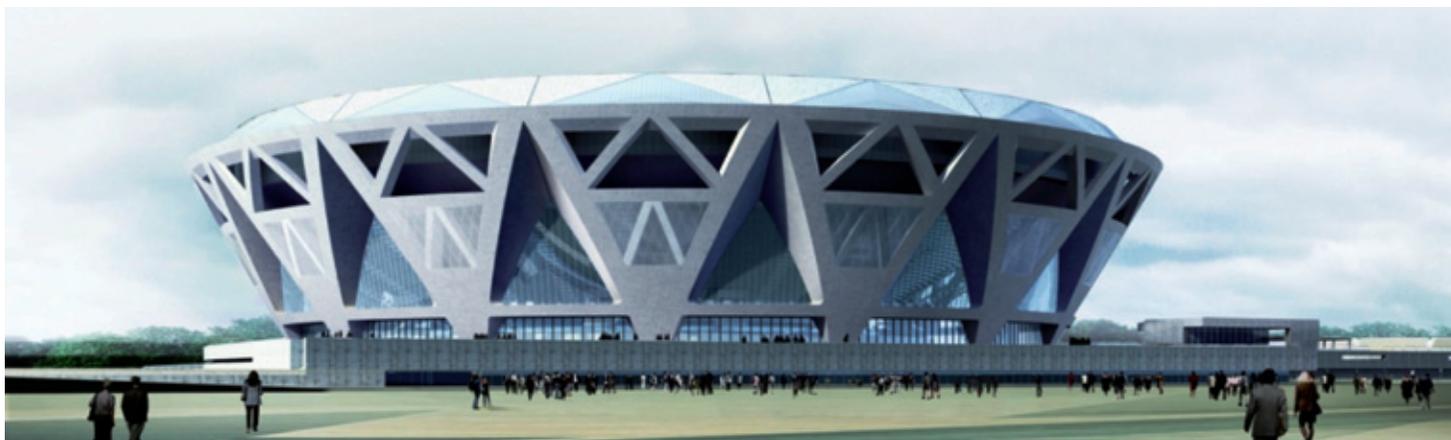
大跨度屋盖平面呈圆形，固定屋盖最大直径为 140m，中间带有可开启的活动屋盖，在场地中央设置



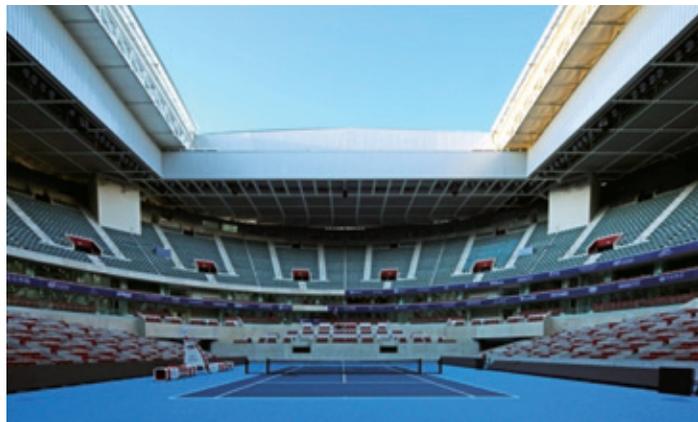
活动屋盖全闭状态



活动屋盖全开状态



国家网球馆“钻石球场”



国家网球馆“钻石球场”室内实景

70m×60m的矩形洞口。固定屋盖采用网壳结构，在活动屋盖可移动范围内为双层网壳，便于支承活动屋盖的轨道；周边为三层网壳，使结构刚度有效增大，同时能够很好地满足建筑立面对活动屋盖遮挡的效果要求，也形成了颇具特色的建筑立面。国家网球馆是目前国际最先进的网球比赛场馆，已经成功举办过中国网球公开赛等重大国际赛事。

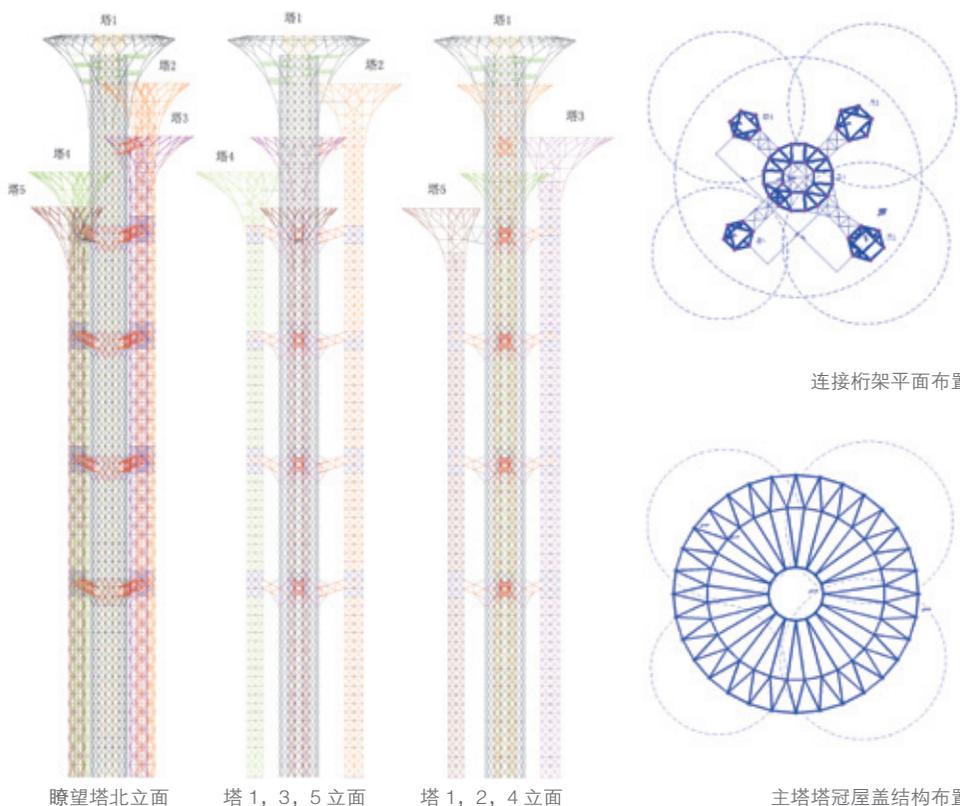
1.6 奥运瞭望塔

奥运瞭望塔位于北京市奥林匹克公园中心区内，主体建筑紧邻中轴线景观大道。建筑占地面积约为6500m²，总建筑面积为1.8万m²。瞭望塔由5个直径与高低各不相同的单塔组成，最大高度约为248m。每个单塔均由圆柱状塔身与顶部树冠形的瞭望大厅与瞭望平台组成。中间主塔直径为14.8m，其余为7.2m与6m，基座大厅最大高度为18m。该工程建筑方案寓意为“生命之树”。

每个单塔的高跨比很大，为了增强结构的整体侧向刚度，在5个单塔之间设置连接桁架，形成多连体结构，大大提高了结构的抗倾覆能力，满足了结构在风荷载作用下的舒适度要求，也保证了结构在罕遇地震作用下的安全性。连接桁架高3.3m，宽2.7m，并在主塔一侧设有加腋。连接桁架倾斜向上，寓意生长，此外，连接桁架还作为各塔之间的联络通道。我们将这种结构称为组合塔式结构，随着建筑高度增加，侧向刚度成为主要控制因素，多塔组合是满足建筑功能、形式新颖的高效能结构之一。



奥运瞭望塔建筑实景



瞭望塔北立面

塔1, 3, 5立面

塔1, 2, 4立面

连接桁架平面布置

主塔塔冠屋盖结构布置

2 用特殊构件增强建筑的表现力

在大型复杂公共建筑设计时，建筑师有时希望结构外露，直接用结构构件表现建筑效果，减小额外的建筑装饰，这就对构件的截面形式与表面效果提出了比较高的要求。此时，结构工程师需要考虑特殊构件的构造、受力性能与加工制作工艺的可行性。

首都博物馆新馆地面以上平面呈长方形，长 144m，宽 65m，建筑总高度约 40m，分为北侧的主展览楼、椭圆形展览楼、南侧的管理办公楼及东侧钢平台等几部分。其中椭圆形展览楼地面以上 6 层，内筒长轴 29.2m，短轴 21.2m，外筒长轴 34.0m，短轴 26.0m，以 10:3 的斜率向北倾斜，在距 ±0.00 标高约 10m 处突出墙面，屋面结构标高 39.5m，2003 年竣工。

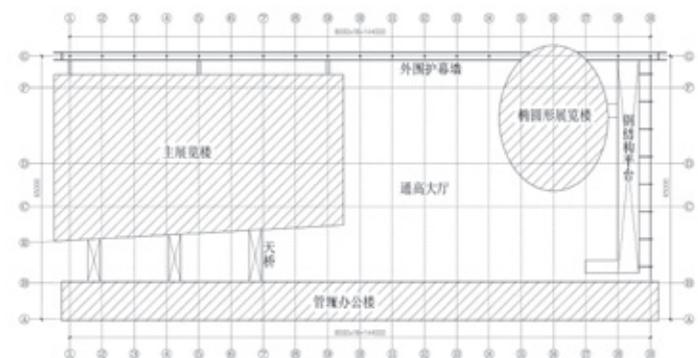
2.1 首都博物馆新馆

建筑屋盖东西方向长 168m，南北方向长 89m，其中椭圆形展览楼从大跨度屋盖的顶部穿出，并在与屋盖相交处设置环形采光带。屋盖在建筑北侧的悬挑长度达 21m，在其他三面的外挑长度为 12m。屋盖采用单坡排水，北侧高，南侧低，坡度为 2%，南、北挑檐上表面与下表面夹角均为 12°，东、西挑檐上表面与下表面的夹角由南到北从 12° 连续变化到 16°，挑檐端部非常尖锐。

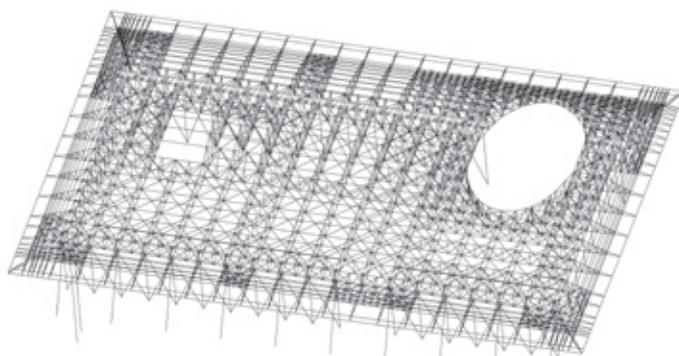
大跨度屋盖采用钢桁架结构体系，主桁架南北向布置，间距为 8m。在大跨度钢桁架结构体系设置了长轴为 41m、短轴为 32m 的椭圆形大洞，使屋盖结构与下部混凝土结构完全脱开，避免屋盖结构出现偏心。



首都博物馆新馆



展厅下部混凝土结构布置



屋盖钢结构计算模型



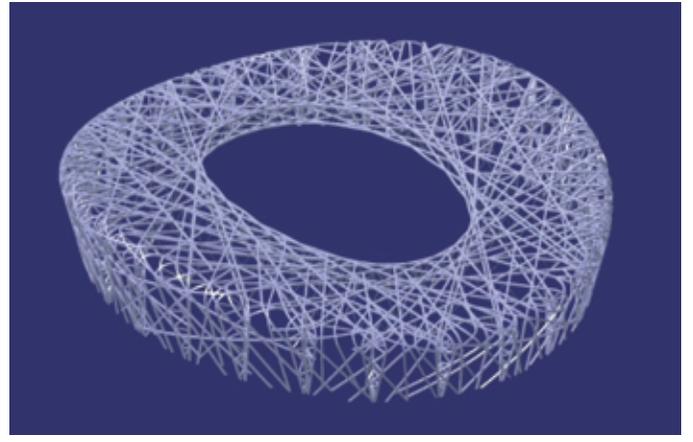
屋盖北侧的悬挑桁架



悬挑桁架端部的变截面 H 型钢



国家体育场“鸟巢”实景



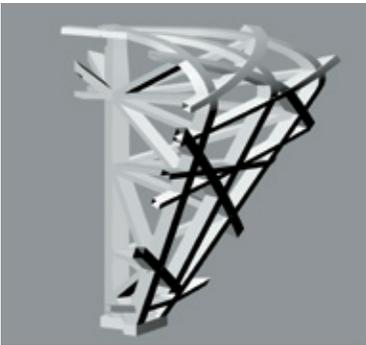
国家体育场“鸟巢”几何模型

为了实现屋盖 21m 悬挑端部厚度逐渐减小为零的建筑创意，在悬挑端部将桁架改为下沉式变截面 H 型钢，且垂直方向的次构件高度低于悬挑桁架的上弦，很好地实现了尖端部分的效果。此外，在屋盖挑檐前端 4m 范围内设置金属百页，既可以实现屋盖阴影光线的柔和过渡，也可以有效减小屋盖悬挑端的风荷载，达到了理想的效果。

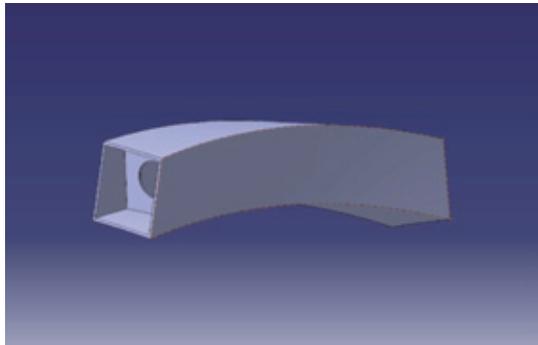
2.2 国家体育场“鸟巢”

北京国家体育场是第 29 届奥运会的主会场，固定座席可容纳 8 万人，活动座席可容纳 1.1 万人，总建筑面积约为 25.8 万 m^2 。国家体育场屋面呈双曲线马鞍形，长轴为 332.3m，短轴为 297.3m，交叉布置的主结构与屋面及立面的次结构一起形成了“鸟巢”的特殊建筑造型。

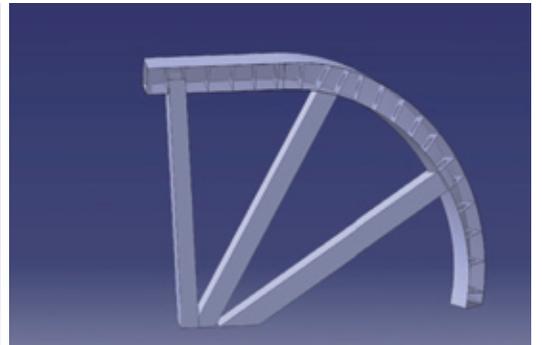
迄今为止，对于薄壁箱形构件的研究主要着重于以薄壁为特征的直梁和曲梁的性能研究，对于扭曲薄壁箱形构件的系统理论研究尚未涉及。而扭曲构件在建筑工程中的应用也尚属首次，国内外目前均无相关的技术规程与工程实例。此外，箱形扭曲构件空间关系非常复杂，常规设计软件无法完成其几何构型。同时，传统的制图方式无法表达其几何定位与板件之间的相对关系。设计中提出设置内部加劲肋的扭曲箱形构件构造，通过有限元分析、试验研究、工艺试验，完全实现了扭曲构件表面光滑平顺的建筑效果。



桁架柱几何模型



扭曲薄壁箱形构件



扭曲薄壁箱形构件的内部加劲肋



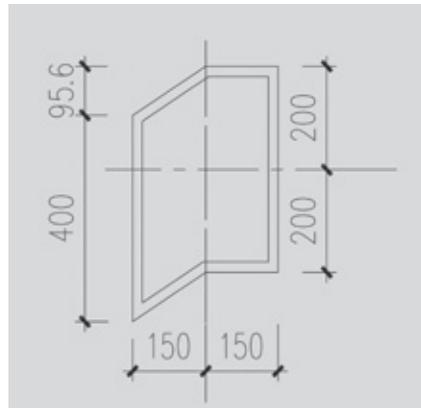
扭曲箱形构件工厂加工制作



扭曲箱形构件现场安装



奥运演播塔（玲珑塔）



异形箱形截面



加工的异形箱形构件

2.3 奥运演播塔（玲珑塔）

奥运演播塔位于奥林匹克公园中心区中部，是2008年北京第29届奥运会期间主要转播现场，是一个坐标性构筑物。演播塔总高度为132m，总建筑面积4299m²，地上沿高度方向共设有7层演播室。每层塔楼相隔13.5m，每个塔楼设有两层，上层为演播室工作平台，下层为卫生间及设备用房。建筑平面为等边三角形，三个角筒为垂直交通空间，建筑外形很别致。结合建筑平面，将角部的消防楼梯梁作为柱间支撑，形成巨型角筒；利用屋面斜梁作为巨型支撑，形成“巨型柱+巨型支撑”的结构体系。在结构设计时，大胆采用异形截面构件，很好地满足了建筑立面理想多面体的造型，且玻璃幕墙安装非常方便。

2.4 天津国际金融会议酒店

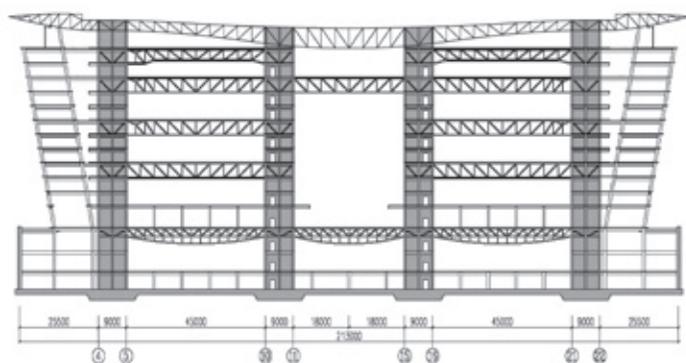
天津国际金融会议酒店位于天津滨海新区于家堡金融区起步区一期03-04地块，集会展、大型会议、五星级酒店与奢华公寓于一体，总建筑面积约19.3万m²。其中地下部分约6.5万m²，地上部分约12.8万m²。地下2层，地上12层，建筑总高度约60m。



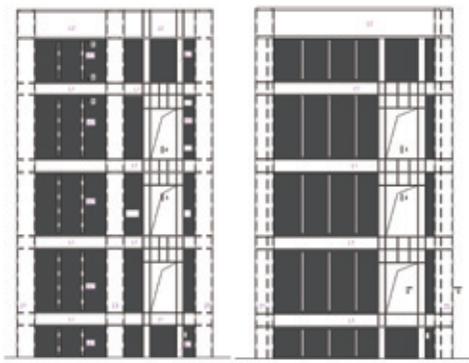
天津国际金融会议酒店



施工现场



多层大跨度结构体系



矩形洞口带肋钢板剪力墙

建筑平面呈“∞”形，造型独特，建筑功能多样。酒店客房和公寓环向设置在外侧，会议室、汇报厅、宴会厅和博物馆设置在中央，形成45m大跨度空间。建筑顶部用大跨度屋盖将两个塔楼连接为一个整体。由于在不同标高均需要大空间，在多处形成跃层结构。围绕四季厅的超大面积玻璃幕墙，形成东西通透的建筑效果。

项目为多层大跨度结构，采用由“钢板剪力墙筒体+桁架”形成的巨型框架与“钢管混凝土柱+H型钢梁框架”形成的双重抗侧力体系。结构筒体内部主要作为楼电梯使用空间，是竖向承重与抗侧力的主要构件。由于筒体布置了门洞，若用钢支撑形成框架-支撑筒体，将无法进行门洞布置。故此，在设计时采用了带有矩形洞口的钢板剪力墙，由钢管混凝土柱、H型钢梁形成边框，然后在其中镶嵌钢板剪力墙形成筒体。钢管混凝土柱主要承担竖向力，充分发挥其组合构件承载力高、性能优越的特点。钢板剪力墙仅用于承担水平剪力，在钢板表面设置槽形加劲肋，可以避免过早发生局部屈曲，结构的整体性、刚度与延性显著提高，具有大变形能力，耗能能力强。与钢筋混凝土筒体相比，钢板剪力墙筒体大大提高了对超长结构温度变形的适应能力。该项目也是开洞钢板剪力墙在我国的首次应用。

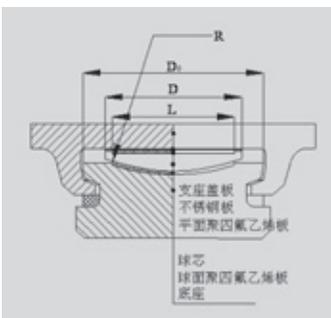
3 用新技术改善建筑效果

3.1 宁波国际会展中心

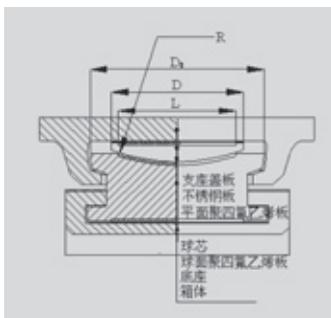
宁波国际会展中心由主展厅、小展厅、西展厅、东展厅、商务办公楼和会议楼等子项构成，总建筑面积约90 000m²，主要用于举办每年一度的国际服装节。在主展厅两侧与南侧为半室外广场，覆盖有圆柱壳形屋盖，起到全天候条件下联系各展厅的作用。为了达到理想的建筑效果，不希望的结构单元之间设置双柱。结构设计采用了固定铰、单向滑动以及双向滑动等多种抗震球形支座，将大跨度屋盖支承在5栋独立的结构之上，避免了不同结构单元差异变形的影响，达到了理想的建筑效果。



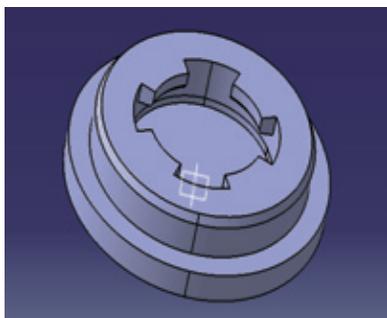
宁波国际会展中心



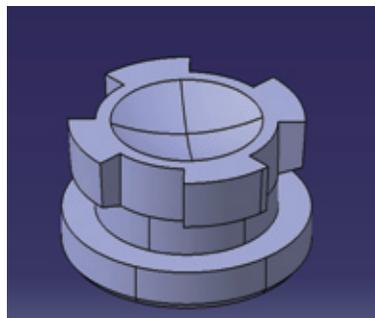
固定球形支座



滑动球形支座



支座盖板



支座底座



中关村金融中心实景



塔楼之间的连桥

3.2 中关村金融中心

中关村金融中心塔楼 150m 高，连桥将塔楼与配楼连为一体，长约 140m，宽约 30m，平面及空间均为弧形，造型复杂独特，建筑师不希望连桥在建筑的一侧设置落地柱。连桥由 4 个混凝土筒体、钢桥及门式刚架顶盖组成。桥面采用空间钢桁架结构，上铺压型钢板混凝土楼面。钢桁架最大跨度约 35m，次桁架最大悬挑长度约 10m。连廊屋面采用空间门式刚架结构。主桁架在主楼、副楼处支座为双向可滑动，设计滑动量 350mm。主桁架在筒体处支座施工阶段可滑动，使用期为固定铰支座。

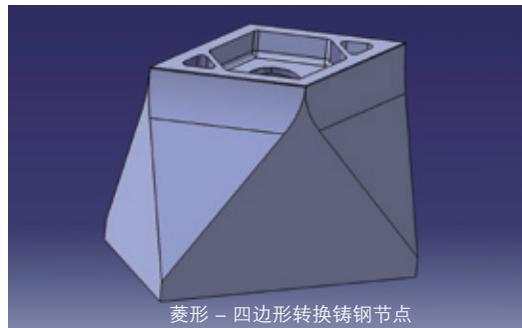
4 新型节点使建筑构造更流畅

空间结构的节点形式多种多样。螺栓球节点与焊接球节点主要适用于网架与网壳结构，相关焊接节点主要适用于管桁架结构。随着相交杆件数量的不断增多及杆件夹角呈现不规则性，铸钢节点在空间结构中的应用也逐渐增多。构造简单、传力直接、降低制作成本，始终是节点设计的关键问题。通过采用 CATIA 软件等高级三维建模技术，完成复杂节点的构型设计，对节点进行应力分析，并根据需要通过试验研究确认节点的实际受力性能。

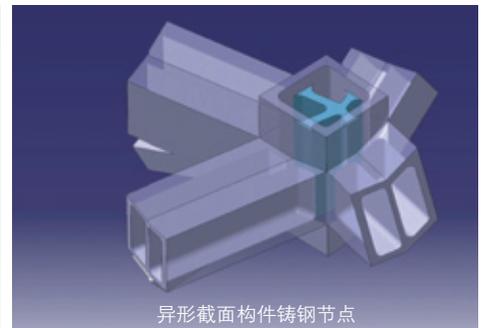
国家体育场大跨度屋盖的 24 根桁架柱均由一根垂直的菱形内柱、两根倾斜的外柱以及内柱与外柱之间的腹杆组成，如同垂直放置的变高度三角形空间方管桁架。桁架柱的腹杆分别位于各自主桁架的平面内，外柱截面近似为方形，除有多根腹杆与内、外柱相交外，还有与立面次结构相交的情况，且构件的角度规律性差。桁架柱的内柱节点，相交腹杆的数量多，角度复杂，对称性差。内柱与主桁架下弦之间的柱顶节点，最多有 13 根杆件交汇在一起。节点形式特殊，构造复杂，在国内外钢结构中均无先例，合理进行节点的设计，是保证国家体育场大跨度钢结构安全性的关键问题之一。



圆钢管相贯焊接节点

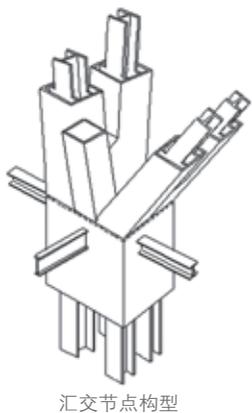


菱形 - 四边形转换铸钢节点

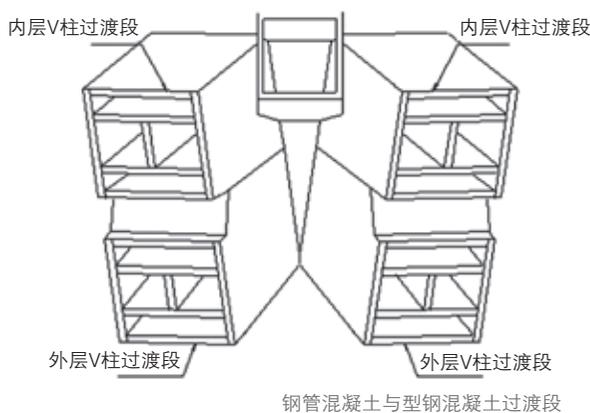


异形截面构件铸钢节点

复杂节点构型技术



汇交节点构型



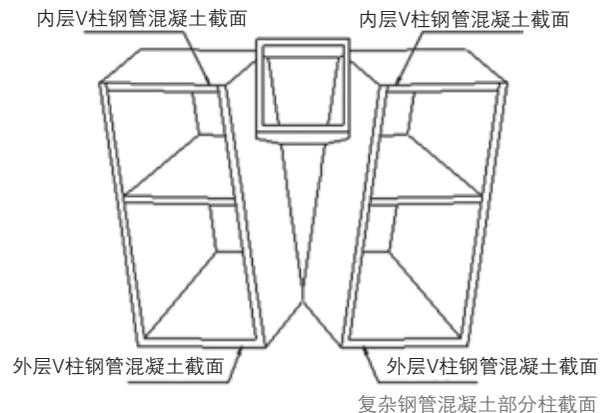
内层V柱过渡段

内层V柱过渡段

外层V柱过渡段

外层V柱过渡段

钢管混凝土与型钢混凝土过渡段



内层V柱钢管混凝土截面

内层V柱钢管混凝土截面

外层V柱钢管混凝土截面

外层V柱钢管混凝土截面

复杂钢管混凝土部分柱截面



奥运景观灯柱



奥运公园下沉广场——礼乐重门

国家网球馆钢筋混凝土看台立面底部节点由两根内V形柱、两根外V形柱以及内斜柱相交，内、外V柱均为钢骨混凝土柱，内斜柱为钢筋混凝土柱。在节点域采用带竖向隔板与加劲肋的钢套筒，便于与V形柱的型钢连接，型钢混凝土柱的钢筋则通过与钢套筒侧壁焊接，从而避免了大量交叉钢筋的连接、锚固问题，有效增强了节点的强度，大大简化了施工难度，实施情况良好。

5 利用结构表现特殊形态

许多功能特殊的造型是以构筑物或雕塑的形态出现的，此时结构构件更能体现出造型的骨骼与肌理，可以从生态的角度诠释建筑。

奥运景观灯柱位于奥林匹克公园中心区内，共29根，其中沿中轴景观大道东侧南北纵向25根，庆典广场上4根，灯柱间距为72~90m左右，高均为25m，上有5片或4片扇形叶子沿灯柱高度螺旋上升或高低落错布置。主要功能为照明及赛事发布信息 and 赛后商业运作，并进行安全监控、广播。灯柱外形似北京的银杏叶，由叶脉、叶片、叶柄、叶茎组成，平面呈伞状布置，冠部投影直径达12m。

结合建筑创意，采用变截面H型钢作为叶脉、变截面箱形构件作为叶柄，10根焊接箱形构件合并而成灯柱。箱形构件合围的空腔可以作为管线的通道。在叶茎的上部，10根箱形构件两两一组，在不同的高度向外倾斜并逐渐张开，截面高度逐渐减小，形成叶片两侧的叶柄，承托叶片的荷载。在两根叶柄之间设置环向、径向及水平支撑构件，形成叶片结构（叶脉），便于安装照明等各种设备。该造型美观典雅，富有北京特色。

奥运公园下沉广场中的“礼乐重门”景观是由我院完成设计的，其中的“鼓墙”采用斜交网状钢结构，为了安装大小不同的鼓，不少构件需要中断，完成后的鼓墙具有很强的庆典装饰作用，烘托出喜庆祥和的气氛。

6 结语

我国经济的发展给建筑工程提供了很多机遇，结构师通过不断努力探索与技术创新，可以在很大程度上不断完善和丰富建筑创作，改进建筑效果，为建筑方案提供更加坚实的技术支持。▲