

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201706086



景观构筑物功能需求的力层级构成响应

王瑜^{1,2}, 陈震³

- (1. 南京航空航天大学 艺术学院, 江苏 南京 211106;
2. 东南大学 建筑学院, 江苏 南京 210096;
3. 江苏开放大学 传媒与设计学院, 江苏 南京 210036)

摘要: 为了满足景观构筑物对竖向、跨向、遮蔽、围合等方面的功能需求,以及日益多样化与模糊化的发展要求,将单纯的结构力学问题转化为拓展景观构筑物设计的思维与方法. 通过塔式结构的层级秩序调度,以截面作用、形态作用与向量作用结构体系为主层级结构两种方式实现层级的强化;而通过构件的无差别化与构件的相互支承两种方式实现层级的弱化. 研究表明:层级的强化与弱化均是内在物理法则的物质表达,能够有效地促进建筑与结构的整合,在实现景观构筑物自身功能需求的基础上,为其形态的创新生成提供坚实有力的技术支撑.

关键词: 景观构筑物; 功能需求; 层级强化; 层级弱化; 塔式结构; 主层级结构

中图分类号: TU 201 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)01-0043-08

Response to Functional Requirement of Landscape Architecture via Hierarchy of Force

WANG Yu^{1,2}, CHEN Zhen³

- (1. Arts College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, China;
3. School of Media and Design, Jiangsu Open University, Nanjing 210036, China)

Abstract: The functional requirement of landscape architecture includes many aspects such as vertical, spanned, covered, enclosed, etc. In order to fulfill all these requirements and the diversified and blurred development of landscape architecture, it is necessary to change the problem of sheer structural mechanics to the idea and methods of promoting landscape architecture design. The hierarchy of force can be intensified by two methods, one is to arrange the hierarchical order of tower structure, another is to regard the section-action, form-action and vector-action structure systems as the main hierarchy. The hierarchy of force can be weakened by two means, such as non-discriminatory and mutual support of structural elements. The study shows that the intensification and weakening of hierarchy of force which are all the material expression of inner physical laws, can promote the integration of architecture and structure, then act as the firm technical support of innovative form based on meeting the functional requirements of landscape architecture.

Keywords: landscape architecture; functional requirements; hierarchical intensification; hierarchy weakening; tower structure; main hierarchical structure

系统组织在地位与作用、结构与功能上所表现出等级秩序性,形成了具有质的差异性系统等级. 层次性便是反映这种不同的系统等级或系统中的等级差异性. 层次是系统内部各元素之间或系统外各个

系统之间具有某种共同特征的集合. 它可以构成一个有机的整体, 即形成一类新的子系统, 也可以是相对独立, 但属性相似的集合体^[1]. 建筑系统的子系统——结构系统通常按照其内在的约束机制分层级、分类型组织秩序而形成, 层次性是其一种基本特征. 隶属于结构系统的力量表现出分层级传递的特征, 通常包括横向关系和纵向关系的层, 即水平体系与竖向体系, 如梁柱结构是由一系列的梁、面板和柱构件组成. 各层次之间既各司其职, 也相互联系, 相邻上下层间相互牵制, 但不能支配另一方, 均需服从所属的共同层级整体, 结构层级中较低层次构件的布置通常确定了竖向体系的必要安排; 反之, 竖向体系的类型与几何的选取也就先期设定了最佳的层次布置与适宜的水平体系的性质. 由于景观构筑物的建筑与结构的天然一体性, 景观构筑物的设计很大程度上是对结构形态的驾驭, 其功能需求的满足很大程度上依赖力量的合理组织. 本文通过发现结构内在的力流组织法则, 即层级构成的规律, 探讨应用于景观构筑物功能需求的层级的强化与弱化两种方式.

1 景观构筑物的功能需求

建造景观构筑物最基本的目的是为了人的使用, 其功能需求(主要是物质需求)囊括了竖向、跨向、遮蔽、围合、抬升和动态 6 种.

1) 竖向是指构筑物对空间高度的追求, 藉由高度所带来的便利为人所用, 涉及广播、电视、通讯、观光、导航、照明、供水、排风(烟)、训练、监测等多种用途.

2) 跨向是指当人无法依靠一己之力跨越障碍物, 借助一定的外在力量实现跨越和沟通, 从而顺畅地由一端到达另一端, 如景观桥、街桥(人行天桥)、铁路桥、公路桥、公路铁路两用桥、管线桥和渡槽等.

3) 遮蔽是通过悬浮于空中的水平界面即屋顶实现的, 森佩尔认为人类的基本动机是基于实用需求的技术操作, 因而, 在起源处就必然与一定的制作方式和形式相联系, 与遮蔽需求相对应的形式便是屋顶^[2], 此类构筑物涵盖了所有类型的亭、廊、榭、舫、入口雨棚、公交站台、汽车与火车客运站月台顶棚、温室大棚及动物园笼架等.

4) 围合是构筑垂直向的界面以区隔内外, 用“围”这种物质形式产生出内部空间供人使用, 维护自身的舒适与安全, 如柱列、景墙、围墙、挡土墙、防音壁、户外演剧构筑物, 以及历史遗留下来的城墙等.

5) 抬升指的是抬升地面, 其原始动机不在于与外界的隔断, 而在于支撑起活动的场所, 而今该方式还可用于规制人类的行动, 限制在特定的范围内, 满足远眺、观景等需求, 如各种类型的观景平台、休闲驳岸、树屋、楼阁、儿童游乐设施等.

6) 动态即为顺应剧变的社会生活方式而产生诸多新的社会需求, 进而对景观构筑物提出新的功能要求, 使用功能越发表现出不确定性, 有的是突发性的, 有的是临时性的, 有的则是更迭往复的. 鉴于自身的优势, 运动结构^[3]使构筑物进行调整与变换迎合人的需求成为可能, 它所应对的动态需求是以上竖向、跨向、遮蔽、围合, 以及抬升各种使用功能的综合, 并以动态的方式实现功能之间的快速转换^[4].

2 层级的强化

调节与控制能力的缺乏, 可以在一定程度上用增加组织层级来补偿^[5]. 层次的增加一方面使系统结构日趋复杂; 另一方面, 每一层次的划分又会使系统在属性功能上得到一次简化^[1]. 将其应用于结构系统, 即通过层次化构成的调度, 也就是增加组织层级增强控制力, 能发挥良好的力学性能, 从而有效地引导力流在空间形态中的分布与传递.

2.1 通过塔式结构实现空间的竖向延展

自立式的塔式结构属于高耸结构, 横向荷载起着主要作用. 其力学模型相当于悬臂梁, 在横向荷载作用下, 呈现上部截面较小, 下部结构较大的结构形式^[6]. 作为主层级的塔身, 其功能主要集中为两类: 一是作为载体, 将某种工艺装置举向高空; 二是将烟气通过杆身内管道排向高空. 前一类重在将位于塔顶装置的重力荷载、活荷载及风荷载经由塔身导向基础; 后一类则重在维持塔体自身的稳定性.

2.1.1 利用空间桁架形成向量作用结构体系 桁架在竖向和水平荷载作用下, 各杆件主要承受轴向拉力或轴向压力, 两力共同作用形成能够改变力向且不需中间支承就能传递荷载跨越长距离的机制. 该机

制不仅作用于跨向,还作用于竖向上的延展,以较少的结构材料换取较大的空间刚度,体现出结构的实效性. 结构的构成方式表现为如下两种形式:一种是塔柱为一水平截面为正多边形、外轮廓呈抛物线形或折线形的棱,如位于巴西首都高 224 m 的巴西利亚电视塔(图 1),塔形呈锥形,正四边形空间桁架结构;另一种是以 3 或 4 根钢管构成一个大格构柱,再由数个大格构柱之间的连接桁架(隔一定间距设置)构成塔体的组合型塔.

以空间桁架作为主层级结构,与圆盘形塔楼的悬挑桁架结构、球形塔楼的网壳结构、田字形塔楼结构,以及悬挑结构平台等次层级结构进行组合,有利于抵抗横向作用力和垂直重力的双重作用. 最著名的案例是埃菲尔铁塔(图 2). 塔脚是由 4 个角铁和扁铁构造成的空间桁架角柱,底部大面积铺展以增加横向抗风的能力,清晰地表明其稳定性,向上逐渐变窄的形态有助于减小风压. 角柱倾斜 54° ,在标高 55 m 处,由第一平台(水平横梁支承)相互连接,标高 115 m 的第二平台再次将 4 个角柱相连,向上转化为 189 m 高、细长的、近乎垂直的、刚性很大的方尖塔直通顶部平台^[7].



图 1 巴西利亚电视塔
Fig. 1 Brasilia TV tower



图 2 埃菲尔铁塔
Fig. 2 Eiffel tower

2.1.2 通过钢筋混凝土管筒实现空间竖向上的扩展 塔顶支承大型塔楼结构,受力最为合理的结构方案莫过于钢筋混凝土管筒结构. 通过使用钢筋混凝土结构代替钢结构,减少了结构受风压产生的弯曲变形,由风力或气涡流引起的摇摆,也通过钢筋混凝土的耗能性能加以避免. 常见的圆形截面的塔柱可将风力的影响减至最小,而小型钢筋混凝土塔的截面形式则更加多样化,也有用 3 片结构呈三叶形或 4 片结构呈十字形截面共同撑起塔楼的方案. 采用钢筋混凝土管筒为主层级结构,具有良好的力学性能,符合技术要求,并以优雅而纤细的形态形成对各种形式塔楼的有力支持.

德国汉堡海因里希的荷尔茨塔(图 3)塔体为钢筋混凝土管筒结构,标高 150,125 m 设有两处塔楼,主要受力结构为预应力混凝土薄壳,分别作为发射中心与旋转餐厅、观光平台. 主层级结构良好的受力性能保证了其上部次层级结构的功能运作^[8].

布拉格电视塔(图 4)主层级结构为 3 个钢筋混凝土管筒结构(一大两小),上下 3 个方形塔楼均沿 3 个方向悬挑而出,将 3 个筒体联成一体,增加了结构的刚度. 标高 63 m 的塔楼设有餐厅,标高约 100 m 的塔楼设有瞭望层,塔顶还设有露天平台,各种功能被整合于竖向扩展的空间内.



图 3 汉堡海因里希的荷尔茨塔
Fig. 3 Heinrich Hertz tower



图 4 布拉格电视塔
Fig. 4 Prague TV tower

2.1.3 利用双层筒体的组合提供空间竖向扩展的足够刚度 双层筒体(又称筒中筒)由内筒和外筒组成. 内筒一般为刚性结构,由多根钢管构成一个兼具抗压、抗弯的空间桁架结构或是钢筋混凝土管筒结构,内设楼梯和电梯井道等. 外筒分为柔性和刚性两种^[6]. 柔性外筒以钢索、钢绞线或不能作为压杆的细长杆件构成,一旦进入受压模式便退出工作,索的两端分别固定于基础及悬挑于刚性内筒的桁架外端节点上. 内筒及悬挑桁架为刚性杆,外筒为柔性杆,是一个由两种不同性质的单元构成的强非线性体系. 刚

性外筒一般是由数十根等角度空间斜向排列的直线状斜柱构成一个双曲抛物面,杆件均为刚性构件,可视为整体空间桁架,内外筒之间亦由塔上的桁架系统与塔下的基础相连接. 因外斜柱一部分受压,故在适当高度处内外筒之间还要增设横隔. 内筒承受压力和部分弯矩,外筒与之相连并协调工作,构成整个塔的有效而经济的抗水平侧向力结构.

德国斯图加特的基莱斯山观景塔为索网塔(图 5),内筒为一高 41 m、直径仅为 50 cm 的塔柱,外筒为索网结构. 在位于 8,16,24,31 m 标高处设有 4 个观景平台,2 个呈 180°错开的螺旋式楼梯分别用于上下交通. 观景平台与楼梯悬挂于四周由 48 根钢索编织而成的索网结构上,交叉索网体系悬挂在高 33.5 m 的压力环与圆形基础之间. 塔柱与索网共同承担竖向力,一部分通过预张拉的索向下传递,一部分导向上部的压力环上,对塔柱施压,塔柱受压而在索网内产生预应力. 通过施加预应力,索网可以承担平台和楼梯的质量,并在风力作用下保持稳定,而不会使索松弛. 连接塔柱与索网的平台,由凹形薄板放置在辐射状的梁上,增强了塔身的横向刚度,促使整个系统得以稳定^[8].

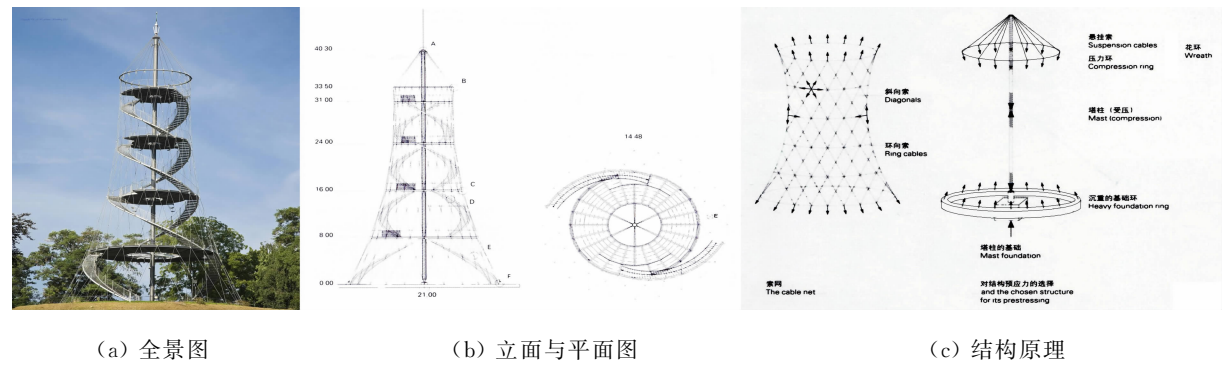


图 5 斯图加特的基莱斯山观景塔

Fig. 5 Stuttgart Killesberg sightseeing tower

刚性外筒的案例是总高度达 610 m 的广州新电视塔(图 6),它由高 454 m 的主塔与高 156 m 的天线桅杆构成. 主塔竖向传力结构由混凝土内筒与钢结构外筒组合而成,内筒为 14 m×17 m 的椭圆,外筒由 24 根倾斜的钢管混凝土直柱、46 道钢环杆和 45 道钢斜撑组成,由底部和顶部 2 个不同直径且相互转动、错心的椭圆各 24 个点对应拉直线构成. 外筒节点刚接,提高了外筒刚度与整体稳定. 外筒和内筒下端均支承在塔座上,上端功能区放射状布置的钢梁联系混凝土内筒和钢结构外筒支撑起楼面,但混

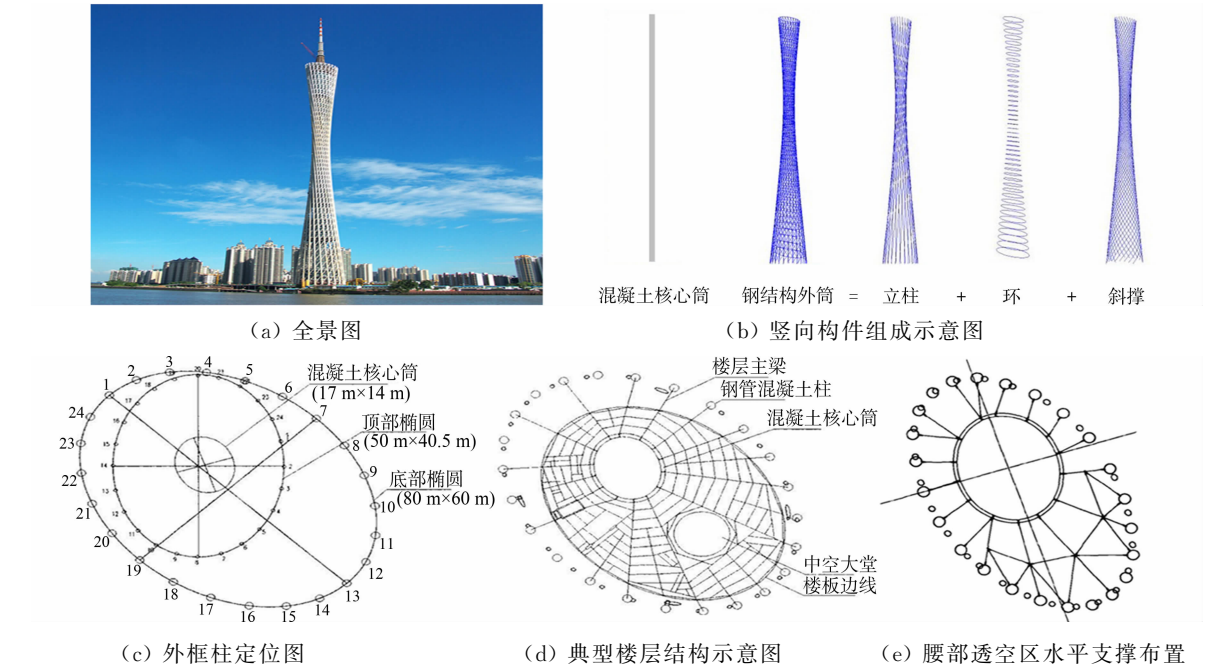


图 6 广州新电视塔

Fig. 6 Guangzhou new TV tower

凝土楼板并没有与外筒钢柱直接相连,加强了外筒的稳定性,透空区除腰部设有 4 道支撑外,内外筒之间彼此再无连接^[9]。

2.2 空间面域扩展、跨向延伸与组织自由性的实现

截面作用结构体系中的刚架结构,形态作用结构体系中的悬索结构和拱结构,以及向量作用结构体系在外力作用下,均具有较为突出的结构性能,将其应用为主层级结构,并通过与膜、折板、薄壳、网壳、网架等次层级结构共同组成杂交结构,可轻松驾驭较大尺度的空间,主次层级的构成有利于整体性能的发挥与整体结构的力流组织,解放次层级结构而实现空间的灵活多变以适应构筑物多元的功能需求。

2.2.1 以刚架作为主层级结构 作为主层级结构的刚架结构有效性虽不高,但结构的连续性使景观构筑物能获得更大的内部空间与设计的自由度,与作为次层级的其他结构形式结合运用有利于空间在面域上的拓展。位于美国马里兰州贝塞斯达郊区一户人家后院里的茶室(图 7),其主层级结构为两榀钢结构刚架,位于主梁处通过水平向的交叉斜撑将两榀刚架联系起来,确保整体结构的横向稳定。钢结构的茶室经拉杆悬挂于刚架下方,犹如日本灯笼一般悬浮在地面上,构成次层级结构,是主人饮茶、冥想及举办家庭聚会的场所。主体结构强有力的支承提供了必要的刚度支持,方才造就了次级结构的轻盈。

2.2.2 以拱作为主层级结构 刚性拱在荷载变化的情况下,仍能够一直保持原始形状。支座处常设计为能够承受竖向和水平反力,以及弯矩的支墩,或用拉杆来承受水平推力,从而将拱所接收到的荷载传至基础或下一层级的竖向体系。以拱结构作为主层级结构,可为结构整体提供主要刚度和边界支承条件,与次层级的桁架、网架、壳体 and 悬索等结构相互组合、共同作用。联合国临时雨篷(图 8)毗邻新建的临时的联合国大会大楼,用作入口与安保空间,采用一系列扭曲呈一定 S 弧度的预制钢桁架拱作为主层级结构,并将荷载传至与两侧拱脚铰接的高矮不一的立柱上。同拱相组合的是次一级的膜结构,它作为张拉构件参与结构受力,使荷载均匀分布。



图 7 大卫·吉姆森建筑事务所设计的茶室
Fig. 7 Teahouse designed by David Jameson Architect

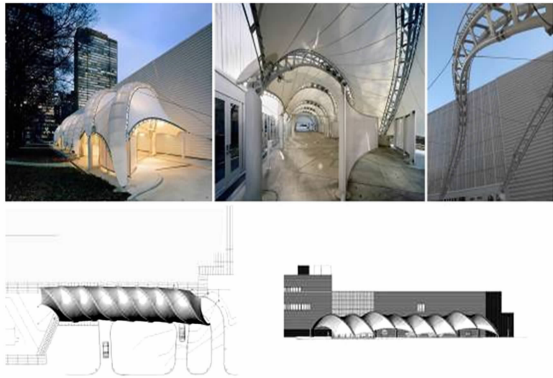


图 8 联合国临时雨篷
Fig. 8 United Nations temporary awning

2.2.3 以斜拉结构作为主层级结构 斜拉结构是一种有着一系列直线形缆索定点地支承着一个刚性水平构件的结构^[10]。它除了在桥梁之类满足跨向需求的景观构筑物中广泛应用,还可与其他类型结构组成各种混合结构,服务于空间面域扩展的要求。作为跨越构件的次层级结构,如梁、板、桁架、网架、网壳等,可与塔柱顶端伸出的呈辐射状的缆索相连,将受弯构件的传力途径改为由缆索和塔柱承受拉力和压力的传力路径,沿塔柱传递给地基。一方面,由于附加支承点的存在而使得结构覆盖的空间大增;另一方面,次层级结构因附加支承点而减轻了原有结构跨距上的压力,缆索布置得紧密,可采用相对较小的次层级结构,缆索布置得宽松,则要采用尺寸和刚度越大的次层级结构,尤其是当跨度超出了跨越构件正常可能达到的距离时,采用斜拉结构是最有效的。

德国公共电视频道 ZDF 的户外场地建有一处用于遮阳避雨的景观构筑物(图 9),以保证在恶劣的天气下仍然能够正常地表演和广播。预制的桁架梁通过斜拉索悬挂于 6 根 20 m 高的桅杆上,受拉的斜拉索对梁提供多点弹性支承,并将梁承受的荷载传递至桅杆,再由桅杆传到基础。梁在斜拉索的支承下,仿佛多个弹性基础上的小跨径连续梁一般工作,使梁内的弯矩大大减小。因而,梁的尺寸较小,结构自重较轻,跨越能力突出^[11]。

2.2.4 以悬索结构作为主层级结构 悬索结构是目前跨越能力最强的桥型体系之一,它是用悬挂在两边塔架之间的强大主缆为主要承重构件的悬吊结构.在竖向荷载作用下,吊杆将荷载传递到主缆上,使主缆承受拉力,主缆支承在塔架上并最终锚固于桥两端的锚碇中,从而将荷载通过塔架和锚碇传至基础.也可将主缆直接锚固在主梁上,形成自锚式悬索桥.另外,把悬索结构应用到具有遮蔽功能的景观构筑物中,与其他结构方式进行杂交,既能有效增强结构对空间的覆盖力,又具有意想不到的景观效果.当然,悬索结构发挥优势的领域仍主要集中在桥梁一类的景观构筑物上.

Sanzpont Arquitectura 设计公司名为动态变形螺旋桥(图 10)的过街天桥方案位于两栋假想的建筑之间,其灵活的结构可根据两栋建筑间距的不同而改变跨度.运用单层悬索结构作为主层级结构,主缆固定在天桥两端的建筑上,与其相组合的是次一级的张拉膜结构,两者皆属于柔性结构,因而,每当有行人走过时,桥体会产生技术上的动态形变以适应之.

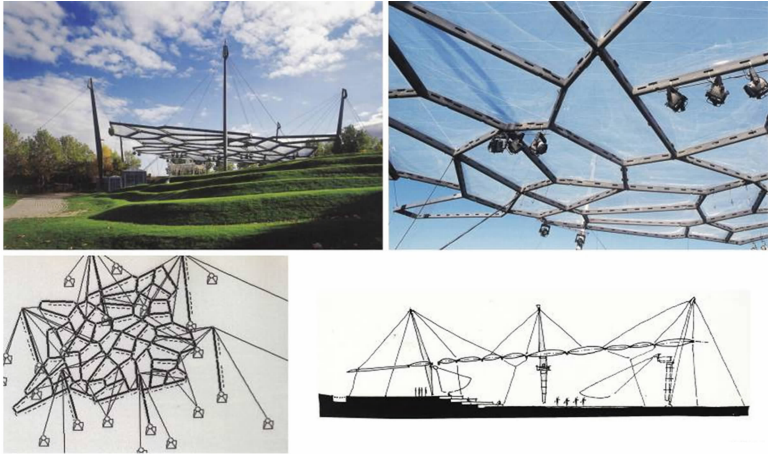


图 9 德国公共电视频道 ZDF 景观构筑物
Fig. 9 Landscape architecture of German television ZDF

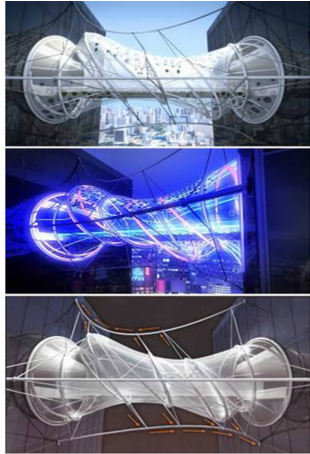


图 10 动态变形螺旋桥
Fig. 10 Dynamic shape-shifting helix bridge

3 层级的弱化

层级的弱化绝不意味着否定与抹杀层级性的存在,其本质在于用多向度的传力路径取代原本唯一且明晰的传力路径,将层次隐藏于刚度的梯度分布中,而削弱视觉上的差异性.

3.1 无差别化构件创造均质的遮蔽空间

由于构件各自所处的位置(水平体系与竖向体系)与受力情况的不同,各司其职,共同作用,荷载逐级传递最终平稳的到达地面才成为可能.层级的构成有赖于构件本身的材料和力学性能、几何特征及构件之间的相互关系;反之,对层级秩序的破解亦主要从这两方面入手.所谓无差别化是不强调各个方位结构构件之间的差异性,即弱化竖向和水平构件、高层次和低层次构件的差别,在视觉上将它们进行同一化处理,不采用结构分层、分段,而是强化结构传力的整体连续性,使得传统的力流层级变得视而不清.非线性景观构筑物的创作即显现出构件角色的模糊化与一体化成型的特征.其结果往往还表现为结构构件与围护构件没有明显的区分,构件在承担结构功能的同时,还起到部分围合的作用.该手法主要适用于以遮蔽为主要目标的景观构筑物,能够创造出均质统一的空间效果.

在 2002 年建成的比利时布鲁塞尔临时展亭(图 11)中,尝试将结构的逻辑性与空间秩序均质化的思想相结合,选用无差别化的倒 U 字形铝合金蜂窝板构筑结构体.蜂窝板六边形结构的形成有赖表面张力作用,与多个肥皂泡交接在一起构成的六边形原理相同,在结构上具有天然的稳定性.在应力集中、不能满足结构受力要求的部分两侧加固铝合金板做成夹芯板,以增加其刚度.结构



图 11 比利时 Burg 休闲亭
Fig. 11 Belgium Burg leisure pavilion

即是表皮, 表皮亦是结构, 如此便产生了戏剧性的空间氛围, 令人难以捕捉力流传递的痕迹。

3.2 相互支承构件的实现跨向与面域上的空间扩展

与构件的无差别化相伴而生的是构件的相互支承(又称作互承结构), 后者建立在前者的基础上, 并重在结构构件之间传统组织关系的突破。互承结构是一种构造独特的三维格架结构, 其特点是每根构件都被相邻构件支承, 同时又支承相邻构件, 即构件之间以一种递推的方式相互支承, 因而, 在几何上和结构上均无主次层次可言。层级的消解造成互承结构的几何形状难以预测, 更增添了所塑造空间的玄妙感。结构的显著特征是在受到外力作用时, 结构整体共同参与受力, 以构件受弯来承受荷载, 解决了构件之间的弯矩传递问题, 同时, 作为彼此的侧向支撑而获得刚度和稳定。利用相同类型的小尺寸构件(线形构件或面形构件), 以相同的连接方式建造, 实现简便易行的模数化施工, 可以很好地应对景观构筑物在跨向与面域上空间扩展的要求, 在运动结构(包括可展结构)方面也有着良好的应用潜力。

互承结构优秀的跨越能力早在北宋名画《清明上河图》中便已显现出来, 虹桥结构正是应用互承结构的代表。即使在现今的浙江、福建等地区仍可见用该结构配置而成的廊桥。目前, 通过构件的相互支承创造遮蔽空间的案例还集中在小型的景观构筑物, 多数作为实验的足尺模型以供研究。国内有王澍与柏庭卫分别从不同的关注点所进行的模型建造^[12], 国外有如 ETH 与日本诸多高校的课程实践活动。巴尔蒙德与坂茂为合作设计森林公园展廊曾在莱斯大学先期进行了实验建造项目(图 12), 巴尔蒙德提出一种一大一小 2 种方格相互交织的几何图式, 一种在 2 种节奏之间交替变换的互承网格。大小正方形的面积关系和每块竹板在结构中的厚度变化即位置关系制造出了变化的曲率, 形成壳体结构的形态。覆盖面积为 11 m×11 m 的竹构顶棚置于一束束同样也是采用互承形式的、由 8 根钢管放射状排列捆扎成的支撑体上^[13]。

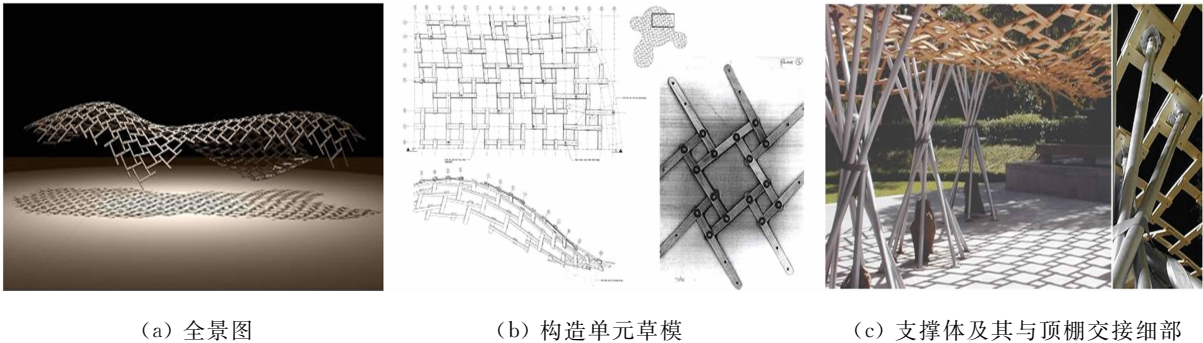


图 12 莱斯大学的竹天棚

Fig. 12 Bamboo roof in Rice university

在形成面域上拓扑关系的同时, 借助互承结构还可达成对空间的围合效果。为纪念 800 年前著有《方丈记》的作者鸭长明彼时的居所, 建筑师隈研吾使用现代的材料、结构和建造技术在下鸭神社内同样的场地上重现该原型(图 13)。从顶界面、围合界面至底界面共计 21 片 ETFE 膜, 每 3 片膜材组合成 1 个单元, 膜材上附有断面 20 mm×30 mm 的日本柳杉木条相互搭接而成的互承构件单元, 连接节点采用强力磁铁牢固地吸附在一起, 搭接成共同受力的互承结构。



图 13 800 年前方丈庵的景观构筑物重现

Fig. 13 800 years ago abbot nam's landscape structure to reproduce

4 结论

等级层次原理是复杂系统最合理的组织方式,或是最好的发展模式^[14],系统的层次性特征有利于系统本身的运行和功能的发挥.力量的层级构成是结构系统进行控制的方式,是景观构筑物作为物质的人工物必须居于其中,且又必须遵守的自然界的物理法则^[15].

力量的层级强化或层级弱化皆是内在的物理法则的物质表达,将这一通常认为是束缚设计师创作的结构力学问题转化为激发设计灵感的新动力,充分实现建筑与结构在设计思维与设计方法上的整合.通过对力量的合理引导与调度可以产生外化的形式动力,获得景观构筑物结构形态的自由度,从而适应景观构筑物功能需求所提出的条件,适应其今后功能日益多样化与模糊化的发展趋势;同时,也将这种形式的变换建立在稳固的结构力学性能的基础上,在确保空间性的同时以结构的名义推动建筑形态的创新生成.

参考文献:

- [1] 颜泽贤.复杂系统演化论[M].北京:人民出版社,1993.
- [2] 史永高.材料呈现:19和20世纪西方建筑中材料的建造-空间双重性研究[M].南京:东南大学出版社,2008:60-61.
- [3] RAMZYA N, FATED H. Kinetic systems in architecture: New approach for environmental control systems and context-sensitive buildings[J]. Sustainable Cities and Society, 2011, 1(3): 170-177. DOI: 10.1016/j.scs.2011.07.004.
- [4] 王瑜,陈震.运动结构稳定构形切换实现景观构筑物的功能拓展[J].深圳大学学报(理工版),2017,34(1):51-62. DOI: 10.3724/SP.J.1249.2017.01051.
- [5] 苏朝浩.结构艺术与建筑创作之协同研究[D].广州:华南理工大学,2010:101-102.
- [6] 王肇民,马人乐.塔式结构[M].北京:科学出版社,2004.
- [7] 罗福午.土木工程(专业)概论[M].武汉:武汉工业大学出版社,2001:181-182.
- [8] 博格勒.轻·远:德国约格·施莱希和鲁道夫·贝格曼的轻型结构[M].陈神周,等译.北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [9] 周定,韩建强,杨汉伦,等.广州塔结构设计[J].建筑结构,2012(6):1-12.
- [10] SCHODEK D L. 建筑结构:分析方法及其设计应用[M].罗福午,等译.北京:清华大学出版社,2005:206-207.
- [11] BOLLINGER K, GROHMANN M. Workflow: Architecture-engineering[M]. Basel: Birkhäuser Architecture, 2004:44-47.
- [12] 程云杉,乐志.平视王澍:以互承体系为线索[J].建筑师,2013(1):68-75.
- [13] 马卫东.塞西尔·巴尔蒙德[M].北京:中国电力出版社,2008:40-47.
- [14] 沈祿康.系统科学概要[M].北京:北京广播学院出版社,2000:43-44.
- [15] 苏布拉塔·达斯古普塔.技术与创造力[M].沈阳:辽宁人民出版社,2015:10-11.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)