



【编者按】第30届夏季奥林匹克运动会于2012年7月28日至8月12日在英国伦敦隆重举行，世人在关注此次盛事的同时，也对举办赛事的场馆表示出了极大的兴趣。为举办此次奥运会，伦敦共计有34座场馆投入使用，其中新建场馆14座，改造及利用现有场馆20座。中国钢结构协会空间结构分会组团赴英国参加第35届国际桥梁与结构工程学会与第52届国际壳体与空间结构学会学术会议，会议期间参观考察了正在建设的伦敦奥运会场馆工程并收集了相关资料整理成文，向大家介绍伦敦奥运场馆相关工程及结构体系。

2012伦敦奥运场馆工程及结构体系介绍

薛素铎, 李雄彦/北京工业大学空间结构研究中心

作者简介: 薛素铎, 北京工业大学教授, 中国钢结构协会空间结构分会秘书长, 中国土木工程学会空间结构委员会副主任委员。

0 引言

2012年伦敦奥运会的比赛场馆包含了新建场馆、已建成的场馆以及英国一些著名的景点中设置的临时场地。伦敦奥组委坚持可持续发展的理念, 临时场馆在奥运会后将被拆除, 所用建材和其他设备将在奥运会结束后在英国其他地区重新使用。而新建的永久性场馆也将成为伦敦奥运会为英国留下的宝贵遗产, 为当地的社区服务。许多场馆都使用了最新的科学技术, 并使用环保材料建成, 且通过设计增加自然光的利用, 把科技和环保完美结合。

伦敦奥运会的比赛将在34个体育场馆举行, 其中32个竞赛场馆、2个非竞赛场馆。14个新建体育馆中有6个永久性场馆, 8个临时场馆或场地(见表1)。这34个场馆分布在伦敦奥林匹克公园、伦敦市区以及英国其他地区。其中奥林匹克体育场、水上运动中心、篮球馆、小轮车赛道、曲棍球中心、自行车馆、水球馆和手球馆坐落于奥林匹克公园内, 奥林匹克公园于2005年开始筹建, 2011年基本竣工。伦敦市区的场馆有伯爵宫、ExCEL体育馆、格林威治公园、汉普顿宫、皇家骑兵团阅兵场、海德公园、罗德板球场、北格林威治体育馆、林荫路、皇家炮团军营、温布利体育馆、温布利体育场以及温布尔登网球场。英超豪门的主场将举办伦敦奥运会足球比赛, 皮划艇的比赛也将在伦敦市外举行。此外, 伦敦奥运会后, 小轮车赛场将同山地自行车赛场以及场地自行车赛场组建成自行车公园。

新建场馆分类 表1

新建永久性场馆	新建临时性场馆(比赛场地)
奥林匹克体育场Olympic Stadium	伦敦奥运会篮球馆Basketball Arena
奥林匹克公园自行车馆Velodrome	奥林匹克公园水球馆 Water Polo Arena
伦敦奥运会水上运动中心Aquatics Centre	海德公园Hyde Park(铁人三项和马拉松游泳比赛场地)
小轮车赛场BMX Track	林荫路 The Mall
伊顿庄园体育中心Eton Manor	皇家骑兵团阅兵场Horse Guards Parade
奥林匹克公园手球馆Handball Arena	格林威治公园Greenwich Park
	埃塞克斯郡哈德利农场Hadleigh Farm
	奥林匹克公园曲棍球中心Hockey Centre

本文重点介绍奥林匹克体育中心、奥运水上中心、室内自行车馆、篮球馆、温布利体育场、千禧穹顶、温布尔登网球中心七座场馆工程及其结构体系, 同时对其他部分场馆的功能做简要的介绍。

1 奥林匹克体育场

2012伦敦奥林匹克体育场(图1)由建筑师Populous和结构工程师Buro Happold设计, Watson钢结构公司承包施工。体育场屋顶覆盖面积超过2.45万 m^2 , 共设8万座位, 永久座位约为2.5万个, 奥运会及残奥会的开闭幕式及田径比赛将在该场举行。

体育场主体结构可分为四部分: 底层永久性混凝土看台、临时钢桁架支承看台、索网屋盖和顶部灯塔支承系统。



图1 伦敦奥运会体育场

体育场建设很好地贯彻了可持续发展的理念, 堪称绿色建筑典范, 为了解决场馆的赛后利用和奥运遗产保存问题, 奥运会后体育场将保留25000个永久座位, 永久座位的看台为钢筋混凝土结构。

体育场主体采用钢结构, 总用钢量1万余吨, 单位面积用钢量90kg左右。支承55000个临时座位的看台由钢桁架托承(图2)。

屋顶采用轮辐式索网结构, 通过张拉内环索、外环桁架间的劲向索使结构成形并提供结构承载刚度, 径向索和环向的张拉索通过铸钢节点连接。索的预应力也可作为压环桁架提供几何刚度, 避免桁架的整体屈曲。体育场索网屋盖沿径向等间距设置28根主索支承屋面系统, 同时在各主索间共设置84根副索支承聚酯纤维涂层的PVC屋面(图3)。临时性看台和上部的屋盖系统将在奥运会结束后拆除, 在钢筋混凝土看台上部替换为永久性屋盖。

为保证开闭幕式和比赛时的效果, 体育场架设了14座灯塔。灯塔距屋面的高度近30m, 在塔架顶部沿体育场布设封闭的环向次索, 张拉环向次索和斜向水平副索与体育场外缘压环桁架形成稳定的索系支撑结构。



图2 临时看台支承结构

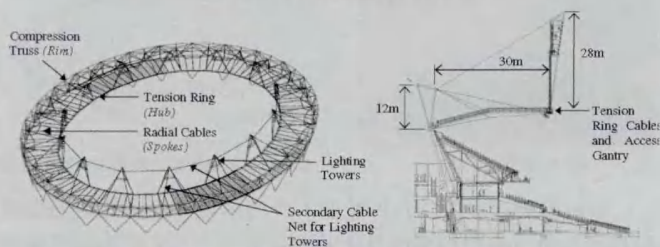


图3 屋盖结构

2 奥林匹克水上运动中心

奥林匹克水上运动中心是2012年伦敦奥运会和残奥会的标志性建筑（图4），由著名建筑师Zaha Hadid设计。奥运会期间，水上运动中心将成为游泳、残奥会游泳比赛、跳水、花样游泳以及现代五项游泳比赛的赛场。水上运动中心可谓是伦敦奥林匹克公园的“大门”，到时预计有三分之二的观众将由场馆北侧的人行桥进入奥林匹克公园。

伦敦水上运动中心的设计灵感源于流动水面的几何形状，建筑造型优美，与奥林匹克公园内的其他景观保持协调。波浪形的屋顶宛若地面掀起的涟漪，将水上运动中心训练池、竞技池和跳水池包裹其中。水上运动中心位于奥林匹克公园的东南边界，与新建的进入公园的步行大道毗邻并垂直于斯特拉福特大桥。

由于受奥林匹克公园的场地限制，水上运动中心的设计和建造极具挑战性。中心建设用地位于东侧铁路线和西面河之间的狭小范围里。两个新建的电缆管道从中心下面通过，场地的

北面紧挨着跨越斯特拉福特河和铁路线的斯特拉福特市大桥。

在奥运会比赛期间，水上中心的两翼将会临时加建由两个楔形块体组成的“翅膀”，使之从空中看上去宛如一只展翼滑翔的蝠鲼。两个加建的块体内各设约7500个临时座椅，使场馆总容纳量符合奥运会要求。奥运会结束后这两个附加物会被拆除，使水上中心保持在2500座的规模。



图4 伦敦奥运会水上运动中心

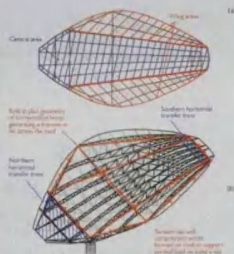


图5 水上运动中心屋盖结构

水上运动中心的屋顶被很多英国建筑师评价为英国在建的最复杂的结构工程（图5，6）。160m长、90m宽、重达2800t的屋顶钢桁架由10根弧度和截面高度不同的纵向主桁架和横向次桁架组成网格结构。屋盖南侧柱与北侧钢筋混凝土墙间的跨度为120m，屋盖的中心区域由主桁架间的简单桁架支承，翼展区由拱和压箍组成的复合结构伸展入核心区承托，翼展区沿外围桁架的纵向拉索与横向（翼展最宽点）拉索平面拉结以提高结构刚度。屋盖的北端支承于固定球铰支座，南端由沿混凝土墙顶的三个滑移球铰支座支承，其中中心支座仅可沿结构的纵向轴线滑动。

在比赛期间搭建的临时看台为可拆卸结构（图7），水上运动中心的总座位数可从2500个固定座位增加到举行盛大比赛时的17500个座位，该结构由栓接钢支撑框架构成。临时看台框架体系，西侧跨过waterworks河，东侧看台向奥运公园的环形路悬挑，利用胶合板固定于梯形型钢上形成临时座位。

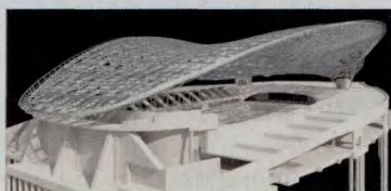


图6 伦敦奥运会水上运动屋盖支承构造



图7 临时看台框架

3 篮球馆

篮球馆是为奥运会新建的临时场馆，奥运会的篮球和手球比赛及残奥会的轮椅篮球与轮椅橄榄球将在该场馆进行（图8）。在英国建设100m跨度、有12000个座位的临时场馆尚属首次。

篮球馆的结构设计淡化了临时建筑的概念，通过结构设计的方法创新实现场馆体积最小化，提高投资效益。篮球馆结构最终设计方案采用了经典的等截面的正交网格，但在转角处倾斜成45°，普通观众座位沿斜面布置，满足最低视线60°的要求。场馆中的看台设计独立的单元，球馆的维护结构采用PVC骨架膜。

篮球馆的设计实现了结构可拆卸、可重复利用，重新定义了临时结构的概念，合理地解决了设计年限和荷载取值问题。



图8 伦敦奥运会篮球馆

4 室内自行车馆

自行车馆坐落于奥林匹克公园北部，奥运会结束之后，将作为自行车越野赛标志性建筑永久保留。拥有6000座席的自行车馆将作为2012年伦敦奥运会和残奥会场地自行车赛的主场馆(图9)。



图9 伦敦奥运会自行车馆

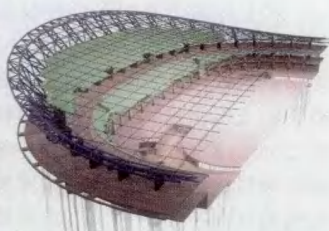


图10 伦敦奥运会自行车馆结构体系

自行车馆的设计理念来源于其将来在奥林匹克公园枢纽中的重要作用，建筑设计的挑战在于如何将场馆室内外完美连接。运动会后在此要举办自行车越野赛、山地车赛，环交叉和公路自行车赛，这些比赛都需要将室内外连成一体。

自行车馆结构设计的创新集中体现在屋盖结构的设计。起初设计采用的是传统的钢屋盖，索网体系由于考虑建筑安全隐患和建设成本被摒弃。然而，传统的钢屋盖工期需延长工期5~6个月，工程无法按期完工，因此屋盖系统设计必须采用新型方案。

屋盖结构方案选择考虑了张拉索网、预应力钢拱、复合木拱、索-木材混合结构体系，最终索网成为首选方案。与传统的屋顶结构相比，索网减少了45%的二氧化碳排放量，用钢量由原来的1300t减少到160t。结构设计时索网屋顶与场馆看台的网格体系集成一体，共同工作。看台支承结构直接承受屋顶荷载，克服了斜面悬臂受力的不足，使其荷载传至下部结构(图10)。结构的创新边缘设计解决了传统索网结构周边巨型环梁设置问题，通过索网与看台网格体系拉结，在屋盖周边只需设置环形桁架即可。屋盖与看台结构共同工作时，需对结构的舒适度进行验算，项目设计对看台结构自振频率与加速度进行了详细分析，单根索的最大拉力约为650kN，所有的索均处于张拉状态。由于结构的共同工作，约40%的索力由屋盖边缘的环形桁架承担，其余60%的索力传至下部结构，由此产生的倾覆弯矩由结构的自重和基础平衡。

自行车馆的设计选材旨在减小材料对环境和社会的影响，可再生木材是应用于结构室内外维护结构。在设计面临的另一挑战是结构钢索与木材屋顶板的连接，如何填充索、索节点等之间的空隙以及如何保实现刚性屋面与柔性索结构的变形协调问题。

5 温布利体育场

温布利体育场坐落在伦敦西北部，距离伦敦市中心仅6英里。该体育场设有滑动屋盖。体育场的每一个座位都能将整个球场收入眼底，座位之间相隔距离较宽，能让观众在观看比赛的同时放松双腿。

温布利体育场是2012年伦敦奥运会足球比赛场馆中6个最大的场馆之一。男子足球和女子足球的冠军争夺战都将在此举行。奥运会结束后，温布利体育场仍将是世界顶级的体育场。

旧温布利体育场建于1924年，是非常传统的体育建筑，展现了设计者的作品特点，外墙由强化混凝土覆盖，是结构主义建筑风格的先驱。这种古老的强化混凝土表面，给人感觉好像是用普通建筑材料建造的，或者好像是涂上了灰泥石膏。

新温布利体育场为对旧有场馆的改造(图11)，该体育场为英国国家足球队的主场，是为举办大型项目和赛事准备的，体育场的拱已经成为一种国际性标志。屋盖七个独立驱动可收缩屋面的总面积达1.5万 m^2 。固定屋顶的结构构件布置如图12。



图11 温布利体育场

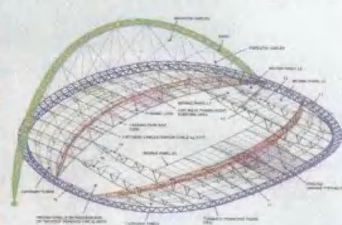


图12 温布利体育场固定屋盖结构构件布置图

屋盖沿周边设置三角形截面的空间桁架环梁。北侧固定屋面托梁与轨道桁架均采用月牙形的张弦梁，月牙形张弦梁两端支承于环向桁架，中部由索拱支承。四榀180m跨的多边张弦桁架(图13)横跨于北侧固定屋盖的南侧与外环空间桁架之间，多边张弦桁架南端支承于外环桁架，北端由索拱支承。多边张弦桁架一方面支承东西向次桁架，另一方面其上弦同时作为开合屋盖的轨道托梁。南侧固定屋盖及开合屋盖的轨道梁由东西向的弓形张弦桁架支承，张弦桁架的两端支承于外环桁架，中间部位由南北向的三角桁架提供侧向支承，桁架的中间跨度为140m，高度为15m。

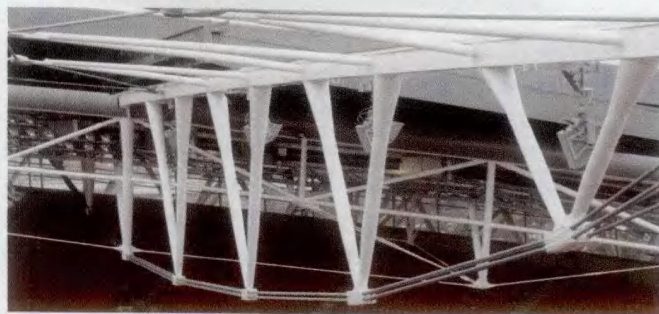


图13 南北向张弦桁架



图14 温布利体育场拱架

拱是体育场的另一特点(图14),总重达1500t,采用格构式圆柱体,在支座位置收缩为锥体。拱跨度达315m,高度135m。拱由12根直径为457mm的钢管与直径300mm的横隔空心环连在一起,环的间距为11m。格构拱能有效抵抗各种情况下的整体轴力和剪力,同时能与下面结构形成优美的统一体。

从体育场的结构系统可看出,索拱与张弦体系广泛应用于屋盖结构,张拉结构使超大跨屋盖结构刚柔相济,体型协调、轻盈。温布利体育场屋盖结构充分发挥了索结构单元的力学性能特点。

6 北格林威治体育馆(千禧穹顶)

北格林威治体育馆又名千禧穹顶(图15,16),位于格林威治半岛,在子午线右侧,奥运会篮球、体操、蹦床等比赛项目将在该馆举行,残奥会的轮椅篮球比赛也将在此举行,场馆设20000个座位。北格林威治体育馆最初是为庆祝千禧年而建造,现在已经被改造成一个集体育和娱乐为一体的多功能场馆,并附带有商店、餐馆等。在奥运会结束后,北格林威治体育馆仍将是集音乐、体育和娱乐为一体的多功能场馆。

伦敦的千禧穹顶,在结构的意义上并不是穹顶结构,但是却因穹顶结构而知名。这个建筑物的钢索网是由24根桅杆形成的圆环支撑的。建筑物的整体直径是358m,但最大跨度约225m,最大跨度是由24根桅杆形成的环的直径。



图15 千禧穹顶外景图

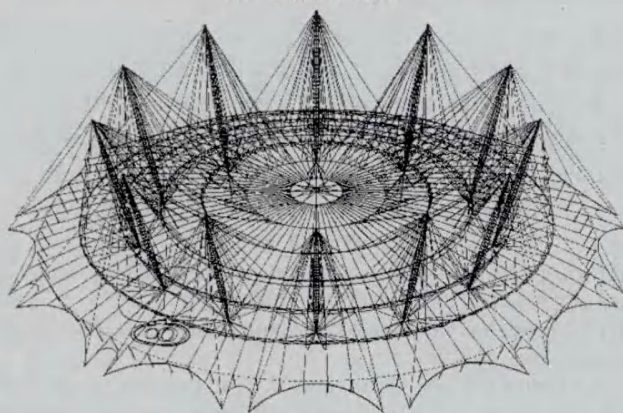


图16 千禧穹顶结构图

屋面覆盖层固定在钢索网结构上,钢索网结构由一系列成对的径向索组成。径向索的节点间距约为25m,在节点处径向索与吊索连接,再将吊索连接到桅杆顶部。这些节点同时又与环向索连接,以确保其稳定性。对径向索施加预应力来平衡吊索的内力,这使得每一段径向索几乎都被拉直,并将穹顶的表面转换成一系列多边形的圆顶。

千禧穹顶的结构方案简化了覆盖层的安装。事实上,径向悬索是略微弯曲的,但这个曲率在覆盖层的设计中是允许的,但整体的几何结构远不及鞍形面复杂。

7 温布尔登网球场

网球比赛将在温布尔登网球场举行,该场馆位于伦敦西南部,温布尔登网球场是全英草地网球俱乐部所在地,世界著名的温布尔登网球公开赛始于1877年。目前,温布尔登网球场是世界上现存的唯一的大型草地球场。温布尔登网球场已经整修了看台,并在中心球场安装了开合屋盖。开合屋盖施工于2009年温网比赛前已竣工(图17)。

温布尔登中心球场的可开合屋盖部分是一种可折叠的张拉膜结构。这种设计允许可开合屋盖在不需要时,可折叠并集中在屋盖的固定部分。

可开合屋面部分应用了7000多 m^2 的Tenara膜材,该膜材具有强度高、柔韧性好、透光性好等优点。在屋面闭合后,一定量的自然光仍然可以透过膜材满足草坪的生长。根据设计方案,可开合屋面可在10分钟内完全开启或闭合。膜结构划分为9个开间,每个开间的膜结构的两边都固定在棱柱型钢桁架上,棱柱型钢桁架的跨度约75m。每榀钢桁架的两端支承在滚轮组上,滚轮组可沿安装在固定屋面的轨道滚动,实现屋面开合。



图17 温布尔登网球场

8 其他场馆简介

8.1 手球馆

手球馆(图18)位于奥林匹克公园西侧,手球、盲人门球和现代五项比赛将在该馆进行,馆内设10000个座位。手球馆最大的特色便是它独特的外形。3000 m^2 的铜将体育馆包裹,经历时间变迁后其外观将变成绿色。在手球比赛结束后,只需48小时便能完成场地转场,随后便可举行现代五项的击剑比赛。

奥运会后,手球馆将成为一个多功能体育场馆,为社区提供各项服务,也可供运动员训练和举办中小型体育赛事。手球馆也适合举办其他室内运动,例如篮球、手球、羽毛球、拳击、武术、无挡板篮球、乒乓球、轮椅橄榄球和排球。手球馆也将为当地社区设立一个设施齐全的健身房和咖啡馆。可伸缩座椅使得手球馆既适宜举办国际大赛,也可举办社区的小型体育比赛。奥运期间的媒体工作区和技术服务区都将在奥运结束后安装其他设施。运动员的更衣间也将转换为方便家庭使用的更衣室。



图18 伦敦奥运会手球馆

8.2 水球馆

水球馆(图19)位于奥林匹克公园东南角,毗邻奥林匹克体育场和水上运动中心,水球比赛在该馆举行,场馆共设5000

个座位。在奥运会结束后，水球馆将拆除。水球馆的建材将在英国其他地区重新投入使用。



图19 伦敦奥运会水球馆

8.3 伯爵宫Earls Court

伯爵宫(图20)位于伦敦西区,靠近维多利亚和阿尔伯特博物馆、科学与自然历史博物馆。奥运会排球比赛将在该馆举行,共设有15000个座位。伯爵宫于1937年开始营业,在当时伯爵宫就能提供4万m²的展区,轰动一时。奥运结束后,伯爵宫仍是伦敦最佳的展览厅和活动举办地之一。



图20 伯爵宫Earls Court



图21 ExCEL体育中心

8.4 ExCEL体育中心

ExCEL体育中心(图21)位于伦敦皇家维多利亚码头,靠近伦敦城市机场。奥运会拳击、击剑、柔道、乒乓球、跆拳道、举重、摔跤等项目,及残奥会乒乓球、残奥会举重、残奥会力量举重、坐式排球和轮椅击剑将在该体育馆进行。体育中心共设4个比赛场馆,各场馆举行的赛事和座位数量如下:场馆1:16000座位(举重与残奥举重);场馆2:10000座位(柔道、摔跤、室外地滚球戏);场馆3:6000座位(跆拳道、乒乓球、残奥乒乓球);场馆4:10000座位(拳击和轮椅篮球)。ExCEL是伦敦码头区的一座著名展览馆和会议中心。在奥运会期间,ExCEL体育馆将举办多项奥运会和残奥会的赛事。在奥运会期间,ExCEL体育馆将举办143项比赛。在奥运会后,ExCEL体育馆仍将继续作为欧洲最大的多功能的展览中心。

8.5 温布利体育馆 Wembley Arena

伦敦西北部,距离伦敦市中心仅6英里。坐落在温布利体育场旁,羽毛球和艺术体操将在该场馆进行,场馆设6000个座位(图22)。



图22 温布利体育馆 Wembley Arena

9 结论

(1) 场馆建设秉承伦敦奥组委申办时提出的可持续发展和绿色的特点,以充分发挥现有场馆的作用为出发点,利用临时场馆满足赛事的需要,以降低场馆建设和运行的能耗和费用。

(2) 通过结构的合理设计实现了大型场馆赛后小型化的转换,典型的场馆有奥林匹克体育场和水上运动中心,在结构方案设计上实现了“大”与“小”、“临时”与“永久”的完美结合,为类似项目的设计树立了典范。

(3) 对于临时建筑给出了合理的解决方案,如篮球馆的结构设计,维护结构、主体承重结构、看台和辅助房间的独立设计,提高了建设速度,同时也降低了工程建设的难度,为大型临时建筑的设计提供了新的思路。

(4) 传统结构体系通过技术创新,焕发出勃勃生机。如自行车馆的建设,将传统的索网屋盖与钢网格体系的看台结构有机结合,摒弃了传统索网结构的巨型环梁,使结构体态轻盈、刚柔相得益彰。

(5) 在新建场馆与既有大型场馆中,索结构的应用得到了淋漓尽致的发挥,如奥林匹克体育场轮辐式索支撑索网屋面、自行车馆的索网屋盖、水上运动中心的张弦体系、温布利体育场的索拱和张弦结构组合体系等,索结构的应用使体系变得柔美,在大跨结构中彰显了力与美的统一。

致谢:北京工业大学空间结构研究中心的多位博士和硕士研究生参与了资料收集工作,为本文的写作提供了基础,在此表示感谢。除对奥运工程考察所获资料外,论文的资料还包括公开发表的学术论文、相关的网站或其他资料,其中学术论文在参考文献中已列出,作者对其他引用资料的提供者一并致谢。

参考文献

- [1] N COLE, P HULME. Erection of the cable net roof for the London 2012 Olympic Stadium[J]. Structures Congress, ASCE, 2011:304-313.
- [2] KOUROSH KAYVANI. Engineering the Arch and Roof of Wembley Stadium[J]. Structures, ASCE, 2009:2409-2417.
- [3] R ARNOLD, C BANISTER, A WEIR, et al. Delivering London 2012: the Velodrome[C]// Proceedings of the Institute of Civil Engineers: Civil Engineering.2011,164(6):51-58.
- [4] I CROCKFORD, M NELSON, S FRASER, et al. Delivering London 2012: the Aquatics Centre[C]// Proceedings of the Institute of Civil Engineers: Civil Engineering.2011, 164(6):44-50.
- [5] A NIMMO, S WRIGHT, D COULSON. Delivering London 2012: temporary venues[C]// Proceedings of the Institute of Civil Engineers: Civil Engineering.2011, 164(6):59-64.
- [6] I CROCKFORD, M BRETON, F MCCORMICK, et al. Delivering London 2012: the Olympic stadium[C]// Proceedings of the Institute of Civil Engineers: Civil Engineering.2011, 164(6):37-43.
- [7] <http://www.london2012.com/venue/>