



封帅

毕业于中央美术学院建筑学院，获得AA建筑学院MArch with Distinction优异级建筑学硕士。2010年至今先后供职于伦敦福斯特事务所SMG（专家建模组）与ARD（应用研发组），2014年任教于AA清华访校。

GENETIC ALGORITHM AND PERFORMANCE-ORIENTED MATERIAL RESEARCH: DESIGN AND CONSTRUCTION OF AA CANOPY

遗传算法及性能主导的材料研究 ——AA 天棚的设计与建造

撰文 封帅 Foster+Partner 事务所 SMG/ARD 应用研究发展组

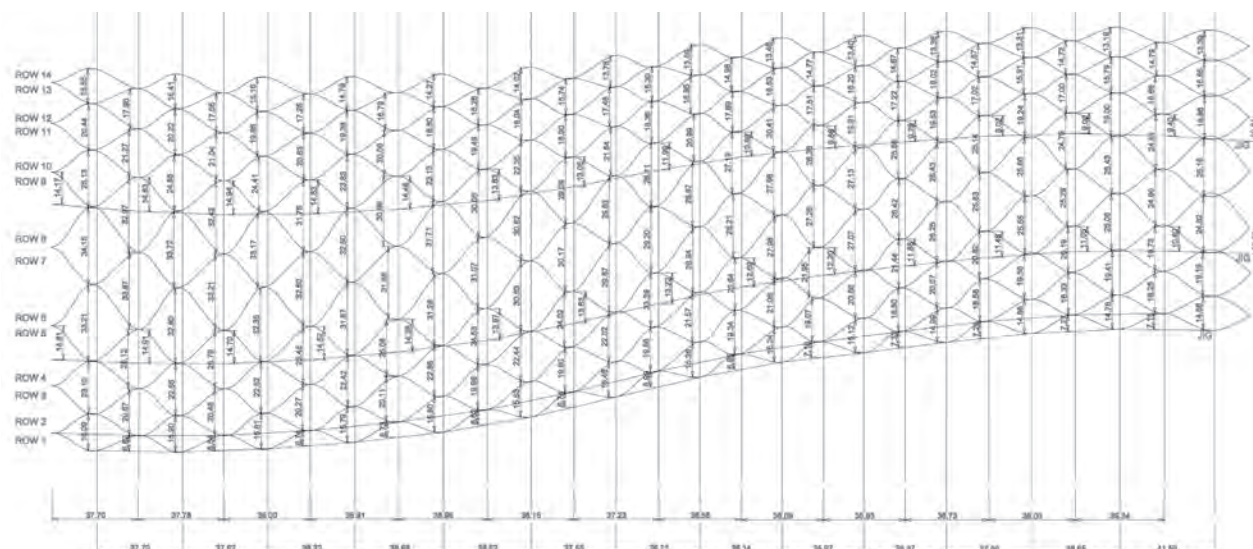
要求和限制

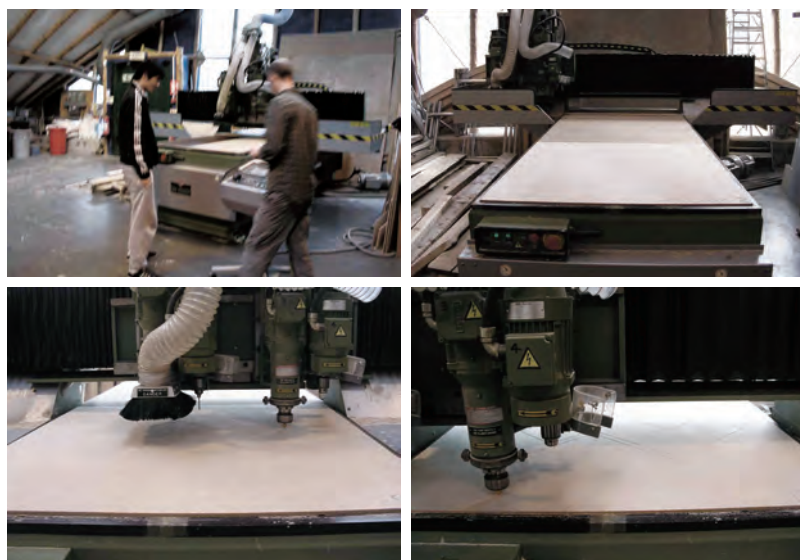
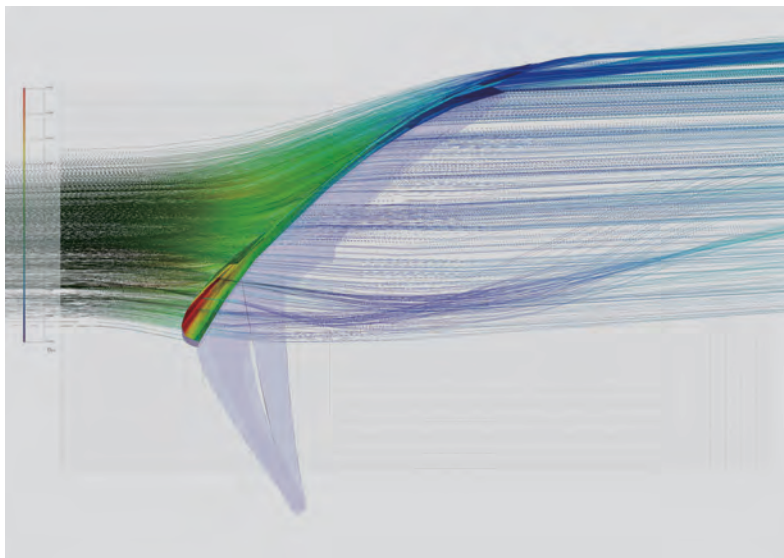
AA建筑联盟学院天台毗邻咖啡店与图书馆，是整个学校最活跃的公共区域，承担了夏季展览的酒会会场以及学术交流、社交场所等多重功能。但作为英国国家文保建筑的一部分，其在承重系数与改建余地方面存在着很大限制。因此天台加建的功能被限定为：为各种活动提供局部的遮雨、遮阳，并适度调节天台上的风环境。

天台加建项目实行的是竞赛机制¹，我和Ittai Frank设计的初始方案最终胜出并得以建造。设计借鉴了北京传统牌楼层叠搭接的精密复杂结构系统，提供水平出挑用以庇荫和排水所需的合适坡度，同时参考了上海民居中镂空瓦作铺接的做法，实现遮蔽物上下方的空气流通。在借鉴的基础上，我们进行了革新，使用镂空搭接的复合材料条带作为结构系统，不仅满足了水平出挑的结构强度，也体现出树冠一样的环境表现性能：雨水沿着互相叠压的分支排水管径层层流下，而透明瓦片在提供层层漫射的光效的同时，也过滤衰减了风环境，形成天棚庇护下微风习习、光影斑驳的空间感受。

应对策略

基于文保的要求，以不损害文保建筑为目标所采用的传输安装手段对天棚的大小、重量以及组装逻辑提出了限制，而施工制造也受到CNC切割机和木制胶合板尺寸的限制。设计实践在发展中囊括了两个





长期的研究方向：遗传算法以及基于材料性能的物理实验。设计和制造的迭代推演过程使用了先进的计算工具，并将一系列物理实验与制造组装逻辑作为参数输入。最终的波浪状条带和鳍状支撑的设计与它们所需的组装逻辑互相影响演化，最大化地突破了天台基地使用空间的狭小和可利用建造时间短促的限制，保证了整个组装过程都得以安全地天台护栏内由人力手工完成。

系统构造和受力分析

AA天棚拥有两个主要的子系统，即木片和玻璃纤维复合物制成的波浪条带，竖向的“木鳍”（鳍状支撑）加固木制条带的强度，并将天棚固定于现有的天台栏杆中升起的铁圆柱上。5m长的波浪状木条带由两层1.5mm厚的胶合板复合而成，中间用玻璃纤维混合树脂夹层以增强强度，厚度达1.8mm。三根“木鳍”由三层加厚的木质板材复合而成，上下两部分通过钢制的夹板将其连接固定。一根直径20mm的钢柱将每根“木鳍”固定于天台栏杆柱顶端的接口之上，“木鳍”的下缘位于天台栏杆的外侧，通过可拆分的钢箍与栏杆柱底端对接，从而使落地面积缩至最小，着陆在天台的黑色铁栏杆之上，实现了对文保建筑的最小化影响。

结构分析和建造构想的深化

相互叠压的木质波浪状条带的发展经历了一系列尺度上的演化与研究。最初的建造希望以构件单元模式进行发展，计划采用受张力的绳索系统与受压力的木质合成材料系统进行复合，每一个构件以受弯木材的每一个波峰和波谷为区间断开，同时考虑到天棚在两个方向上的组装可能性，构件单元采用了错



动的平面，从而形成波浪状的效果。在这个系统中，作为受压的木质合成材料系统可以成单元形式进行裁切与生产，而作为受张力的钢索系统一方面可对木质构件的弯曲施加压力，另一方面可将整个张力系统固定于基地的支点之上。虽然这种做法会使复合系统的纯粹性得到保证，但由于基地的限制，在随后的受力分析中这种布局被认为不切实际。为了进一步推进设计，构件单元以等比例方式进行物理模型的复原，在形式与性能基本维持不变的前提下，对木质构件与钢索的复合系统进行了极大简化，其受力逻辑也产生了颠覆性的改变。木质复合构件在水平方向上的延展有利于以条带为单元进行互相叠压，而条带单元的叠压方式也摆脱了作为张力系统着陆在基地当中的各种局限，更接近于传统木构件的受压系统，并且轻盈地以垂直支点方式传递荷载。

组装起来的条带单元的结构性能由一系列条带之间的叠压程度实验进行验证，并且通过实验记录生成的不同叠压图案，用铆钉固定叠压部分。这个以探讨为目的的物理模型提供了一个天棚构建方式的结构构架，下一步所需要的精确性控制更多地体现在计算机平台上的自重与风雨荷载下的形变分析。天台的空间排布与环境信息被转化为数据输入到优化的算法中，经过20个连续的迭代发展进化，天棚的最初母表面得以生成。母表面在实现最小化的风力荷载的同时，其坡度分析也在瞬时进行优化，用以规划母表面本身的曲率分布，将雨水径直引入位于支点正下方的基地排水管道中。空气流体动力学模拟（CFD）作为设计工具被引入到最初母表面的下轮进化中，基于读取CFD平台所得出的母表面表层风压系数，连续的迭代数字模型实现逐步优化，以减少天棚下方湍流空气的产生，从而提供相对平缓的风环境。天棚最初的母表面由于波状条带的拼接所形成的大量孔洞在辅助达成上述环境性能的同时，也避免了天棚在极端的风力荷载下成为一顶鼓满的船帆，进一步增强了天棚结构的稳定性。



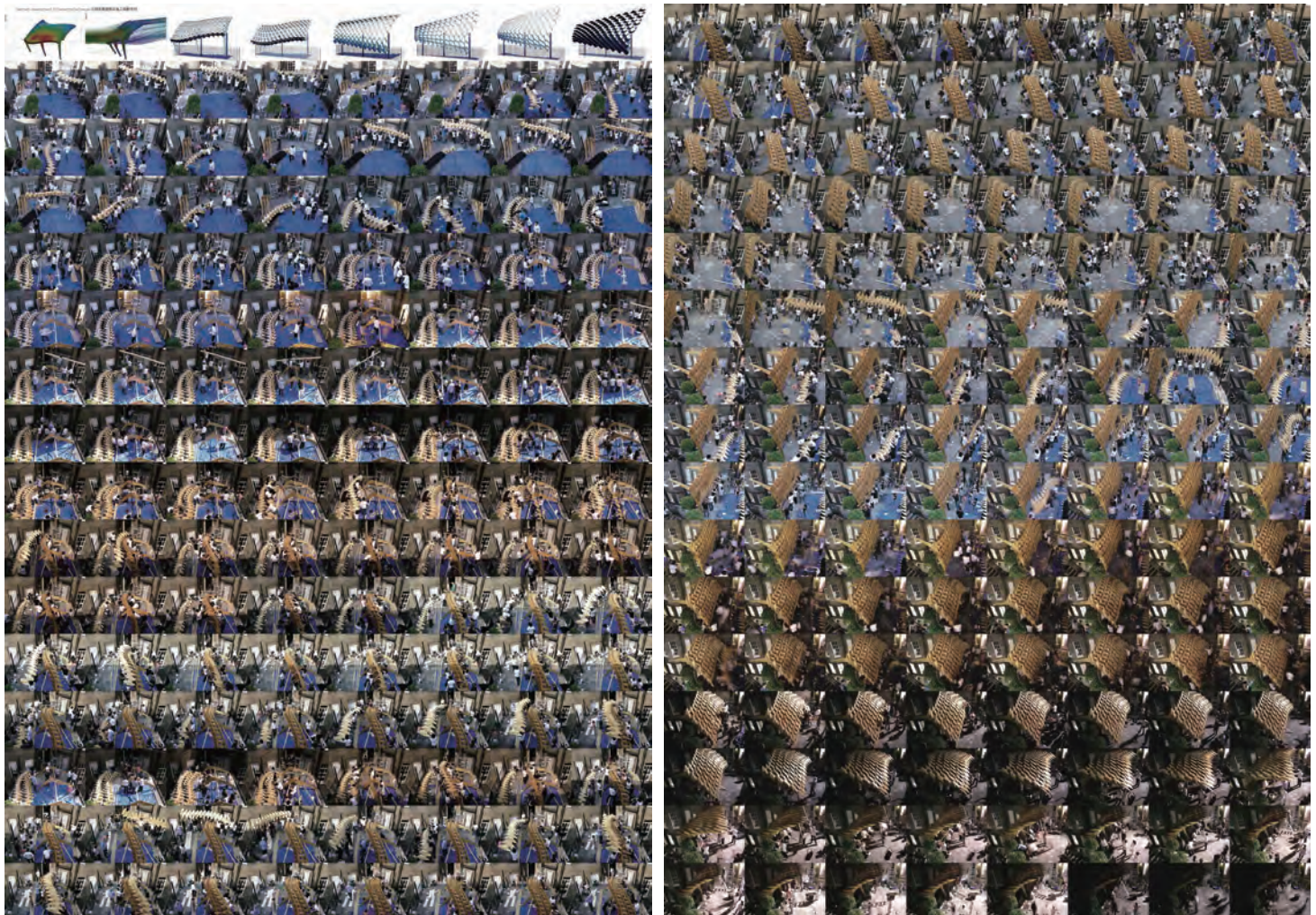
基于材料性能的物理实验

系统化的等比例物理实验模式有效地提供了材料在波曲弯折过程中接近破坏阈值前所需要的曲率半径信息，薄至1.5mm的胶合板木条虽有利于被弯曲得到需要的曲率，但不足以提供足够的材料硬度，寻找强度与柔韧度的平衡成为亟待解决的问题。我们用两层木条层压在一起来解决这一问题，而二者之间的接合做法则是从平行学科里得到启发：玻璃纤维层和树脂层的复合夹层是足够坚硬的复合材料，在实践中被广泛地使用于船舶制造与汽车内壁制造中，结构强度与技术的成熟度历经复杂的自然环境的检测。

由于相关的层压技术受到人力与经验的限制，需要由反复实验和试错获取。在层压之前，被拆分为“之”字形构件的木制条带在CNC机器中被裁切，每一片“之”字形胶合板依序放置在预制巨型模架之上，逐段进行弯曲，并使用压力钳将其紧密固定在模板之上，巨型模架的长度足以覆盖整条条带，涵盖了母表面的各段曲率分布。通过构件逐段在巨型模架上完成条带的层压，可以精确检测每一段曲率与数字模型的契合程度。而具体到每一条条带内部的曲率定义，则是率先由数字模型中“引力点”脚本分段控制的，继而在满足波状条带的自承重结构性能的前提下，通过改变每个波状构件的波动曲率与波动跨度，逐渐地增加波浪状木条搭接时所形成的空洞的开放尺寸。空洞尺寸正比契合于最终优化生成的母表面表层风压系数，以分区域减少表面上最危急区域的风力荷载。

浇注

在层压过程中，需要压力钳与定位器的辅助来定义天棚条带每段构件的不同曲率。波浪状胶合木条被层压在一起，根据“引力点”脚本所生成的分段跨度数据表单来直接进行人力手工弯曲，并通过压力钳以及螺栓固定于巨型模架上。这一过程要求大量的人工操作和高速的配合，单条条带的每一段构件在团队根据数据表单组装定位的同时，负责裁切玻璃纤维层的团队需要在中间及时铺装纤维夹层，而调配树脂的团队要同时持续搅动树脂以保持活性，并需在压力钳定位之前，迅速地对玻璃纤维夹层“浇注”生物树脂



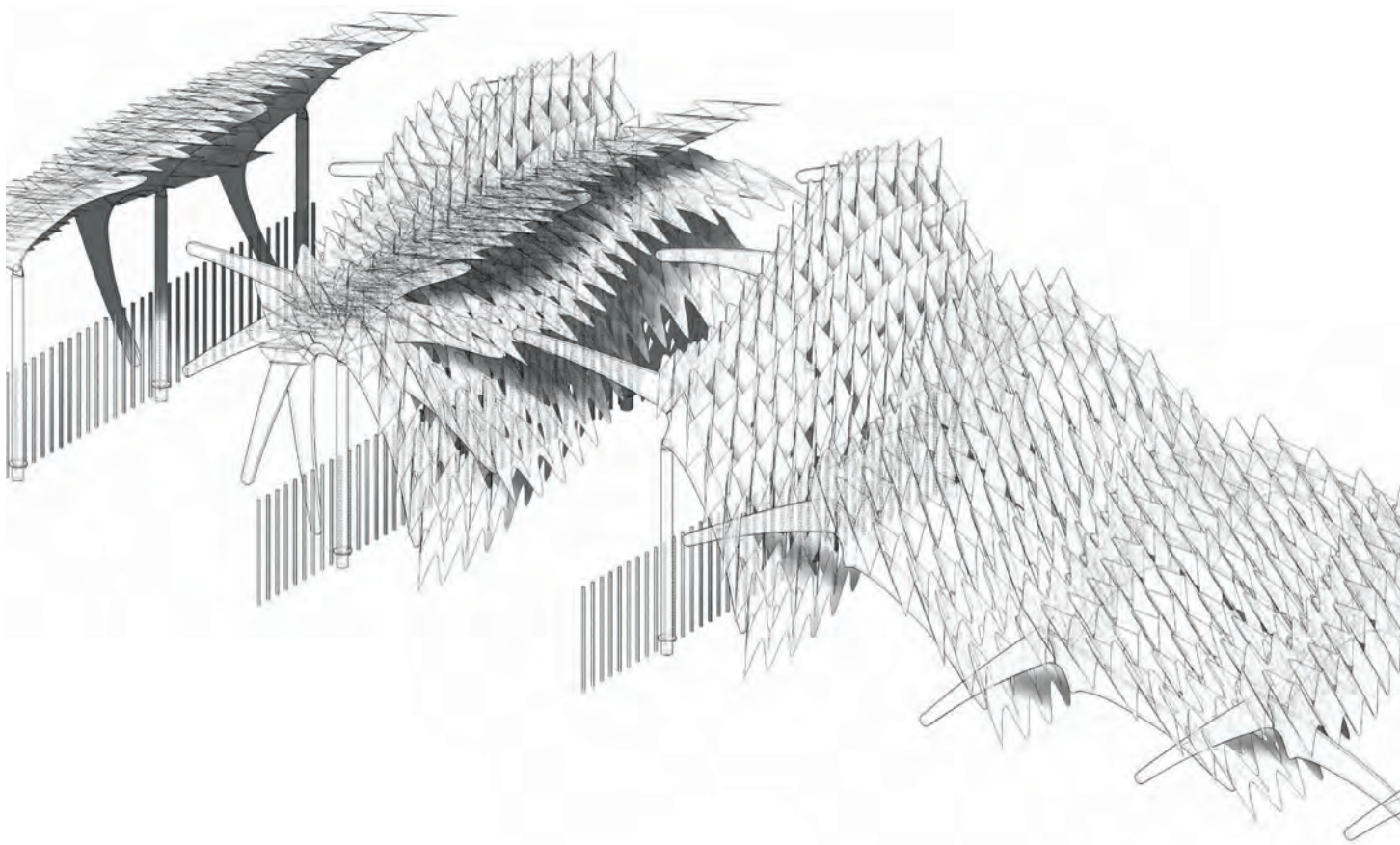
层，从而使得在压力钳施加压力后纤维层和树脂层被充分融合。由于每两条波浪条带需要以螺栓穿透纤维与树脂的复合夹层，于是每两条互相叠压的条带需要在巨型模架上双双“浇注”完成。用以固定的压力钳与定位器在树脂晾干后取下，而下一条条带就在前一条表面上直接进行施工，最大程度保证了叠压搭接的每两条条带的螺栓对位，确保了施工的精度。整个两条条带的施工过程涉及几乎同时进行的模具定位、材料弯折、补料铺装与粘合、辅助设备施压实现层压，一气呵成，不可以有间隔，可以说整个过程强度非常高，连续耗时5~7个小时，其复杂程度远大于现浇混凝土施工的要求。

在局促空间中的长时间连续“浇注”，需要穿着厚厚的化学护具与防毒面具，以抵御生物树脂挥发出的有毒化学物质和裁切中玻璃纤维碎末的物理伤害。“浇注”完成后的玻璃纤维复合条带的表面及背面需要在短时间内反复经过5遍轮流交互的打磨、抛光、上漆及风干处理，最终完成的表面在阴天可呈现出浅浅的金色琉璃色泽。

现场施工

基于每条条带的长度与巨型模架的尺寸，整个“浇注”的施工被安排在天台东南侧的教室露台上进行，并需在天台进行清场的一天内完工。狭小的空间不仅对施工过程中不同团队的高度配合与人员流动提出了挑战，也为条带运抵基地与人力进行组装制造了新的难题。基于现场施工的多重限制，最终的策略是将施工进程中的“塔吊”与“脚手架”系统也理解成完工建筑的组成部分，从而精简了施工过程对空间和时间的占用。

在所有条带制造完毕之后，每两条条带通过空中悬索搭建的滑轮组系统运抵天台，并且插接在横向放置于天台上的预制鳍状支撑中。当过半的条带插接完成后，“木鳍”的上缘枢轴被提升至天台栏杆柱顶端的接口之上，一根20mm直径的钢栓将每一根鳍状支撑分别半固定于接口，且保证钢栓在枢轴中的自由转动，这时鳍状支撑的下缘指向天空，而上缘触地。由于天棚的上缘触地，安置于上端的半数波浪条带此时得以在不使用“脚手架”的情况下插入相应位置并铆接。当全部条带组装铆接完成后，整个系统以栏杆



柱顶端的钢栓与枢轴作为支点，进行180°的旋转，使得鳍状支撑的下缘和栏杆柱底端的钢箍对接。整个天棚通过围绕支架的翻转顺利安装到位，而辅助翻转的杠杆“木鳍”在扮演了塔吊、脚手架、定位器等一系列角色之后，也正式成为了完工的AA天棚构筑物的支架部分。**AI**

注释

1 由学院内部竞赛产生9个入选方案，其在各自设计实验3个月后进行总决选产生3个方案，3个方案允许更多的学生自愿加入进行发展，并由英国Buro Happold（标赫工程咨询公司）的结构工程师协助3个入选方案进行1个月的工程图纸深化。最终评选出1个胜出方案，进行等比例建造，全体参赛同学共同参与制造、组装、建造。

项目名称：AA建筑联盟学院天台加建

建设地点：英国伦敦Bedford广场

建设时间：2009~2010年

方案设计：Shuai Feng（封帅），Ittai Frank

团队：Selim Bayer, Kunkun Chen（陈昆鲲）Stéphanie Chaltiel, Utssav Gupta, Konstantinos Karatzas, Mohamad Khabazi, Tamara Lavrovskaya, Mohammed Makki, Maria Mingallón, Michael Moukarzel, Sara Pezeshk, Sakthivel Ramaswamy, Jheny Nieto Ropero, Revano Satria, Kyle L. Schertzing, Pavlos Schizas, Xia Su（苏夏），Ioanna Symeonidou.

老师：Michael Weinsack

顾问：Wolf Mangelsdorf, Michael Brooks, Luke Epp, Martin Flint, Victoria Littlewood, Andrea Menardo, Jonathan Vidler.（BuroHappold/英国标赫工程）

赞助：Architectural Association（AA建筑联盟学院），Buro Happold（英国标赫工程），“Unto This Last” CNC（英国永续家具工坊），Alec Tiranti Ltd resin and glass fibre（意大利艾利克斯提拉提建材）

