

高层建筑结构形式与空间形式的逻辑对应

The Correspondence between Structural Forms and Space Forms in Tall Building Design

撰文 杨绍亮 同济大学建筑与城市规划学院

张弦 东南大学建筑研究所

摘要 高层建筑结构是高层建筑设计的基础，通过对高层建筑结构形式和空间形式的逻辑关系梳理，力求探讨出高层建筑结构体系的选择对高层空间设计的影响，探讨技术原则和艺术法则之间的深层联系和逻辑互动，希望通过对以结构为线索的高层建筑空间设计的论述，建立起高层建筑设计中结构与空间的联系，以便做好高层建筑结构概念设计工作，为进一步优化方案做准备。

关键词 高层建筑 结构概念设计 结构形式 空间形式

现代结构技术的成熟和材料的发展，结构类型的增多以及结构分析水平的提高，使高层建筑的体型与空间也越来越丰富。

结构是高层建筑设计主题。高层建筑的结构作为技术支撑不仅要把建筑空间及其实体支撑起来，还要把作用于建筑物上的一切荷载传递到地基上去。高层建筑结构功能是建筑承受荷载和抵抗侧移的能力，同时也是建筑体量组成及结构艺术表达的基础。高层建筑设计需要体现高效能的结构体系，结构的简洁、秩序也正是建筑艺术所追求的。奈尔维曾说：“在艺术效果和结构、施工的要求或者方案之间，存在着某种充分的、内在的契合……一个技术上完善的作品，有可能在艺术上效果甚差，但是，无论是古代还是现代，却没有一个从美学观点上公认的杰作而在技术上却不是一个优秀的作品。”^[1]结构的合理与建筑的美观在根本上是统一的，而且优美的结构同样也是实现优美建筑的关键。

1 高层建筑的结构特点

高层建筑结构形式的特点表现为杆状，水平荷载成为高层建筑设计的关键性因素。高层建筑的结构总体犹如一个巨大的悬臂杆件，建筑主体所承受的水平荷载使得底部的弯矩和剪力均为最大，因此高层建筑结构的抗侧移和抗倾覆设计成为关键，而确定正确的建筑形体、选择合理的结构体系、增加刚度、提高延性成为设计的基本概念。

如图1所示，高层建筑整个结构单元的简化计算模型就是一根竖向悬臂梁，受竖向荷载和水平荷载的共同作用。当它受均布水平的风荷载 q 和垂直荷载 p 作用时，其悬臂底部轴向力 N 、弯矩 M 和顶部的侧向位移 u 为： $N=pH$ ； $M=qH^2/2$ ； $u=qH^4/8EI$ ，其中 H 是建筑的高度， EI 是建筑物的刚度（ E 为弹性模量， I 为惯性矩）。

2 高层建筑结构概念设计中结构与空间的共同作用理念

高层建筑结构概念设计，是不经过数值计算，在对高层建

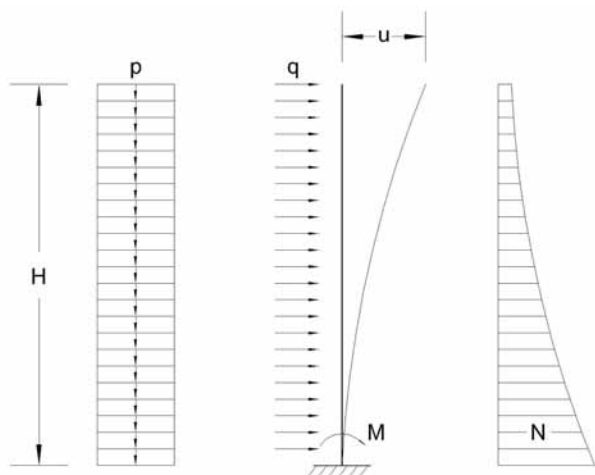


图1 高层建筑受力简图

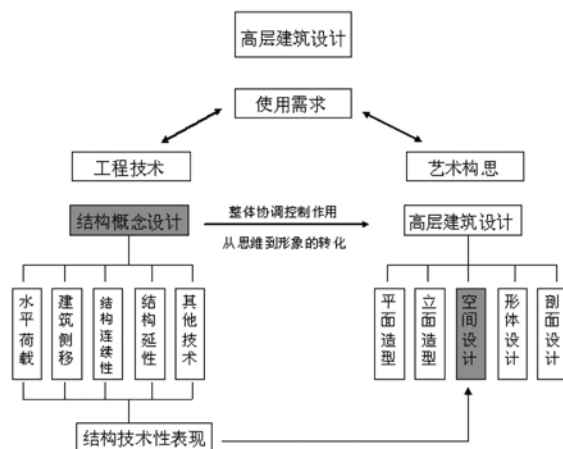


图2 高层建筑设计过程

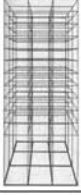
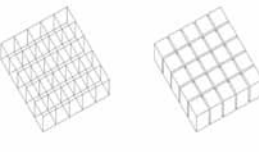
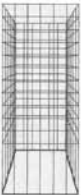
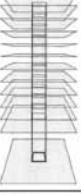
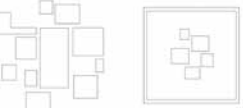
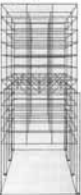
结构体系分类	空间组合形式
格构式结构体系 	网格式空间组合 
箱围式结构体系 	集中式空间组合 放射式空间组合 
核心筒结构体系 	组团式空间组合 
桥式结构体系 	集中式空间组合 放射式空间组合 

图3 高层建筑结构体系与空间组合形式的对应

分类	空间形式	实例
框架 	较灵活的空间	帝国大厦
对角支撑筒体 	灵活的大空间	约翰-汉考克中心
筒中筒 	比较灵活的大空间	世贸中心
空间桁架 	灵活的大空间	中银大厦
成束筒 	灵活的大空间	西尔斯大厦
核心筒外伸桁架 	中庭空间	金茂大厦

图4 具体结构技术与空间形式的对应

筑结构的地震作用、风作用、温度作用、场地土特征、结构的真实效应和一些基本概念的深刻理解的基础上，从整体的角度来确定建筑结构的总体布置和抗震措施，运用宏观的思维方法去指导设计。

高层建筑结构概念设计在设计过程中的位置和作用如图2所示，结构概念设计是初步设计之前的总体构思，是综合考虑建筑、结构、设备、施工等诸多方面因素的初步成果，为初步设计提供了正确的概念和思路。可以说，结构概念设计是高层建筑设计的灵魂。结构概念设计需要设计人员根据对建筑功能、空间、材料、构件等基本要件的认识和把握，运用合理的思维和判断，正确确定基本原则、判定方案和实施措施。它是设计人员在设计研究和创作实践中从感性到理性的认知过程。

结构概念设计的主要内容包括：确定主体结构体系（相应的楼盖、屋盖、承重结构和基础结构系统），选择主要结构材料，考虑关键节点构造措施。高层建筑结构概念设计需要对高层建筑的结构体系有一个全面的了解，要知道结构体系的种类和它们各自的适用范围，同时头脑中还需要对建筑的空间和形式有清晰的概念，在选择建筑结构体系的同时，思考高层建筑的立意构思、空间形态、思想及创意。

高层建筑结构概念设计中，结构与空间共同作用的理念就是在结构概念设计中，不仅重视结构技术这个逻辑概念，同时

也强调结构所支撑围合生成的空间的功能诉求。结构体系与所能做出的空间之间存在着对应关系，空间的性质和形式受结构体系的制约。在设计结构的同时考虑空间内容，明确了高层建筑空间形式与结构概念在建筑本质层面上的关系，可以在高层建筑概念设计阶段更灵活地处理空间设计与结构设计的关系，可以从结构形式中寻找空间设计的灵感。结构的理性美是建筑设计的丰富资源，在设计高层建筑空间时可以使空间依存于结构，同时组织结构的美的元素为空间所用，既丰富了设计手法，又表达了结构的理性。

3 高层建筑结构形式与空间组合形式的对应

结构概念理论体系包含的范围很广，按照体系分类的主线不同，可以分为以结构材料作为体系主线的结构理论和以结构尺度作为体系主线的结构理论。前者根据材料不同的力学特征把结构体系分为木结构体系、钢筋混凝土结构体系、钢结构体系以及混合结构体系等。这是一种从力学特征出发的微观的理解结构的方式，这种组织方式需要对结构的计算方法、构件力学特征分析有足够的了解，这种方式适用于结构工程师。以结构尺度为主线的分类体系强调的是结构体系的目的和特征。尺度是与功能需求直接相关联的，建筑设计中十分强调建筑类型，而这种分类方式与之有较好的对应性，可以使设计者明确结构体系的适应性，有助于建筑师对整个结构体系建立起形象

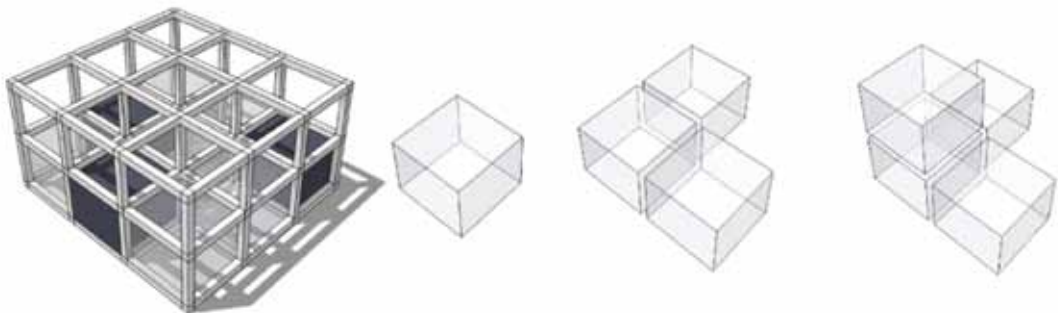


图5 框架结构及其空间形式

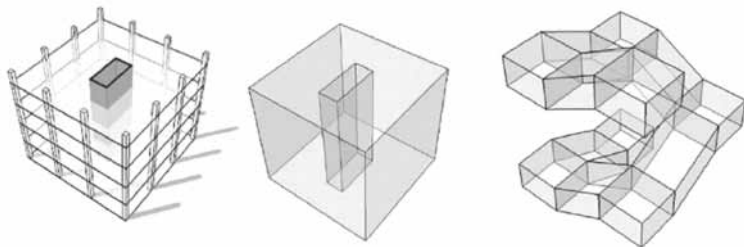


图6 核心筒结构及其空间形式

的认知。

高层建筑结构形式分为四大体系：格构式结构体系、箱围式结构体系、核心筒式结构体系、桥式结构体系。它们各自的特点决定了自身对空间形式的选择，比如中庭式空间就更适合箱围式结构，在起支撑作用的构件都布置在建筑的外围时，所形成的内部完整、自由的空间形式天然地与中庭式这种建筑空间形式对应。在建筑设计时，如果设计师根据功能、设计构思、主题表达等需要在建筑内部设计一个中庭空间，那么箱围式结构体系应该是优先考虑的结构形式，而不是设计开始就排好规整的格构式柱网。因此，建立起结构体系和空间形式的这种对应关系是有重要意义的。

按照基本的结构体系分类及基本的空间组合关系分类，有图3所示对应关系。

3.1 格构式结构体系

该结构的特点是荷载的汇集点均匀分布在整個楼层平面上，在形态上呈均匀分散的特征。因为荷载的均匀分布，垂直传递荷载的柱子和材料也在空间上均匀地分布，因此均匀地侵占了各楼层的面积。从形式上说，其在平面的分布呈网格状，承受荷载的墙或柱顺着荷载传递的方向落下，一般形成均匀的十字交叉网格。这种严格的网格划分在实体方面由墙或柱子构成，在虚体方面由一个个大小相似的空间组成。这种结构体系根据具体技术不同又可分为：框架格构体系、稳定柱格构体系、剪力墙格构体系、桁架格构体系。

这种结构体系的均匀性特点也决定了空间形式的匀质性，内部空间一般都不会太大，且大小相似。空间组合方式呈网格式，空间关系受控于三度网格区域，网格的组合力来自于图形的规整性和连续性，它们渗透在所有的组合要素中。由空间中

的参考点和线形成的图形建立起一种稳定的位置或稳定的区域。网格空间组合中各空间之间享有共同的关系，其中要素的尺寸、形式或功能可以不同，重复的、模数化的空间单元可以被消减、增加或层叠，但基于三度网格的特征仍然可以保持其可识别性，具有组合空间的能力。网格 also 具有很强的适应性，形式变化时可以调整网格，使其与基地相适应。

3.2 箱围式结构体系

该结构的特点是在高层建筑的周边安排荷载汇集点，承重构件安排在建筑物的周围，力的传递通过围护结构完成，外表面的构件既起到了围护作用，又起到了承重作用。此结构根据具体的技术不同分为框架箱围体系、桁架箱围体系、稳定柱箱围体系和剪力墙箱围体系。

这种结构体系在建筑内部留出大块完整的空间，以满足各种不同功能需求，同时也给空间组合带来了多种可能性。集中式和放射式的空间组合都适用。集中式空间组合形式是一群小空间围绕一个大空间而组织，中间的大空间处于统治地位，周围的小空间处于从属地位，主次分明。现代建筑中庭及其周围附属空间的关系也是这种组合方式。放射式空间组合类似于集中式，在中心有一个较大的占统治地位的空间。这个空间一般是规则形状的，周围的相似小空间围绕主体空间而存在，它与集中式的不同在于，不是每个小空间都与主体空间发生直接的联系，而是通过相邻的小空间线性连接再与主体空间发生关联。

3.3 核心筒式结构体系

该结构有效利用一些高层建筑功能所需的必不可少的构件作为承重构件，如楼梯井、电梯井、设备管道，将这些构件组织在一起，就形成了核心筒。这种结构形式减少了荷载传递构

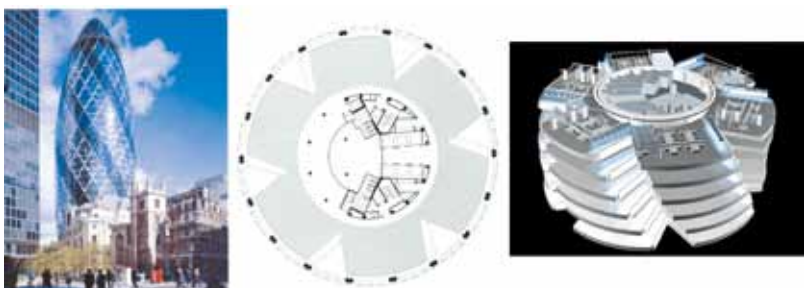


图7 瑞士再保险大厦外观、平面、内部空间构成

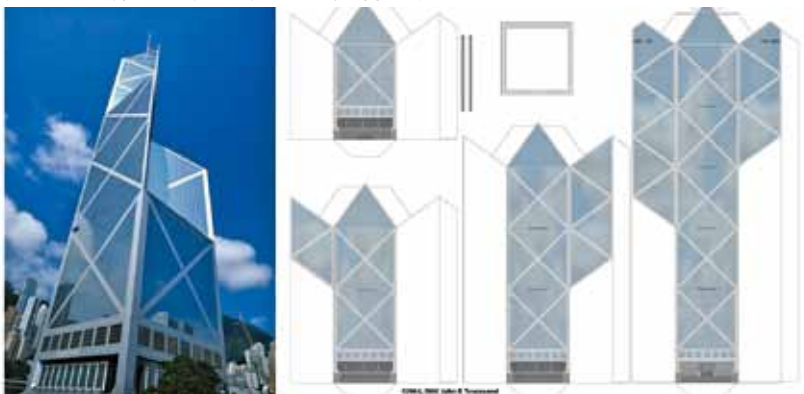


图8 香港中国银行外观、立面展开图

件的截面，争取了更多楼层使用空间。根据具体技术不同分为悬臂核心筒体系和简洁荷载核心筒体系。

这种结构体系根据具体要求的不同可以布置一个或几个核心筒，核心筒位置可以居中也可以在角部，空间形式十分灵活，适用组团式的空间组合方式。组团式空间组合通过紧密连接使各个空间互相联系，通常包括重复的、细胞状的空间，这些空间具有类似的功能并在形状和朝向方面具有共同的视觉特征。它的组织规律隐含在各个空间的相互关系中。组团式组合的图案并不来源于某个固定的几何概念，因此它灵活可变。在现代强调空间开放及流动性的发展趋势下，组团式空间可随时增加和变换而不影响其特点。20世纪50年代建成的西格拉姆大厦、纽约世界贸易中心，以及现今的世界上最高的几座高层建筑如马来西亚的石油大厦（Petronas Towers）、上海的金茂大厦和香港的中环广场大厦（Central Plaza）等，都是采用了这种“内核”式的空间构成模式。^[2]

3.4 桥式结构体系

该结构形式的产生是因为要减少高层建筑结构荷载传递构件的截面尺寸，用特殊的超结构来架起或悬吊起水平楼层，类似于桥梁结构，将荷载汇集再传递由塔架承受。为了传递垂直荷载，高层建筑需要相当的柱截面尺寸，但是通过悬吊楼层取代支承楼层的方式可大大减小荷载传递构件的截面尺寸，从而减少承重截面在楼层中所占的空间。根据具体技术的不同可分为大梁桥体系、楼层桥体系和多层桥体系。因为减少了结构体系所占用的空间，这种结构体系内部空间相对较大，适用于集中式和放射式的空间组合方式。

4 高层建筑具体结构形式与空间性质的对应

空间形式除了组合关系之外，在建筑设计时还要考虑到空间的灵活性、尺度、流动性、开放性等，结构形式和空间形式之间除了宏观层面上的对应关系之外，在具体的处理上还会有交叉和组合。因此，需要把结构体系进一步细化，考虑具体的结构技术和空间性质以便做进一步分析（图4）。

4.1 框架结构

框架结构体系空间的特点是必须受密集梁架的制约，空间的特征表现为单元式（图5）。使用框架结构作为结构体系的最著名高层建筑是帝国大厦，102层，从底层到85层是办公楼，第86~102层是观光塔楼。该大厦的底层面积为130m×60m，在第6，25，72，81，85层处逐渐分段收缩，略呈阶梯形。大厦的结构体系为钢框架结构，采用等建筑柱网，基本的柱间距为5.4m×7m。框架结构受到梁柱体系的限制较多，框架结构的高层建筑空间特点呈现为单元化，水平向及竖向有着明显的分割，但也可以通过模数的组合，在横向、竖向通过单元的组合形成大小不等的空间。通过结合楼板的设计可以形成较丰富的空间，但除了在建筑的顶部利用减少柱子的方法外不大会出现整体上的大空间，另外由于结构强度的限制，框架结构高层建筑空间的高度有限。选用钢框架结构体系可以用于塑造小尺度的中庭、底部开放空间、屋顶花园及边庭等。

4.2 核心筒结构

核心筒结构体系可分为框筒、筒中筒和成束筒。采用筒体结构的建筑由于功能性空间和服务性空间的分离以及服务性空间的相对集中，因此内部的空间无论是在水平向上还是竖向上

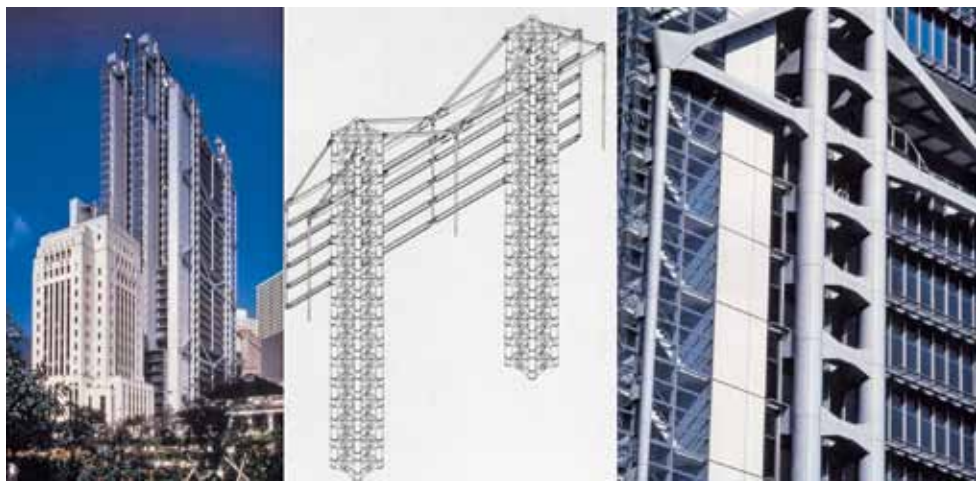


图9 香港汇丰银行外观、巨柱示意、巨柱细部

都能做出较大、较完整的空间。这种结构体系能够做出水平环通的空间、垂直向动态流动的空间、丰富的边庭以及空中花园和较大的底部开放空间（图6）。

诺曼·福斯特设计的位于伦敦的瑞士再保险公司办公楼，建筑采用中心集中核心筒，建筑的空间在竖向上围绕核心筒流动，形成丰富的韵律（图7）。该空间形式既形成了内部丰富的空间效果，也表现了结构的逻辑，是结构形成空间与空间形式表现结构的逻辑理性的典型实例。

成束筒结构是一组筒体由共同的内筒壁相互连接，形成一个多格筒体，即束筒的“腹板”增加了，使它在侧向荷载作用下的剪力滞后效应大大减小，各内立柱受力的不均匀性也大大减小，因而它的受力性能比单个框架筒更接近实壁筒体。但同时这种结构形式楼面被一系列横跨建筑宽度的立柱划分为密集的区域，不利于布置大面积的开敞空间。

芝加哥的西尔斯大厦是成束筒结构典型实例，它的结构体系是由9个尺寸相同的22.86m见方的筒体组成的模数成束框架筒体结构，110层，底层平面68.6m×68.6m，总建筑面积37万m²。这个模数成束筒的各个筒体是在不同高度处截断的，形成了一组阶梯型的体量，在外观上从不同角度都能看到变化的景观和天际线，给人以活泼感。

4.3 空间桁架结构

空间桁架结构的特点是荷载主要由分布在空间中的巨型桁架承担，空间的自由度大大增强，建筑的功能空间只要避开空间中的桁架即可，因此，在空间桁架结构体系中，建筑空间设计的自由度非常大，在水平向和垂直向都能做出大型完整的空间。但是由于结构的特点，内部的空间形状以及演化出来的侧庭，中庭多以三角形存在，其空间的限定界面也多为三角形。

建成于1988年、由华裔建筑师贝聿铭设计的香港中国银行大楼使用了空间桁架结构（图8）。地面以上部分是72层的塔楼，底层平面为52m×52m的正方形，从地平面算起高315m，

天线顶端高369m。塔楼从平面为正方形的竖筒底座上兴起，以对角线为界的1/4体积依次收进，将竖筒逐渐变为4个变角度、变截面的三角形棱柱体，最后保留其中一个到达顶部。它的主要结构是13个以楼层高为模数的交叉支撑的巨型空间桁架构成，主要荷载最后都由位于大楼4个角隅处的巨型组合立柱承受，并将它们直接传递给基础。其实质是固定在地基上的竖向悬臂空间桁架结构。这种高层建筑空间桁架结构所形成的空间形式灵活自由，无柱的平面为空间自由组合提供了无限可能。

4.4 巨型柱结构

核心筒结构的分散和分离使得服务性空间和交通空间逐步向四周分散，这也促使了巨型柱结构的出现。由巨型柱承担主要荷载，使得高层建筑内部功能空间相对于核心筒结构更加完整。

诺曼·福斯特设计的香港汇丰银行的主要承重构件是两列巨型钢立柱，架构在建筑的外表面，它们承受全楼的重力荷载和水平荷载（图9）。楼层通过架在两列立柱间的“吊杆”悬挂在立柱上。全楼除了8个巨型立柱外都是无柱的开敞大空间，室内布置与空间处理具有很大的灵活性。5榀巨型桁架将全楼在竖向分为5个独立的区域，以便于组织空间，每榀桁架都有两层高，可为大型会议、娱乐场所等功能空间服务，在底部空间有一个3层高完全开敞的空间，为该区域提供了一个宽广的广场。

4.5 表皮结构

表皮结构也称为蒙皮结构，是将建筑承受荷载的功能全部交由表皮构件完成，在维护构件的同时起到支撑结构的作用。表皮结构将高层建筑的内部空间解放出来，不受柱子的影响，功能空间的划分也更容易。空间的设计可以向异型化发展，作为内部的整体空间可以做得具有雕塑感。表皮结构的实例有MAD设计的中钢大厦，在这个项目中，外表皮的承重使高层建筑内部空间进一步解放，空间大小、形状、连接方式十分自由，可以做出丰富的空间（图10）。图10中所示即为室内完整的无立柱的大空间以及在标准层上的水平向大空间。



图10 中钢大厦外观、内部空间



图11 CCTV大楼外观、表皮展开图、表皮结构示意

荷兰建筑师库哈斯所做的CCTV新办公楼也是采用表皮三角形环网来加强表皮所承受荷载的能力的，该楼的空间雕塑般的体型能够实施跟它的表皮结构是分不开的（图11）。表皮结构在处理异型形体与空间上具有独特的能力，也为高层建筑空间设计提供了新的可能。

5 结语

通过对高层建筑设计中结构逻辑与空间逻辑对应的分析总

结，阐明了空间与结构的关系。在设计高层建筑时，空间不是单独存在的，结构为空间提供支持，同时空间也需要表达结构的理性。近年来，高层建筑结构的发展出现了结构构件的复合化和立体化、标准平面巨柱周边化、维护构件结构化的发展趋势，新的结构设计理念解放了空间，结构技术的发展将从根本上颠覆空间设计理念。

参考文献

- [1]程大锦. 建筑：形式、空间和秩序[M]. 天津大学出版社，2005.
- [2]刘建荣. 高层建筑设计与技术[M]. 中国建筑工业出版社，2005.
- [3]张惠英，杨军. 建筑结构概念设计及案例[M]. 清华大学出版社，2003.
- [4]谭力. 高层建筑空间构成模式研究[J]. 建筑学报，2001（4）.
- [5]王睿. 高层建筑造型艺术与结构概念设计[D]. 重庆大学.



作者简介

杨绍亮，同济大学建筑与城市规划学院博士，主要研究方向高层大跨建筑。

张弦，东南大学建筑研究所博士，巴黎Paris-Belleville school of architecture联合培养博士生。