

# Architectural and Structural Design of Shanghai Tower

## 上海中心大厦之建筑与结构

撰文 丁洁民 同济大学建筑设计研究院（集团）有限公司



### 丁洁民

同济大学校长助理，同济大学建筑设计研究院（集团）有限公司总裁、总工程师，国家一级注册结构工程师。中国勘察设计协会建筑设计分会副会长，英国结构工程师协会中国分会主席。设计代表作品：上海中心大厦、上海世博会主题馆、温州市大剧院、东方体育中心、北京大学体育馆、复旦大学正大体育馆、同济大学教学科研综合楼等。

## 1 工程概况

上海中心大厦工程位于上海市银城中路 501 号，上海浦东新区陆家嘴金融中心区 Z3-1，Z3-2 地块。建成后的上海中心将成为上海新的制高点，同时，与金茂大厦、上海环球金融中心组成“品”字形关系的建筑群，构成陆家嘴金融商业贸易区新的天际线。

## 2 建筑设计

### 2.1 建筑布置与功能划分

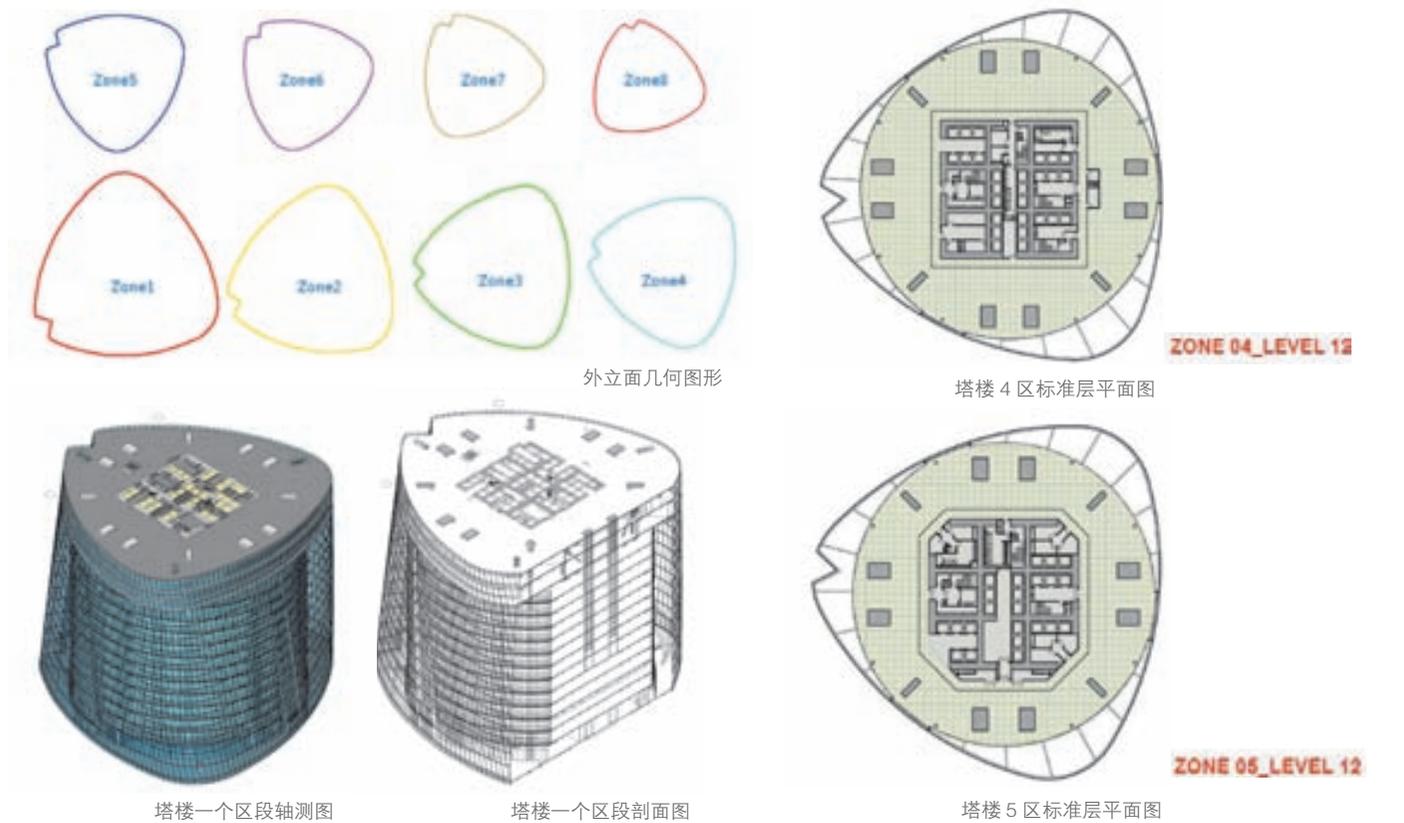
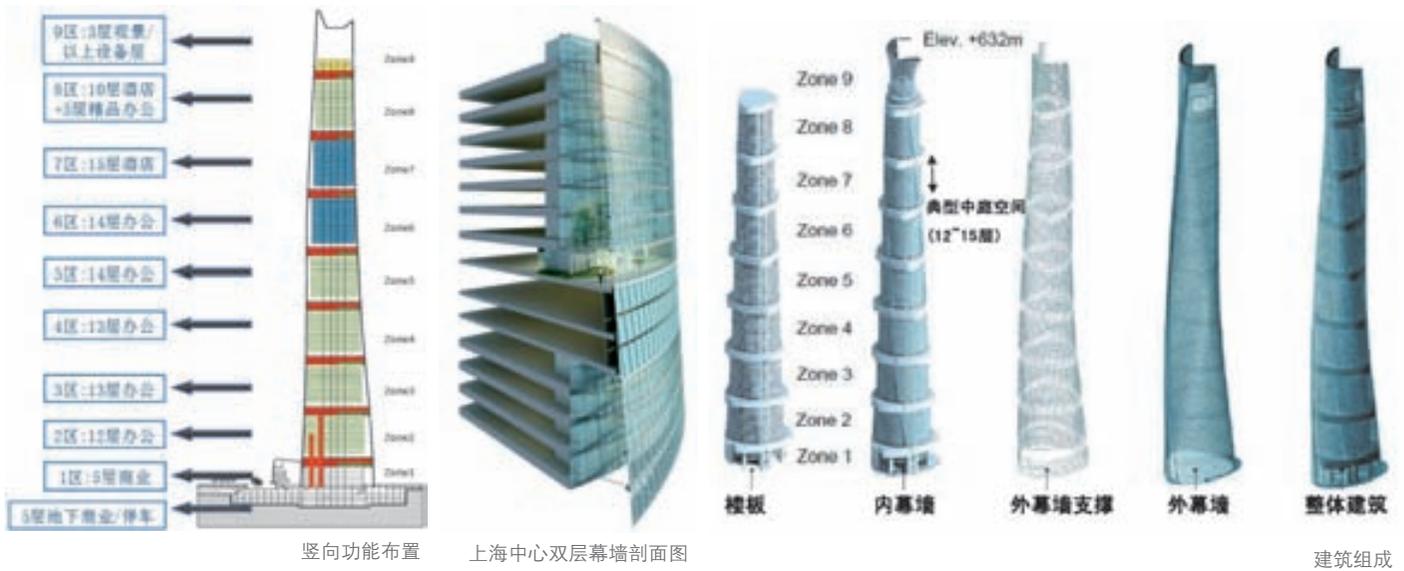
上海中心为一多功能的摩天大楼，主要用于办公用途，同时配有酒店、商业、观光等其他公共设施。塔楼地上 124 层，地下 5 层，建筑高度为 632m，裙房地上 7 层，建筑高度为 38m，整个建筑地上总面积约 38 万  $m^2$ ，地下总面积约 14 万  $m^2$ 。塔楼地上部分沿竖向共分为 9 个区，其中，1 区（包括裙房）是高档商场、餐饮以及大型会议厅，2~6 区为办公楼，7 区和 8 区为五星级的酒店，9 区为观光层。

上海中心建筑组成包括以下几部分：内部主体楼层、内层玻璃幕墙、外层玻璃幕墙和柔性支撑体系。其中，塔楼内部主体标准楼层呈圆形，圆心沿高度方向对齐，楼面半径逐渐收缩。在每个区段的顶部外侧与内侧玻璃幕墙之间，布置有一个空中大堂。

上海中心突出了“垂直城市”的高层建筑设计理念，采用了创新的中庭解决方案，在每个区布置了空中花园，类似于城市中的广场，这些中庭为建筑提供了互动交流的空间，内部布置有餐厅、咖啡厅、商店等，同时，中庭内种植了大量的绿色植物，提高了交流的品质。这种新型中庭的布置方式对传统的层叠式功能结构理念提出了新的挑战，从而将高质量的空中城市生活概念引入到高层建筑中，打造了一座立体城市。



陆家嘴地区鸟瞰图

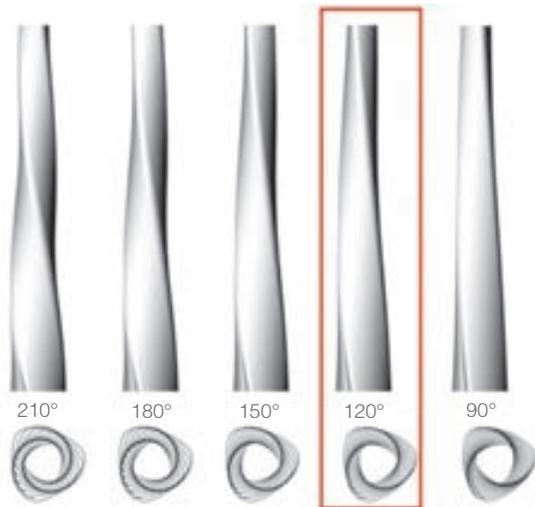


## 2.2 建筑外立面造型设计

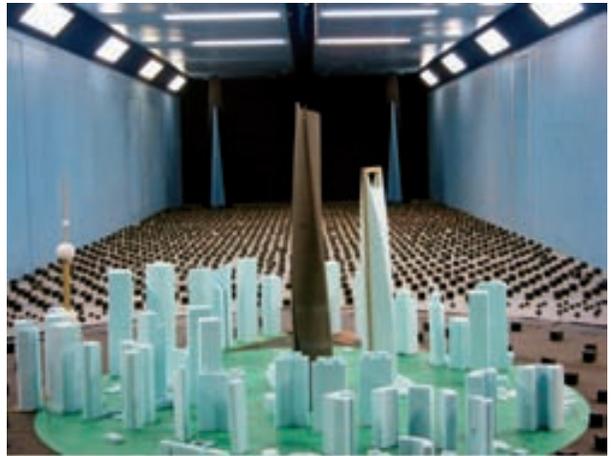
上海中心建筑设计的一个重要思考内容是如何与金茂大厦的节节宝塔、环球金融中心的锐利边角造型形成完整而和谐的关系。建筑师采用旋转上升的建筑造型，这一构思来源于哲学中“螺旋式发展”的逻辑概念。在此理念的基础上，上海中心与金茂大厦、环球金融中心形成了“过去、现在、未来”的时空联系。

建筑外立面的基本几何图形为倒圆角的三角形，通过改变三角形沿竖向的旋转角度和缩放比例实现整个外立面的变化，因此，如何确定三角形的旋转角度成为参数化设计的关键。

由于上海地区的风荷载较大，同时，风荷载对超高层建筑结构设计的影响巨大，所以建筑师与风工程专家对上海中心外立面幕墙进行了多方案的对比。比较发现，当外幕墙采用 $120^\circ$ 的旋转角度时，整个塔楼不仅具有动态的美感，而且相比普通的方形塔楼，旋转塔楼承担的风荷载减小了24%，从而大大降低了塔楼的结构造价。



外立面幕墙旋转角度变化



风洞试验模型

### 3 结构设计

#### 3.1 结构体系选型

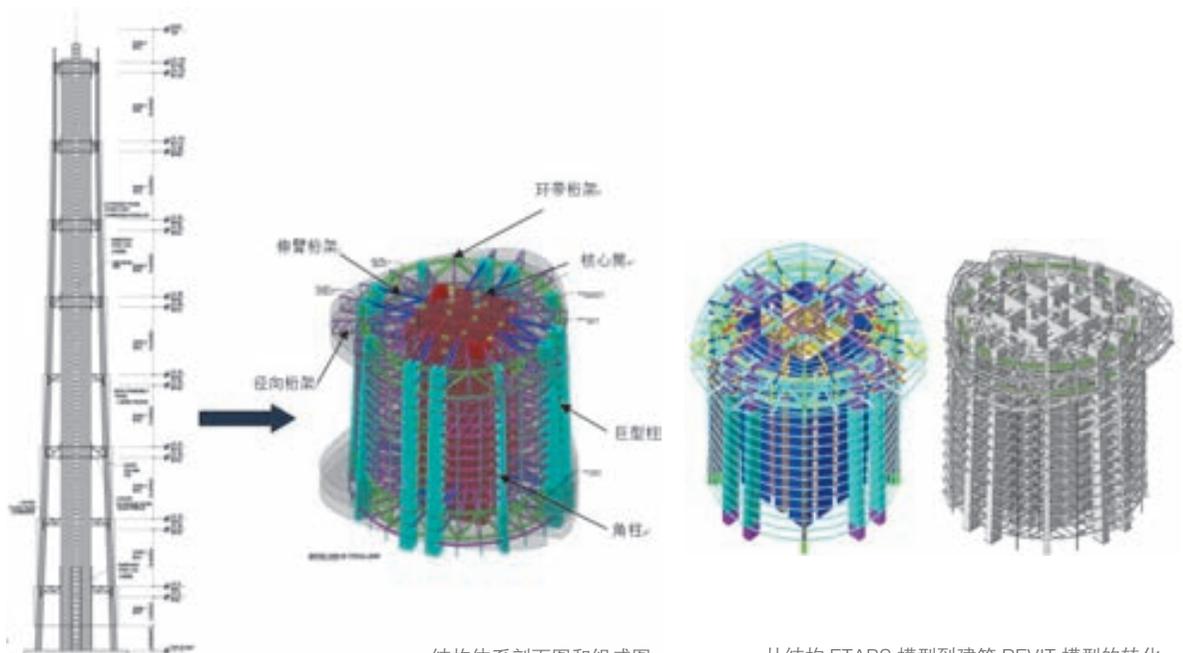
上海中心独特的建筑造型、超高的建筑高度、复杂的建筑环境给塔楼的结构设计带来了巨大的挑战，许多结构设计问题没有现成的答案可寻。同时，上海中心结构设计不仅要保证其安全性，而且需要综合考虑结构造价以及施工的可行性，更重要的是如何满足建筑理念以及使用功能的要求，真正成就建筑之美。

上海中心建筑高度 632m，结构高度 580m，底部外圈直径 83m，结构高宽比 7.0，内部核心筒尺寸为 30m×30m，核心筒高宽比 19.3，核心筒占底层平面面积的 16.6%。经过对国内外多个超高层建筑进行分析，发现对于超高层建筑来说，结构整体高宽比、核心筒高宽比和核心筒所占面积比例是影响超高层建筑的关键因素。对于上海中心来说，由于核心筒尺寸较小，导致核心筒的抗侧刚度较弱，因此，如何有效提高外部框架结构参与塔楼整体工作，成为了结构体系选型的一个关键问题。

通过对多方案的比较，上海中心采用了“巨型框架 - 核心筒 - 伸臂桁架”结构体系，该结构体系突出的优点是一方面结构效率很高，可以利用结构材料抵抗重力和水平荷载，从而降低结构造价，另一方面，该体系为建筑创造了外立面大空间的感觉，从而最大限度地提高建筑外立面的通透度。

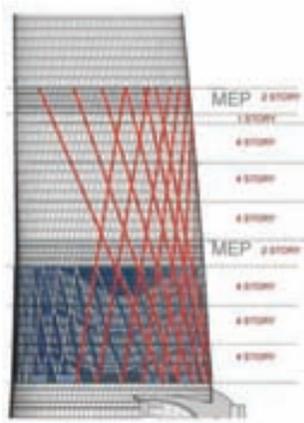
结合建筑“垂直城市”的概念，结构设计从下到上也分为 9 个相同区段。塔楼内部的核心筒与外围的巨型框架柱通过结构加强层(建筑设备层、避难层)中的伸臂桁架有效地联系在一起，从而形成了完整的结构体系。

设计过程中采用 BIM 技术将结构设计与建筑设计以及机电设计结合起来，从而大大提高了多个专业之间沟通的效率，降低了出错率。



结构体系剖面图和组成图

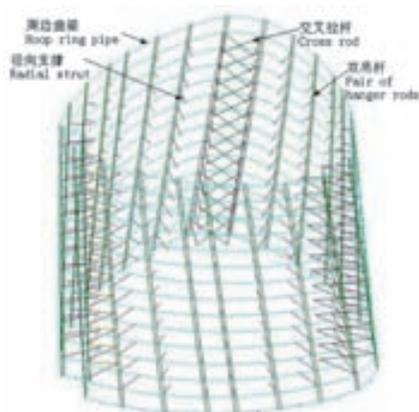
从结构 ETABS 模型到建筑 REVIT 模型的转化



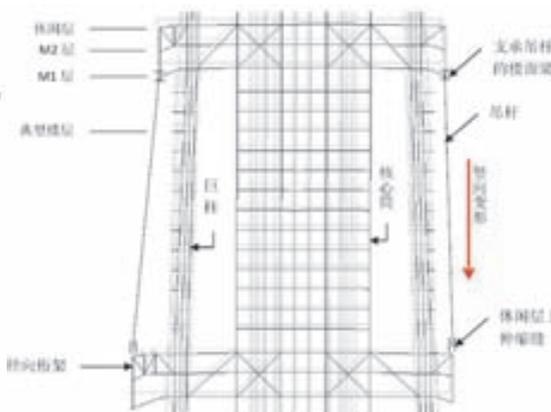
外幕墙三向网格支撑方案



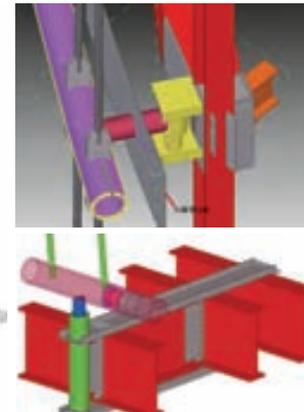
外幕墙吊挂支撑方案



一个独立区段的幕墙支撑体系



重力荷载下外幕墙变形 幕墙水平支撑与吊杆底部伸缩支座



## 4 外幕墙支撑结构设计

### 4.1 外幕墙支撑体系选型

如何实现上海中心扭转上升的外立面幕墙是整个塔楼设计的一个关键，该幕墙突出的特点是几何造型非常复杂，同时，幕墙的视觉效果要求很高。在幕墙支撑体系的比选阶段，结构曾提出了刚性三向网格支撑方案，该方案的优点是结构变形小，施工难度较低，但是，该方案对建筑外立面影响较大。

基于建筑幕墙轻盈的要求，最终采用了柔性吊挂支撑结构体系。幕墙支撑结构体系采用分区吊挂的形式，分设底部1区幕墙、中部2~8区幕墙（典型区）、顶部塔冠幕墙共三个独立区段。采用分区布置后，可有效降低幕墙支撑结构与主体结构的相互作用，从而减小结构构件内力，优化构件截面与形式。

各区幕墙支撑体系均为独立的基本单元，并且采用相同的结构体系，具体为“悬挂钢结构+径向撑杆+水平斜撑”的幕墙支撑体系。根据建筑平面扭转形态，支撑结构为相应在平面尺寸向上逐步缩小并每层旋转 $1^\circ$ 的径向支撑，并通过环梁与吊杆悬挂于各区的设备层。

### 4.2 关键节点设计

该方案的优点是结构支撑构件布置与建筑幕墙分隔合二为一，结构与建筑协调统一，但是，该方案对结构设计以及施工提出了巨大的挑战。由于采用柔性体系，幕墙结构与主体结构之间在重力荷载以及水平荷载作用下会产生变形差，如果不能有效地释放该变形差，将会导致幕墙结构与主体结构发生碰撞，最终导致玻璃幕墙发生破坏。

为解决变形差问题，结构设计在幕墙水平支撑以及吊杆底部采用了伸缩支座，该支座有效地释放了幕墙支撑结构与主体结构之间的变形差，从而保护了幕墙支撑结构自身的结构安全性。为了准确确定该伸缩支座的滑移量，结构分析过程中综合考虑了外幕墙在重力荷载、风荷载、地震作用、温度变形以及施工过程中的内力和变形情况，经过大量的分析与试验研究，最终完成了伸缩支座的设计，从而保证了上海中心外幕墙的安全性。

## 5 结论

上海中心大厦作为上海陆家嘴地区的一个标志性建筑，体现了建筑师独特的设计理念和大胆的设计创新，同时，结构工程师结合结构概念以及高性能的分析与设计手段，积极地与建筑师配合，从业主、建筑师的角度出发，不断寻求解决建筑与结构矛盾的方法，并有效地利用建筑师给予的条件，创新性地优化了整个塔楼的受力性能，丰富了结构表现手法，从而实现了结构即是建筑的目标。■



**建设单位：**上海中心大厦建设发展有限公司

**方案及扩初设计：**Gensler

**施工图设计：**同济大学建筑设计研究院（集团）有限公司

**结构设计团队：**丁洁民、奥斯、何志军、吴宏磊等

**高度：**632m

**动工时间/竣工时间：**2008年/2014年

照片拍摄于2012年9月25日