

建筑学的力学询证 ——《异规》给当代建筑的结构学启示

撰文 曾超 中国建筑设计研究院

塞西尔·巴尔蒙德（Cecil Balmond），世界知名结构工程师，专注于创新结构的建筑设计方向，现任奥雅纳工程公司（Ove ARUP）副总裁，合伙人，运营部负责人，高级几何部门主管。

他长期与世界顶尖建筑师合作，完成了大量富有创新意义的建筑和构筑物，将结构工程提升到一种富于创新的行为。他的兴趣特别注重于将数字、代数和音乐作为视觉元素体现几何结构的动态感。

这本名为《异规》的砖头一般大小的书表达了他多年来对于创新动态的结构设计领域的探索。正如他所言：“希望建筑师用这块砖，砸向现代主义所构筑起来的壁垒。”

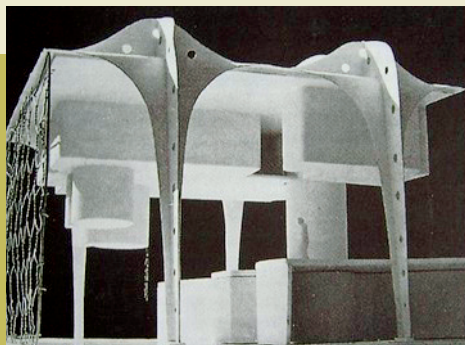
让建筑飞

在讲述波尔多住宅的章节里，作者讲述了从构思到出现问题以及解决问题的整个过程。位于一片芳香蕴藉的葡萄酒庄园的山顶上，恐怕别墅再好的姿态莫过于临空飞翔。很多人都尝试过设计漂浮的建筑，比如现存于纽约现代艺术博物馆，由PAUL NELSON 设计的“悬宅”（THE SUSPENDED HOUSE，1936-1938）模型向人们宣扬了“生活机器”的研究成果。NELSON 认为：“预制的独立并可变的功能性空间单元，被悬挂于一个固定的外罩所形成的室内空间里，创造了它们自己的室内体量和永远变化的空间”。

巴尔蒙德做了类似的探索。波尔多别墅设计的整个过程围绕如何让方盒子漂浮，归纳了3种使建筑悬空的手法：

- （1）建筑底部尽量内凹，以使人感到悬空的边缘；
- （2）抬高地面以遮盖支撑结构；
- （3）倾斜的柱子有利于去除直接支撑的感觉。

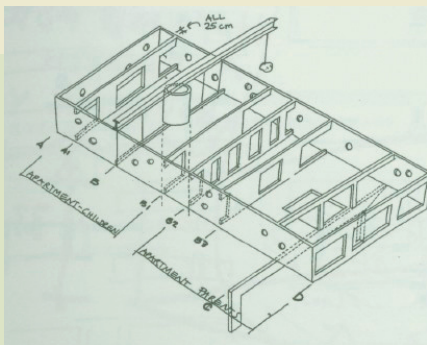
巴尔蒙德巧妙采用平面支撑点的侧移和立面上支撑形式的翻转（支撑与悬挂结合）造成结构上戏剧化的效果，同时也体现了将墙变成梁的巧妙转换。立面开洞处理上，网格划分和避让结构线也值得借鉴（此方法可以直接转化为参数化控制）。



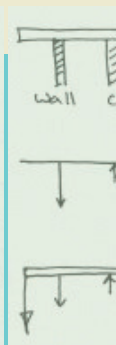
PAUL NELSON 悬宅



波尔多住宅



轴测结构草图



结构图

从草图上可以看出，青年时代的巴尔蒙德充满设计激情，试图用各种力学手段来实现设计想法。针对主人夫妇的房间，采用了将支撑柱外移的方式来营造蓄势待发的形态。而对儿童房，则以中部核心筒作为轴心，考虑到两边剪力墙支座反力的不均衡，采用了挑出钢梁上悬空配重的、充满幻想和冒险的力矩平衡法，虽然悬空配重被埋入地坪的混凝土块所代替。

“四大怪”美术馆

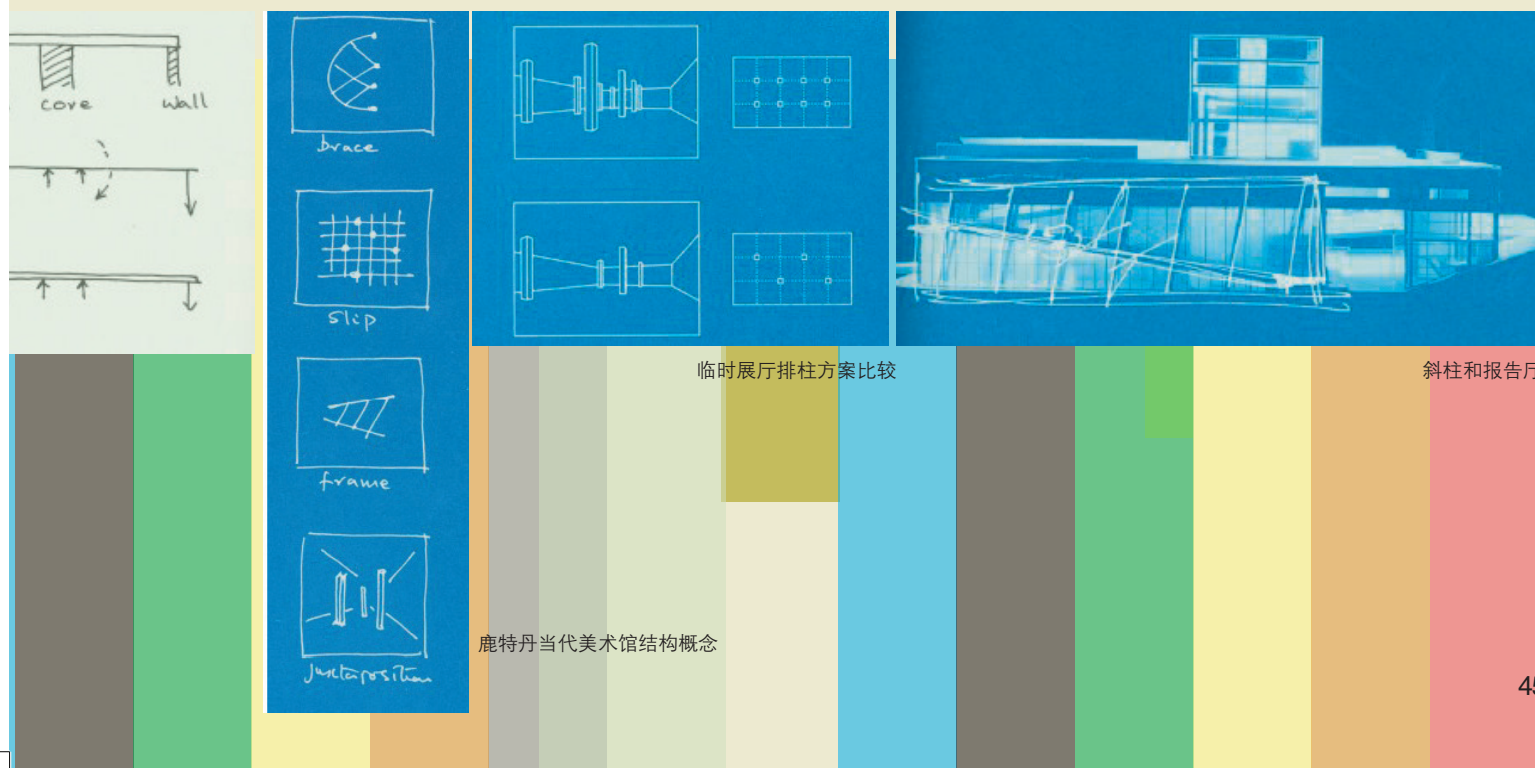
早期的当代艺术充满了叛逆性的探索，建筑界当然无法置身事外。库哈斯曾经认为完美是极度无趣的，并且阻止了能引起强烈争论的意外事物的发生。“如果细部处理是从前提出的要将那些完全不同的材料聚合在一起的话——或许是永久性地聚合在一起——那么，它现在就是一种短暂的耦合，等待着被解开和松开；不再是对差异的有组织遭遇，而是一种僵局、一个体系的突然结束。”因此库哈斯提出了“非细部”（Non-Detail）的概念，这其中似乎实现了一种材料与另一种材料之间完全连续的转变，材料似乎被互不干涉地并置在一起，使得体量感占据主角。另一方面，“非细部”就是消失了细部，或者更准确地说，是未经设计的细部，而非建筑细部。

在鹿特丹当代美术馆的项目中，巴尔蒙德成功地实现了四项方案：斜撑，滑动，框架，并置。

传统的斜撑方式是两条平行线之间一系列对角连线，如同平面桁架体系。巴尔蒙德却认为，“在水平方向上，当建筑的楼板和屋顶起到横膜作用，以便将侧向荷载传递到垂直核心轴心的时候，我们同样需要斜撑。”基于这样的思考，他大胆地将“桁架”旋转90°，并将一条“平行线”弯曲成弧形，以此来实现力传递的维度转化，垂直向下的屋面荷载被转化成斜撑中的拉应力，并传递给了剪力墙。

在临时展厅的设计中，巴尔蒙德意识到传统的矩形柱阵严整得使人乏味，因此他采用“不协调的位移”来使得对角线变得通畅起来，空间开阔而一体。

剧烈倾斜的柱子往往是结构师所避之不及的，它往往带来较大的偏心矩和复杂的水平侧移。巴尔蒙德则



认为，如果结合报告厅固有的阶梯向上的建筑形式，倾斜的柱子支撑恰好可以构成一个牢固的力矩框架。在这里，400mm的报告厅斜坡楼板被当作梁一样和同样400mm的标准柱组合成了一个框架体系。

在美术馆的入口附近有三根并置的“柱子”，分别是方形的混凝土柱子、工字梁断面、空腹钢梁。“这样的结构布置，是为了使不同的屋顶荷载可以分别得到直接的支持，而无需通过隐藏的转换结构来把荷载转移到一个支撑点上。”巴尔蒙德意图通过这样并置的方式来让参观者直观地体验建筑各个维度的力传导。

这三根“柱子”展现了如同电影《枪火》中黑帮静默对峙的气势感，一种强大的静态张力的场。

凝固的力流

“一根梁，是在一个力的场中发生的突然收缩，一根柱子是一个漩涡点，它将一池荷载拽向自己。”在巴尔蒙德的眼里，他不无浪漫地认为“力”是一个模糊学上的定义。他认为力是一个区域和被选择的最近路径，而不是经典力学所定义的从一点到另一点的放射状的向量。显然，巴尔蒙德的想法是更贴近真实的。

回转的悬臂梁

在凯姆尼兹的体育场方案设计中，巴尔蒙德意图表现浮云、树林和大地。传统的体育馆设计是由以跑道为基础的同心圆组成的，顶棚也大多设计成向心的悬臂梁的形式。如何打破这种相互依托的复合体结构，来尝试独立的不同层面的形式正是巴尔蒙德所思考的问题。

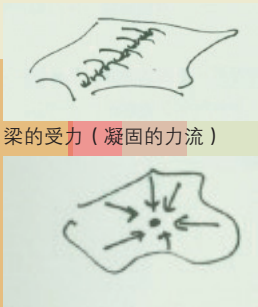
“将体育场的跑道放置于景观之中，将看台层设计为一个悬浮物，它的上面盘旋着浮云状的顶棚。在空气、天空、大地、汗滴和能量之间，竖向的联系方式将会是任意和随机的，服务于不同的需求。在这一方案中不存在连贯不变的笛卡尔逻辑”，彼得·库卡和乌里奇·库宁格斯的最初设计包含了对于无序能量之源的诠释和模拟。巴尔蒙德领会并引导了这一设计。最初颇为夸张的纸质模型变得规整和实际。他从基地条件的草图入手，找到三处无法放置普通悬臂梁的地方，在此处设计拱形的梁，这样显然有空间在两个端点处设计结构柱，进而可以设计出很多相互支持的拱，拱形成网格支持着整个顶棚。



鹿特丹美术馆入口的三根柱子

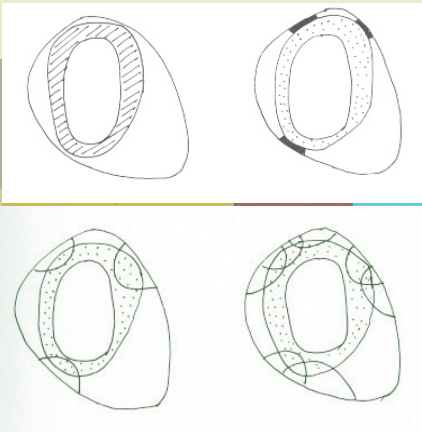


枪火中静态张力



梁的受力（凝固的力流）

柱的受力（凝固的力流）



凯姆尼兹体育馆顶棚草图

金木桁架

欧罗里尔的“大棚”设计包含了三种功能：音乐、会议和展览。在展览馆的顶棚设计时，消防官员坚持要在光滑的顶棚上悬挂阻隔物，这势必破坏原有的效果。结构师们提出将天花板分成条状，因为如果屋顶结构高度为700mm，那么将能够容纳足够的烟雾，就不需要阻隔物了。木板制的顶棚（下弦杆）和T形钢（上弦杆）结合起来，中间用波浪形钢筋作为腹杆，整个设计达到了装饰和结构的统一。

“不只有鸟儿才会飞翔”

1998年里斯本世博会的葡萄牙馆，阿尔瓦罗·西扎需要一个200mm厚的薄板天棚跨越70m的距离，张开的双翼如纸般轻盈。如果采用通常的思考，使用网状的结构和轻质的金属薄膜来实现固然简便，但是来自风的上抬力会使天棚的形态不稳定。巴尔蒙德顺势想到混凝土作为一种重的材料可以平衡这种力，垂曲线作为一种极少能量线，这种状态下张力的计算公式也和曲线一样简洁。

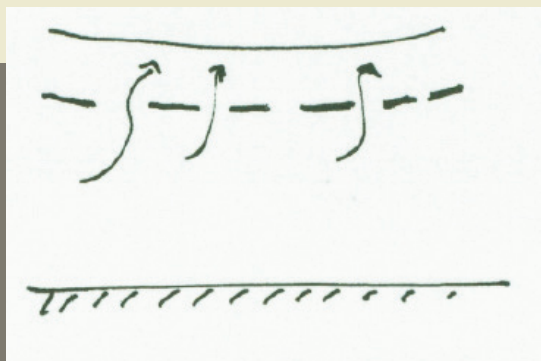
然而作为一种脆性材料，混凝土并非像绳索一样弯曲自如。这就需要在施工时在混凝土受拉之前就形成垂曲线的形态，并且穿越支座的锚固端的走向要和曲线一致。施工过程中，依次提升拉伸钢筋的拉力 $0 - 0.5T - 0.8T - T$ ，逐步增加的钢筋拉力直到钢筋可以独立支撑混凝土“羽翼”的时候才拆去模板，以保持混凝土薄壳在整个过程中形态几乎不变。支座之间的地梁起到了拉杆的作用，从而形成地上、地下完整的荷载回路。

建筑设计的需求使得参与者的工作性质变得模糊不清。早在文艺复兴时期，在设计佛罗伦萨大教堂穹顶的时候，吉贝尔蒂和布鲁乃涅斯基分别由金匠和艺术家转变成为雕塑家和建筑师，到了近代，艾菲尔和塔特林也曾由原本的结构师的身份从事建筑设计，并创造了建筑美学和结构学俱佳的建筑。

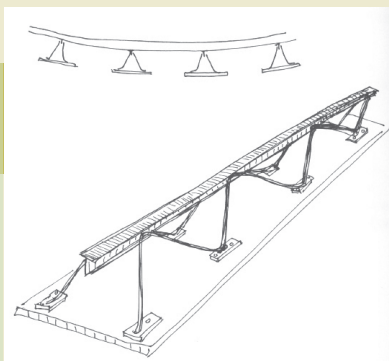
正如柯布西耶所言，“建筑师和结构师如同两只紧握的手”。巴尔蒙德给我们以启示，专业人士不应仅停留于自己的职业特性和行业准则，而应该将触角延伸到更广阔的学术领域。 AT

参考文献

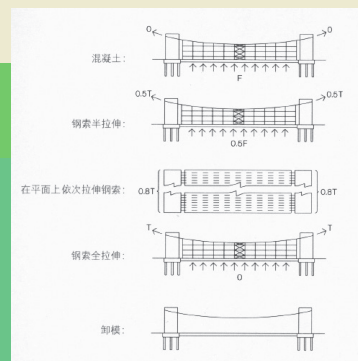
- [1] 赛西尔·巴尔蒙德 (CECIL BALMOND). 异规 (INFORMAL) [M]. 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] 赫曼·赫茨伯格. 空间与建筑师[M]. 天津大学出版社, 2003.



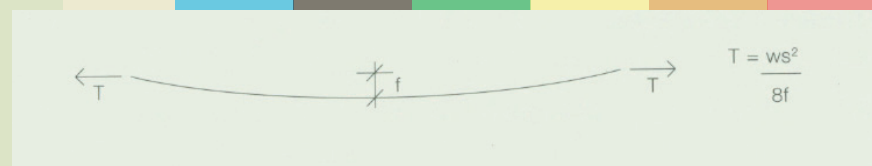
烟雾进入顶棚



金木桁架



施工过程(葡萄牙馆天棚)



垂曲线计算公式(葡萄牙馆天棚)