

革命的技术与革命的建筑

——从世博会建筑看建筑技术历史的发展

Revolutionary Technology & Revolutionary Architecture: The History Study of Architectural Technology through the Architecture in Expos

撰文 戚鑫 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司

摘要 纵观建筑史的发展历程,每一次建筑技术的重大变革都对建筑学的发展带来十分重要的冲击和影响。以历届世博会建筑为案例,研究建筑技术对建筑历史发展的推动作用。

关键词 革命 技术 建筑 材料 结构 设备 辅助设计

0 引言

18 世纪末,“建设物”(construction)一词广泛使用在技术活动的一些最终产品上,如公共和私有建筑物、道路、桥梁、运河、土木工事、输水干管、下水道,通常包罗了机器生产的所有大型项目。如今,技术的进步急剧改变了机器“建设物”,它们日渐分化成不同的专业活动范围^{[1]3}。建筑技术的发展和进步推动了建筑历史的进程,而每一次建筑科技的重大变革都对建筑学的发展带来重要的冲击和影响。

1 革命性的建筑材料的诞生和使用

在历史上,“每当出现新的优良建筑材料时,土木工程就有飞跃式的发展”^{[2]5}。此外,建筑材料对于建筑的质量和形态以及人的生理和心理的感知都有影响,也从而对建筑艺术产生影响。我国著名土木工程专家李国豪指出,土木工程的三次飞跃发展是同三种材料相联系的:一是砖瓦的出现,二是钢材的大量应用,三是混凝土的兴起^[3]。而这些革命性的建筑材料都以最快的速度 and 最直接的空间效果,集中展示在同时期的世博会建筑之中。

1.1 钢铁和玻璃

早在远古时代,铁和玻璃在建筑中的使用就开始了,然而直到现在,工业的进步才扩大了它们的用途,才将新的观念完全带入建筑技术中^{[1]11}。

起初,铁的使用只是辅助性的,用于链条、支撑和毛石建筑中的连接件。例如隆德莱于 1770 年为苏夫洛的圣纳维夫教堂或先贤祠的设计。还有用于荷载不大的屋顶,比如维克多·路易于 1786 年设计的法国波尔多剧院的屋顶。但是,由于早期炼铁以木材为燃料且交通不便,所以使钢铁的产量和使用受到限制。直到 19 世纪下半叶转炉炼钢法和平炉炼钢法的发明和使用,才使全世界铁和钢的产量获得巨大增长。

18 世纪后半叶,玻璃工业取得了长足的技术进步。1806 年,

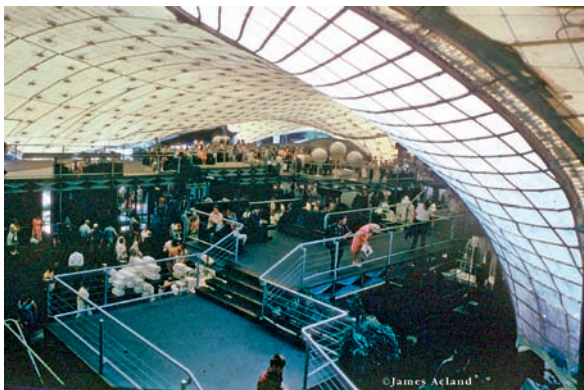
已能生产 2.50m×1.70m 的窗格玻璃。然而,英国的主要厂家由于受拿破仑战争财政需要的影响,玻璃制造业面临严重的困难,直到签订和平条约以后生产才真正得到发展。而直到 1908 年美国发明“平拉法”,1910 年比利时人发明了“有槽垂直上引法”,才使平板玻璃的生产不再依靠繁重手工劳动的“吹制法”而获得迅速发展。

早期,铁和玻璃的大天窗开始在许多公共建筑物中出现,例如 1829 年伯西埃和方坦用玻璃覆盖了巴黎皇宫奥尔良廊,成为 19 世纪玻璃廊的原型。另外,一些大型温室中也使用了玻璃,如鲁奥于 1833 年建造的巴黎植物园等。

1851 年首届伦敦世界博览会上,由园艺工程师英国人帕克斯顿设计建造的“水晶宫”对上述所有这些探索做了最全面、完美的总结。此外,他还着手设计了一系列大型玻璃展览馆,这些展览建筑一直延续到 19 世纪后半叶。



1851 年伦敦世博会水晶宫



1967年蒙特利尔世博会德国馆内景



1889年巴黎世博会机械馆

1.2 水泥和钢筋混凝土

古罗马人最早使用火山灰和喷射物作为天然粘结物，建造了规模巨大的斗兽场、浴场等。直到 18 世纪末，有人用含铝的石灰石烧制出可以在水中硬化的材料，取名为“罗马水泥”。1824 年英国人亚斯普丁将石灰石和粘土碎末合烧，研制出“波特兰水泥”。而直到 1873 年英国人兰塞姆创造了回转窑，才开始使波特兰水泥大规模连续生产。

此后，人们用水泥和砂子、碎石制成混凝土，并积极探索把钢铁和混凝土结合起来共同工作的构造方式。19 世纪 90 年代，钢筋混凝土开始用于房屋结构，最先使用钢筋混凝土建造完整房屋的是德国营造者汉尼比克，他在 19 世纪 90 年代发展并建造了以钢筋混凝土作为承重体系的桥梁、工厂、谷仓、水利工程和百货公司等，并在给自己建造的钢筋混凝土住宅中，大胆设计了悬挑结构和屋顶花园^{[2][23]}。但在整个 19 世纪，人们对钢筋混凝土及其结构理论分析还知之甚少，只是个别尝试。

进入 20 世纪，钢筋混凝土由于其优越的性能，最终成为演绎现代建筑最重要的建筑材料。1925 年在巴黎的装饰艺术展上，勒·柯布西埃以“新精神馆”的设计为其现代建筑宣言作了铺垫，并终生以钢筋混凝土为工具，充分发挥并表现了其工业化和可塑性等特征，对现代建筑的发展产生了极其深远的影响。

1.3 塑料

早在 19 世纪中叶，硝酸纤维制品就已出现^{[4][52]}。最早的合成塑料——酚醛塑料是 1907 年由比利时血统的美国化学家贝克兰研制出来的。第二次世界大战以后，高分子合成工业迅速发展，使塑料在工业和民用建筑上的应用日益广泛。为了提高塑料制品的强度和柔韧性，在塑料中加入了某些纤维制品，如玻璃纤维等，制成各种高强薄膜材料，常见的有 PVC 类、PTEE 类及有机硅类，用以制造充气结构和其他张拉结构等。

在世界博览会上，塑料作为一种新兴材料和处于不断改良中的产品，出现在 20 世纪早期的展品中。而真正作为建筑材料，而且以表现其材料性能的建筑出现在 1967 年蒙特利尔世博会上，是由德国建筑师奥托设计的前西德馆。这座采用索膜结构的建筑首次登场就给人以耳目一新的感觉，并以新颖的外形吸引了全世界的关注。至此，塑料建材作为一种重要的建筑材料，广泛使用在历届世博会大型建筑中，也为世博会建筑增添了亮丽的一笔。

2 革命性的建筑结构的设计

随着社会的发展，人们对于大尺度空间的需求日益剧增。作为

世博会建筑，既需要空间开阔，也要求建造便捷，这使得西方传统砖石结构方式不再适合。而如何发挥好当时新兴建筑材料的特性，来创造出满足需要的新的结构方式成为当时急需解决的难题，这也促成了近代建筑结构科学的迅猛发展。

2.1 三铰拱结构

对于拱结构的应用不仅历史悠久，而且很早就达到了很高的水平。古代阿拉伯谚语说：“拱从来不睡觉。”17 世纪末，虎克开始研究拱的受力性质，提出拱的合理形式应和倒过来的悬索一致。而直到 19 世纪初，克拉贝隆和拉梅为建造圣伊隆克教堂的穹顶和桶拱进行研究之后，人们才开始认识到铰点的存在，这才出现了三铰拱的设计。

1851 年伦敦水晶宫的单个跨度并不大，最大一跨仅 21.6m。1855 年巴黎万国工业博览会上，“产业宫”采用了半圆形拱式桁架结构，长 192m，跨度达到 48m，是当时世界上跨度最大的建筑物。1867 年巴黎第二届世博会上，由 J·B·克兰兹带领年轻的埃菲尔设计的机械陈列室也同样采用了金属拱结构，但跨度只有 35m。

为庆祝攻陷巴士底狱 100 周年，1889 年巴黎第三次举办了世界博览会。在这次被誉为 19 世纪最重要的展会上，出现了一座钢和玻璃搭建的 20 世纪前跨度最大的建筑——机械馆。设计者是最终获得罗马大奖的 Ch·L·F·杜特。这座巨大的建筑物运用当时最先进的钢制三铰拱结构和技术，使其跨度达到 115m，长度达到 420m。

由于机械馆的成功，使三铰拱结构得到了近乎完美的诠释，从此成为博览会上时常出现的钢制大跨度结构。

2.2 薄壳结构

虽然人们对于鸡蛋壳这种天然壳体结构早就充满好奇，但直到 1923 年在德国的耶纳才第一次建造了圆形薄壳屋顶结构。

随着钢筋混凝土技术的成熟，其壳体结构由于省材和覆盖面积大而被世人推崇。特别是扭壳结构具有结构空间小、屋面面积小、能充分利用混凝土的抗压特性、合理用材、材尽其用的特点。与球壳相比，它既是双曲，又能做到横向曲率不变，大大便利模板施工，并可创造出优美的外部造型和素雅明朗的室内空间，具有良好的技术表现力和低廉的造价，所以亦被世博会看好。如 1958 年布鲁塞尔世博会上由柯布西耶参与设计的飞利浦馆，采用扭壳拱墙屋顶结构，其平面由各种曲线构成，高低错落的墙面及屋顶均为扭壳，充分展现了混凝土的塑性表现力，建筑造型非常生动。该届博览会的问讯亭也采用了曲边扭壳结构，这种曲边扭壳的边缘构件不仅承受

轴向力，还承受一定的弯矩。由于扭壳四周边缘均向里转，使之获得了轻盈的反拱造型。而土木工程馆无疑是该届博览会体现钢筋混凝土特性最为壮观的结构，它的悬挑超出 80m 的“巨型箭头”给人以非凡的震撼力。

2.3 网架结构

网架的概念是由德国工程师施维德勒首创。1863 年，他为一个直径 30m 的煤气罐设计了钢网壳，这种网壳形式后来被称为“施维德勒穹窿”。20 世纪 60 年代以后，由于钢材供应的充分保证、杆件连接技术的突破，以及网架的高次超静定结构的研究进展，尤其是电子计算机开始用于建筑设计，使得网架结构开始真正意义上得到发展和应用。

1948 年美国工程师富勒从易于制作与装配的角度出发，探讨穹顶结构的规则划分和装配架设方法，提出了用于穹顶结构的短线网格结构形式，该成果是其著名的“少费多用”原则的集中体现。1967 年，富勒采用他创造的穹窿结构体系设计建造了加拿大蒙特利尔世界博览会的美国馆。该馆直径 67m，高 61m，整个建筑以较少的材料造成轻质高强的屋盖，轻巧地覆盖着整个展馆空间。由于采用了三角形金属穹顶结构，使杆件规格最少，结构用料最省，网肋规格相当整齐，便于施工和装配，很好地满足了世博会建筑的要求，成为该届世博会的标志建筑，同时也让全世界了解了网架结构的无穷潜力。时值今日，网架结构因其跨度与经济性已成为大规模空间的首选结构之一。

2.4 悬索结构

悬索结构的概念古已有之，多用于桥梁上，直到十九世纪末，随着现代钢材的成熟，才开始实际运用于建筑中。1917~1919 年，英国人就提出缆绳承受张力的大扇形屋顶结构体系^{[5]428}。二十世纪三十年代开始，建筑师开始探索这种结构方式的表现力。1933 年美国芝加哥博览会的汽车馆采用了直径为 60m 的圆形平面悬索结构，是当时世界上最大的悬索结构。1937 年巴黎世博会的圆形大

厅采用类似自行车车轮的屋盖结构，其辐射式钢索是靠中央圆环的自重绷紧。这种探索到 1958 年的布鲁塞尔世博会上发展到了一个新的高峰，有多个国家的展馆都采用了这种结构。美国馆的屋盖采用圆形双层悬索结构，而法国馆是由两个紧靠的蝶形悬索结构构成的展览大厅。两个对称蝶形悬索结构的承重索与稳定索锚同在钢桁架边缘构件上，用于平衡屋顶重量的悬臂钢梁以 45° 斜角外伸 65m。双向正交索网构成 1.3m 见方的正方格，上铺钢板，再做保温层及油毡防水层。外墙为钢化玻璃及聚酯塑料板，用钢管吊挂在屋顶边缘的构件上，对索网起预应力作用。该建筑是二战后悬索结构中最具表现力的建筑之一。

这两个展馆代表了当时大跨度研究的领先水平，也对这种结构形式起到了很好的宣传和促进作用。从那以后，悬索结构得到了更大的发展，成为当今主要的大跨度结构方式之一。

2.5 膜结构

早在 1917 年，英国人 W·兰彻斯特首次提出气承式帐篷的设想，但直到 1946 年，美国人 W·勃德才首次制成一座直径 15m 的充气穹窿。后来，德国建筑师 F·奥托将皂膜原理应用于膜结构设计中，取得了很大的进展。

1970 年日本大阪世博会上，由 D·盖格设计的美国馆成为充气式膜结构的代表。其平面是 140m×83.5m 的椭圆形室内充气结构，膜材料为玻璃纤维敷聚氯乙稀涂层制品。由于该结构采用椭圆形环梁和斜对角索网约束，大大减小了环梁的弯矩，使得建设投资预算大幅度节省（总造价 290 万美元）。其次，是由日本建筑师川口卫设计的充气梁式拱结构的日本富士馆。其平面是直径 50m 的圆形，由 16 根直径 3.3m、高 72m 的充气管拱，通过圆形的钢筋混凝土环梁把它们固定在一起，而各管拱间再由 0.5m 宽的环形水平带将它们相互固定。可以说，1970 年的大阪世博会是把膜结构屋顶系统地、商业地向外界介绍的开始，标志着弹性结构向柔性结构转化的开端，是建筑业的一个转折、一次革命。



1958年布鲁塞尔世博会飞利浦馆



飞利浦馆及结构示意图



1967年蒙特利尔世博会美国馆



1933年美国芝加哥世博会汽车馆



1958年布鲁塞尔世博会美国馆



1958年布鲁塞尔世博会法国馆



1970年大阪世博会美国馆



1970年大阪世博会富士馆

3 革命性的建筑设备的发明

建筑作为众多技术的综合产物，与各种相关技术的发展和进步有着密切的联系，每一次重大的发明与革新都会在建筑上有所体现，尤其是各种建筑设备的出现，直接作用并改变了建筑的面貌。以下仅以电梯和空调为例进行说明。

3.1 电梯

随着人类对于建筑高度的不断追求，建筑内部的升降设备设计成为阻碍其发展的技术瓶颈。早期的升降机使用蒸汽动力，而且多用于仓库运送货物。直到 1853 年，美国人奥蒂斯发明了第一座配有保险装备的载人升降机，并在 1853 年的纽约世博会上成功展出，之后有了世界著名的奥蒂斯电梯公司。1857 年他们为纽约的哈瓦特公司安装了世界上最早的乘客用升降机，之后又研制出高速水压动力升降机和使用电力的真正意义上的“电梯”，并在 1893 年的美国芝加哥世博会上展出了最早商品化的电梯。随后在 1889 年的巴黎世界博览会上，埃菲尔巧妙地结合了当时最新的研究成果，使登上 300m 的高空变得轻松自如。到了 1900 年的巴黎世博会，另一种和电梯相关的设备——电动自行车道也投入了使用，使得世博会的展览环境更具现代化和人性化。

电梯的出现使得大规模的摩天大楼成为可能，最终深刻改变了现代城市的面貌。而见证了这一重大变革的世界博览会，它的规划布局和展览方式也发生了潜移默化的改变。

3.2 空调

1902 年美国工程师威利斯·开利发明了可以控制空气温度和湿度、改善空气循环和通风的调节设备，也就是今天我们所熟知的空调，并于 1915 年与其他 6 位工程师投资 32 600 美元创办了 Carrier Engineering 公司。1922 年，他们的产品首次在美国的一家剧院面对公众，两年后为底特律的一家百货商场安装了空调。两年后，他们的产品出现在 1926 年美国费城世博会上。1950 年，

随着窗式空调的投入生产，它作为 20 世纪最重要的发明之一，改善了人们的生存环境，并完全改变了人们的生活方式。

4 革命性的建筑辅助设计方法——计算机的运用

在人类智力解放的道路上，电子计算机的出现无疑是一个重大的里程碑。1946 年世界上第一台电子计算机出现在美国；1963 年计算机辅助建筑设计 CAAD 系统研发成功^{[6]448}；80 年代个人电脑普及；90 年代中期世界范围商业网络迅速成熟和发展，涌现出了一系列反映数码时代特征的建筑概念，如：信息建筑、数码建筑、虚拟建筑和超建筑¹等。2000 年，在普利茨奖颁奖会上，得主荷兰建筑师瑞姆·库尔哈斯更是发出了近乎危言耸听的预言，“……在数十年也许近百年来，我们的建筑学遭受到了极其强大的竞争，……我们在真实世界难以想象的社区正在虚拟空间中蓬勃发展。我们试图在大地上维持的区域和界限正以无以察觉的方式合并，进入一个更直接、更迷人和更灵活的领域——电子领域。……我们仍沉浸在砂浆的死海中。如果我们不能将我们自身从‘永恒’中解放出来，转而思考更紧迫、更当下的问题，建筑学不会持续到 2050 年。”^[7]

从 1970 年大阪世博会开始，计算机技术广泛应用于规划和建筑设计中。以该届的美国馆设计为例，由于引入 CAAD 系统，大大缩减了设计和建造的周期。尤其是在结构设计中，经过计算机的反复验算，将结构尺寸减至最小。既解放了人脑，又缩减了建设资金，并最终获得轻盈的建筑空间效果。此后计算机逐渐成为建筑师必不可少的辅助设计工具，帮助建筑师实现着过去难以想象的梦想。

5 2010 上海世博会场馆的技术革新

中国 2010 年上海世博会以“城市，让生活更美好”为主题，充分反映了我国乃至全球未来城市发展的趋势，响应了城市经济和社会全面、协调、可持续发展的理念，同时也是创新性的建筑技术实践的集中展示。

5.1 新的建筑材料的运用

日本馆圆润可爱的造型源自于 ETFE 双层膜气枕结构，这是一种附着力极小的新材料，自洁性大大优于玻璃。分布在结构表面的水喷雾系统在气枕表面持续喷洒，形成一层流动的水膜，在带走热量的同时也使膜表面真正做到一尘不染，时刻晶莹剔透。膜表面的水膜流经陷入壳体内部的呼吸柱汇集到地下水池，经纳豆菌水处理技术净化处理后循环使用。

德国馆主展厅外围护结构采用了双层结构的设计。主结构外侧首先是由一层 100 厚的彩钢夹芯板（包括屋面板）包裹，具有保温、防水、防火及保护内部结构的功能。在夹芯板外侧还有一层膜（PVC 穿孔材料），该层膜由次结构支撑，包裹出建筑复杂的三维造型，



电梯发明人奥蒂斯



空调发明人威利斯·开利



2010年上海世博会日本馆



2010年上海世博会德国馆



2010年上海世博会瑞典馆



2010年上海世博会意大利馆



2010年上海世博会芬兰馆

不仅具有装饰的作用，同时具有透气、遮阳的功能，对提高建筑整体的热工性能具有很好的辅助作用。

瑞典馆使用了一种主动式和智能型涂料——反射隔热涂料。当这种涂料涂在建筑外墙上后，一旦受到阳光照射刺激，就会立即将阳光中所藏有的主要热量的红外线部分光线反射掉。

意大利馆外墙采用了“透明混凝土”，这种加入了玻璃纤维的混凝土材料利用各种成分的比例变化达到不同透明度的渐变，能够在不同场合发挥不同的功能，不论白天还是夜晚都可以感知建筑内外部的温度、湿度等，特别适合展览性建筑的建造。其最明显的特点是可以透过墙体看到另一面的景象，墙体的不同部位设置不同透明度的这种板材，从外面看上去，在三面环绕水系和玻璃幕墙的映衬下，整个建筑如梦如幻，如同分裂的马赛克，晶莹闪耀，体现了不同地区的多元文化。

芬兰馆采用生态回收材料——纸塑复合板，该材料用塑料、泡沫和纸张构成，是一种新型纸塑复合材料，表面坚硬耐磨，水分含量低，自重轻，不褪色。

5.2 新的结构形式的运用

德中同行之家展馆采用竹结构体系。展馆主要支撑结构是 24

组向上张开的 4 根竹竿组成的倒金字塔形构架。竹材生长速度远优于木材，如果获得广泛使用可以大量减少对树木的砍伐，是典型的可持续建材。同时竹文化在中国源远流长，它所具备的坚韧典雅的精神内涵广受认同。

荷兰馆开辟了单排柱支撑的环绕式连续钢箱梁体系。沿着街道这条空间曲线中轴布置了巨型连续箱梁和支承箱梁的单排钢管桥柱，组成了“简单”的复杂空间结构。为了保证建筑物安装完成后与地面垂直，支撑建筑物的挑梁设计预起拱，同时在挑梁上安装支架，在建筑物安装到位后，通过调整支架高度，使建筑物保持水平。

阿联酋馆结构设计在自由形体部分采用单层空间网壳并使用了可拆卸的节点。一个节点连接 6 根角度不同的钢杆，整个建筑除了轴对称因素，没有一个节点和杆件完全相同，而计算机模型提供了这种精确加工的可能。此外，外幕墙亦全部采用可拆卸、可组装方式设计，通过编号系统保证未来重新组装的可能。

5.3 新的建筑设备的运用

世博会主题馆在结合建筑造型的基础上，将光伏发电单元与建筑屋顶完美结合，创造了亚洲最大的装机容量为 2.8 兆瓦的光伏建筑一体化并网发电系统。



2010年上海世博会德中同行之家展馆



2010年上海世博会荷兰馆



2010年上海世博会阿联酋馆



2010年上海世博会主题馆



2010年上海世博会瑞士馆



2010年上海世博会台湾馆

日本馆采用日本最新研制的超薄太阳能电池板系统作为建筑的辅助能源供应,这种电池板超薄且可弯曲,在贴附在膜结构表面吸收太阳能的同时,也减少了辐射到建筑内部的热量。

瑞士馆屋面边缘垂挂而下的 16m 高的红色金属幕帷并非只是一层建筑表皮肌理那样简单,它的金属表面上依附大量植物树脂材料合成的光电煤质,在太阳光的照射下将太阳能转换成电能并存储起来,通过芯片的控制,光能源可为幕帷上的 LED 照明系统提供充足的能源。芯片、存储片、LED 照明系统都被浇筑在这层半透明的植物树脂合成材料之中,就像是琥珀一样剔透可见。植物树脂材料可以被降解,不会对环境造成污染,充分体现了可持续发展的理念。

注释

1 最早由美国建筑师马科斯·诺瓦克 (Marcos Novak) 提出。

参考文献

- [1] L.本奈沃洛[意]著,邹德侗,巴竹师,高军译.西方现代建筑史.天津科学技术出版社,1996.
- [2] 吴焕加.20世纪西方建筑史.河南科学技术出版社,1998.
- [3] 《中国大百科全书·土木工程》卷.
- [4] 高达声,汪广仁等.近现代技术史简编,中国科学技术出版社.

以台湾馆为代表的各国场馆大量使用了 LED 照明系统。由于其耗电极小,并且在彩色光、动态照明方面的优势,在城市建筑照明领域越来越受重视,尤其在建筑景观照明中得到广泛的应用。整个园区 80% 以上的夜景都采用了 LED 照明系统。

6 结语

世界博览会作为建筑学历史上不容忽视的一页,对于近现代建筑学的发展起着深刻的影响和促进作用。世界博览会力求展示现阶段世界科技文明领域最前沿的研究成果,决定了每一届世博会都是最新科技的斗秀场,而建筑科技在其中占了相当的比重。每届世界博览会都是一个阶段建筑技术发展的集中回顾和总结,同时也为我们提供了未来建筑技术发展的新趋势,预测了未来建筑发展的方向。AT

- [5] 中国科学自然科学史研究所近现代科学史研究室.20世纪科学技术简史.科学出版社,1985.
- [6] 刘先觉.现代建筑理论——建筑结合人文科学自然科学与技术科学的新成就.中国建筑工业出版社,1999.
- [7] 朱涛.信息消费时代的都市奇观——世纪之交的当代西方建筑思潮.建筑学报,2000(10).

作者简介

戚鑫,同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司同励设计院二所建筑一室主任,上海市建筑学会会员,一级注册建筑师。2005年硕士毕业于同济大学。担任上海嘉定保利大剧院、瑞金宾馆新接待大楼及贵宾楼(超五星级宾馆)、上海嘉定保利商业文化中心(凯悦酒店)多个项目的专业负责人,主创设计的浦东世纪花园办公楼获2010年度国家鲁班奖和上海市白玉兰奖及2011年度上海市优秀工程设计一等奖、建设部优秀工程设计二等奖。