

现代空间结构与奥运场馆建设

沈世钊

(哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150090)

[摘要] 介绍了2008年北京奥运场馆的总体建设情况,结合一些具有代表性的场馆,对其新颖独特的建筑造型、先进的结构体系以及在设计、材料、施工和监测等方面所采用的大量自主创新技术进行了重点探讨。通过对一些具有经典意义的奥运建筑进行回顾,指出它们的共性特点是:新颖的建筑造型、创新的结构形式与建筑功能的统一;符合建筑技术(包括材料、构造、施工安装技术等)的发展方向,推动了技术的进步。比照这些优秀奥运建筑,有理由相信2008年北京奥运场馆中的一些杰出代表建筑,将有条件成为这一行列的新成员。

[关键词] 现代空间结构;奥运建筑;设计理念;技术创新

[中图分类号] TO3;TO245.4 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)08-0012-10

1 奥运建筑与空间结构

1890年,现代奥运之父皮埃尔·德·顾拜旦先生游历了奥林匹克运动的发源地——希腊的奥林匹亚,萌生了邀请世界各国参加奥运会的大胆设想。在他的不懈努力下,1896年这一设想变成了现实,第一届现代奥运会在希腊雅典成功举办。回顾百年奥运历程,奥运场馆建设也在默默地实践着“更高、更快、更强”这句奥林匹克格言。在奥林匹克运动发展的初期,受到当时的经济、技术水平限制,各种奥运设施都非常简陋。此后相当长一段时间里,虽然奥运场馆建设有了一定的发展,但也仅以满足基本的比赛需求为目标。随着二战的结束,人们对和平的向往以奥运竞技的形式迸发出来,奥林匹克运动迎来了快速发展时期。与此相适应,人们也以越来越大的热情进行奥运场馆建设,一批经典的奥运建筑随之诞生。当人们尽情享受各国健儿呈献的竞技盛宴之时,美轮美奂的奥运场馆也为历届奥运会增添了许多绚丽的色彩。如果说奥运健儿赛场拼搏给人们留下了无形的精神财富,奥运场馆留下的则是一份宝贵的物质遗产。

空间结构因其形式多样且受力合理、可跨越大

空间的特点,一直是奥运场馆结构方案的首选。借助奥运场馆这一舞台,举办国不遗余力地将最先进的空间结构形式和建造技术运用其中,藉此来展示其在建筑科技领域的综合实力。一些优秀的奥运建筑往往成为某一种空间结构体系的代表性作品。因而现代奥林匹克运动的历史在一定程度上是现代空间结构技术发展史的最好见证。

所谓“空间结构”,是相对于梁、拱、桁架等传统“平面结构”而言的。在实际的三维世界里,任何结构实际上都是空间性质的,只不过出于简化设计和建造的目的,人们在许多场合有条件地把它们分解成一片片平面结构来进行构造和计算。与此同时,真正意义上的空间结构(无法进行简单分解)也始终没有停止其自身的发展,并日益显示出一般平面结构无法比拟的创造潜力。空间结构的卓越性能不仅仅表现在三维受力,而且还在于通过合理的曲面形体来有效抵抗外荷载的作用。当跨度增大时,空间结构就愈能显示出其优越的技术经济性能。事实上,当跨度达到一定程度后,一般平面结构往往已难于成为合理的选择。从国内外工程实践来看,包括奥运场馆在内的大跨度建筑多数采用各种形式的空间结构体系。

空间结构的形式十分丰富多彩,大体上可分为

[收稿日期] 2008-06-06

[作者简介] 沈世钊(1933-),男,浙江嘉兴市人,中国工程院院士,哈尔滨工业大学教授,研究方向:大跨空间结构

如下基本类型:a. 钢筋混凝土薄壳结构;b. 空间网架结构,包括各种形式的网架结构、网壳结构;c. 张力结构,包括各种形式的悬索结构、薄膜结构或索-膜结构;d. 混合结构——由刚性构件和柔性索组合而成的一类结构形式,如各种形式的张弦结构、斜拉结构等。在上述各种空间结构类型中,钢筋混凝土薄壳结构在 20 世纪 50 年代、60 年代曾获得不少发展,但目前应用已较少,主要原因是施工比较费时、费事。其他类型的空间结构近 40 年来发展很快,且随着建筑材料和建筑技术的进步,在结构形式和建造技术上不断创新,跨度和覆盖的空间也越来越大,表现出十分旺盛的生命力。

2008 年北京奥运会使中国人前所未有地近距离感受到奥林匹克的气息,也为中国大跨空间结构的发展提供了广阔舞台。经过近 5 年的紧张筹备与

建设,如今奥运场馆已成功投入使用。系统总结这些场馆建设中所采用的先进设计理念和自主创新技术,对于推动我国空间结构的进一步发展具有十分重要的意义。

2 北京奥运场馆总览

2008 年奥运会比赛场馆共 37 个,其中北京地区 31 个,京外地区 6 个。京外的场馆为:青岛国际帆船中心、天津体育场、秦皇岛体育场、沈阳五里河体育场、上海体育场和香港马术赛场。北京地区的 31 个场馆(其中 12 个新建场馆,8 个临时场馆,11 个改扩建场馆),相对集中于奥林匹克公园区、西部社区、大学区和北部风景区等 4 个区域,形成了一个中心加三个区域”的格局。图 1 为北京比赛场馆分布图,表 1 为全部比赛场馆的名称。



图 1 北京比赛场馆分布图

Fig. 1 Locations of the stadiums/gymnasiums of the Beijing Olympic Games

表 1 北京奥运场馆汇总

Table 1 Summation of the stadiums/gymnasiums of the Beijing Olympic Games

新建场馆	改扩建场馆	临建场馆
1 国家体育场	13 奥体中心体育场	24 国家会议中心击剑馆
2 国家游泳中心	14 奥体中心体育馆	25 北京奥林匹克公园曲棍球场
3 国家体育馆	15 北京工人体育场	26 北京奥林匹克公园射箭场
4 北京射击馆	16 北京工人体育馆	27 北京五棵松体育中心棒球场
5 北京奥林匹克篮球馆	17 首都体育馆	28 朝阳公园沙滩排球场
6 老山自行车馆	18 丰台体育中心垒球场	29 老山小轮车赛场
7 顺义奥林匹克水上公园	19 英东游泳馆	30 铁人三项赛场
8 中国农业大学体育馆	20 老山山地自行车场	31 公路自行车赛场
9 北京大学体育馆	21 北京射击场飞碟靶场	
10 北京科技大学体育馆	22 北京理工大学体育馆	
11 北京工业大学体育馆	23 北京航空航天大学体育馆	
12 北京奥林匹克公园网球场		

在进行这些场馆的规划设计时,提出了如下基本原则。a. 场馆的规划设计既要有利于奥运体育比赛,又要充分考虑赛后利用,最大限度地发挥奥运场馆的社会效益。例如,把许多新建场馆放在西部社区和大学校园里,主要就是照顾到赛后的充分利用。b. 坚持勤俭节约,力戒奢华浪费。所有场馆设施建设的规模、位置、数量逐一进行论证,能够利用现有场馆进行改建、扩建的就不新建,能用临时性场馆的就不建永久性场馆。c. 创造出体育建筑精品,充分利用可持续发展的理念,努力探索建筑技术、艺术与环保的有机结合,充分体现“绿色奥运、科技奥运、人文奥运”理念,为首都留下宝贵的奥运遗产。

从结构角度,应该在奥运场馆建设中创造出空间结构的精品。对大跨度体育建筑来说,一个完美的设计应该体现出建筑造型、结构形式与使用功能的和谐统一;因而合理结构形式的选择具有十分重要的意义。现在看来,2008 北京奥运场馆的建设者们是努力做到了这一点。从表 2 可以看到,新建奥

运场馆采用了丰富多彩的空间结构体系,并呈现出一些值得注意的特点。a. 创造出一些新颖的空间网格结构,如国家体育场采用以格构式交叉刚架为主体,外加自由布置的次结构而形成的仿生式网格结构;国家游泳中心采用基于多面体理论的空间网架,这两种结构形式在世界范围内都是独一无二的。b. 先进的张弦结构体系得到广泛应用,如国家体育馆采用双向张弦桁架,北京工业大学体育馆采用联方型球面弦支网壳,北京大学体育馆采用矩形平面弦支网壳,都是这类张弦体系第一次在如此大跨度建筑中的应用,因而也构成了本届奥运场馆结构建设的亮点。c. 传统空间网格结构得到进一步发展,如北京奥林匹克篮球馆采用巨型网格平板网架,沈阳奥体中心体育场采用超大跨拱支单层网壳,老山自行车馆采用大跨度双层球面网壳,天津奥体中心体育场采用 V 形大悬臂空间桁架,都代表空间结构形式的不断创新,反映了空间结构旺盛的生命力和强大的适应性。

表 2 新建奥运场馆的结构形式

Table 2 Structural forms adopted in the new Olympic stadiums/gymnasiums

场馆名称	结构形式	场馆名称	结构形式
国家体育场	仿生式网格结构	北京大学体育馆	矩形平面弦支网壳
国家游泳中心	多面体空间网架	北京科技大学体育馆	平板网架
国家体育馆	双向张弦桁架	北京工业大学体育馆	联方型球面弦支网壳
北京射击馆	网架与桁架结构	北京奥林匹克公园网球场	钢筋混凝土悬挑板梁结构
北京奥林匹克篮球馆	巨型网格平板网架 (交叉桁架)	天津奥林匹克中心体育场	V 形大悬臂空间桁架
老山自行车馆	双层球面网壳结构	沈阳奥体中心体育场	拱支单层网壳
顺义奥林匹克水上公园	刚架结构	秦皇岛市奥体中心体育场	膜结构
中国农业大学体育馆	桁架结构		

应该说,这些奥运场馆建设反映了我国大跨空间结构发展的最高水平,其中所蕴含的先进设计理念、所采用的创新结构形式,以及所开发的新材料、新技术、新方法,对于我国空间结构发展有十分重要的借鉴意义。

3 创新的设计理念

现代设计大师蒙荷里·纳基曾指出:“设计并不是对制品表面的装饰,而是以某一目的为基础,将社会、人类、经济、技术、艺术、心理的多种因素综合起来,使其能纳入工业生产的轨道。”基于这样一种思想,可以把设计理念理解为,是设计者对以上诸多因素的权衡与调配,目的是借助建筑的表象来传达

其独特的构思和情感。

北京奥运场馆建设过程中,“鸟巢”、“水立方”以其新颖的设计理念,创造出令人耳目一新的大跨空间结构形式。而张弦结构等先进空间结构体系在许多场馆中获得成功应用,则从技术的层面折射出北京奥运场馆设计理念的另一个亮点。

3.1 国家体育场

国家体育场的“鸟巢”建筑方案是经全球设计竞赛招标,并经专家评审和公众投票后,在 13 个方案中脱颖而出的。该方案由瑞士 Herzog & de Meuron 建筑师事务所、中国建筑设计研究院及英国 Ove Arup 工程顾问公司联合设计。设计师按下面的方式规划了“鸟巢”的形体:其外墙面为椭圆锥面,内墙面为椭圆柱面,屋面为马鞍形,是圆环体内侧表面

的一部分;屋顶内外表面相互平行,相距 12 m;屋面与外墙面通过半径为 8 m 的圆弧连接(见图 2)。构成的巨大椭圆形体长轴 332.3 m,短轴 296.4 m,最高点高度为 68.5 m。

体育场中央开有 185.3 m × 127.5 m 的椭圆孔。

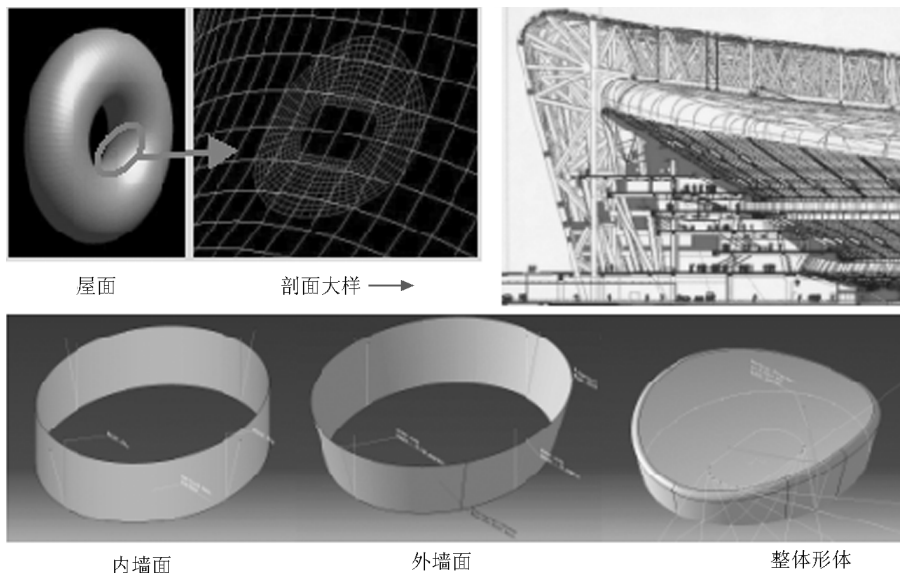


图 2 “鸟巢”屋面的几何构成

Fig. 2 Geometrical formation of the National Stadium

主体钢结构由 24 榀格构式刚架组成,它们绕着中央椭圆孔相互交叉布置,形成复杂而规律的空间网格体系(见图 3)。在此基础上,加上以随机方式布置的次构件,最终形成了“杂乱无章”却显得十分自然宛如金属树枝编织而成的巨大“鸟巢”(见图 4)。

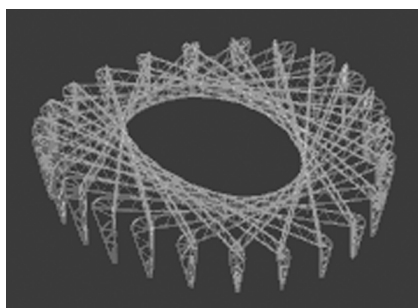


图 3 国家体育场结构主体框架

Fig. 3 The main structural frame of the National Stadium

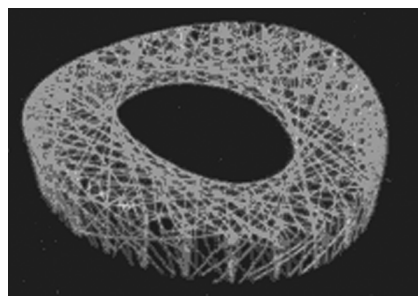


图 4 国家体育场完整框架

Fig. 4 The entire structure of the National Stadium

单纯从结构角度看,将格构式刚架用于如此大的跨度并不十分理想,其梁柱连接部位及跨中部位受力均较大,导致结构用钢量过大,也使结构永久荷载所占比例过高。因此在 2004 年曾对设计方案进行一次调整,即取消了原有的可开启屋盖,并相应扩大了屋顶开口(见图 5);这样调整仍然保持了“鸟巢”的设计理念,但用钢量减少了 22.3%,相应也提高了结构的安全性。

“鸟巢”现在建成了,它那具有震撼力的独特建筑造型在国内外引起巨大反响。可以预见,它那建

筑与结构浑然一体,貌似无序的自由编织而成的结构体系不仅为国家体育场提供了新颖的建筑造型,也为大跨空间结构家族增添了一个富于个性的新成员。

3.2 国家游泳中心

国家游泳中心的“水立方”建筑方案是经全球设计竞赛招标,并经专家评审和公众投票后,在 10 个方案中脱颖而出的。该方案由中国建筑工程总公司、澳大利亚的 PTW 建筑师事务所及澳大利亚 Ove Arup Pty 工程顾问公司联合设计。

“水立方”的设计理念可以概括为“方盒子”和“水分子”两个概念:其主体结构由一种新颖的平板网架围成方盒子形状,其围护结构则由形状、大小各异的许多 ETFE 薄膜气枕组成,就像许多晶莹剔透的“水泡”或“水分子”。形成的建筑形象十分新颖独特,令人神往。此外,从奥林匹克公园总体规划上看,“水立方”与“鸟巢”比邻,一方一圆,一柔一刚,相互呼应,形成十分美妙的对比,体现了中华文化中“天圆地方”的理念。

“水立方”主体结构的概念来源于三维空间的最有效分割问题。1887 年,英国物理学家 Kelvin 提

出:“如果将三维空间细分为许多单元,各单元的体积相等且接触表面积最小,这些单元应是什么形状?”在此后 100 余年的时间里,科学家致力于解决这一难题。他们很多人以肥皂泡作为研究对象,将其归纳为“无限等体积肥皂泡阵列几何学”问题(即气泡理论),并提出了多种解决方案。1993 年,爱尔兰的 Weaire 和 Phelan 提出了一种多面体组合模型(W-P 模型),认为将一定数量比例的 14 面体和 12 面体按一定规律排列起来,可以填满整个空间(见图 6)。到目前为止,W-P 多面体组合仍被认为是三维空间最理想的构成。

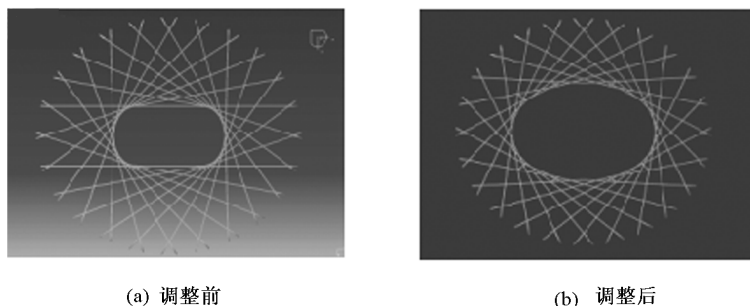


图 5 国家体育场设计方案的调整

Fig. 5 Modification of the design scheme of the National Stadium

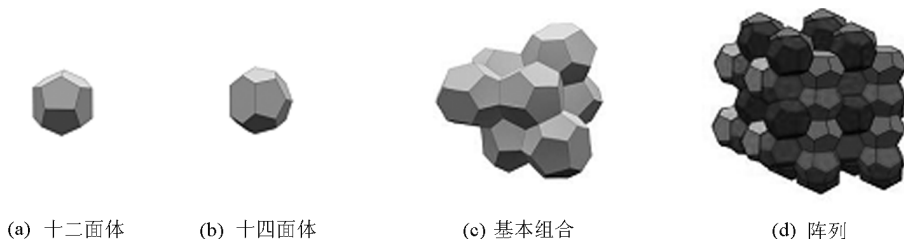


图 6 由多面体单元构成的完整空间

Fig. 6 The space fully filled with polyhedra

“水立方”的钢结构设计方案就是以经适当改良的 W-P 模型为基础,以多面体的棱为实体构件,形成由空心多面体单元构成的空间网格体系(见图 7),再以适当的角度进行平面切割,形成平板状的网格结构(见图 8),以之作为“水立方”的屋顶和墙体的承重结构。这种结构体系新颖、独特,其不规则的复杂形体其实是由相对简单的元素经多次重复形成的,这是空间结构形态学的杰出创新。

“水立方”的围护结构由内外两层 ETFE 气枕组成,每层气枕包含 3~4 层 ETFE 膜。整个建筑共包含 3 700 多个 ETFE 气枕,覆盖面积达 $10 \times 10^4 \text{ m}^2$,是世界上最大的 ETFE 工程。其 ETFE 气枕的基本

单元投影平面为不规则多边形,它们大小不一,形状各异,最大的直径近 9 m,最小的直径则不足 1 m。“水立方”外层气枕的内层膜和内层气枕的外层膜上都镀着密度不等的小镀点,以控制膜的透光度,达到隔热散光的效果。

3.3 张弦结构体系

平面的张弦结构是以刚性构件(通常为格构式或实腹式的拱或梁)为上弦,以柔性的“弦”(通常为高强索)为下弦,并通过竖向撑杆连成一体的新型混合体系(见图 9)。可施加适当预应力使体系绷紧,犹如一付张紧的弓,故称为张弦结构。这种结构体系的原意是用张紧的“弦”来加强上弦的梁或拱;

其自重相对较轻,且可通过调整预应力对受力性能进行优化,因而具有较好的技术经济性能。当上弦为网壳或双向交叉桁架等空间体系时,也可通过加设下弦索系和竖向撑杆来进行加强,形成空间的张弦结构。

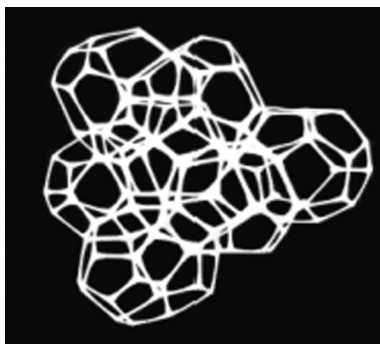


图7 空心多面体单元构成的空间网格体系
Fig. 7 The space frame formed with hollow polyhedra

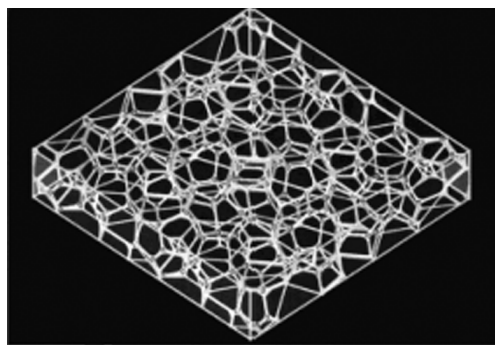


图8 切割形成平板状的空间网格结构
Fig. 8 Plate-like structure cut from the space frame



图9 平面张弦结构
Fig. 9 2D cable-supported structures

张弦结构是近期在空间结构方面的重要创新形式。我国1997年建成的上海浦东国际机场候机楼首次将平面张弦结构应用于大跨度建筑中,其最大跨度为82.6 m;之后建成的广州国际会展中心(跨度126.5 m)、深圳会展中心(跨度124 m)和哈尔滨会展中心(跨度128 m)也都采用了类似的结构形式。相比之下,各种形式的空间张弦结构此前的工程应用还比较少;此次奥运场馆建设则在这方面取

得了重大突破。

国家体育馆屋盖呈波浪形,南北长144 m,东西宽114 m,采用双向正交张弦结构,是目前世界上跨度最大的双向张弦结构,见图10(a)。北京工业大学体育馆(奥运会羽毛球馆)采用净跨度为93 m的弦支联方型球面网壳,是目前世界上跨度最大的弦支网壳结构,见图10(b)。北京大学体育馆(奥运会乒乓球馆)的矩形屋盖采用由中央球面网壳与两条螺旋形屋脊构成的复杂曲面造型,平面投影93.2 m×72 m,净跨度为80 m×64 m,采用了一种较为特殊的弦支网壳结构——由一系列按辐射方向布置的张弦桁架再加上环向竖向支撑和屋面水平支撑组成,或可称之为矩形平面弦支肋环型网壳结构,见图10(c)。

国家体育馆、北京工业大学体育馆、北京大学体育馆不约而同地采用了不同形式的空间张弦结构,说明这种轻盈优美、受力合理、用材经济的新型空间结构形式已被认识到是大跨度建筑结构方案的合理选择,也反映了设计者试图以一种更为理性的方式来贯彻“适用、经济、美观”这一原则的设计理念。2008奥运场馆种类多样,规模各异,为中外杰出建筑师和工程师的创新思维提供了广阔舞台,从而创造出了丰富多彩又富有特点的一批优秀体育建筑。设计者在所有场馆设计中均努力贯彻“适用、经济、美观”的设计原则,并以“人文奥运、科技奥运、绿色奥运”三大理念作为指导方针。与此同时,针对少数有代表性的重要场馆,更多地重视和强调其新颖性和标志性,突出了创新设计理念与现代奥林匹克精神的有机融合。这样,不同的场馆就具有不同的特点,显示了既有共性又有差异的各种设计理念。这种不同设计理念的碰撞和交融,使这些奥运场馆建筑异彩纷呈。

4 自主科技创新

如果说奥运场馆的创新设计是中外设计者共同合作的成果,那么要将这些设计变成现实,则主要靠中国人自己来完成。这些场馆规模巨大,技术要求复杂,对建设者提出了前所未有的巨大挑战,因此贯彻建设全过程的自主科技创新成为这次奥运场馆建设的显著特点,并确保了这些场馆建设的高质量完成。据统计,针对奥运场馆建设,共完成了108项自主科技创新课题,涵盖设计、材料、施工和监测等不同领域。这里作一些简单扼要的介绍。

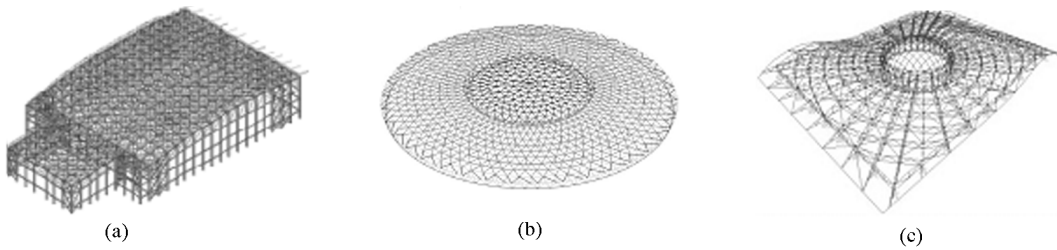


图 10 奥运场馆中的张弦结构

Fig. 10 3D cable-supported structures in the Olympic gymnasiums

4.1 精细化结构分析与试验

许多奥运场馆规模巨大、结构体系复杂、影响因素众多。它们的设计要求非一般常规设计可比,只有进行精细化分析并配合必要的试验,才能确保设计和施工质量。例如:a. 太阳辐射引起的非均匀温度场效应分析,借以确定“鸟巢”主体钢结构的适当合拢温度应为 $19 \pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$,为确定合拢时间提供了可靠依据;b. 考虑地震空间相关性的抗震分析;c. 全面细致的风荷载及风效应研究,包括大量风洞试验和计算流体力学(CFD)数值分析;对国家游泳中心的 ETFE 气枕考虑流固耦合效应的 CFD 数值模拟,以研究 ETFE 膜材与内部气体之间的相互作用。类似的精细化的分析研究在一般设计中是无法想象的。此外,在设计和施工过程中还进行了大量结构、构件或节点的大比例模型试验。例如,通过对“水立方”多面体网架子结构模型在重力荷载和往复水平荷载作用下的受力性能进行试验,研究了子结构模型的屈服过程、承载能力、变形能力和破坏形态,为“水立方”钢结构的抗震设计提供了依据。通过对奥运会羽毛球馆的 1:10 缩尺模型的张拉过程、正常使用状态、超载阶段和破坏形态进行全过程试验研究,为实际工程的设计和施工提供了重要的指导性结论。进行了国家体育场焊接方管 KK 型节点的 1:4 的缩尺模型试验,扭曲构件受力性能试验等。

4.2 新材料的研发与应用

奥运场馆的独特设计对建筑材料提出了许多高新技术要求,必须依靠自主创新来解决。例如 Q460E-Z35 特厚钢板(100~110 mm)的研发和生产具有典型意义。“鸟巢”要求使用高强度的低合金钢材 Q460 厚钢板,这种钢材过去主要应用于工程机械行业,从未在建筑中使用过,而且其厚度不超过 100 mm。用于鸟巢的 Q460E-Z35 建筑钢板需满足许多新的高难度技术要求,包括低温韧性、抗层状撕裂性能、屈强比、延伸率以及焊接性能等方面的许多严格的要求,其生产工艺没有可供借鉴的成功

经验。我国舞阳钢厂自主研发和综合采用微合金化成分设计、洁净钢冶炼工艺、大钢锭无缺陷浇铸工艺、严格的控轧控冷工艺、正火热处理等多种工艺技术措施,经反复试炼,终于成功生产出 Q460E-Z35 钢板,填补了国内外的空白。

ETFE 膜材这种新型覆面材料在国外有一定应用,但在国内还是第一次应用,而且是大规模的应用,中国国家体育场中 ETFE 的用量为 $5.7 \times 10^4 \text{ m}^2$,国家游泳中心中 ETFE 的用量为 $26 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。

4.3 高难度施工技术

创新的空间结构形式、庞大的规模、复杂的体型、不规则的构造、新材料的应用等,给奥运场馆施工带来了前所未有的技术难题,整个施工过程是在一系列技术创新、攻克难点的过程中完成的。

1) 精细的施工方案。国家体育场和国家游泳中心的屋盖钢结构都采用了高空拼装的施工方案,需要攻克许多技术难点,如超大吨位单体吊装、高精度空中对接、大规模高空焊接、复杂温度变形控制、多点同步撤支等问题。在解决这些难题的过程中,创造了多项国内第一。这些场馆施工中还首次大规模采用了先进的 GPS 卫星定位、激光定位与其他高精度测量设备,建立了精确的三维坐标控制系统,以精细的施工保证精细的设计。“水立方”由 30 513 个构件、9 843 个球节点焊接构成,所有节点的三维坐标均靠上述先进测量系统精确定位。针对国家体育馆的双向张弦结构特点,屋盖施工中采用了“纵向桁架横向累积滑移,后张拉索”的创新施工方案,屋盖结构一次成型;实现了与下部结构同步交叉施工,保证工期按时完成。针对国家体育馆、北京工业大学体育馆、北京大学体育馆等复杂张弦结构特点,精细地设计了同步张拉方案,解决了大吨位张拉、柔性结构形态控制、索系耦合等关键技术问题,对张拉全过程进行了数值仿真和实时监测,确保了结构整体的高精度成型。

2) 复杂的焊接工艺。“鸟巢”的焊缝总长度达

到了 300 km,现场施焊焊缝长度 60 km,消耗焊材 2 100 t;“水立方”的焊缝总长度也达到了 100 km。焊接工艺复杂:焊接钢材等级多种多样,对很多新钢种的焊接缺乏技术标准;复杂的高强度厚板焊接;大量的现场高空焊接(包括空中对接),其中 50%是在冬季负温下进行的。质量要求又很高,几乎全部采用全熔透一级焊缝。为了解决上述技术难题,在施工过程中组织了大量技术攻关,形成了大量的焊接工艺评定、焊接技术标准和相关的施工质量验收标准;其中 Q460E-Z35 厚板焊接技术成果填补了国内外空白,被纳入《建筑钢结构焊接技术规程》。这些成果确保了奥运场馆复杂焊接工程的高质量完成。

3) 异型构件精确成型技术。“鸟巢”采用的异型弯扭构件,断面 1 200 mm × 1 200 mm,最大板厚 60 mm,最大长度 15 m,形状复杂多变,而且每根构件的弯扭程度各不相同,它们的制作是“鸟巢”施工面临的最大的挑战之一。加工厂为此专门开发出“异型构件制作软件”,创造出“多点成形和计算机结合的无模成形工艺”,最终高精度加工出完全符合设计要求的弯扭构件。

4) 多点同步撤支技术。许多奥运场馆在安装过程中均设置了大量临时支承架。所谓“撤支”(有些报道中称为“卸载”),就是在主体结构合拢完成后,将这些临时支承撤除,使已经成为整体的主体结构依靠自身的受力体系矗立起来。“鸟巢”共设置 78 个临时支承架,撤支时分 7 级同步卸载。撤支过程中综合采用了数值仿真技术、计算机同步控制技术和结构实时监测技术,对撤支全过程进行精密控制,确保平稳、精确地完成撤支过程。撤支完成后,主体结构最大下降位移 271 mm(数值计算结果 286 mm)。

4.4 实时施工监测的广泛应用

实时施工监测是确保精确施工的重要技术手段,奥运场馆施工中广泛应用了这种先进技术,在各个施工阶段对环境、荷载、内力、位移等进行全方位、全过程的实时监测,及时指导调整施工过程,确保施工与设计要求精确吻合。

综上所述,北京奥运场馆建设规模之大、技术之难在国内外建筑史上都是罕见的,中国的工程技术人员靠自己的智慧和汗水,通过大量自主科技创新,高水平、高质量地把图纸变为现实,这是中国人民的骄傲。事实上,综合运用各种技术把这样复杂的场

馆顺利建成,本身就是一项重大的集成创新。近十几年来我国空间结构取得了很大发展,积累了许多经验,也培养了一批优秀的技术人才。这些技术和人才的储备为奥运场馆的成功建造奠定了必要的基础。同时,在奥运场馆建设中积累的丰富经验和取得的大量自主创新成果,也必将对我国空间结构的进一步发展发挥重要的作用。

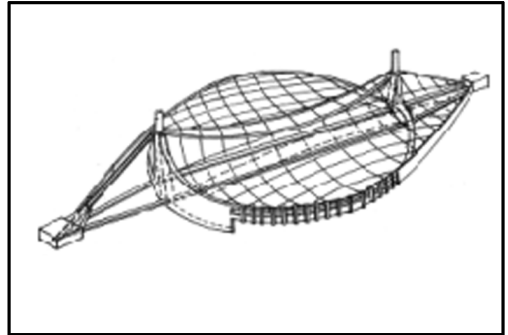
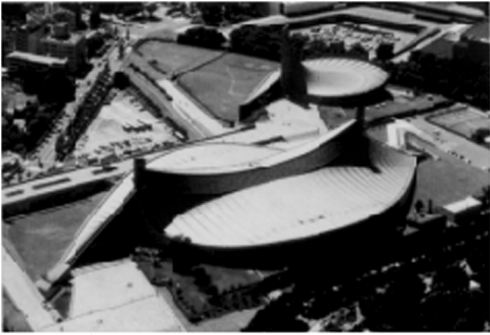
5 优秀奥运建筑回顾与展望

二战结束以后和平时期的到来使奥林匹克运动迎来了快速发展时期。奥运场馆建设也进入了崭新时期,建筑师和结构师们各显身手,把奥运场馆作为展示当时先进建筑科技的舞台。半个世纪以来,产生了一批具有经典意义的奥运建筑。例如 1960 年罗马奥运会的罗马小体育馆,见图 11(a),其跨度为 60 m 的圆形穹顶,采用钢筋混凝土薄壳结构,由沿周围均匀分布的 36 个“丫”形斜柱承托,这一朴素而优美的穹顶代表了当时空间结构技术的最高水平,迄今一直被认为是薄壳结构的代表性作品;1964 年东京奥运会的代代木体育馆,见图 11(b),其屋盖主体结构由悬挂在两个塔柱上的两条中央悬索(跨度 126 m)及分列两侧的劲性悬索组成,雄伟的建筑造型与创新的结构体系浑然一体,极具震撼力;1972 年慕尼黑奥运会的奥林匹克体育场,见图 11(c),其主看台上方悬挑长度达 80 m 的挑篷采用连续帐篷式索网结构,由 9 片鞍形索网结构组成,悬挂在 8 根 70 m 高的桅杆下面,并通过内侧边缘索及外侧锚索张紧。这一宏伟的索网结构是现代张力结构奠基人 Frei Otto 的代表作之一,在当时极具创新意义,慕尼黑奥林匹克体育场也因此成为公认的经典奥运建筑。进入 20 世纪 90 年代以后,空间结构获得进一步的发展,这一时期最具代表性的作品就是 1996 年美国亚特兰大奥运会的主体育馆,见图 11(d),该体育馆平面呈准椭圆形,轮廓尺寸 241 m × 192 m,可容纳 70 000 人,是世界上最大的室内体育馆,其屋盖采用被称为“索穹顶”的创新张力结构体系,用以覆盖如此大的空间,而每平方米用钢量仅 30 kg,可见其结构效率之高。亚特兰大体育馆也因此进入了经典奥运场馆的行列。

纵观这些奥运建筑史上的经典之作,不难发现其一些共性的特点:a. 新颖的建筑造型、创新的结构形式与建筑功能的统一;b. 符合建筑技术(包括材料、构造、施工安装技术等)的发展方向,推动了技术的进步。



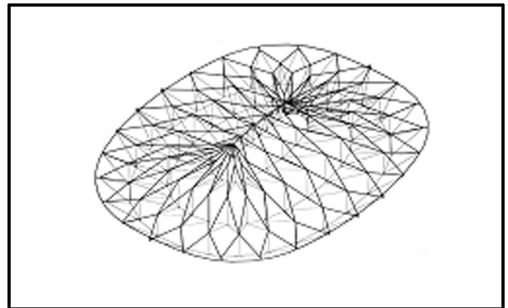
(a) 罗马小体育馆



(b) 东京代代木体育馆



(c) 慕尼黑奥林匹克体育场



(d) 美国亚特兰大奥运会主体育馆

图 11 部分优秀奥运建筑

Fig. 11 Some out - standing stadiums/gymnasiums of the Olympic Games in history

回顾这些奥运历史上的优秀建筑作品,我们自然会想到,2008北京奥运场馆是否符合上述特点呢?在建筑发展史上,特别是奥运建筑史上,又会占有怎样的地位呢?不妨先来看看国外舆论及有关方面的评价。

2008年初,“鸟巢”设计获英国设计博物馆建筑设计奖。获奖评语是“这个拥有10万座位的结构代表了1972年慕尼黑奥运会自由形态帐篷结构以来最具创新性的一个设计……它那被称为‘鸟巢’的貌似随意的钢结构是一个令人难忘的地标式建筑。”英国《卫报》发表文章称“水立方”为“理论物理学的杰作”。美国著名杂志大众科学将“水立方”评为“2006年度100项最佳科技成果”之一。国际奥委会主席罗格对“鸟巢”的评价是,“它是奥运历史上非常壮观的场馆,我确信它将成为北京的新地标”。国内舆论不必说,每天都可以从媒体上感受到越来越多的赞誉声和中国人的自豪感。2008北京奥运场馆已经开始受到国内外的的好评。创新的设计理念、先进的结构体系和大量自主创新技术使它们中的一些杰出代表呈现出非一般的品质。我们有

理由相信,这些代表性场馆有条件成为比肩林立于历届经典奥运建筑行列的宝贵建筑遗产。

6 结语

2008北京奥运场馆建设是创新设计理念、新技术、新材料、新方法的综合应用,是改革开放以来我国建筑科技进步的集中体现,也是中国综合国力的展现。场馆建设努力贯彻了人文奥运、科技奥运、绿色奥运三大理念,充分体现了不同设计思想的碰撞和交融,反映了中华民族悠久文化的多样性和包容性。在人们尽情欣赏各国健儿呈献精彩竞技的同时,美轮美奂的奥运场馆也为2008北京奥运会增添了一道亮丽的风景。与此同时,奥运场馆建设中积累的丰富经验,也必将对我国乃至世界空间结构的进一步发展作出重要贡献。

致谢 在准备文章时,参考了“2008”工程建设指挥部、英国ARUP公司、澳大利亚ARUP公司以及其他有关设计、施工、管理部门提供的资料或发表的文章,特此一并致谢!

Space structures and Olympic gymnasiums

Shen Shizhao

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

[Abstract] Space structures are always preferred for Olympic stadiums and gymnasiums due to their great variety of forms, efficient mechanical behavior and the ability to cover large spans. The construction of 2008 Beijing Olympic stadiums and gymnasiums provides an enormous stage for space structures. It is advisable and useful for the further development of space structures to summarize the advanced design concepts, innovative structural forms as well as the new materials and techniques used in these stadiums and gymnasiums. A brief introduction to the 2008 Beijing Olympic stadiums and gymnasiums is presented first, then some representative Olympic stadiums and gymnasiums are discussed with respect to their novel architectural appearance, advanced structural forms and innovative techniques applied in design, construction and monitoring. By reviewing a number of classical Olympic stadiums and gymnasiums, their common characteristics are summarized as: perfect combination of novel architectural appearance, innovative structural form and satisfactory service performance; in accordance with the development of construction techniques, and hence promoting the progress of technology. Compared to the outstanding classical Olympic buildings, it is believed that some representative stadiums and gymnasiums of the 2008 Olympic Games do have the qualities to be recognized as the new members of this glorious list.

[Key words] space structure; Olympic stadium; design concept; innovative technique