

形与力的平衡

——基于偏心伞结构应用的建筑设计策略研究

Balance of Form and Force: Research on Architectural Design Strategies Based on Application of Eccentric Umbrella Structure

张墅阳 | ZHANG Shuyang 王扬 | WANG Yang

摘要: 本文从偏心伞形态偏心但结构平衡这一角度出发, 简要阐述偏心伞在建筑设计中的应用价值, 着重分析其设计应用方面的平衡策略。根据偏心伞的平衡机制, 从整体协同和局部稳定加强两个方面, 归纳出组合平衡、自稳式平衡、基础协同平衡以及附加固定件平衡、配重平衡、材料预应力平衡和伞面折叠或弯曲共七种抵抗失稳及变形的策略。并结合相关偏心伞结构的建筑案例, 给出相应的形与力关系图解, 具体阐述这七种策略在建筑设计中的应用方式。

关键词: 偏心伞、平衡策略、形与力、整体协同、局部加强

Abstract: Although the eccentric umbrella is eccentric but the structure is balanced, it is from this perspective that the application value of the eccentric umbrella in architectural design is briefly described, and its balance strategy in architectural design is analyzed. According to the balance mechanism of the eccentric umbrella in architectural design, the strategies of combination balance, self-stabilizing balance, foundation synergy balance, additional fixture balance, counterweight balance, material prestress balance and umbrella folding to resist instability and deformation are summarized from the two aspects of overall coordination and local stability enhancement. Combined with the architectural case of the related eccentric umbrella structure, the corresponding relationship between form and force is given, and the application methods of the seven strategies in architectural design are elaborated.

Keywords: Eccentric umbrella, Balance strategy, Form and force, Overall synergy, Local reinforcement

一、研究背景

偏心伞结构, 英文 Eccentric Umbrella Structure, 是一类伞面重心与伞柱交节点在竖直方向上并不重合的伞状结构^[1], 因其支柱一侧的质量或体量往往比另一侧大, 从而呈现出一种不平衡的状态。偏心伞概念建立在伞状结构基础上, 其术语则引自日常生活中的偏心雨伞^[2], Eccentric Umbrella 作为偏心雨伞的专有名词, 多次出现在大量国内外偏心雨伞的专利文件中。本文首次将其借用到建筑结构的范畴, 用以描述一类特殊的伞状结构。

目前在我国的建筑工程实践中, 由于固定的思维模式与工作方法, 往往将结构与建筑设计相剥离, 削弱了建筑设计中结构美学的表达。

本文从偏心伞结构研究的角度出发, 以建筑与结构一体化整合设计思想为基础, 探讨融结构美学与建筑形式于一体的设计方式方法, 激发其在建筑设计中的潜在可能性。

二、偏心伞结构的主要优势

与通常的伞状结构相比, 偏心伞结构的优势主要表现在, 其使用往往会产生大小不等的空间。这些空间, 有的是为了匹配主、辅空间的功能需要; 有的是为了打破空间的均质感, 从而突出某些特殊场所或是营造某种自然的氛围; 有的则是为了适应建筑师独特的形态诉求。当然, 也有以上几种原因兼而有之的情况(表1)。

作者:

张墅阳, 华南理工大学建筑学院硕士研究生;
王扬(通讯作者), 华南理工大学建筑学院博士生导师, 华南理工大学建筑设计研究院有限公司教授级高级工程师。

偏心伞结构的主要优势

表 1

偏心伞的主要优势	代表建筑案例	偏心伞的布置方式
匹配主辅空间	布鲁塞尔格罗嫩达尔赛马场	并列式组合
	神奇勋章圣母教堂	偏心伞对称组合
	意大利帕多瓦市击剑学院	大小偏心伞成对组合
打破空间的均质感	台湾大学社会科学院新馆图书馆	多单元自由组合
建筑的形态塑造需求	装置展亭“丽丽丝”	旋转式组合

在匹配主辅空间方面，代表案例有比利时布鲁塞尔格罗嫩达尔赛马场（图1），其主侧设置观众席，在较小一侧设置走廊、休息室、俱乐部和餐厅等辅助空间。实现偏心伞不同侧的功能匹配。另外，还可以借由偏心伞的成对组合使用，形成大小不同的空间，完成对主、辅空间的划分。例如墨西哥城的神奇勋章圣母教堂（图2），通过数组对称布置的偏心伞形成了教堂的中厅，而偏心伞的另一侧边缘则通过折叠形成了教堂外

侧倒“V”形采光窗，与内侧的伞柱围成教堂的走廊和耳室。同样的，意大利帕多瓦市击剑学院（图3）通过十组5m等距排列的一高一矮、一大一小水平向呈偏心伞形的结构梁柱，形成了一侧击剑厅、一侧辅助用房的功能分区，既解决了25m的跨度需求，也最大程度地保证了击剑厅空间的纯净。

在打破空间均质感方面，比较有代表性的例子有台湾大学社会科学院新馆图书馆（图4），通过88把四种不同直径

(200mm、300mm、400mm、450mm) 偏心伞疏密有致的分布，适应了不同柱距、板跨的需求，创造出不同场域之间的差异感，为空间营造出一种自然的氛围，使人仿佛置身林间。

偏心伞亦可以形成奇妙的建筑形态，带给人别样的体验。如扎哈·哈迪德在2007年苏富比展览设计的装置展亭“丽丽丝”。作为一座雕塑式的露天展馆，“丽丽丝”由三个相同的围绕中心点排列的偏心伞组成，通过借鉴花瓣和树叶等自然几何形状，形成了一个供人们互动和交往的场所（图5）。

三、偏心伞结构的设计原则及七种主要平衡策略分析^[3]

1. 设计原则

实现偏心伞结构的平衡稳定，主要从抵抗失稳和防止变形两个方面入手，具体可以从单元组合、伞面形式、支撑结构、基础和辅助构件等多方面来进行优化，将局部构件的受力和弯矩转化到整个结构体系中，进而优化结构形式，提高结构体系的使用效率。不同偏心伞建筑以其独特的形式，在设计中巧妙地兼顾了建筑结构中形与力的关系。

2. 七种主要的平衡策略

就偏心伞设计的平衡机制而言，主要有组合平衡、自稳式平衡、基础协同平衡、附加固定件平衡、配重平衡、材料预应力平衡和伞面折叠或弯曲共七种主要策略（表2）。七种抵抗偏心伞失稳及防止变形的策略，由于位置不同，其作用效果也不同。其中前三种强调整体的协同性；而后四种则更多地注重结构局部的稳定加强。其目的都是为了将局部的集中受力和弯矩转化到更大的结构范围或结构整体，从而实现减少集中应力与荷载的不利影响（表2）。

1) 整体协同 - 组合平衡

组合平衡是指两个或多个不平衡的偏



图1：比利时布鲁塞尔格罗嫩达尔赛马场（何塞·范德沃德等，1980—1985年）：(a) 观众席；(b) 辅助空间

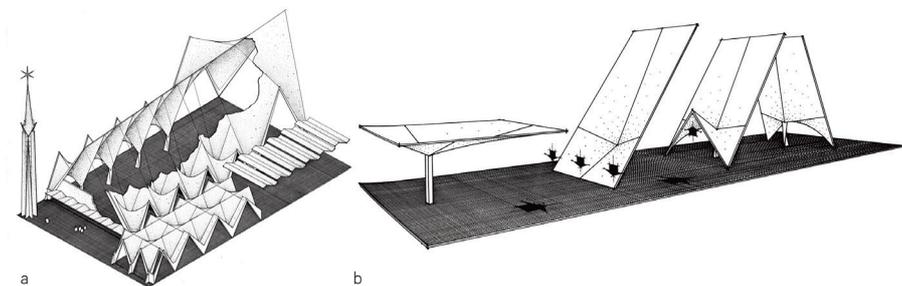


图2：墨西哥城的神奇勋章圣母教堂（费列克斯·坎德拉，1953—1955年）：(a) 轴测图；(b) 偏心伞结构变形



图3：意大利帕多瓦市击剑学院（莫莱蒂，1936—1940年）：(a) 击剑厅；(b) 更衣室等辅助用房

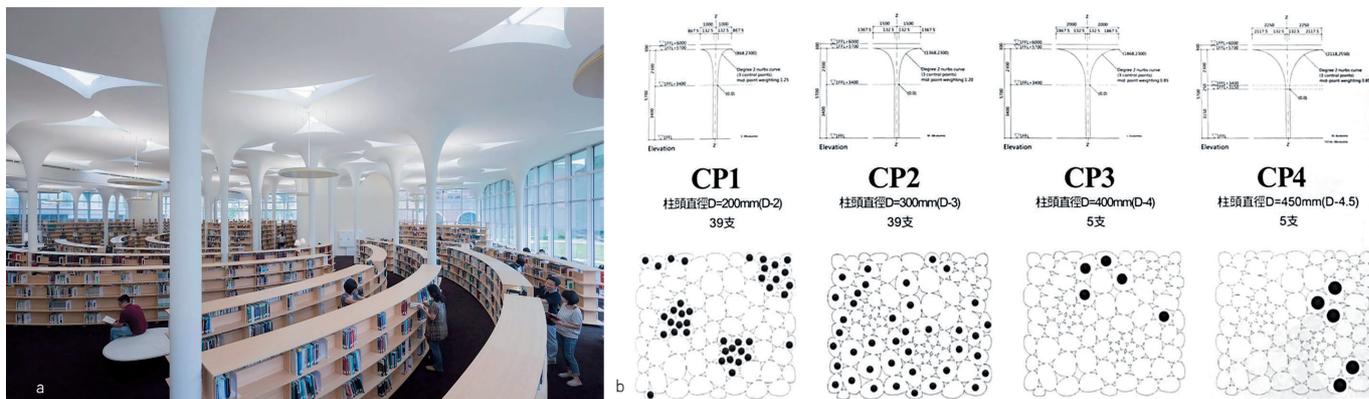


图4: 台湾大学社会科学院新馆图书馆(伊东丰雄, 2006—2013年): (a) 图书馆室内空间; (b) 四种柱径柱体剖面及平面分布图

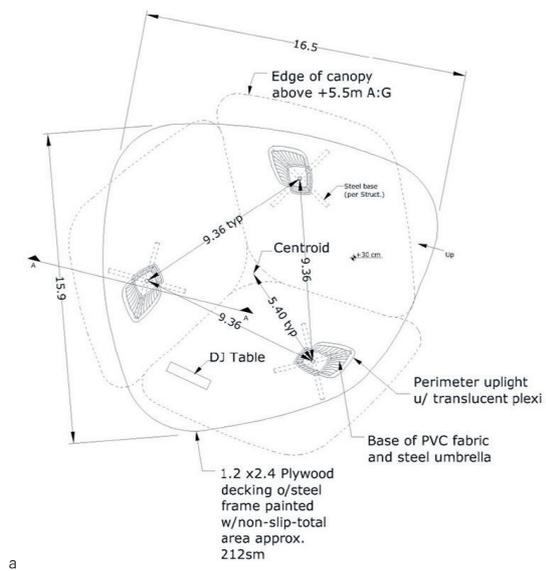


图5: 2007年苏富比展览的装置展亭“丽丽丝”: (a) 平面图; (b) 夜间光影效果

七种偏心伞建筑设计平衡策略的特性归纳

表 2

平衡策略	对结构干预的侧重方面		目的		优化方面 (构件优化及单元组合)				
	整体协同	局部稳定加强	抵抗变形	抵抗失稳	伞面形式	支撑结构	基础	辅助构件	单元组合
组合平衡	•			•					•
自稳式平衡	•			•		•			
基础协同平衡	•			•			•		
附加固定件平衡		•	•	•				•	
配重平衡		•		•				•	
材料预应力平衡		•		•		•			
伞面折叠或弯曲		•	•		•				

心伞单元组合在一起, 形成一个整体平衡的组合结构; 主要包括成对式组合和多单元组合两种类型。

(1) 成对式组合:

成对式组合, 常见为数对形状相同的偏心伞对称组合结构, 在单一偏心伞呈现出不平衡的情况下, 通过安排一个对称的

伞结构, 使其整体结构的内力相互抵消, 形成类似于拱券的状态。如芝加哥的北岸会众犹太教堂(图6), 在教堂中殿部分, 通过8组15m高的对称偏心伞柱, 形成了教堂的主要结构体, 单支伞的跨度达到了14.3m, 长短方向的比值达到了3.3:1, 其横向剖面结构类似于一个三铰拱。设计

师山崎实延续了其一贯的典雅主义手法, 匠心独到地把犹太教元素融入教堂的建筑形式, 实现了建筑形式、结构与文化的统一。同样的策略还可见于法国贝尔特里尚普森林的休憩亭(图7)和波兰罗兹市的电车站(图8)。在休憩亭, 用旧木板构成6个像手风琴一样的三角形悬臂梁偏心伞, 两侧的偏心伞在中央交汇, 形成整体稳定的结构。而电车站通过中央的9组偏心膜结构伞, 形成了中央的电车轨道空间。

(2) 多单元组合:

多单元组合, 主要强调多个偏心伞单元结构的协同受力。这种组合往往看上去比较自由, 但其结构在布置上却往往存在着秩序性。例如前述的台湾大学社会科学院图书馆, 柱子分布是由3个中心点按螺旋线扩散而成的, 越靠近中心点柱子越密(图9)。这种组合形式, 使得由单一的伞

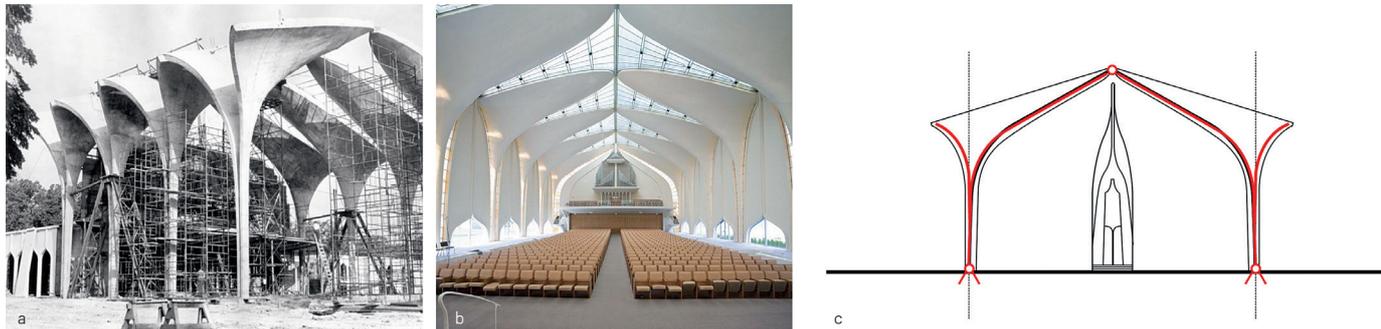


图6: 芝加哥的北岸会众犹太教堂(山崎实, 1964年): (a) 施工照片; (b) 建成后室内透视; (c) 横向剖面

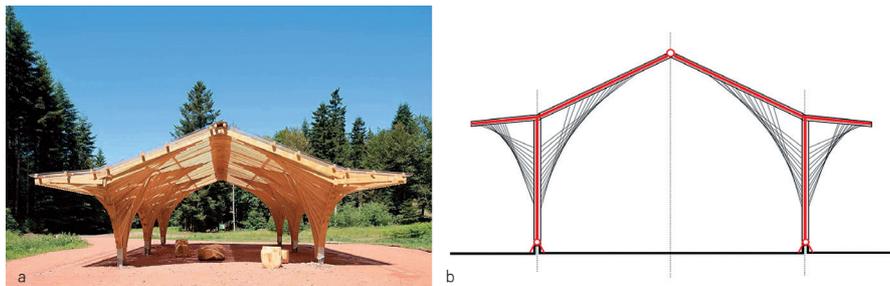


图7: 法国贝尔特里尚普森林的休憩亭(Studiolada Architects+ Yoann Saehr Architect, 2014年): (a) 外观透视; (b) 横向剖面

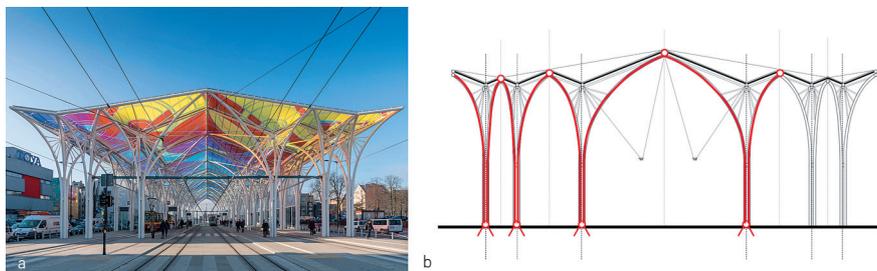


图8: 波兰罗兹市的火车站(FOROOM, 2014年): (a) 外观透视; (b) 横向剖面

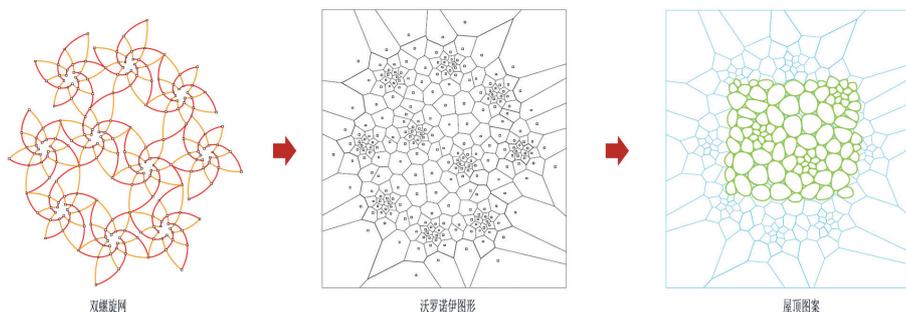


图9: 台湾大学社会科学院图书馆偏心伞柱的分布及生成逻辑

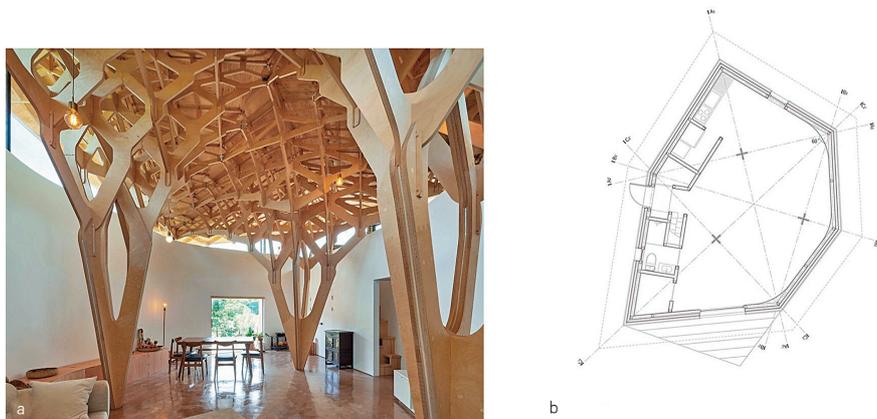


图10: 韩国庆尚北道三棵树住宅(JK-AR事务所, 2018年): (a) 室内透视图; (b) 平面图

柱受力变成了整体结构系统的协同受力, 从而有效地提高了结构的整体性能。同样运用多单元组合策略的, 还有韩国庆尚北道的三棵树住宅(图10)和北京的林建筑(图11)。这两座建筑中, 相邻偏心伞的柱距相等, 不论伞面形式变化如何复杂, 其结构柱的分布依然均质。

2) 整体协同 - 自稳式平衡

加拿大卡尔加里市肖尼斯(Shawnessy)轻轨站(图12), 通过将支柱适当倾斜, 使得偏心伞上部伞面的重心尽可能在竖直方向与基础支点重合, 从而缩短力臂, 减小结构基础处的弯矩。^[4]

3) 整体协同 - 基础协同平衡

基础协同平衡是借由基础结构与偏心伞整体刚性结构的协同效应来实现偏心伞的稳定, 由于这种办法体现在结构的基础位置, 所以具有一定的隐蔽性。如前述的意大利帕多瓦市击剑学院, 将基础向偏心伞悬挑较远的反方向延伸, 通过土壤对基础扩大部分的固定作用, 来防止整个结构体倾覆(图13)。既保证了上部结构的纯净, 又有效实现了偏心伞结构的稳定。其较大的伞, 跨度达到了24.8m, 高度达到了12m, 长短方向的比例为1.7:1。

4) 局部稳定加强 - 附加固定件平衡

附加固定件平衡是在整体结构失稳的运动趋势方向上, 对结构附加一个阻止其倾覆的固定件, 以拉住或支撑整个结构体, 或通过某种增加结构抗侧刚度的构件, 以抵抗地震力等水平荷载。主要包括拉索式固定件、支撑式固定件和抗侧剪力墙三种形式。

(1) 拉索式固定件:

拉索式固定件有两种形式。一种是通过在偏心伞较轻一侧, 施加向下拉的拉索, 阻止偏心伞向较重的一侧倾覆。如前文提及的

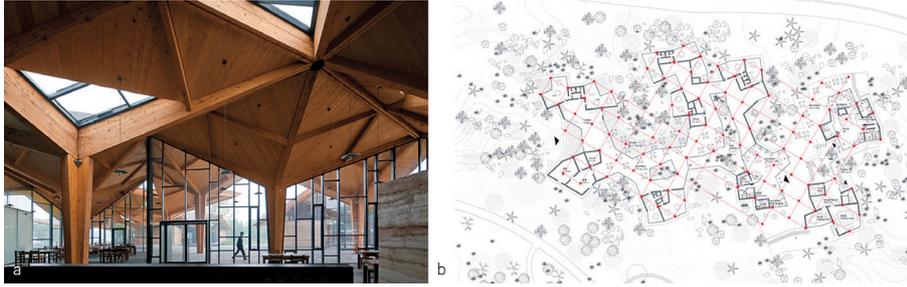


图 11: 北京林建筑(华黎, 2014年): (a) 建筑室内透视; (b) 建筑平面图

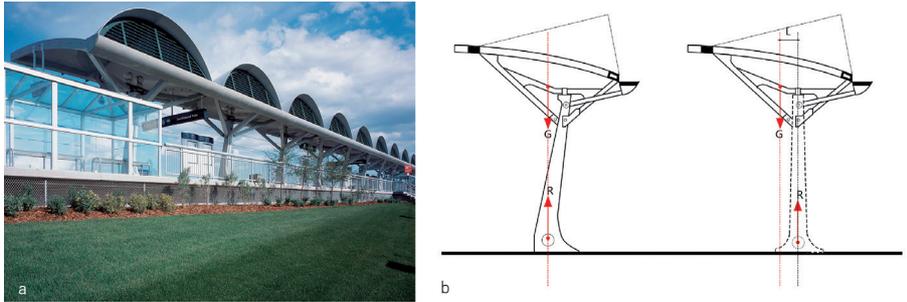


图 12: 加拿大卡尔加里市肖尼斯轻轨站台(恩佐·维森齐诺, 2004年): (a) 外观透视图; (b) 实际结构受力简图及假设支柱非倾斜状态下受力简图

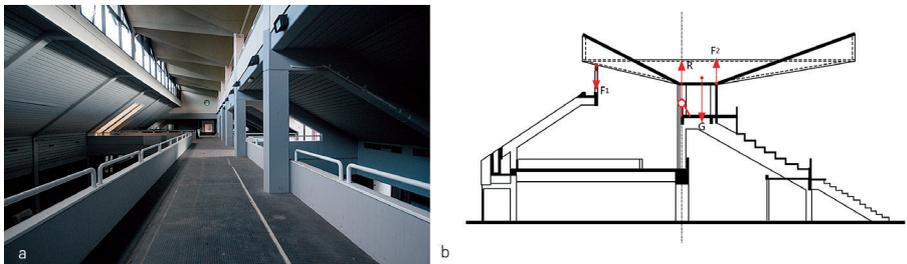


图 14: 比利时布鲁塞尔格罗嫩达尔赛马场: (a) 固定构件与窗框合二为一; (b) 结构受力简图

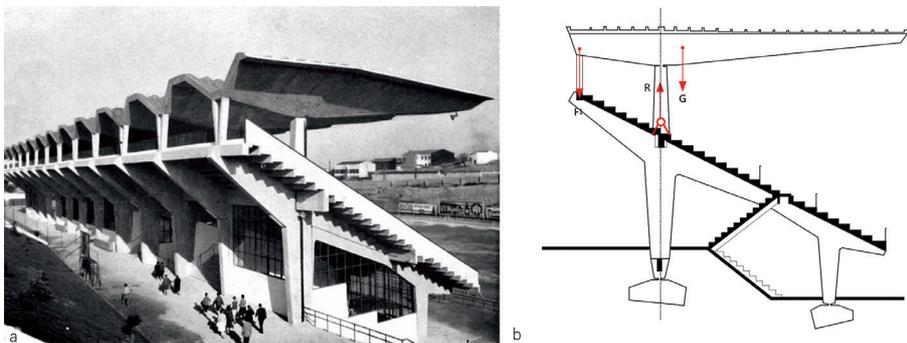


图 15: 西班牙马德里赛马场(何塞·阿兹皮亚祖与佩德罗·平托, 1960年): (a) 外观透视图; (b) 结构受力简图

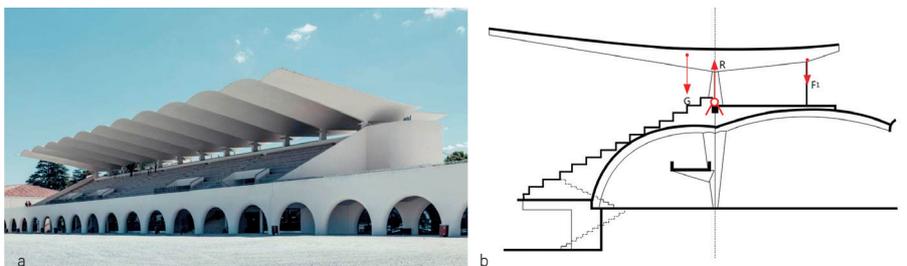


图 16: 西班牙马德里扎苏埃拉赛马场(托罗哈, 1935年): (a) 外观透视图; (b) 结构受力简图

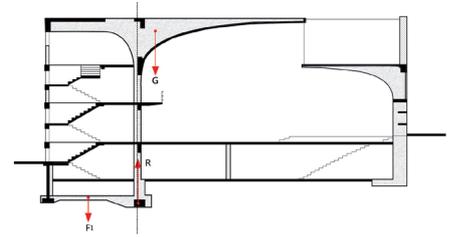


图 13: 意大利帕多瓦市击剑学院偏心伞结构受力简图

比利时布鲁塞尔格罗嫩达尔赛马场(图 14), 就是通过在短侧的辅助功能区使用这一结构固定件, 使其整体结构更加稳定, 并将该构件与窗框相融合。采用同样办法的还有西班牙马德里赛马场(图 15)和西班牙马德里扎苏埃拉(Zarzuela)赛马场(图 16)。相较于布鲁塞尔格罗嫩达尔赛马场, 后两座体育场的拉索式固定件表现比较明显, 其中马德里赛马场使用的是一种“V”形拉索, 而扎苏埃拉赛马场则使用一种暴露在外的线状拉索, 通过钢筋勾连伞面底部与后方的支座。其中赛马场的跨度达到了 24m, 偏心伞长短方向的比值达到了 2.7 : 1。

另一种则类似于稳定索, 通过对结构体系施加预张力, 提高结构体的刚度, 进而增加整体的稳定性。如武重义 2010 年在越南永福省建成的竹翼餐厅(图 17)。通过在弯曲竹柱的自由端施加一个固定在地面的拉索, 将竹柱的内力予以抵消, 从而加强了整个结构的稳定性, 拉索的存在也为建筑提供了一种富有韵律感的装饰线条。而在西班牙兰格雷奥市齐亚诺教区公园的音乐亭(图 18)方案中, 通过拉索, 将伞盖边缘的伞肋与突出于伞面的柱顶相联系, 从而增加了结构整体的刚度。运用同样方法的还有由 Tilke 有限责任公司和上海建筑设计研究院有限公司联合设计的上海国际赛车场的副看台(图 19)。副看台顶篷由赛道两侧各 13 个独立的索杆梁膜结构偏心伞单体组成, 通过 10 根固定于椭圆伞面边缘的上拉索和位于伞面上的谷索拉住膜结构的偏心伞面, 和伞底下方固定环一起防止伞面倾覆, 维持副看台顶部伞体平衡与稳定。

(2) 支撑式固定件:

既然有在偏心伞较轻一侧施加的拉索, 相应的, 就有在较重一侧施加的支撑

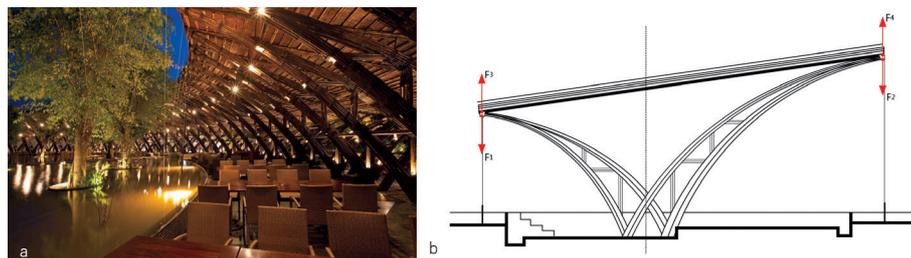


图17: 越南永福省竹翼餐厅: (a) 夜景透视图; (b) 结构受力简图

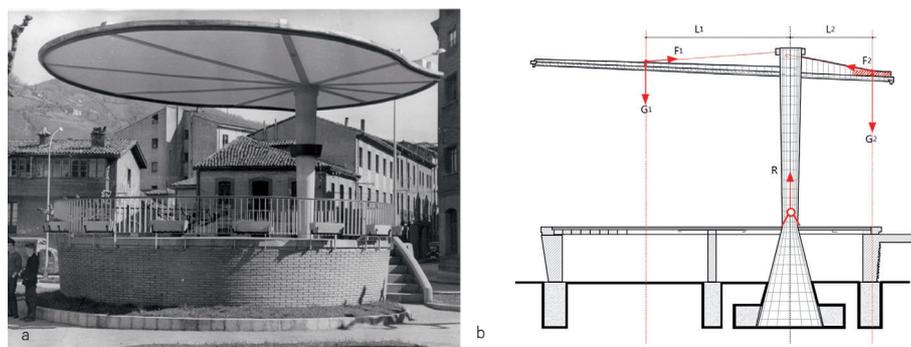


图18: 西班牙兰格雷奥市齐亚诺教区公园音乐亭(胡利奥·戈麦斯和方案·桑切斯里奥, 1961年): (a) 外观透视图; (b) 结构受力简图

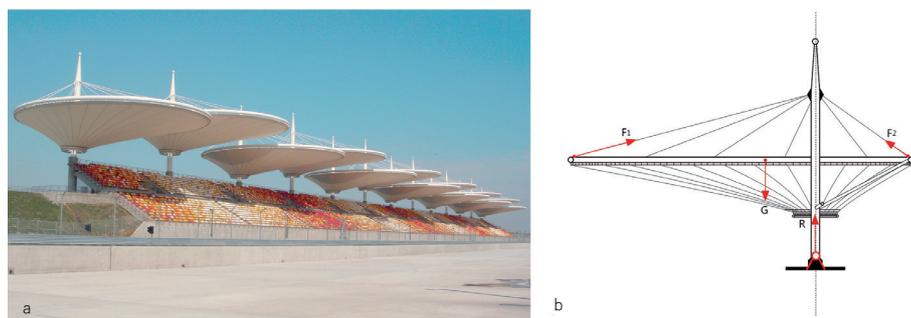


图19: 上海国际赛车场副看台(2004年): (a) 看台透视图; (b) 结构受力简图

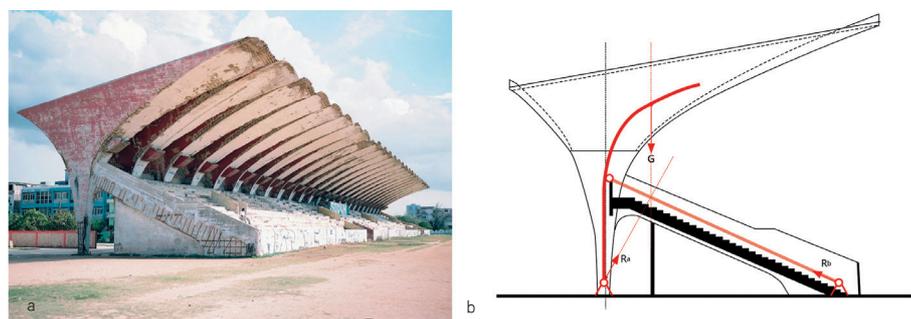


图20: 古巴哈瓦那何塞马蒂公园体育场(阿克塔维奥·比加斯, 1960年): (a) 外观透视图; (b) 结构受力简图

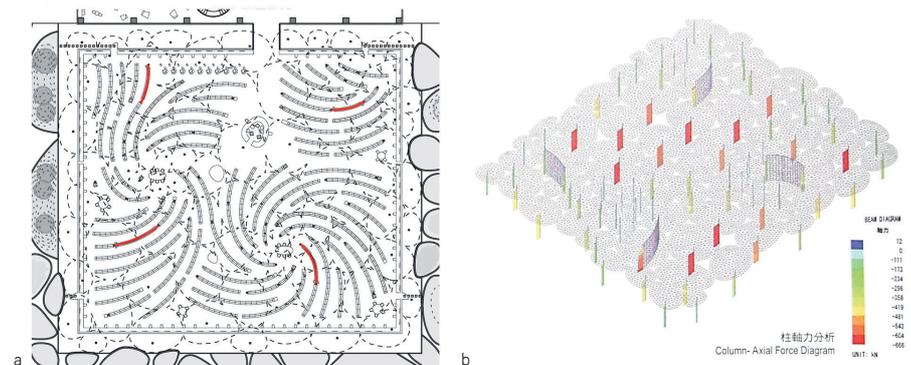


图21: 台湾大学社会科学院图书馆柱体与抗侧剪力墙: (a) 布置平面图; (b) 轴测图

式固定件。在古巴哈瓦那何塞马蒂公园体育场(图20), 将观众看台作为结构的辅助支撑, 作用于伞状结构的支柱上, 柱体和辅助支撑共同抵抗由偏心伞自重引起的倾覆力矩。这种设计将功能空间与结构构件巧妙地融合在一起, 形成一个整体协同的受力体系。其偏心伞跨度为18.9m, 长短方向的比值为2.86:1。

(3) 抗侧剪力墙:

抗侧剪力墙也是一种有效提高偏心伞整体结构刚度的方式。在台湾大学社会科学院图书馆抗震体系中, 除偏心伞柱外, 还布置了4片高刚度、高强度的曲线形钢板剪力墙(图21), 可以有效地抵抗地震力, 在一定程度上防止了建筑的横向变形, 使得内部空间布局更加自由。

5) 局部稳定加强 - 配重平衡

配重平衡是指在偏心伞质量较小的一侧施加配重, 以使整个伞状结构两侧的质量保持平衡。如前述西班牙兰格雷奥市齐亚诺教区公园的音乐亭, 该音乐亭从圆柱的顶部发散出10个相对且对称排列的伞肋, 共有5种不同的长度(图22)。其中悬挑7m的肋通过轻质的陶瓷拱板^[5]建造, 减轻了其质量, 而悬挑2.5m的肋, 则由钢筋混凝土板制成, 并为其增加了一个配重物, 从而使两侧质量平衡。其偏心伞的跨度达到了11.1m, 长短方向比为2.6:1。

6) 局部稳定加强 - 材料预应力平衡

材料预应力平衡是指在整体结构失稳的运动趋势方向上, 对材料施加一个相反的预应力, 以抵抗其变形或倾覆。如前述越南永福省竹翼餐厅, 通过拉索抵消弯曲竹材的内应力, 使其整体结构达到稳定。

7) 局部稳定加强 - 伞面折叠或弯曲

伞面折叠或弯曲主要是为了提高伞面的刚度, 防止较大一侧伞面的屈曲变形。常见的有“弓”形折叠、“V”形折叠和双曲抛物面弯曲三种方式。如墨西哥城莱德利实验室入口雨棚(图23)和比利时布鲁塞尔格罗嫩达尔赛马场的伞面就采用了“V”形折叠的方式, 而马德里赛狗场则采用“弓”形折叠, 托罗哈设计的马德里扎苏埃拉赛马场则为双曲抛物面弯曲的形式。

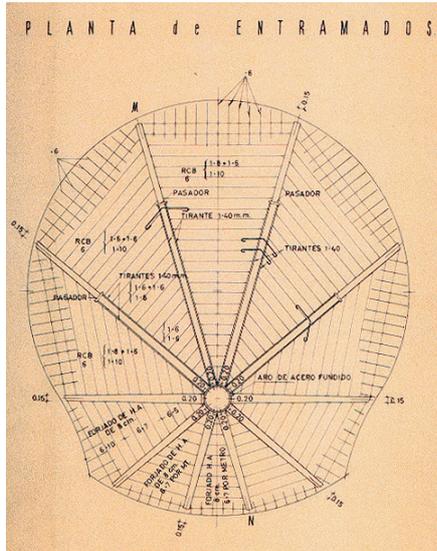


图22: 西班牙兰格雷奥市齐亚诺教区公园的音乐亭车顶配筋平面图

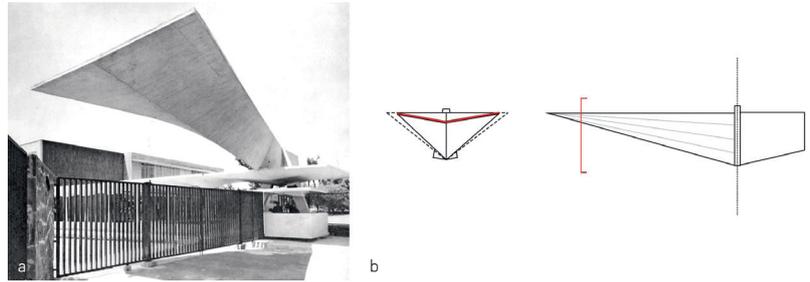


图23: 墨西哥城莱德利实验室入口雨棚(坎德拉, 1956年): (a) 外观透视图; (b) 偏心伞剖面图

3. 平衡策略的复合使用

上述策略还可以根据情况复合使用，以达到更好的效果。如越南永福省竹翼餐厅、台湾大学社会科学院图书馆和西班牙兰格雷奥市齐亚诺教区公园音

乐亭都运用了两种不同的平衡策略；而在马德里赛狗场、马德里扎苏埃拉赛马场和布鲁塞尔格罗嫩达尔赛马场，由于建筑体量的扩大和结构复杂性的增加，复合使用的平衡策略甚至达到了三种(表3)。

相关案例概况及平衡策略归纳

表 3

案例	项目功能 建造时间 结构用材	抵抗失稳及变形策略							偏心目的			形与力的 关系图解
		组合平衡	附加固定件平衡	配重平衡	自稳式平衡	材料预应力平衡	基础协同平衡	伞面折叠或弯曲	适应主、辅空间的功能需求	打破均质感营造富有变化的空间	建筑形态塑造	
意大利帕多瓦市 击剑馆	击剑馆 1936-1940 钢筋混凝土						●		●			
韩国庆尚北道 三棵树住宅	住宅 2018 木结构	●								●		
北京林建筑	休闲展会 2015 木材	●								●	●	
台湾大学社会 科学院图书馆	图书馆 2006-2013 钢筋混凝土	●	●							●		
法国贝尔特里尚普 森林休憩亭	森林休憩亭 2014 木材	●							●		●	
波兰罗兹市火车站	火车站 2014 钢材、ETFE膜	●							●			
芝加哥北岸会众 犹太教堂	教堂 1964 钢筋混凝土	●									●	
越南永福省 竹翼餐厅	餐厅 2010 竹材、拉索		●			●				●		
墨西哥城莱德利 实验室入口雨棚	入口雨棚 1956 钢筋混凝土							●			●	
西班牙马德里 赛狗场	体育场 1960 钢筋混凝土	●	●					●	●			
比利时布鲁塞尔 格罗嫩达尔赛马场	赛马场 1980-1985 钢筋混凝土	●	●					●	●			
西班牙马德里 扎苏埃拉赛马场	赛马场 1935 钢筋混凝土	●	●					●	●			
古巴哈瓦那 何塞马蒂公园体育场	体育场 1960 钢筋混凝土	●	●					●	●			
西班牙兰格雷奥市 齐亚诺教区公园音乐亭	音乐亭 1961 钢筋混凝土		●	●							●	
上海国际赛车场 副看台	赛车场看台 2004 钢结构、PTFE膜		●									
加拿大卡尔加里市 肖尼斯轻轨站	轻轨站 2004 超高性能混凝土(UHPC)				●				●			

四、不同偏心伞建筑适用的尺度、比例范围与应用价值

不论是结构所产生的通高无柱空间，还是多单元组合产生的充满节奏韵律的场所，都能赋予不同建筑独特的性格和表情。通过对上述 16 个偏心伞案例的分析以及对跨度、高度^[6]、伞柱间隔及长短方向比例、高跨比等参数的归纳（表 4），可以看到，高度最大者为西班牙马德里赛狗场，高达 15.4m，跨度最大者为上海国际赛车场副看台，其长轴方向跨度达到 31.4m。不难发现，偏心伞长短方向的比例处于 1.5 : 1 ~ 3.6 : 1 的范围。若比例太小，偏心伞的空间结构效果则不太明显；若比例太大，则会超出结构可承受的受力范围，不利于结构的稳定。高跨比处于 0.31 : 1 ~ 3 : 1 之间，其中大部分偏心伞跨度略大于长边自由端的高度。由于结构的合理性和主辅空间的使用需求，偏心伞长方向一侧的自由端往往会高于短方向一侧。单排设置时，偏心伞的柱间距在 4.8m ~ 24m 之间，最大的为上海国际赛车场副看台，数值为 24m；多排或组合设置时，柱间距较为灵活，数值在 2.5m ~ 13m 不等，其中波兰罗兹市火车站的柱间距就达到了 13m。

不论是整体的单元组合，还是局部的伞面形式、支撑结构、基础和辅助构件，在偏心伞建筑设计中，其主要思路都是从整体和局部两个方面来考虑的，根据伞面材料、支撑构件、排水与采光的方式和结构材料使用的不同，落实到形态、构件和节点的设计上，在把握好形与力平衡尺度的基础上赋予建筑结构特色。另外，偏心伞和伞状结构一样，同样具备多单元模块化组合的灵活性，使其在大到展馆建筑、交通站点、体育场馆、宗教建筑……，小至景观小品、构造装置等都有着多样的应用可能。

五、结语

偏心伞建筑的优势明显：①可以形成大小不同的空间，适应主、辅空间的功能

偏心伞建筑相关案例尺寸及比例一览表

表 4

案例	高度 (m)	跨度 (m)	长短方向比值	高跨比值	伞柱间隔 (m)
意大利帕多瓦市击剑馆	12	15.8+9	1.7	0.48	5
韩国庆尚北道三棵树住宅	5.3 ~ 6.2	(4.8+2.2) / (3.7+2.2) / (2.2+1.3)	2.18 / 1.69 / 1.68	0.89 / 1.05 / 1.77	3.8
北京林建筑	3 ~ 5.1	—	—	—	7.8
台湾大学社会科学院图书馆	6.15	0.2+0.3+0.4+0.45+	1 ~ 2.5	—	2.1 ~ 11.3
法国贝尔特里尚普森林休憩亭	2.16 ~ 3.81	3+1.5	2	0.84	2.88/6.22
波兰罗兹市火车站	10.9 ~ 12.7	(6+2.65) / (2.4+1.2)	2.26/2	1.46/3	13/5/2.5
芝加哥北岸会众犹太教堂	11.2 ~ 15.2	11+3.3	3.3	1.06	5
越南永福省竹翼餐厅	3.5 ~ 5.2	7+4.6	1.5	0.45	1.8
墨西哥城莱德利实验室入口雨棚	—	—	3.6	—	—
西班牙马德里赛狗场	15.4	17.5+6.5	2.7	0.64	9
比利时布鲁塞尔格罗嫩达尔赛马场	14.76	13.5+7.75	1.74	0.69	5.5
西班牙马德里扎苏埃拉赛马场	10.8	12.68+6.87	1.85	0.55	4.8
古巴哈瓦那何塞马蒂公园体育场	12.6	14+4.9	2.86	0.67	4.8
西班牙兰格雷奥市齐亚诺教区公园音乐亭	10	7.3+2.8	2.6	0.99	—
上海国际赛车场的副看台	9.8	24.3+7.1	3.4	0.31	24
加拿大卡尔加里市肖尼斯轻轨站	5.64	3.15+2	1.48	1.09	6

注：跨度的大小为偏心伞长短方向长度之和

需求；②打破空间的均质感，营造丰富变化的空间；③满足建筑的形态塑造需求。七种平衡策略，无论从抵抗结构失稳，还是防止变形；无论侧重于整体协同，还是局部稳定加强；无论强调单元组合，还是构件优化；都呈现出不同建筑师对结构的精妙处理。通过分析其在不同案例中的高跨参数、长短方向比例、受力机制等，可为偏心伞在不同规模、不同类型建筑设计中的应用提供可堪借鉴的设计策略（表 3）。

偏心伞作为建筑与结构一体化设计的特殊形式，其极强的结构特色和视觉冲击力，其敢于打破平衡，在失衡中达到平衡的设计思路，既把美学的错落嵌入到建筑形式中，又体现了建筑师大胆和独到的设计。

注释

[1] 作为特殊的悬臂结构，伞状结构 (Umbrella Structure) 是一种具有独立支撑的结构体或结构单元。一般由一个屋顶 (或楼板)、一个支柱和柱下基础组成。不同的

伞状结构单元具有不同的组合形式和连接方式。因其结构特色强烈、布局灵活、建造高效、整体便于模块化设计和生产，适宜作为通用大空间等特点而往往应用于交通站、展馆、集合市场、体育场等需要大空间的建筑和装置小品中。相应的，一些运用伞状结构的建筑以其结构、功能与建筑美学合而为一的设计而闻名于世。

[2] 日常生活中的偏心雨伞是将传统雨伞的一根伞骨进行位移，使位于中心位置的伞杆偏于一侧，形成了非对称伞状结构的新型雨伞，以增大持伞人的有效遮雨面积。

[3] 本文侧重于讨论具有一定体量和规模的偏心伞建筑，小体量或轻质偏心伞的质量不均，偶尔也可以在建筑结构所能承受的范围之内，但一旦涉及大体量的建筑，对偏心伞采取加固和稳定的措施就显得非常必要。

[4] $M=F \cdot L$ ，其中 M 为力矩，F 为支撑结构顶部物体的重力，L 为力臂长。

[5] “陶瓷拱板” (Bovedillas Cerámicas) 指通过模制、干燥和烧制获得的未成形黏土而制成的构件。它们用于建筑施工中单向和网状平板的建造，或者用作浇筑平板混凝土的模板。

[6] 案例中偏心伞高度计算为伞柱基座到伞面最高点处的竖直距离。

参考文献

[1] Lara Slivnik. The Distinction between Mushroom

and Umbrella Structures in Slovene Architecture[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 471, 2019: 1-10.

[2] Michiel Beernaert. ANDRE PADUART: Pionier op het vlak van schaalconstructies in gewapend beton (1914—1985) [D]. België: Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen, Vakgroep Architectuur & Stedenbouw, 2006—2007.

[3] 马丹红. 似是而非的结构[D]. 南京: 东南大学, 2017.

[4] 台湾大学社会科学院大楼[J]. 世界建筑导报, 2018, 33 (01): 28-31.

[5] Isabella Douglas, Corrie Kavanaugh, Julie Chong. Creativity in Cuban Thin Shell Structures: PARQUE JOSÉ MARTÍ STADIUM[OL].[2019-8-22]. <https://cubanshells.princeton.edu/projects/parque-jose-marti-stadium/>

[6] AIA Chicago. North Shore Congregation Israel Synagogue[OL].[2019-8-22]. http://www.illinoisgreatplaces.com/#detail/north_shore_congregation_israel_synagogue-052/type=religious/city=chicago

[7] Michiel Beernaert. ANDRE PADUART: Pionier op het vlak van schaalconstructies in gewapend beton (1914—1985) [D]. België: Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen, Vakgroep Architectuur & Stedenbouw, 2006—2007.

[8] 孙晓颖.《悬索结构体系》[OL].[引用时间2019-08-22]. <https://wenku.baidu.com/view/e333b9e8551810a6f5248645.html>

[9] Pepa Cassinello. Ildefonso Sánchez del Río Pisón De la Bóveda a la Lámina (1924—1972) [C]// . S. Huerta, I. Gil Crespo, S. García, M. Taín. Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Madrid; Instituto Juan de Herrera, 2011: 233-242

[10] Isabella Douglas, Corrie Kavanaugh, Julie Chong. Creativity in Cuban Thin Shell Structures: PARQUE JOSÉ MARTÍ STADIUM[OL].[2019-8-22]. <https://cubanshells.princeton.edu/projects/parque-jose-marti-stadium/>

[11] 伊东丰雄. 互助营造. 台大社科院新建大楼工程纪录[M]. 台北: FuTsu Construction, 2018.

[12] Pepa Cassinello. Ildefonso Sánchez del Río Pisón De la Bóveda a la Lámina(1924-1972)[C]// . S. Huerta, I. Gil Crespo, S. García, M. Taín. Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Madrid; Instituto Juan de Herrera, 2011: 233-242

[13] 周春, 周晓峰, 顾嗣淳, 姚念亮. 上海国际赛车场副看台膜结构顶篷设计[J]. 空间结构, 2004 (04) : 7-11.

图片来源

图 1a: Stephanie Van de Voorde. Beton in de Belgische Architectuur (4) : André Paduart[J]. Baanbrekende schaalconstructies, 2008, 60 (8) : 62-67.

图 1b. SETESCO. Anciens projets remarquables- Hippodrome de Groenendaal[OL].[2019-8-22]. <http://www.setesco.be/index.php>

图 2: <http://hiddenarchitecture.net/church-of-our-micaulous-lady/>

图 3a: <https://iphotographeroftheyear.com/winners-gallery/ipoty-2016/amateur/interior/show/hm/1399>

图 3b: <http://foroitalico.altervista.org/scherma.htm>

图 4a: <http://www.keywordbasket.com>

图 4b: 伊东丰雄. 台大社科院新建大楼工程纪录[M]. 台北: FuTsu Construction, 2018.

图 5a: Gonca Zeynep Tunçbilek. Temporary Architecture: The Serpentine Gallery Pavilions[D]. Ankara: Architecture in Department of Architecture of Middle East Technical University, 2013: 53-54

图 5b: <https://www.e-architect.co.uk/london/zaha-hadid-pavilion-at-chatsworth-house>

图 6a: <http://galleries.apps.chicagotribune.com/chi-photo-gallery-a-history-of-glencoe-20130329/>

图 6b: <https://explore.chicagocollections.org/image/uic/59/348gm0c/>

图 7a: <https://aasarchitecture.com/2015/01/forest-shelter-studiolada-yoann-saehr-architect.html/?+As+Architecture>

图 8a: <https://www.burohappold.com/projects/piotr-kowska-street-tram-stop-roof/>

图 9: 台湾大学社会科学院大楼[J]. 建筑创作, 2014 (01) : 166-203.

图 10: <https://www.archdaily.cn/cn/922354/san-ke-shu-zhu-zhai-dong-ya-chuan-tong-mu-gou-jian-zhu-de-xian-dai-yan-yi-jk-ar>

图 11: <http://www.ikuku.cn/post/61739>

图 12a: <https://www.concretedecor.net/decorativeconcretearticles/vol-6-no-2-aprilmay-2006/ductal-a-solution-looking-for-problems/>

图 14a: <https://www.urbex.nl/hippodrome-de-groenendaal/>

图 15a: Rafael García García. Láminas plegadas de hormigón armado. Realizaciones en España[C]// M. Arenillas, C. Segura, F. Bueno, S. Huerta. Actas del Quinto Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Madrid; I. Juan de Herrera, SEdHC, CICCOP, CEHOPU, 2007: 367-378.

图 16a: <https://artchist.wordpress.com/2016/12/04/la-zarzuella-racecourse-in-madrid-by-carlos-arniches-molto-martin-dominguez-eduardo-torroja/>

图 17a: <https://www.archdaily.com/219880/bamboo-wing-vo-trong-nghia>

图 18a: <https://www.facebook.com/182950981787858/photos/kiosco-de-musica-julio-galan-e-ildefonso-sanchez-del-rio-1961/284466571636298/>

图 19a: <https://www.racingcircuits.info/asia/china/shanghai-international-circuit.html#.Xey0Zfln13d>

图 20a: <https://www.port-magazine.com/art-photography/photo-essay-colour-in-havana-cuba/>

图 21b: 伊东丰雄. 互助营造.《台大社科院新建大楼工程纪录》[M]. 台北: FuTsu Construction, 2018.

图 22: <https://www.flickr.com/photos/98983335@N04/10707447356/in/album-72157637376468746/>

图 23a: <https://unavidamoderna.tumblr.com/post/82416662646/entrada-a-los-laboratorios-lederle-calzada-de>

图 6c、图 7b、图 8b、图 12b、图 13、图 14b、图 15b、图 16b、图 17b、图 18b、图 19b、图 20b、图 21a、图 23b: 作者自绘

表 1~ 表 4: 作者整理自绘