

# 上海中心大厦巨型悬挂式幕墙系统设计

## Giant Hanging Wall System of Shanghai Tower

撰文 陈继良 丁洁民 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司

**摘要** 上海中心大厦创造性地设计了从未在超高层建筑中大规模使用的分离式双层玻璃幕墙系统。对上海中心外幕墙系统的设计理念、几何形态的确定、复杂曲面幕墙的实现与构造,以及巨型悬挂式的支撑结构进行了系统的总结和分析。

**关键词** 上海中心大厦 幕墙系统 巨型悬挂式

### 1 工程概况

上海中心大厦位于上海浦东新区陆家嘴金融区,与金茂大厦、上海环球金融中心形成品字形格局,并作为一个和谐的整体成为陆家嘴的新地标(图1)。上海中心大厦建筑总高度632m,主体结构高度580m,共121层。结合建筑避难层,上海中心大厦塔楼沿高度分为9个区段,每段12~15层,由低到高依次配置了商业会议、办公、酒店、精品办公和观光体验5大功能(图2,3)。其中塔楼1区及裙房为商场餐饮和大型会议,2~6区为办公,7区和8区为酒店和精品办公,9区即塔冠区为观光体验。整个建筑用地面积30370m<sup>2</sup>,地上建筑面积大约38万m<sup>2</sup>(129层),地下建筑面积约16万m<sup>2</sup>(5层),容积率12.51。

上海中心主体结构采用由8根巨柱、核心筒、环带桁架及伸臂桁架组成的巨型框架核心筒结构(图4)。塔楼标准楼层呈圆形,内部直径沿高度方向由底部的83.6m收缩到顶部的42m。加强层平面为圆角的三角形,由径向桁架支撑悬挑出主体结构,径向桁架同时也是外幕墙的支撑系统。

整个建筑以绿色建筑为目标,对建筑相关各领域的尖端技术进行全方位的创造性整合和应用,而在诸多绿色专业设计技术中,分离式双层幕墙是最关键的绿色设计技术策略。内幕墙与主体楼面呈圆柱体布置并沿高度分区收缩,外幕墙平面形状为与主体楼面内切的圆角三角形(图5),

在高度方向上,三角形的外幕墙绕着圆柱体楼面逐层旋转、收缩向上,借助避难层分隔(由于功能上的楼层分段)在内外幕墙之间形成21个空中庭院(图6~8)。该分离式的双层幕墙形成大厦的智能表皮系统,有效地降低了建筑能耗,提高了室内环境品质。空中庭院作为各功能分区的开放式共享空间,提供分区的餐饮、社交等公共配套服务,既丰富了超高层内的工作和生活体验,又降低了楼内人群下到地面的交通需求,提高了建筑的运营效率,降低了能耗。

### 2 幕墙系统设计理念

上海中心大厦创造性地设计了从未在超高层建筑中大规模使用的内、外分离的双层幕墙系统。其中,分段悬挂的外幕墙系统是其区别于其他超高层建筑的显著特征之一。双层幕墙和空中庭院构成整个建筑的核心设计理念,是实现绿色设计的关键设计支撑。更具创意的是,设计师还将双层幕墙的外表皮设计成逐层旋转并逐渐向上收分的形态,让大楼具备了动感,突破了以往超高层建筑外形简单、规则的惯例。大楼外形从底到顶连续旋转120°,同时几何轮廓也随高度逐层收缩,顶部为底部的55%。这样设计的流线形立面形态,部分是从周边环境角度以及和金茂大厦和上海环球金融中心关系角度考虑的;更为重要的是,采用这种非规则、非对称的建筑造型有利于破坏塔楼尾流漩涡脱落的规律性,从而降低结构横风向风振效应。



图1 建设中的上海中心大厦

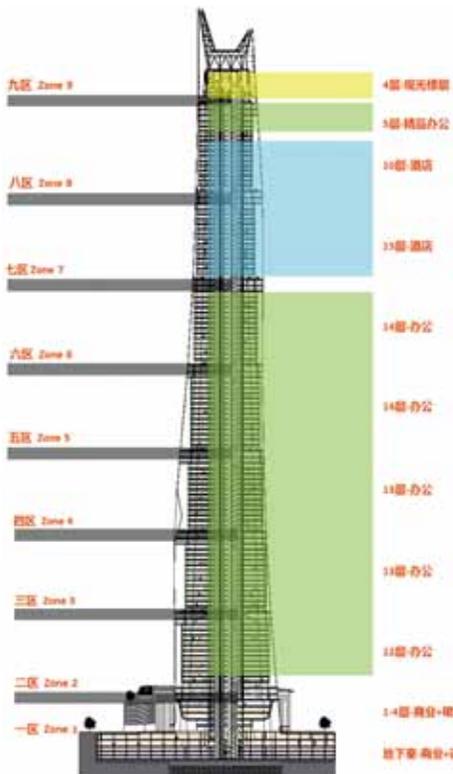


图2 上海中心大厦功能分区图

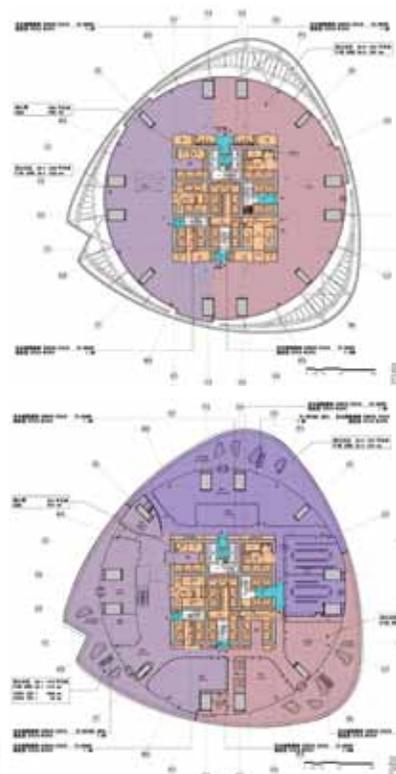


图3 上海中心大厦典型平面图

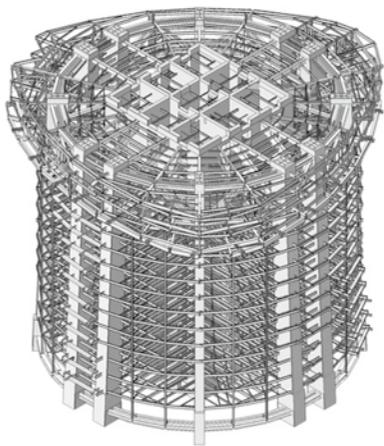


图4 上海中心大厦主体结构

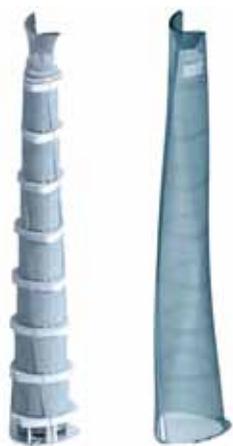


图5 圆柱体内表皮与三角形流线形外表皮



图6 双层幕墙与空中大堂

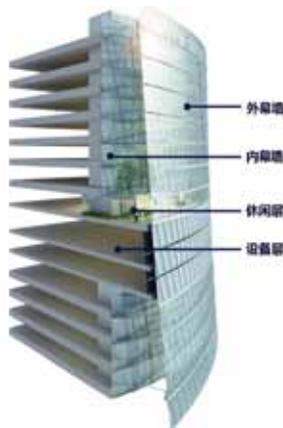


图7 双层幕墙关系

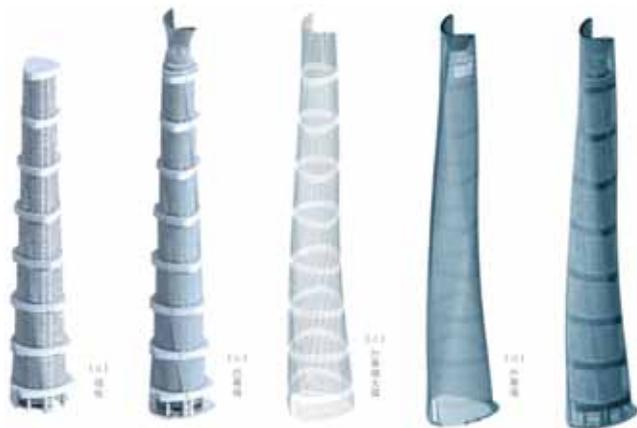


图8 幕墙系统构成

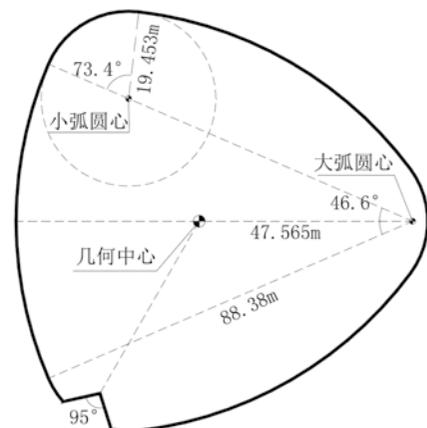


图9 外幕墙基准平面几何

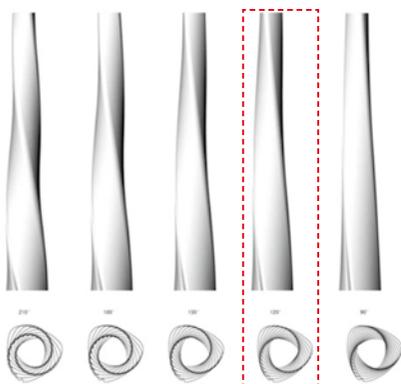


图10 不同旋转角度模型



图11 风洞实验实景

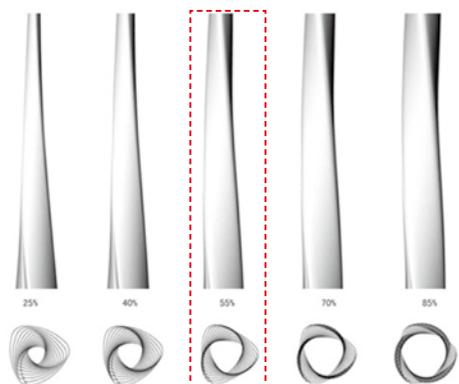


图12 不同收缩比例模型

但如果将主体结构也按照这样不规则造型进行设计，将成倍地加大主体结构的设计和建造难度，并影响建筑的使用效率。为此，打破了传统超高层建筑的几何外形与主体建筑一致的惯性思维，创造性地采用了内、外幕墙分离的双层幕墙设计策略，将内幕墙和主体建筑设计成造型一致的分段收缩圆柱体造型，而将外幕墙与主体建筑脱开，使其造型设计相对独立于主体结构，从而可以在保持主体建筑造型简洁高效的同时，增加外表皮几何造型设计的自由度，进而为通过改变建筑几何造型来降低整个建筑的横风向风振效应提供了可能性。

### 3 外幕墙几何形态的确定

由于外立面 45m 以下区域基本上被周边建筑遮挡，为此以 45m 标高处的圆角三角形轮廓作为建筑表皮的基本平面沿高度方向逐层扭转、收分形成整个光滑、连续的流线形建筑表皮（图 9）。圆角三角形由两段半径分别为 88.38m 和 19.453m 的大小圆弧围绕建筑的几何中心交替衔接重复 3 次，并在其中一个圆角开 95° 的 V 形口而形成。其中大圆弧圆心距建筑几何中心 47.565m，圆心角 46.6°，小圆弧与大

圆弧在端部相切连接，圆心角 73.4°。

为了让建筑形态更加优美、轻盈，在方案设计早期，建筑师从数学和美学的双向角度，对建筑扭转角度进行了反复论证和优化。从 90° 开始按 10° 量级递增，一直到 180°，每个递增角度分别输出模型进行比较（图 10）。通过比较发现，旋转角度越大，建筑体量动态效果就越强烈，但过于强烈的动态感将破坏上海中心和陆家嘴超高层建筑群体之间的和谐关系。为确保建筑几何造型的最优化，最终借助风洞试验对大楼外形进行空气动力学优化（图 11）。考虑实际上允许的扭转范围，先对 100° 和 180° 两个扭转角度进行风洞试验研究，结果证明了扭转造型对降低横风向效应的效果。在此基础上，就 110° 和 120° 两个扭转角进行风洞试验。在综合考虑风洞试验结果与其他诸如建筑美观和幕墙设计等各种因素后，最后发现整体扭转 120°，是美学与风工程学的最佳结合点。

相较于外表皮的线性旋转，其收分并不是一个线性过程，收分表现在楼层平面上即为相对于基准平面的缩放比率（图 12）。为了最大

化外层表皮所能覆盖的内层圆柱空间的使用面积，即实现最大体表比，收分按幂函数  $e^x$  的方式进行，整个外表皮的几何可由下述公式准确描述，顶部相对基准平面缩小了 45%

$$\text{旋转值: } r = \left(\frac{120}{560}\right)Z + 50$$

$$\text{缩放值: } y = e^{-0.001096(z-45)}$$

其中，Z 为楼层标高。

经风洞试验优化后最终确定的几何造型，以基底倾覆弯矩为比较指标，与最初的设计（旋转 100°）造型相比，设计风荷载降低了约 25%，等效体型系数仅为 0.95，节省结构造价约 3.5 亿。

#### 4 复杂曲面幕墙的拟合

尽管借助空气动力学优化最终确定了建筑的几何造型，但针对这样一个非规则的几何造型，如何排列和划分玻璃板块，使之能与复杂的曲面形态匹配，并同时兼顾建造的经济性和可操作性，是这类复杂几何形态幕墙设计的一个难点。

为此在方案设计阶段，针对建筑的几何特点，从建筑效果、经济性及可建造性角度，对三种较为可行的排列方案：水平交叠式（shingle）、垂直阶梯式（stagger）和平滑式（smooth）（图 13）进行了深入的选型研究。

水平交叠式方案需采用平行四边形玻璃（图 14），导致其材料切割会产生较多废料；平滑式需将玻璃冷弯加工（图 15），加工难度高、造价昂贵；同时，水平交叠式和平滑式拟合一层建筑曲面所需要的板块种类远远多于垂直阶梯式的排列方式，两种方案的可建造性和经济性很差。而垂直阶梯系统利用上下层单元板块间凸台、凹台的变化拟合曲面（图 16），玻璃板块为常规的矩形板块，板块易于加工，切割后无废料，建造所需板块种类少，整个系统的可建造性和经济性突出，是最佳选择。

整楼外幕墙总面积约 13.5 万  $m^2$ ，由 17 000 余块板块组成，为了进一步增加垂直阶梯幕墙系统的建造可操作性和经济性，借助 BIM 技术对垂直阶梯系统的板块种类进行优化，对在幕墙组装修容范围内的幕墙

板块进行归并，将拟合一层幕墙所需的板块种类减少到了 13 种。优化后各层主要板块的规格尺寸为：立面标准单元宽 2 120~1 235mm，立面标准单元高为 4 500mm 或 4 300mm。

#### 5 幕墙板块构造选型

外幕墙板块构造的选择综合考虑了视觉效果、节能效果、结构安全性等因素，最终采用了横明竖隐的单元式玻璃幕墙。单元式幕墙对不均匀变形的吸收能力更强，有利于提高幕墙的整体安全性。

玻璃板片采用双层 12mm 半钢化超白 Low-E 镀膜玻璃 + 1.52mm SGP 胶片，超白玻璃通透性好且杂质少，自爆率接近零；SGP 胶片的剪切模量高，温度敏感性低，可以考虑夹胶玻璃的部分整体作用，因而可提高夹胶玻璃的承载力，同时能使玻璃意外破碎时的碎片牢牢粘在胶片上不脱落。同时从节能角度，外层幕墙采用夹胶玻璃、内层幕墙采用中空玻璃的组合，可使上海中心维护系统节能达 20%，仅比内外双层均采用中空玻璃少节能约 2.8%，却减少了 20% 左右的板片重量，大大减小了外幕墙结构系统的受力。

板块的龙骨采用铝合金型材，固定玻璃的上部横框悬挂在凸合牛腿的端部（图 17），凸合钢牛腿与环梁间采用两级转接件连接（图 18），可方便调整幕墙板块的定位偏差。下部横框与下层板块的铝合金上横框形成插接构造，用以吸收板块层间的相对竖向变形。

#### 6 外幕墙对结构设计的挑战

上海中心大厦外幕墙几何形态扭曲、收缩，分区悬挂重量大且远离主体结构，给上海中心幕墙支撑结构的设计带来许多前所未有的技术挑战。<sup>[1]</sup>

（1）外幕墙远离主体结构，中庭最宽处外幕墙距主体结构距离达 13m 以上，主体结构无法直接为板块提供支撑，为此需在幕墙与主体结构之间设置在几何上能够协调内外幕墙的过渡次级结构系统，为幕墙板块提供支撑，并保证外幕墙荷载向主体结构的有效传递。

（2）由于外幕墙表皮形态非常复杂，支撑结构对复杂表皮几何形态应具有良好的适应性，能用简洁的结构搭建出复杂的几何形态。



图13 板块排列和划分方式比较



图14 交叠式构造



图15 平滑式板块曲面玻璃



图16 垂直阶梯式构造

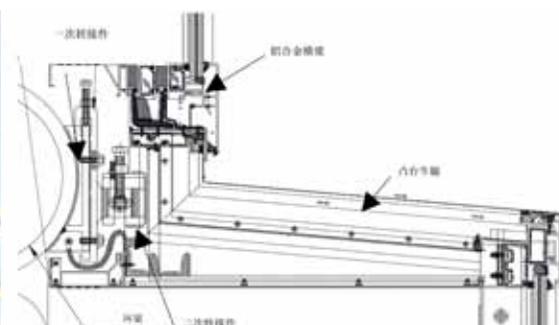


图17 幕墙龙骨与环梁的连接构造

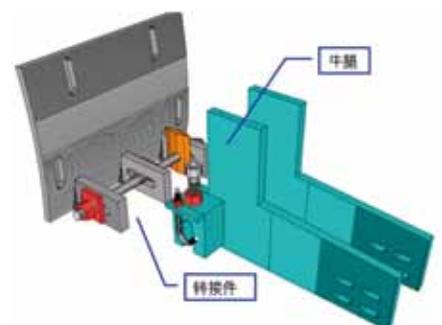


图18 牛腿与转接件连接



图19 三向斜交网格结构方案

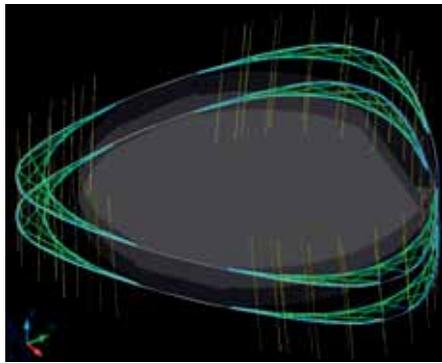


图20 水平桁架—吊杆体系

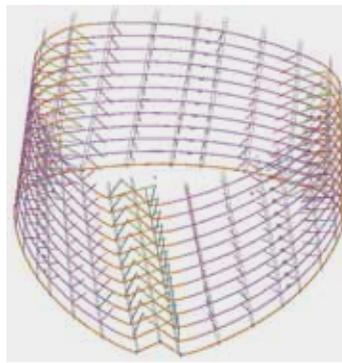


图21 幕墙支撑结构体系



图22 悬挂式幕墙支撑结构（施工中）

(3) 内外幕墙之间的空间大, 作为幕墙支撑结构的体量大, 对幕墙系统的通透性影响大, 因此支撑结构构件需要做到轻巧、断面小、视觉阻碍小。

(4) 上海中心高度超高, 设计按 100 年回归期梯度风速 50m/s、阻尼比 2% 的风荷载对结构进行强度设计。风洞试验结果表明幕墙板块最大负压达到了  $6.5\text{kN/m}^2$  (7~8 区)。相应的幕墙玻璃板片厚度也较厚 (12mm 半钢化超白玻璃 + 1.52mmSGP 夹胶层 + 12mm 半钢化超白玻璃), 板块重量达  $1.2\text{kN/m}^2$ , 这就要求幕墙支撑结构须有足够的刚度、强度以承载超强的风荷载和幕墙自重。

(5) 与主体结构连接关系简单、可靠且能协同工作。幕墙与主体结构连接构造既要能有效地将幕墙重力、风荷载、地震等荷载作用传递给主体结构, 又要对幕墙支撑结构与主体结构的相对变形有良好的适应性。

(6) 上海中心结构高度超高, 外幕墙面积较大, 结构施工周期长、难度大, 因此幕墙支撑系统应具有良好的可建造性及技术经济性。

## 7 外幕墙支撑结构选型

针对上述挑战, 外幕墙支撑结构的选型经历了一个由刚性方案到柔性方案的转变。最初的幕墙支撑结构方案为刚性斜交叉网格支撑结构, 该结构的变形小, 施工难度低, 但对建筑外立面影响较大, 视觉通透性差, 结构用钢量大 (图 19)。而后幕墙支撑结构的选型转向柔性悬挂方案, 最初的柔性支撑结构方案为水平桁架—吊杆方案, 但该方案桁架水平向杆件较多, 严重影响中庭的视觉效果 (图 20)。

最终, 上海中心大厦外幕墙支撑结构选择了由“吊杆—环梁—径向支撑”组成的“分区段悬挂的柔性幕墙支撑结构系统” (图 21, 22)。各区的幕墙支撑系统均悬挂在顶部悬挑的设备层之上, 中部通过径向支撑与楼面相连, 底部通过竖向伸缩节点与休闲层相连, 以允许幕墙与主体结构在竖向可相对自由变形。该系统具有轻盈通透、视觉阻碍小, 结构传力简洁、结构造型与外幕墙高度匹配、结构用钢量小 (总重量仅约 6 200t) 及可建造性好等优点。

尽管悬挂式幕墙支撑结构有许多技术上的优点, 但由于上海中心幕墙支撑系统分区悬挂 12~15 层, 重量达 2 200~3 200t, 悬挂高度最高近 540m (8 区), 且远离主体结构悬挂在弹性的设备层上, 幕墙结

构变形大, 这使其分析和设计面临诸如荷载作用复杂 (风荷载及温度作用较大)、结构超静定温度敏感性强、外幕墙远离主体需严格控制幕墙相对主体结构的水平相对变形、与主体结构协同工作性能复杂、与主体结构连接构造复杂、竖向地震反应显著以及施工建造过程中结构行为复杂等诸多非常规的结构设计难题。最终, 在结构工程师近两年的努力工作下, 攻克了以上技术难题, 保障了上海中心幕墙系统的顺利建造。<sup>[2]-[4]</sup>

## 8 结语

上海中心大厦第一次将悬挂式的复杂几何形态的分离式双层大尺度玻璃幕墙系统应用于超高层建筑。其采用的“分区柔性悬挂式玻璃幕墙体系”丰富了超高层建筑的幕墙形式, 提高了建筑造型设计自由度, 降低了建筑风荷载, 具有节能、美观、轻盈、通透等特点, 在超高层建筑上具有良好的应用前景。■

### 参考文献

- [1] 丁洁民, 何志军. 上海中心大厦柔性悬挂式幕墙支撑结构分析与设计[J]. 建筑结构, 2013, 43 (9): 5-9.
- [2] 丁洁民, 何志军, 李久鹏, 等. 上海中心大厦幕墙支撑结构设计若干关键问题[J]. 建筑结构, 2013, 43 (24): 6-11.
- [3] 丁洁民, 何志军, 李久鹏, 等. 上海中心大厦柔性悬挂幕墙系统设计[J]. 建筑结构, 2013, 43 (24): 1-5.
- [4] 何志军, 丁洁民, 李久鹏, 等. 上海中心大厦幕墙支撑结构关键节点分析设计[J]. 建筑结构, 2013, 43 (24): 12-17.

业主单位: 上海中心大厦建设发展有限公司

建设地点: 中国上海浦东新区陆家嘴金融贸易区

总建筑面积: 约 576 000m<sup>2</sup>

项目状态: 在建

设计建造时间: 2008~2014年

建筑设计单位: 同济大学建筑设计研究院 (集团) 有限公司

联合设计单位: 美国 Gensler 设计事务所

建筑设计项目负责人: 丁洁民、任力之

团队成员: 陈继良、张鸿武、孙晔、巢斯、何志军、万月荣、虞终军、金炜、归谈纯、杨民、刘毅、周瑾、夏林、钱大勋、包顺强



陈继良



丁洁民

### 作者简介

陈继良, 同济大学建筑设计研究院 (集团) 有限公司副总建筑师、项目运营部常务副主任、国家一级注册建筑师。主要设计作品: 上海中心大厦、上海迪士尼主题乐园、2010 年上海世博会城市最佳实践区总控等。

丁洁民, 同济大学建筑设计研究院 (集团) 有限公司总裁、结构工程专业研究员、教授、博士生导师、中国国家一级注册结构工程师、英国皇家资深注册结构工程师。主要研究成果: 《高层建筑钢结构成套技术》, 获 1993 年国家科技进步二等奖, 《高层建筑钢结构非线性分析理论》, 获 1997 年国家教育部科技进步三等奖; 《钢结构框架体系分析理论与计算机辅助设计》, 获 2003 年教育部科技进步一等奖。主要设计作品: 上海中心大厦、2010 年上海世博会主题馆、非盟会议中心等。