

# 浅析建筑结构形式与力学逻辑的融合

徐丹

中通服咨询设计研究院有限公司

**摘要：**力学逻辑与建筑结构形式的有机融合是建筑结构设计的核心思想。本文阐述了建筑结构与力学的基本理论以及建筑结构形式的发展历程。通过西尔斯大厦与罗马小体育宫两个实例，对不同的建筑结构形式进行了具体的力学解析，同时验证了力学原理是建筑结构形式发展的不变规律，强调了力学逻辑对建筑结构设计的引导作用。

**关键词：**建筑结构形式；力学逻辑；结构分析

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.06.035

## 引言

19世纪以来，随着钢与混凝土材料的广泛应用，力学与数学原理支撑下的建筑结构体系逐渐成熟，各种类型的建筑结构形式均有了飞速的发展。在建筑领域中，结构肩负着安全性与艺术性这两大重要任务。结构形式的力学逻辑是建筑形象塑造的内在依据，建筑仅能实现与其承受力的大小及作用相适应的造型。

### 一、结构与力学

结构是指建筑中，承受各种荷载，起骨架作用的空间受力体系。所有荷载都有着从作用点到支撑点的传递路径，荷载传递路径的外在表现形式即结构形式。力学是一门自然科学。结构力学是指运用能量法、力法、位移法以及有限元法等研究工程结构受力与传力规律的一门学科。

#### （一）结构与力学的关系

结构与力学的关系是结构的第一属性，也是其技术属性。从本质上讲，建筑达到平衡状态时，推演出来的力的传递路径，正是建筑结构形式的表现，它服从于力学法则，拥有清晰的力学逻辑。结构与力学两者相辅相成，力学的发展为结构提供了理论基础，同时结构的发展也刺激了力学的发展。

#### （二）结构受力的基本原则

结构必须具有足够的强度、刚度以及稳定性，才能

在建筑设计中起到有效的支撑作用。结构受力要秉承以下原则：结构的传力路径越短越直接，工作效能越高；承受轴向拉压应力优于承受弯曲应力或混合应力（偏心受拉或偏心受拉所产生的应力）；结构各构件之间要有一定的整体性，构件截面要连续过渡，具有渐变特性；受压杆件需有合适的长细比，保证其受压稳定性。基于上述原则，可以充分发挥结构材料的力学特性，降低能耗，提高承载力，实现建筑结构的优化设计。

## 二、建筑结构形式的发展与力学分析

### （一）建筑结构形式的发展

纵观历史，从树枝、泥土、石头等自然材料构筑的简陋小屋发展为如今庞大复杂的混凝土、钢与玻璃构筑的高楼大厦，这不仅是建筑结构在高度与跨度领域中技术的发展，更是人类从寻求遮风避雨基本需求上升到追求建筑美学精神需求的发展。

17世纪以前，建筑结构形式主要为砌体结构、梁板结构、拱结构以及索结构等，这时期全凭经验建造，实践水平超前于理论水平，人类在试错中摸索着前进。17世纪以后，伽利略的逻辑几何学、牛顿的经典力学等科学理论相继问世，建筑结构学理论体系也逐渐形成。随着结构理论的成熟、材料的发展与施工技术的进步，建筑结构发展迅速，基本形式的发展经过：梁板结构→桁架结构→拱结构、索结构、壳体结构等阶段。

### （二）建筑结构形式的力学分析

#### 1. 梁板结构体系

梁板结构通过水平构件（梁、板）与竖向构件（墙、柱）将力传递至地面，梁、板承受的是弯曲力，墙、柱承受的是垂直的压力。梁是基本的水平受力构件，在荷载作用下，主要承受弯矩和剪力作用，将水平荷载传递至承重构件上。根据支撑方式不同，梁可以分为简支梁（图1-1）、悬臂梁（图1-2）与连续梁（图1-3）等。

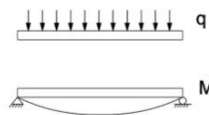


图 1-1 简支梁弯矩示意图

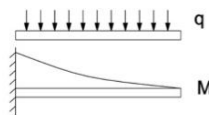


图 1-2 悬臂梁弯矩示意图

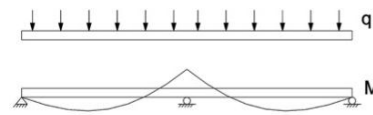


图 1-3 连续梁弯矩示意图

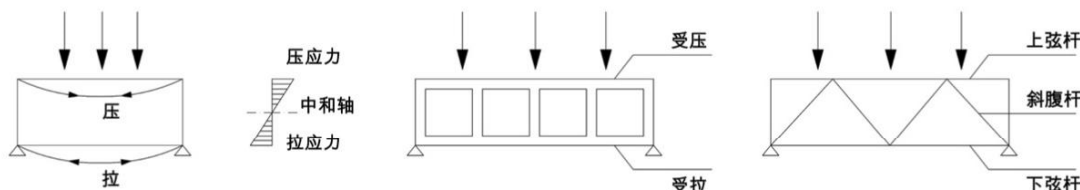


图 2 由简支梁发展成为桁架

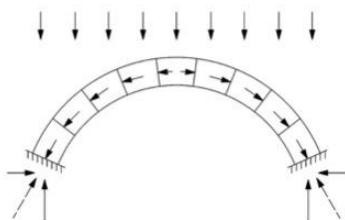


图3 拱的受力状态

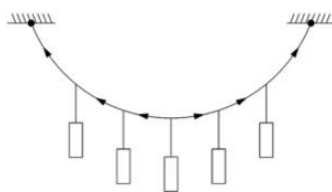


图4 索的受力状态

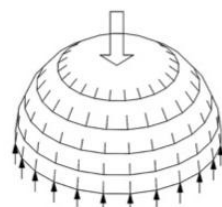


图5 球壳的应力状态

(作者自绘)

19世纪末期，随着钢筋混凝土材料的发明使用，梁与柱之间的连接逐渐发展成为刚性连接，即框架结构。它较传统梁板结构更为稳定，能够抵抗因风、地震等产生的水平方向的作用力，广泛运用于现代建筑中。

### 2. 桁架结构体系

桁架结构是从梁板结构发展而来(图2)：一根单跨简支梁受力后的截面应力分布为梁截面上下端，离中和轴距离越近应力越小。根据这个特性，可把梁的横截面经过挖空简化，直到剩下截面很小的连杆就形成了桁架。桁架基本上是由上弦杆、下弦杆与腹杆构成，杆件之间以铰节点连接。

当涉及大跨度或重荷载时，特别是对于屋顶结构，桁架结构比梁板结构更经济实用，它可有效地将弯矩转化为上、下弦杆的拉、压轴力，剪力则由斜腹杆的轴力平衡。当桁架结构体系从二维向三维空间上发展，就形成了网架结构体系。

### 3. 拱结构、索结构、壳体结构体系

从结构体系受力角度分析，拱结构与索结构互为相反体系，而壳体结构是拱结构和索结构的空表现形式，三者作用机理是相通的。

拱结构(图3)比桁架结构具有更好的力学优势，主要承受压力，在荷载作用下几乎处于无弯矩状态。它是构件摆脱弯曲变形的一种突破性发展，为抗压性能好的材料提供了一种理想的结构形式。但拱结构的支座会产生水平推力，跨度大时比较耗费材料，此时曲桁架比拱更具优势。

索结构(图4)与拱结构互为相反体系，主要承受

拉力，其抗弯刚度可忽略不计。索在自重状态下呈悬链线状，两端受垂直向上的拉力，并产生向内的水平力，为了使其保持平衡，必须在索的两端设柱与斜向拉索。当索与膜两种构件有机结合，张拉成形共同抵抗外荷载作用时，就形成了索—膜结构。

壳体结构(图5)一般是由内外两个几何曲面所构成的空间结构，由壳面和边缘支撑构件组成，它的厚度远小于其他尺寸(如跨度等)故又称薄壳结构，常见形式有：球壳、筒壳、扭壳与双曲扁壳等。不同于拱在二维平面单向传力，壳是双向传力的空间结构，主要受曲面内的轴力及剪力作用，弯矩和扭矩很小可忽略不计。

### 4. 其他结构体系

除以上五种基本体系以及相关演变外，还有些较新的结构体系，如悬挑结构、剪力墙结构、核心筒结构等。建筑结构虽然形式各异，但都遵循两个基本原则：一是必须符合力学原理，二是形成适应功能要求的空间。

## 三、力学逻辑引导建筑结构形式的经典案例解读

世界上公认成功的建筑，几乎都完美地利用力学逻辑进行建筑结构形式的构思。其中，超高层及大跨度结构体系是建筑结构高技派的代表，完全展现了建筑结构与技术的完美融合。

### (一) 超高层结构体系案例解读——西尔斯大厦(Sears Tower; 现更名: Willis Tower)

超高层建筑一般指总高度超过100米的建筑，其抗侧力结构体系的选择是结构设计的核心部分。超高层建筑结构体系主要包括：剪力墙结构、框架—剪力墙结构、框架—核心筒结构、筒中筒结构及束筒结构等。



图6 西尔斯大厦外景(来自网络)

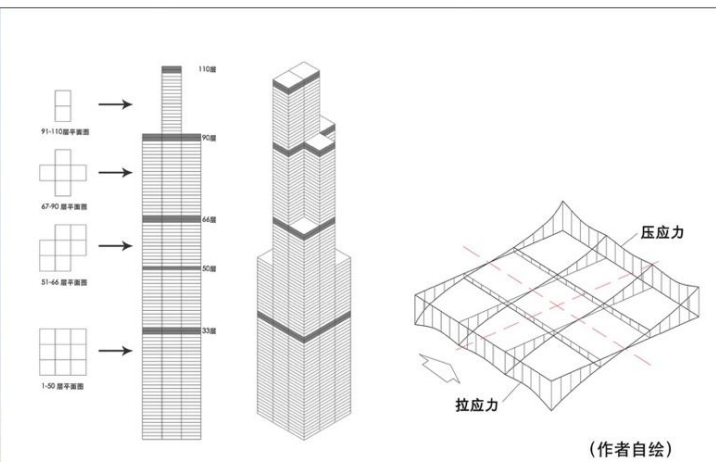


图7 西尔斯大厦平面分析图

图8 侧向作用下柱的轴力分布

美国西尔斯大厦（图6）是超高层建筑的代表之一，建于1974年，高达442.3米，110层，底层平面边长约68.7米，总高宽比为6.43，形体简洁稳定、挺拔利索；采用了束筒结构，由9个高低不一、边长22.9米的方形框筒组成。

设计师F.卡恩在构思时，考虑到地震荷载与风荷载的作用，沿着高度增加逐渐减去部分方筒，91层直至顶部仅剩2个方筒（图7），旨在减轻上部的结构质量，从而减小水平荷载作用。为提高结构抗侧刚度，每边有4个“角柱”，各筒内不再设柱，因而楼盖采用22.9米跨



图9 罗马小体育宫外景（摄影：邢晓萌）

度的桁架。

束筒结构是建筑设计与结构创新相结合的成果，既可缓解剪力滞后现象，又可使柱的轴力分布比较均匀（图8），从而取得丰富的外部造型效果。

## （二）大跨度结构体系案例解读——罗马小体育宫（Palazzetto Dello Sport of Rome）

大跨建筑一般指跨度达到30米以上的建筑，按荷载分布的空间维度可以分为平面结构与空间结构，其中平面结构包括拱结构、索结构等，空间结构包括壳体结构、索—膜结构与网架结构等。



图10 罗马小体育宫内景（摄影：邢晓萌）

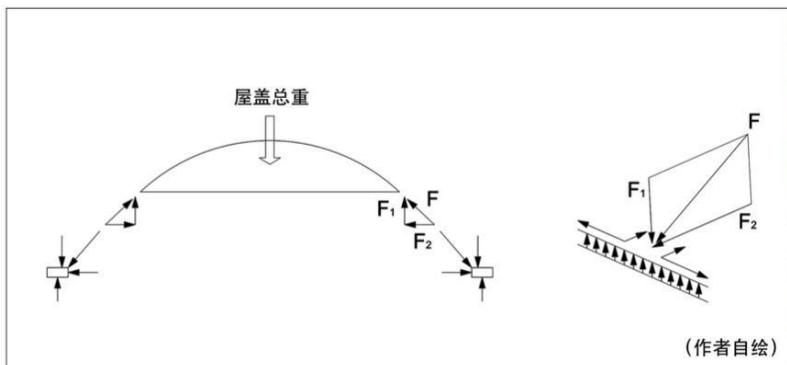


图11 壳顶受力示意图



图12 Y形斜柱传力示意图 图13 Y形斜柱（摄影：邢晓萌）

意大利罗马小体育宫（图9）是大跨建筑的代表之一。建于1957年，由P.L.奈尔维设计，结构外露形成独特风格，比例协调，富有力量感，彰显了建筑结构形式与力学逻辑的完美融合。屋顶为钢筋混凝土球面薄壳结构（图10），采用装配式工艺，由1620个预制菱形钢丝网构件作为模板进行现场浇筑水泥，壳身最薄处仅有25mm，最厚处也不超过100mm，充分利用了材料的力学特性。

球壳直径为59.13m，主要承受压力（图11），壳板的径向和环向弯矩极小，甚至可以忽略。葵花瓣似的网肋，把力传到36个沿圆周均匀分布的“Y”形斜柱上，再传至基础（图12，13），斜柱的倾角与壳体边缘径向切线方向保持一致。球顶的檐边构件呈波浪形起伏，与Y形斜柱衔接自然，结构轻巧且受力合理。

### 结语

力学原理为建筑结构设计提供了深化认知与操作的科学基础，是容易被建筑师和结构师共同掌握的基本准

则。虽然现代结构技术的发展为建筑结构选型提供了较大空间，但是建筑师们仍须遵循力学原理选择合理经济的结构形式，将逻辑思维与形象思维、结构理性与建筑艺术相结合，从而达到技术美和艺术美的高度统一。

### 参考文献

- [1] 王环宇. 力与美的建构——结构造型[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [2] 杨俊杰, 崔钦淑. 结构原理与结构概念设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 知识产权出版社, 2006.
- [3] 杜咏, 陈瑜. 建筑结构与选型[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [4] (日) 川口卫, 阿部优, 松谷宥彦著. 建筑结构的奥秘——力的传递与形式[M]. 王小盾, 陈志华译. 北京: 清华大学出版社, 2012.

作者简介: 徐丹, 性别, 女, 1991年8月, 籍贯: 江苏省盐城市, 最高学历: 硕士研究生, 最高学位: 建筑学硕士, 职称: 建筑师, 研究方向: 建筑设计。