

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

Streaming Architectural Ideas to Build Structure

从建筑畅想到结构实践



于辉

Yu Hui / Project Director/ RFR

RFR 上海公司项目总监

代表作品：法国斯特拉斯堡 TGV 高铁车站，韩国史前博物馆，加拿大卡尔加里人行桥（150m 跨度轻型索网拱结构），北京新保利大厦折面索网幕墙结构（90mx60m 跨度），尼日利亚国家文化中心（75m 跨三角形边界单层扁壳玻璃结构），2014 年 FIFA 巴西世界杯新水源体育场（230m 跨度索膜结构）。



扫描二维码
可进入报告视频

“结构成就建筑之美”这个话题使我想起了RFR创始人、结构大师 Peter Rice (图1) 在1992年获得英国建筑师协会颁发的皇家建筑金质奖章时讲过的一段话：“The most powerful way that an engineer can contribute to the work of architects is by exploring the nature of the materials and using that knowledge to produce a special quality. Exploration and innovation are the keys”。在他的设计哲学中，他坚信最好的建筑是建筑师和工程师相互依存的关系的结果，其中建筑师负责创新思想，而工程师是面向目标的实施者。这种设计哲学在他去世20周年后的今天仍具有现实意义和深远影响。



图1 Traces of Peter Rice

“结构成就建筑之美”是个共赢的目标，需要建筑师和工程师相互尊重，彼此信赖，共同创作。例如 Peter Rice 和建筑大师 Renzo Piano / Richard Rogers 在巴黎蓬皮杜中心项目上的合作，也如任庆英总工程师介绍的其与李兴钢建筑师在海南国际会展中心项目的合作，GMP 事务所和 SBP 事务所在一系列体育建筑上的巨大成就也是很好的佐证。

RFR 结构事务所与建筑师合作完成的一些经典案例

沿着 Peter Rice 的轨迹可以发现，探索和创新一直是 RFR 事务所的工作目标。1982 年的巴黎 La Villette 项目 (图2) 是世界上第一次将玻璃作为受力结构的工程实践。为了实现建筑立面最大通透化的需求，首次将柔性索桁架 (图3) 作为建筑立面的支撑结构加以使用。为了解决脆性材料 (玻璃) 和柔性结构大变形之间的矛盾，也专门创新性地设计了球铰的固定玻璃方式 (图4)。这是点式结构玻璃幕墙的里程碑项目，并在全世界得到广泛推广。

由建筑师贝聿铭设计的巴黎卢浮宫玻璃金字塔 (图5) 也很好阐释了结构成就建筑之美——建筑是结构体系之美和结构细部之美的完美融合 (图6)。结构美和细部美的实现尤其需要工程师深厚的力学功底和对几



图2 巴黎 La Villette 外观



图3 巴黎 La Villette 内视



图4 巴黎 La Villette 球铰



图5 巴黎卢浮宫金字塔-IM.Pei



图6 巴黎卢浮宫倒金字塔-IM.Pei



图7 斯特拉施堡高铁车站-正面

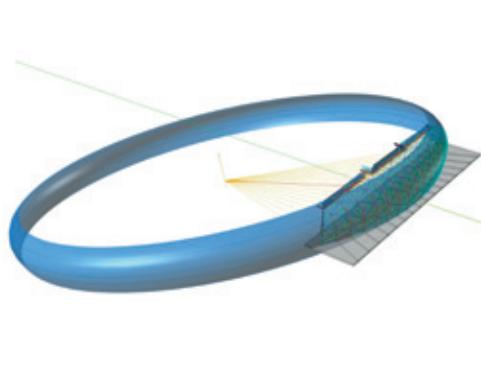


图8 斯特拉施堡高铁车站-几何形体



图9 斯特拉施堡高铁车站-内视和结构



图10 斯特拉施堡高铁车站-冷弯玻璃外观

何拓扑、仿生学、逻辑学、建筑美学的关注。一体化设计 (Integrated Design) 也对工程师提出了新的要求, 需要工程师熟稔几何造型、结构体系、材料科学、加工工艺等多方面知识, 并加以融汇应用。斯特拉施堡高铁车站 (图 7) 是具有百年历史的建筑, 扩建时要求不能将该历史建筑的石材立面与站前广场进行视觉分割。建筑师的方法是增加一个圆润的双曲面通透玻璃立面。为了实现该建筑构想, 利用圆环几何原理将双曲面分解为单曲圆柱面 (图 8), 同时采用轻盈的轮辐索拱结构 (图 9) 实现建筑师对通透性的需求, 也创新性地采用平板玻璃冷弯 (图 10) 的制作方法规避了热弯玻璃的波纹印象失真的问题, 最后的建筑效果堪称完美。

近年来, 随着复杂建筑形体的大量涌现, 也对工程师在建筑形体分析方法和手段方面提出了新的挑战。Frank Repas 建筑师设计的上海国际客运中心项目 (图 11) 为水滴形玻璃球体建筑, 出于建筑理念和成本控制两方面的考虑, 建筑表皮全部为平板玻璃面板, 这一平板拟合的原理反过来也精确定义了最终的建筑几何形体和表皮纹理 (图 12)。建筑大师 Frank Gehry 设计的巴黎路易·威登基金会博物馆项目 (图 13) 也有着其标志性的复杂几何形体, 建筑是多个复杂几何形体的玻璃表皮的组合, 工程师需要以造型解构的方法对形体进行有理化, 将复杂的双曲面拟合可发展曲面 (如圆柱面、圆锥面) (图 14), 表皮的网格划分也同时确定了支撑结构的形式。



图11 上海国际客运中心

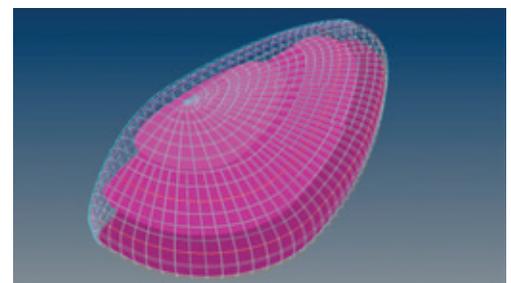


图12 上海国际客运中心-几何网格



图13 巴黎LVMH 艺术博物馆-模型图

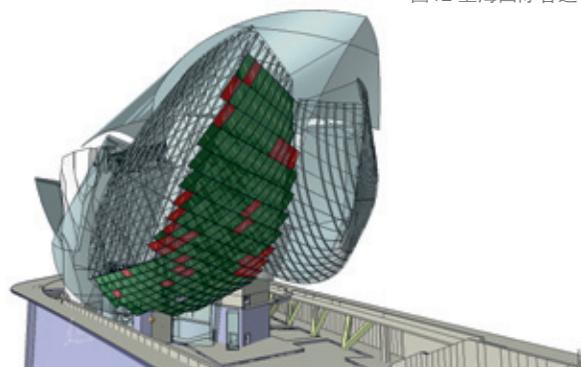


图14 LVMH 艺术博物馆-玻璃表皮几何处理



图15 爱尔兰SAP 总部办公楼中庭



图16 木结构连接节点



图17 爱尔兰Limerick市政厅

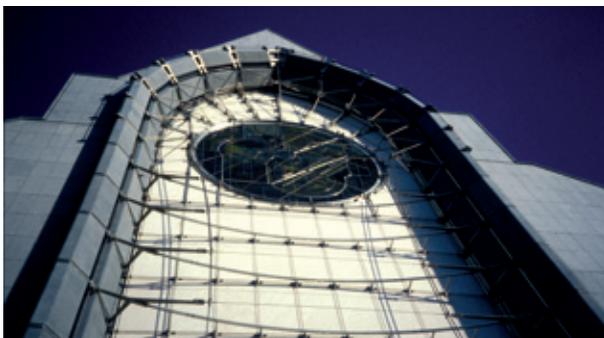


图18 法国里尔教堂

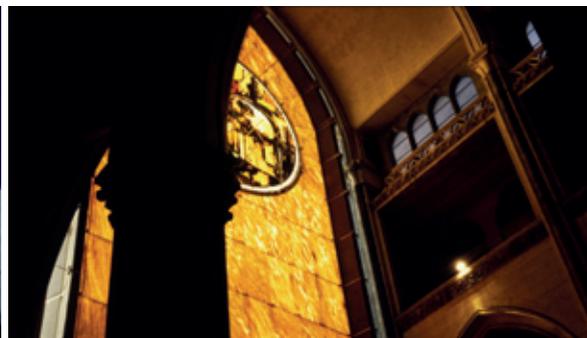


图19 法国里尔教堂-采光效果

建筑师在建筑中对材料的选择是多样性的，工程师在其中的使命就是探索不同的材料特性，辅助建筑师进行不同材料的尝试，从而解放材料对建筑师的束缚。Bucholz McEvoy 建筑师设计的位于爱尔兰 SAP 软件公司总部办公楼的中庭空间（图 15）屋面就采用了木梁作为支撑结构，并根据木构件加工长度的限制量身定制了相互搭接的结构形式，木梁的高度既符合结构受力的需要，同时也给中庭空间提供了有效的遮阳高度（图 16）。在 Limerick 市政厅项目中（图 17），木遮阳构件本身也被整合为立面受力结构并支撑玻璃幕墙。法国里尔教堂（图 18）项目其西立面采用石拱作为承力结构吊挂整个立面，并利用立面结构的不锈钢张拉构件进行加劲。同时采用 3mm 的白色大理石面板夹合在玻璃上，营造出独特的光照环境（图 19）。

下面我结合三个具体的大型建筑项目来分享结构成就建筑之美的创作过程和思考。

2006 年德国世界杯汉诺威体育场

由 Schultz 建筑师设计的 2006 年德国世界杯汉诺威体育场（图 20），是对 1976 年建成的原体育场（图 21）的改建工程。基础结构因为成本控制需要维持原状，但屋面的悬挑则需要向内扩大一倍以扩容到 5 万座。屋盖结构形式的推演（图 22）就是逐步解决上述矛盾的过程。基础无法负担悬挑屋面竖向反力的矛盾是通过引入外圈抗压环和内圈抗拉环以承担水平力（图 22）得到解决的，这同时也确定了屋面的结构形式（图 23）。建筑师对体育场外轮廓高度的控制和拉 / 压环之间必要的结构高度之间的矛盾，通过调低内圈拉环的位置得以解决（图 22）。

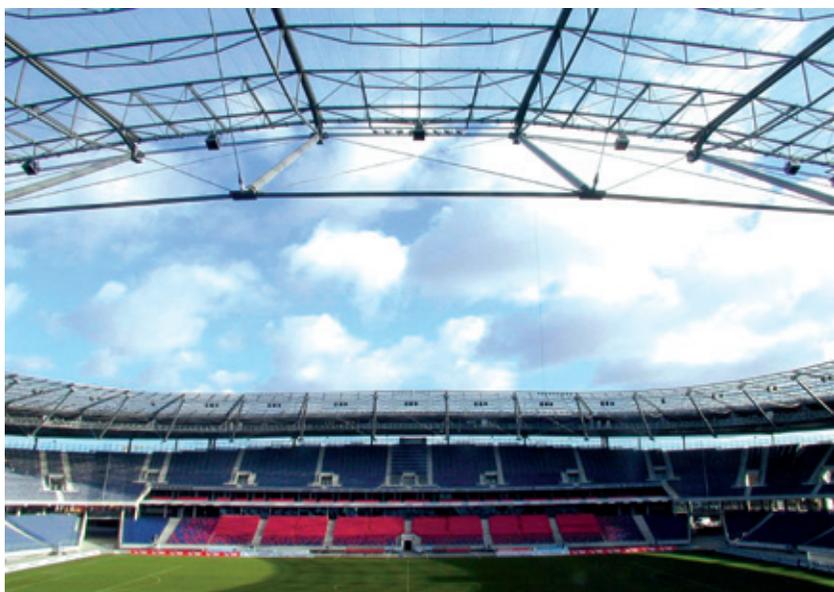


图20 汉诺威体育场（2006）



图21 汉诺威体育场（1976）

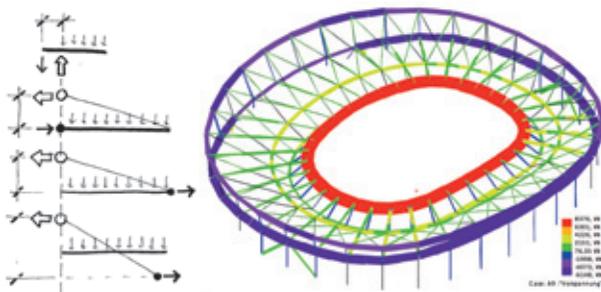


图22 汉诺威体育场-结构体系推演

图23 汉诺威体育场-屋面结构形式



图24 汉诺威体育场-屋面结构



图25 汉诺威体育场-PTFE膜

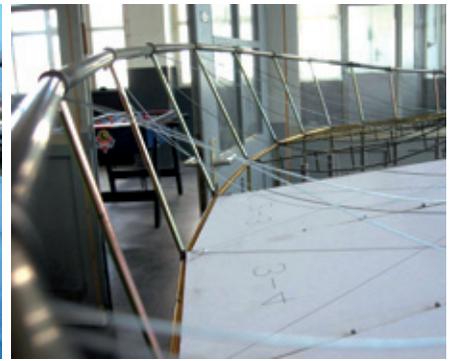


图26 汉诺威体育场-模型

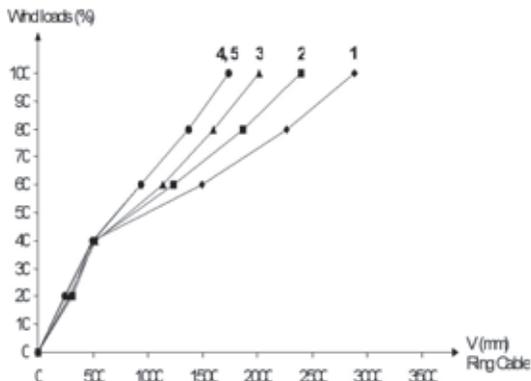


图27 汉诺威体育场-几何形状比选

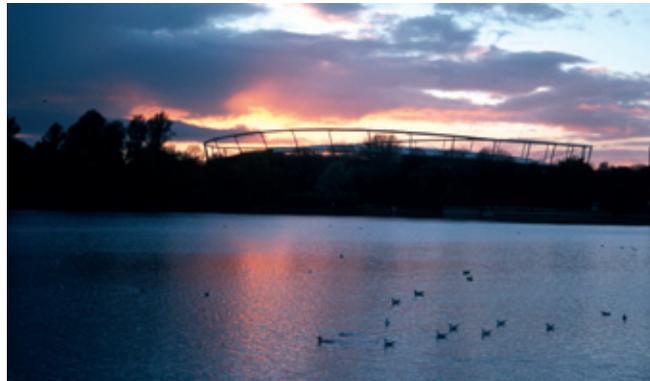


图28 汉诺威体育场-远观

屋面外圈采用经济性高的压型钢板轻型屋面以满足建筑成本控制的要求，并沿其与内圈的交界处布设猫道以布置建筑需要的照明和声响设备（图 24）。为了满足草坪生长需要的自然光照条件并降低运营成本，建筑师提出采用单层 PTFE 透明膜（图 25）而非常用的不透明织物膜，这种材料的选择也自然确定了采用内圈桁架网格结构。结构缩尺模型（图 26）可能是进入软件计算时代以后工程师已经忽略的工作手段。然而其和建筑模型一样，仍有助于强化双方对结构整体性和逻辑关系的直观把控。屋面结构外环的几何形状由结构最佳受力性能造型确定（图 27），最终整个建筑外轮廓表现为一个优雅的马鞍形，和谐地融入到周边景观之中（图 28）。

2014 年 FIFA 世界杯新水源体育场

当 2014 年 FIFA 世界杯的举办权被授予巴西以后，Salvador 作为其中重要的举办城市随即进行了国际公开设计招标，我们和 Schultz 建筑师共同创作的体育场方案（图 29）在 2009 年获得第一名并受委托进行设计。Salvador 新水源体育场的场地半侧依山，正面是一个城市内湖（图 30）。出于对周边场地和景观的考量，建筑师为了避免该类型体育场屋面的隆起感，提出了一个扁平化屋面的建筑要求。从结构角度考量，扁平的屋面形状也有助于减小屋面风荷载，因此我们欣然接受了这个要求。

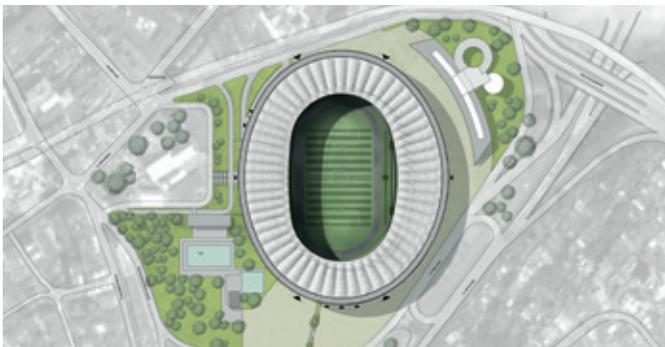


图29 Salvador新水源体育场-中标方案



图30 Salvador新水源体育场-改建前

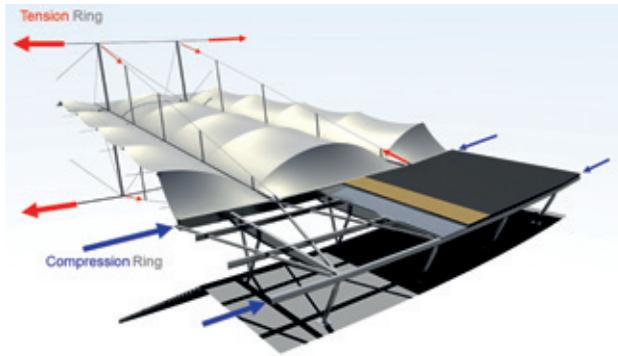


图31 Salvador新水源体育场-结构方案

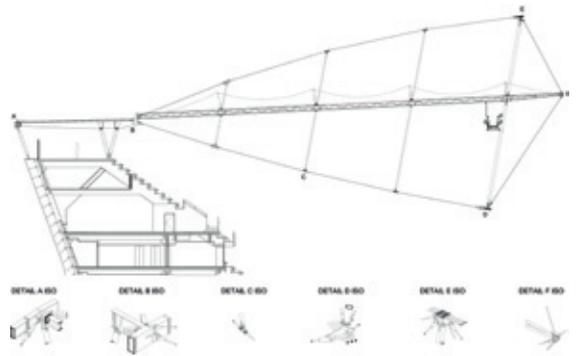


图32 Salvador新水源体育场-结构方案



图33 Salvador新水源体育场-张拉设备



图34 Salvador新水源体育场-整体张拉

轮辐式张拉结构屋面的惯常做法是将膜结构放在上层拉索之上，屋面一般为反碗形，仰角坡度一般在1/5~1/7之间。因此需要打破常规，我们引入了一个中间面层以满足建筑的需要（图31），并通过CFD分析的方式，确定了5%的坡度以满足排水功能且风荷载最小。通过参数化方式的比选，确定了上拱形的法向索的几何形态是结构受力最优的方案，并最终付诸实施（图32）。

整个体育场采用整体张拉提升，缆索结构体系在场地预先铺设连接，然后通过外圈钢结构上的液压千斤顶（图33）张拉法向索进行整体提升（图34）。张拉施工需要工程师预先规划一个完备的张拉方案（图35），并进行精确的模拟分析计算。在张拉过程中，需确定各阶段的控制指标，并根据现场具体数据反馈进行调整。

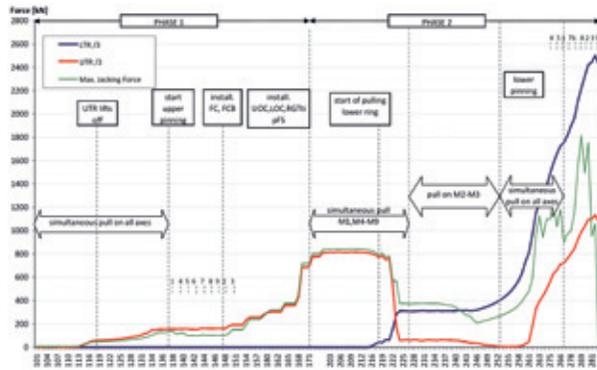


图35 Salvador新水源体育场-张拉方案

相对建筑师来讲，工程师对项目的最终实施肩负重大责任。在Salvador体育场中，整个拉索体系的切割长度和节点定位均由工程师经过特殊的计算确定，因为在整个结构体系中无任何调节构造，任何一个失误都会对最终张拉施工和结构使用安全造成巨大影响。面对这样巨大的挑战和责任，项目设计负责人在过程中会承受巨大的心理压力。在张拉施工顺利完成的那一刻，整个项目团队都欢呼雀跃（图36）。Salvador体育场最终于2013年2月顺利完工（图37），并随后在6月成功承担了2013年联合会杯的比赛。



图36 Salvador新水源体育场-2012.11, 张拉完成



图37 Salvador新水源体育场-2013.06



图38 BERCY人形桥

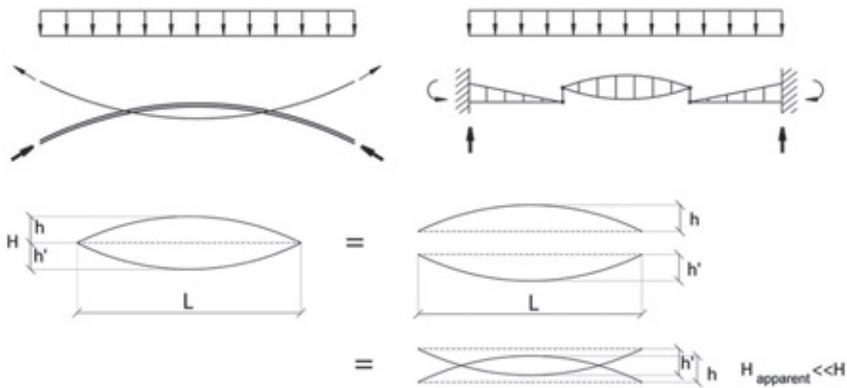


图39 BERCY人形桥-结构原理



图41 BERCY人形桥-结构原理

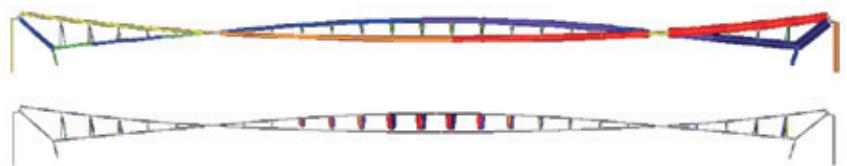


图40 BERCY人形桥-V支杆原理



图42 BERCY人形桥-消失的构件

BERCY 人行桥

和体育场一样，轻型人行桥的结构形式美也是建筑美的直接载体。Feichtinger 建筑师设计的横跨巴黎塞纳河的 BERCY 桥就是一个很好的例证（图 38）。BERCY 桥连接河岸两侧 BERCY 公园和法国国家图书馆，桥长约 200m。建筑师的畅想是将其做成漂浮于河面上的飘带，并希望营造一个富有乐趣的桥上空间。经过与建筑师的几次讨论碰撞之后，结构方案是拉板和压拱的组合，并在约 1/4 跨度进行交叉（图 39，40）。这样一个几何处理在满足结构受力的前提下，同时解决了建筑师的两个需求。结构的视觉厚度极其扁平，仅为跨度的 1/30，很好地完成了飘带景观的建筑畅想。同时这种交叉也引入了两个桥面互相交错的人流空间（图 41），营造了人形路径蜿蜒起伏的动态美感（图 42）。



图43 BERCY人形桥-夜景



图44 BERCY人形桥-桥台处理



图45 BERCY人形桥-阻尼设置

BERCY 桥上为了稳定压拱，通过 V 形支杆和拉板互联。V 形支杆的间距和尺度一方面是结构受力的问题，同时也是建筑美学的问题，因此工程师需要和建筑师进行思想碰撞，最终的结构应该是两者平衡共赢的结果（图 43）。桥台处理也高度展现了结构力学和建筑美学的融合，通过解构手法的处理将结构需要的固接约束简化为展现力流的拉压骨骼结构，从而表达了结构美学（图 44）。大跨度人形桥结构同时也面临着结构振动的挑战，特别是人行振动的舒适度问题。BERCY 桥根据专门的振动分析，在桥下设置了数个阻尼以降低结构的振幅。阻尼构件也很好整合在桥梁设计中（图 45）。

结语

《建筑技艺》杂志社能够站在行业发展的高度，组织国内外设计者进行高端讨论，体现了社会责任感。作为一名结构工程师，我们也希望能够得到建筑师伙伴的信任，也将继续满怀激情投身于“结构成就建筑之美”的探索和实践。At