

# Architectural Expression of Structural Aesthetics, Structural Accomplishment of Architectural Beauty

## 结构美的建筑表达与建筑美的结构实现



### 汪大绥

上海现代建筑设计集团华东建筑设计研究院总工程师，中国建筑学会高层建筑委员会副主任，同济大学博士生导师，英国注册工程师协会资深会员。国家勘察设计大师。

结构设计代表作品：东方明珠电视塔、浦东机场、央视大楼、2010年上海世博会世博轴等。

人类对美的追求是与生俱来的，对建筑美的追求也不例外。以往通常认为建筑的美观与否是建筑师的事，其实结构工程师也是追求设计的美的，这就是结构美。美的建筑加上美的结构会造就真正的艺术瑰宝，因此结构师是可以和建筑师共同来创造美好的建筑的。有了这种追求，相信结构工程师的工作会更有乐趣，也会更有成效。

那么什么叫做结构美？我认为应该包括三方面的内容：首先是要符合力学的逻辑、力学的原则。力学原则对结构设计有很大的指导意义，这是结构工程师必须遵守的。比如力的传递路线明确、刚度分布均匀等都是力学上要遵循的原则。有时候由于受到建筑方案体型的制约，很难完全符合力学的合理性，但是结构还是要来实现它，这就对结构工程师的创造力和技能水平提出了更高的要求。

另外一个就是构图美。所谓构图美就是建筑美学在结构上的体现。建筑美学有很多要素，比如说统一、均衡、比例、尺度、韵律、序列等，这些建筑美学的要素同样也适合于结构，符合这些要素的结构才是美的结构。

第三个就是要注重细部美，即节点的形式、节点的做法等，尤其是外露的结构，细部更为重要。

结构是一个很大的产业，在我国从业的结构工程师要比建筑师多很多，但对于结构美的重视不够。特别是高层和超高层建筑，在大多数情况下结构是被包裹的，就会让人觉得建筑美观与结构关系不大，从而导致结构设计的粗糙化，这是非常值得我们思考的问题。结构美是在建筑外形上得到表现的。下面介绍国外一些建筑和结构完美结合的案例。

### 国内外经典案例

西班牙马德里的欧洲之门是一个倾斜  $15^\circ$  的建筑（超过了比萨斜塔的  $12^\circ$  倾角），建筑立面上突出表现了结构元素，拉杆和压杆组成一个平衡力系，使倾斜的建筑给人一种稳定感。香港中银大厦楼很高，且当地风力强劲，使得建筑物的结构系统需要非比寻常的解决方式，结构工程师采用带斜撑的巨型框架体系，并在



埃菲尔铁塔



西班牙欧洲之门



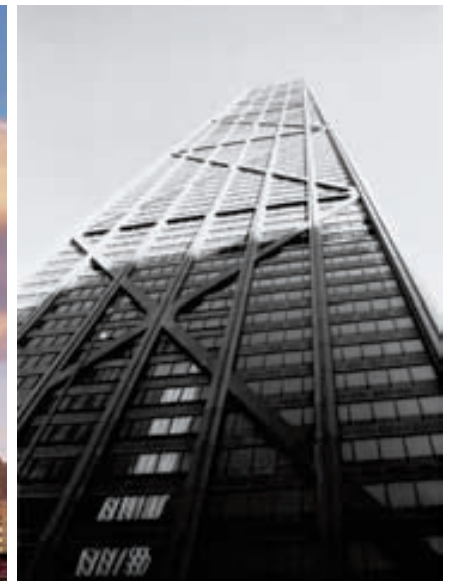
香港中银大厦



北京香山饭店



芝加哥西尔斯大厦



芝加哥汉考克大厦



纽约世贸中心



罗马小体育宫



世界上最大的木结构建筑（西班牙塞维利亚）



西班牙瓦伦西亚科技城



里斯本东方火车站



神圣家族大教堂

建筑立面上加以表现，三角形母题非常有力。不仅建筑本身非常美，也把结构美暴露在外面。北京香山饭店其中庭采用空间桁架，屋面采光窗和吊顶按桁架节间布置，把结构充分暴露出来，取得了非常独特的装饰效果。芝加哥西尔斯大厦曾经是世界最高建筑，其结构上最大的特点是采用了刚度非常好的束筒结构，九个束筒自下往上在不同的高度截去，最后有两个筒通到顶部，形成力学上合理、外形又很丰富的建筑形象。汉考克大厦的结构也非常有特点，下大上小的体型有利于减小风效应，X形支撑结构效率非常高，这些技术的结合达到了十分经济的效果，建筑外形也令人印象深刻。911事件中被毁的纽约世界贸易中心采用密柱框筒体系，主要的柱子距离为1m，柱间窗户宽度500mm，形成挺拔的竖向线条。尤其是下部，大柱距向密柱的转换，一根柱子分成三根，优美的线条令人叫绝，这个建筑的结构美也是表现在外面的。罗马小体育宫为直径60m的球形穹顶，在结构上与看台脱开。由沿圆周均匀分布的36个“Y”形斜撑承托，把荷载传到埋在地下的一圈地梁上。球顶下缘由各支间均分，向上拱起，避免了不利的弯矩。从建筑效果上看，既使轮廓丰富，又可防止因视错觉产生的下陷感。

此外还有世界上最大的木结构建筑（西班牙塞维利亚）、西班牙瓦伦西亚科技城、里斯本东方火车站、神圣家族大教堂（安东尼·高迪的毕生代表作，始建于1884年，目前仍在在修建中）。这些作品都是结构美与建筑美结合的典范，值得我们借鉴。下面重点讲一下我做过的两个项目。

## 中央电视台新台址大楼

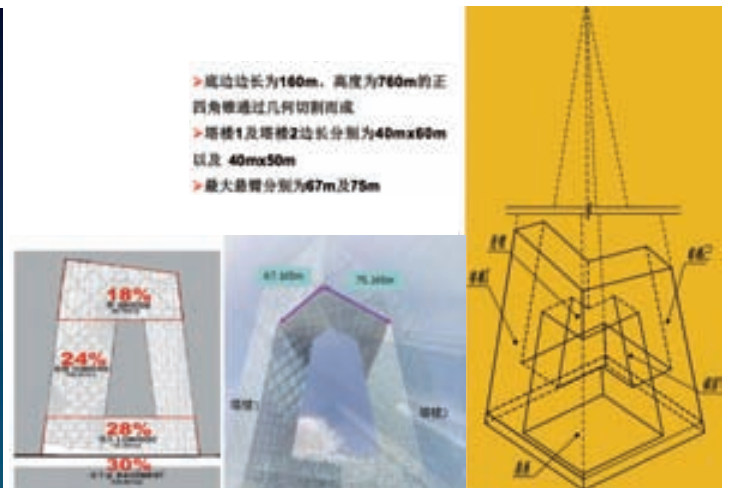
中央电视台新台址大楼于2012年5月16日落成。这个大楼非常不规则，但其实它是有自身的几何的。主楼形体由底边边长为160m、高度为760m的正四角锥通过几何切割而成，所有的面都是在这上面切割出来的，主要的面就是四棱锥的表面，屋顶斜切一刀，这就是中央电视台形象的主题。最终形成了L形连体结构（内筒多次转换），外框筒双向6°倾斜。塔楼1及塔楼2平面分别为40m×60m以及40m×50m，最大悬臂分别为67m及75m。

整个结构就是一个支撑框筒，内部竖向井道不形成筒体，绝大部分的重力荷载和全部水平荷载都是靠外面的筒体承受。建筑给人印象深刻的就是160m高空巨大的75m悬挑，这可能也是世界之最吧。

最初的方案立面是满布的斜网格。对斜网格进行初步的结构分析可以看出各部分受力是不均匀的，这不仅带来材料利用率不高，还使结构刚度过大，从而导致地震力过大。接着进行结构优化，优化的结果是根据力的大小布置杆件，因而形成不规则的布置，这符合力学的逻辑。在立面上把这个力学逻辑表达出来可能会创造出一个新的、更有意思的形象。建筑师与工程师达成一致，于是就形成了最终的立面效果，同样玻璃幕墙的分格也这样做了。幕墙支承的布置跟内部结构的支撑系统相一致。

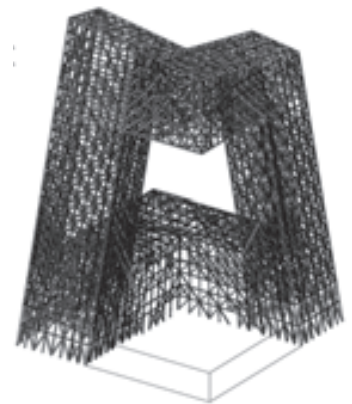


中央电视台新台址大楼

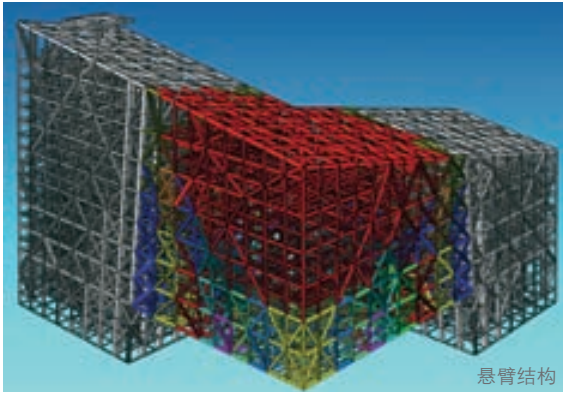


主楼形体由来

- ▶ 设计使用年限100年，8度地震区
- ▶ L形连体结构，内筒多次转换
- ▶ 外框筒双向6°倾斜
- ▶ 160m高空悬挑70m
- ▶ 采用基于性能抗震设计理念
- ▶ 系统的弹塑性动力时程分析
- ▶ 施工过程显著影响结构受力
- ▶ 新型高强钢材大规模应用



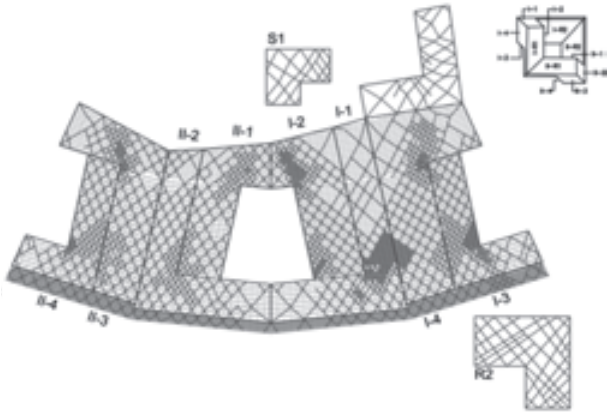
结构特点



悬臂结构

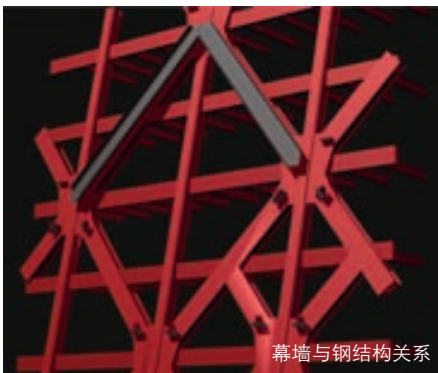


外筒支撑形式的演变

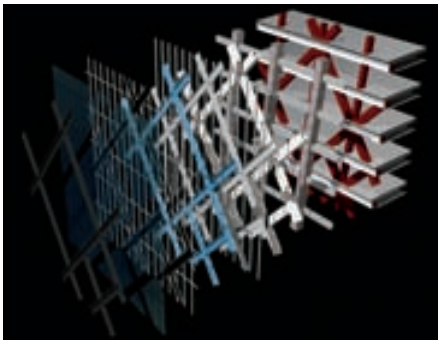
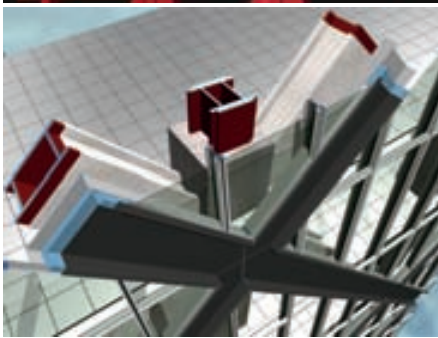


外筒展开立面

- 外筒柱: SRC柱、钢柱
- 外筒支撑: 疏密分布体现了结构受力大小
- 边梁: 桁架弦杆、框架梁



幕墙与钢结构关系



幕墙结构体系



幕墙结构施工



世博轴

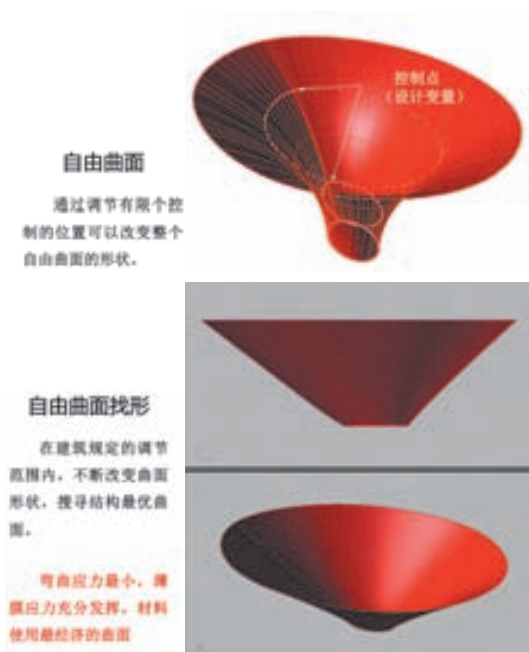


世博轴“阳光谷”

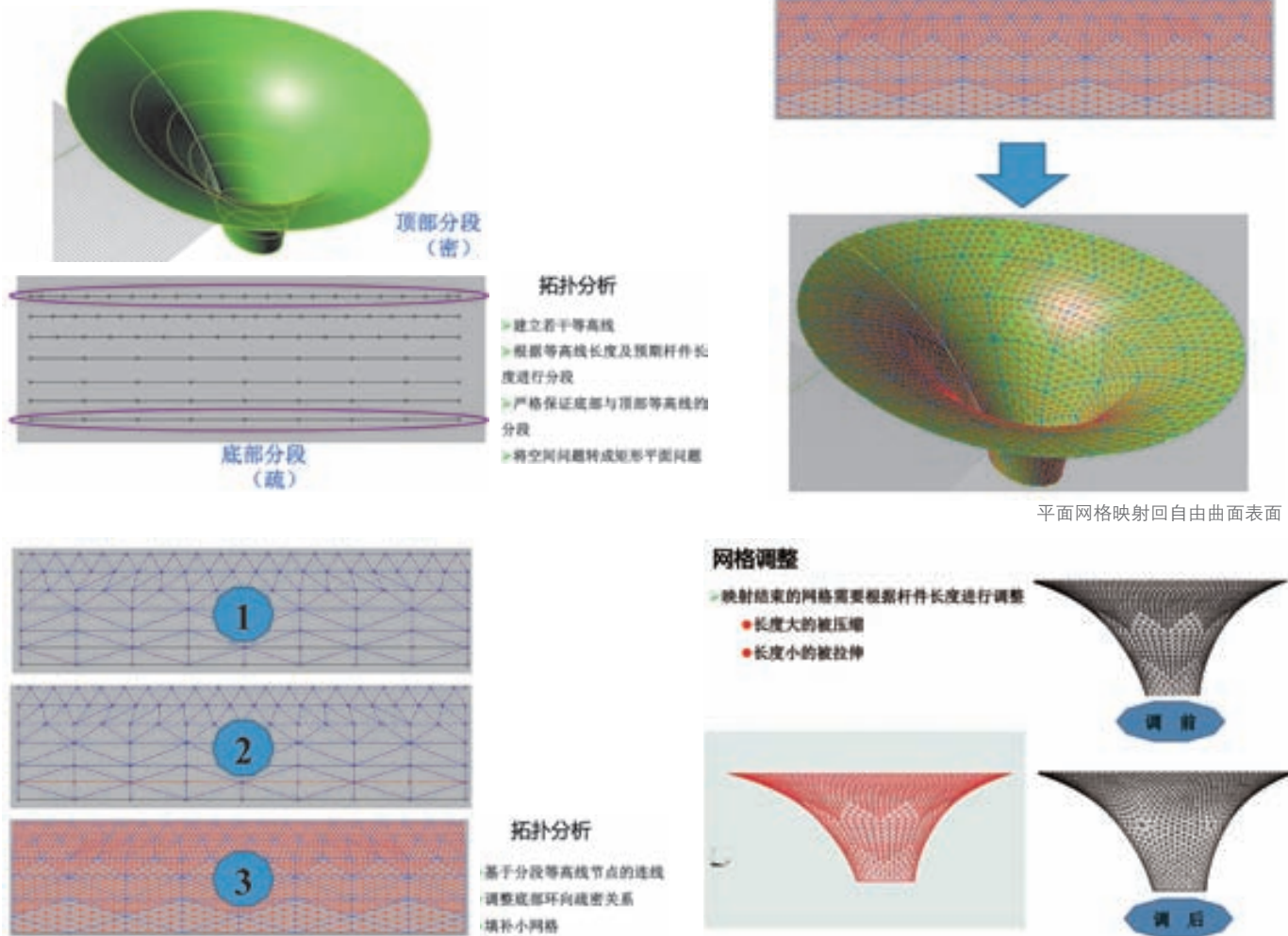
## 世博轴

下面讲一下世博轴项目。世博轴是2010上海世博会“一轴四馆”五大永久建筑之一。2010年上海世博会期间，世博轴发挥了重大的作用，它是人流集散、安检和服务的中心。地下地上各两层，为半敞开式建筑。它由6个阳光谷和相互之间的膜组成的，体量非常大，阳光谷是这里面重要的部分。

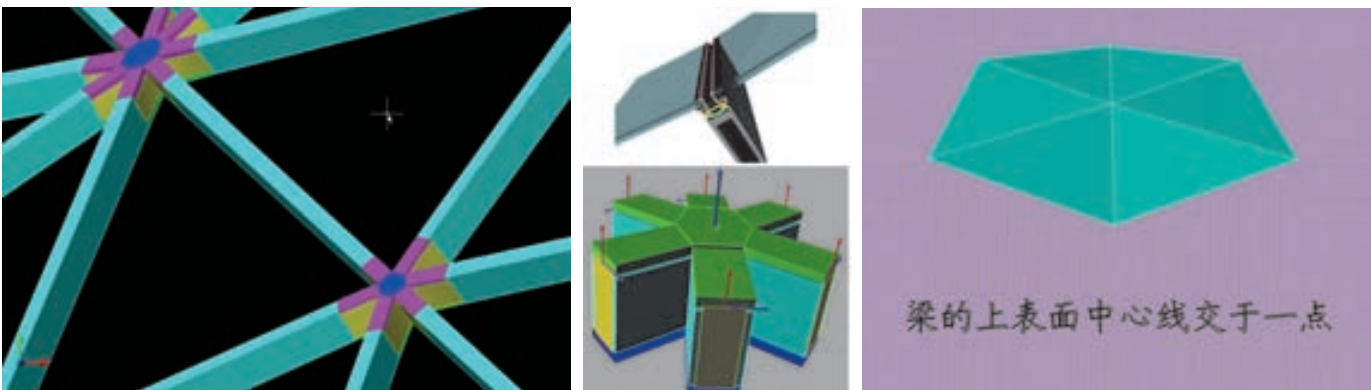
在阳光谷的设计过程当中有三个问题需要解决：一是阳光谷到底是什么形状？每个阳光谷的上口下口基本是椭圆形的，所以这个曲面并不是一个旋转体的表面，那么该如何确定？二是表面上的三角形网格应如何布置？第三个就是由于杆件是用矩形杆，六个杆件交汇于一点，杆件的主轴方向应如何确定？关于阳光谷自由曲面，我们确定了一个原则，就是在建筑师规定上口和下底的条件下，求一个薄膜应力最大、弯曲应力最小的曲面，这个曲面用求结构体系应变能的方法逐步逼近得到。找到这个曲面，所有的坐标就都可以确定，形体在力学上也是合理的。关于网格划分，我们根据建筑师提出的基本的要求，在具有相似拓扑关系的面上布置网格，然后映射到阳光谷曲面上，再用力密度法进行调整，这样得到的杆件布置，反映了力学规律，基本均匀流畅。最后进行一些人工干预，达到满足建筑要求的效果。



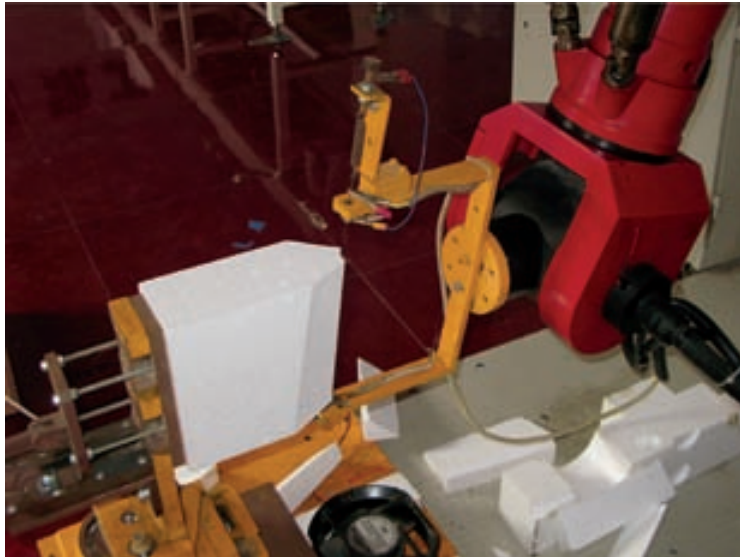
**网格划分：**  
建筑师的意象创意；  
三角形网格；  
杆件长度基本一致（2m左右）；  
杆件过渡光滑流畅；  
无明显层次痕迹



第三个问题就是关于巨型管的节点处理问题。近几年建筑师和结构师都比较喜欢用方管或矩形管，可能是因为方管和矩形管结构给人的感觉比较有力量。这是阳光谷一个三维的节点图。这里有6根杆件交汇。曲面在这一点有一条法线，而每根杆件有一个主轴。这个法线方向跟杆件主轴是什么关系呢？如果杆件主轴方向与法线方向一致的话，你照顾了杆件这头就照顾不了那头，因为杆件是不能拧成麻花形的。分析可以看出，每一根杆件都是三角形的一条边，而且是相邻两个三角形的公共边，相邻的两个三角形不在一个面上，有一个空间夹角，以这个夹角的平分线作为杆件的主轴，它是可以兼顾两端的。一个节点的六个杆件有六个主轴，求其矢量和，得到一根线作为曲面在该点的名义法线。它和所有的杆件主轴的关系都是确定的，这样确定的主轴方向使整个阳光谷杆件从底部到顶的走向都非常自然。这个方法的实现要靠CAM技术。事实证明效果是非常不错的。阳光谷钢结构曲面设计和建造的全过程，体现了建筑师和结构工程师为实现一个共同的美的追求而做的努力，这是值得肯定的。AT



杆件定位和节点盖板定位



机器人切割塑料模型



节点塑料模型组装



铸钢节点半成品



节点与杆件拼焊



完工后的节点

