第38卷第1期 同济大学学报(自然科学版) Vol.38 No.1
2010年1月 JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY(NATURAL SCIENCE) Jan. 2010

文章编号：0253-374X(2010)01-0001-11 DOI:10.3969/j.issn.0253-374x.2010.01.001

论结构创新

沈祖炎，王烨华，李元齐

（同济大学 建筑工程系，上海 200092）

摘要：对结构创新的动力、前提和途径进行了详细阐述.指出人类社会的需求、建筑功能的不断求新、求变，成为结构创新的动力；有效地采用各个学科的先进技术，是结构创新的前提.在结构创新的途径中，结构材料的发展为结构创新提供了基础，结构体系的发展是结构创新的核心，结构功能的发展为结构创新提供了新的需求，结构施工技术的发展使结构创新得以实现，结构理论的发展为结构创新提供了理论基础，结构试验的发展则为结构创新提供了试验验证与保障.从一个结构工程创新所体现的方面、涵盖的内容和达到的效果等三个方面，对结构创新进行了科学界定.

关键词：结构创新；结构材料；结构体系；结构理论；评价标准

中图分类号：TU 3；TU 5；TU 97；TU 74 **文献标识码**：A

Structure Innovation

SHEN Zuyan, *WANG Yehua*, *LI Yuanqi*

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper presents a detailed illustration of the structure innovation(SI) in terms of its motivations, premises and approaches. The demands of human society and the continuous changing of architectural function motivate the structure innovation, and the advanced technologies of different disciplines lay a good foundation for structure innovation. Some imponant approaches to SI are also given. The development of structural material, system, function, construction, theories and tests are proposed to be the basis, the core, the new requirement, the realization, the theoretical basis and the validation of SI, respetively. At last, a scientific definition of SI is given from the perspective of its reflection, contents and effects involved in a project.

Key words: structure innovation; structural material; structural system; structural theory; evaluation standard

当前，我国正在进行着几乎是世界上最大规模的工程建设，这一建设高潮还会随着我国全面建设小康社会的进程而持续相当长的一段时间.这种持续的、大规模的工程建设，为结构工程的发展，特别是为结构创新能力的提升，提供了历史性的机遇[1].随着我国社会经济的发展与科学技术的进步以及人民物质文化生活需求的不断提高，工程建设日趋多样化、复杂化，这给结构工程带来了很多新的挑战，也提出了更高、更新、更广的要求.在这种形势下，结构工程在理论上和实践中都出现了一定程度的创新.而关于结构创新，它的内涵是什么？什么力量促使它产生与出现？具体体现在什么方面？相信这些问题都是结构工程的工作者在设计和研究中会思考的问题.笔者围绕这几个方面做一些探讨，期望能够给结构工程的工作者以启示，激发人们的创新热情，使结构工程技术在发展中不断提升结构创新的能力.

1 结构创新的动力、前提和途径

1.1 结构创新的动力

谈到结构创新，人们不禁要问：是什么促使人类在建筑结构上不断创新？结构创新的动力是什么？结构创新来源于人类社会的需求.随着文化、经济水平的不断提高，人类对构成自身生存环境的建筑物的建筑需求、建筑功能等不断求新、求变，而这种求新、求变以及随之而来的安全问题必将对建筑结构带来新的要求和挑战，也因此成为结构创新源源不断的动力.

1.2 结构创新的前提

建筑往往被认为是技术与艺术的结合，与建筑造型关系最为重要的是结构技术.结构技术的发展

收稿日期：2009-04-01

基金项目：国家自然科学基金重点资助项目(50638050)

作者简介：沈祖炎(1935—)，男，教授，博士生导师，中国工程院院士，主要研究方向为高层钢结构、大跨度空间钢结构、轻型钢结构的非线性设计理论、抗震和稳定分析等.E-mail:zyshen@tongji.edu.cn

会带来新形式、新功能的需求,并产生新的审美观念,而这些需求又同时促进结构技术的发展.

从20世纪70年代开始,世界工程领域就出现了学科交叉.随着现代建筑的发展,各学科的相互交流、各领域的相互渗透,已经成为必然的趋势[2].结构工程在吸收和融合工程力学、计算机技术、材料学、机电控制、信息工程、智能技术等学科的先进技术和在多个学科的交叉融合下,出现了很多创新.

材料领域的成果促进了各种新型材料的发展,结构工程应用这些成果,促成了新材料结构体系的应用和发展;机电和控制学科的成果,信息与通信技术、计算机仿真技术、传感技术的成果,为结构工程实现各类现代使用功能和结构功能提供了技术条件;计算机技术和工程力学理论的发展,为结构工程进行结构创新提供了强有力的保证,使得一些新型结构体系得以实现,使设计效率与工程质量得以大幅度提高.因此,能够有效地采用这些学科的新成果是结构工程创新的前提.

结构工程与其相关学科的联系如图1所示.

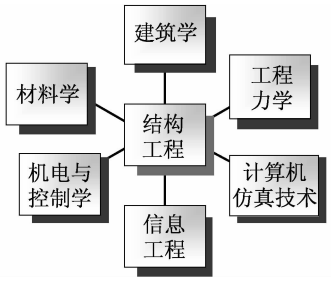


图1 结构工程与其相关学科

Fig.1 Structural engineering and other related specialties

1.3 结构创新的途径

结构创新的途径无外乎源自理论研究和工程实践两大方面.从大范围来看,主要体现在结构材料、结构体系、结构功能、结构理论、结构试验和施工技术等几个方面;小的方面,结构的节点与构件等同样也能够体现创新.从更为广义的角度,用成熟的理论与技术去解决工程实践中的新问题,也是一种创造性的劳动.因此,结构创新的领域非常宽阔.总之,工程实践的创新与发展推动了理论研究的进步,而理论研究成果的进步指导完善了工程实践.这是结构工程科学得以不断创新与发展的规律.

结构材料的发展和进步往往会使结构工程发生质的变化[2-4],为结构体系、结构承载能力和结构理论的创新提供了基础.结构理论和结构试验的发展为结构体系和结构功能的创新及其完善和持久提供了指导和技术支撑.施工技术的发展使结构创新变成了现实.以上几个方面相互促进,共同发展(图2).

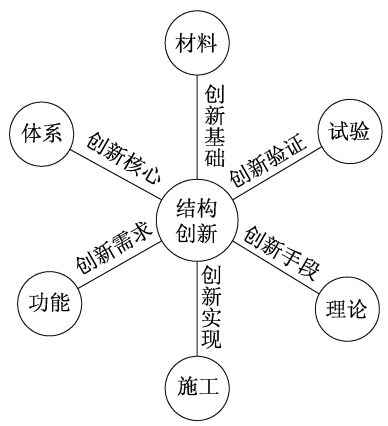


图2 结构创新途径示意图

Fig.2 Schematic diagram of the approaches to structure innovation

2 结构材料的发展与结构创新

建筑结构材料大致经历了土、木、石→钢筋混凝土与钢→新型轻质高强材料的发展过程.进入21世纪,建筑材料的发展趋势具有三个重要特征:功能化,可持续发展化和多样综合化[5].新型材料充分吸收了现代技术精华,把结构工程引入一个全新阶段.

2.1 传统材料的改良

当前,建筑结构工程中应用最为广泛的建筑材料仍然是工业革命后发展起来的混凝土和钢材.混凝土作为第一大建筑材料,钢材作为第二大建筑材料,都在向着高性能化方向发展.能显著提高混凝土结构耐久性的高强、高性能混凝土,在实际工程中的应用正在增多;可满足建筑高层化和大跨距发展需求的高强度等级钢材和超厚板钢材,可提高结构抗震性能的低屈强比钢和极低强度钢,可提高大厚度钢板焊接性能的高效焊接钢,可提高钢结构抗火性能和防腐、耐久性能的耐火、耐候钢,也已研发成功,并应用在一些实际工程中.

表1列出了高性能材料在一些超高层建筑和超大跨度建筑中的应用实例.

2.2 玻璃材料

玻璃是第三大建筑用材料.二十几年来,随着各种钢化玻璃的产生,结构工程师利用玻璃的结构功能,将玻璃作为主体结构材料,进行了崭新的设计和应用研究[6].图3为其中的一些工程实例.

表 1　国内外高性能混凝土和钢材在超高层、超大跨建筑工程中的应用

Tab.1　Application of high performance concrete and high performance steel in super high-rise buildings and super large-span structures in China and foreign countries

工程名称	建成年份	新材料	等级	备注
美国西雅图双联广场	1988	高强混凝土	135 MPa	56 层，226m
马来西亚吉隆坡双塔石油大厦	1998	高强混凝土	100 MPa	88 层，452 m
中央电视台新台址主楼（CCTV 主楼）	2008	高强度钢材	Q420	51 层，44 层，234 m
上海环球金融中心	2008	高强混凝土 超厚板钢材	C60 最厚 100 mm	101 层，492 m
奥运会国家体育场“鸟巢”	2008	超厚板钢材 高强度钢材	最厚 110 mm Q460	顶面呈鞍形，长轴 332.3 m，短轴 296.4 m，最高点高度 68.5 m，最低点高度 42.8 m

2.3　合金材料

合金材料（如不锈钢、铝合金、铝镁锰合金等）作为结构主体构件材料的研究和应用，也取得了较大的进展[6]．图 4 为其中的一些工程实例．

a 北京植物园　　b 九寨沟国际会议度假中心　　c 德国慕尼黑机场

图 3　玻璃结构

Fig.3　Glass structure

a 上海科技馆　　b 上海国际体操中心　　c 荷兰丰田博物馆

图 4　铝合金结构

Fig.4　Aluminum alloy structure

2.4　高分子复合材料

碳纤维 FRP（fiber reinforced polymer）复合材料已在工程中大量应用，在结构加固中相当普及，并取得了良好的经济效果，在新建结构中的应用也在逐渐增多．膜材料从聚酯纤维的 PVC、玻璃纤维的 PTFE 到无纤维的 ETFE，其研究和应用取得了令人瞩目的成果．结构工程师将高强度钢索和膜材结合，创造了许多新颖、合理和经济的结构体系[6]．图 5 为其中的一些工程实例．

从以上内容可以看出，结构材料的发展是结构创新的基础．

a 汉城奥运会体操馆　　b 上海八万人体育馆　　c 美国庞提亚克银色穹顶

图 5　膜结构

Fig.5　Membrane structure

3 结构体系的发展与结构创新

著名的结构专家托罗哈(Torroja, E.)曾说过:最佳结构有赖于其自身受力之形体,而非材料之潜在强度.这就是说,采用高强度材料只解决了问题的一个方面,还必须寻找形体合理的结构,使其能够充分发挥材料的潜力[7].相应于建筑结构材料大致经历了"土、木、石→钢筋混凝土与钢→新型轻质高强材料"的发展过程,建筑结构体系的发展大致经历了"受压为主→受拉为主→组合(拉压组合)→多功能"的路径.这里,针对近几十年来发展比较活跃的多高层结构体系、大跨度结构体系进行说明.

3.1 多高层结构

城市人口集中、用地紧张以及商业竞争的激烈化,促使了现代多高层建筑的出现与发展.随着房屋由低层到高层的发展,在风荷载和地震作用下,房屋的抗侧力问题逐渐成为关键因素.为了提高房屋的抗侧力刚度,结构的体系不断创新和发展.

1885年,美国用钢框架结构体系建成了世界上第一幢现代钢结构高层建筑——10层高的家庭保险大楼(Home Insurance Building);12年后,美国又用钢筋混凝土框架结构建成了第一幢现代钢筋混凝土高层建筑——因格尔斯大楼(Ingalls Building)[8].此后,框架结构体系沿用多年.当人们认识到轴力杆系比弯曲杆系能够更有效地抵抗水平荷载时,就创新地提出了支撑-框架结构体系.然而,当建筑很高时,由于支撑系统高宽比过大,抗侧力刚度会显著降低,因此又衍生出了抗侧刚度更强的带伸臂桁架的支撑—框架体系.与此同时,人们认识到混凝土剪力墙在水平力作用下的工作犹如悬臂深梁,其抗弯惯性矩大,能够大大提高结构的抗侧刚度,这就形成了高层建筑中的剪力墙结构体系和框架-剪力墙结构体系.1968年,100层高的约翰·汉考克中心(John Hancock Center)的建成,使结构上形成了一个新概念——将高层建筑看成一个巨大、中空、由地基升起的竖向悬臂柱,在结构上称为筒体结构体系;若既设置内筒,又设置外筒,则称为筒中筒[8].1974年,当时的世界第一高楼西尔斯大厦(Sears Tower)的建成,又将筒体结构发展为束筒体系.筒中筒和束筒结构体系减小了框筒结构剪力滞后效应,整体结构的抗侧刚度得到进一步的增强.当将高层结构体系的梁、柱、支撑扩展到数个楼层和开间,则构成巨型框架结构和巨型支撑结构等巨型结构体系.1988年建成的香港中国银行大楼,采用由杆系结构组成的巨型空间结构体系,又在一个崭新的概念上发展了筒面由斜撑桁架组成的筒体结构体系,使得高层建筑具有更大的侧向刚度.这些不断出现的创新高层结构体系,无论在建筑艺术、技术、材料、设备和施工等方面,都体现了当时世界最先进的水平.图6显示了包括钢结构、钢-混凝土混合结构在内的一些基本高层结构体系.其中,筒体结构包括框架筒体、桁架筒体、框架-核心筒、钢桁架-核心筒、筒中筒、成束筒和巨型柱-核心筒-伸臂桁架结构体系,巨型结构体系包括巨型框架结构和巨型桁架结构.对于钢筋混凝土结构,除难以具备巨型结构体系外,也具有其他结构体系,但适用高度和楼层数有所降低.其中,钢-混凝土混合结构由于充分利用钢结构和混凝土结构两类结构的优点,弥补两类结构的缺点,显示出发展的优势.

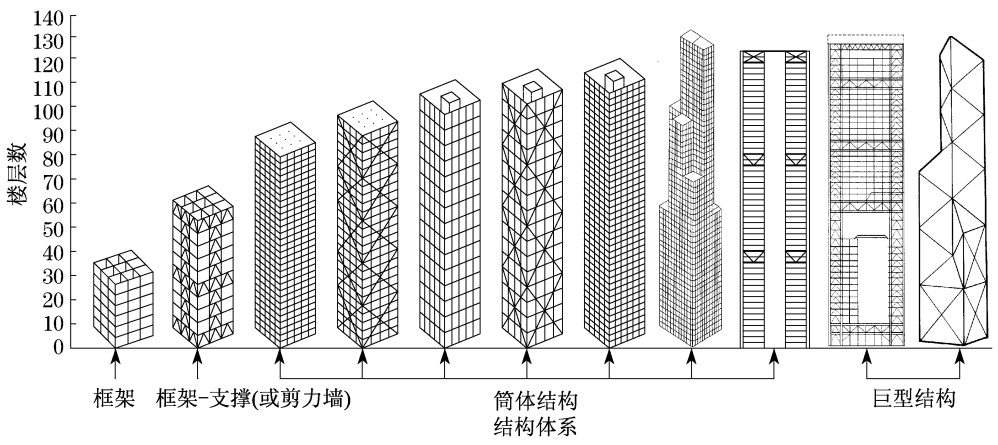


图6 基本高层结构体系

Fig.6 Basic structural systems of high-rise structures

表 2 列举了几个采用不同高层钢结构体系和钢—混凝土混合结构工程的用钢指标. 其中，香港中银大厦带斜撑的钢桁架和巨型柱，均为钢-混凝土组合构件. 金茂大厦的巨型柱、上海环球金融中心的巨型柱和巨型斜撑，也均为钢-混凝土组合构件，并与混凝土核心筒和钢伸臂桁架形成混合结构. 从中可看出，高层结构体系创新发展的特点除上述的抗侧力能力不断提高外，还有一个突出标志，就是随着抗侧力体系的高效发展，结构用钢指标在大幅度降低；同时可看出，钢-混凝土混合结构显示出良好的经济性，并得以广泛采用. 因此，用钢指标也应成为衡量一种结构体系和一个结构工程优劣的重要指标.

表 2　不同高层钢结构体系及用钢指标

Tab.2　Some structural systems of high-rise steel structures and their steel consumption per square meter

建筑名称	国家	建成年份	层数	高度/m	结构体系	用钢指标/(kg·m^{-2})
帝国大厦	美国	1931	102	381	框架结构	206[8]
世界贸易中心	美国	1973	110	412	外框架筒体结构	186[8]
约翰·汉考克大厦	美国	1970	100	344	外斜撑框架筒体结构	145[8]
西尔斯大厦	美国	1974	110	443	成束框架筒体结构	161[8]（仅相当于一般传统框架结构 40～50 层塔式建筑的用钢指标）
香港中国银行大厦	中国	1989	70	369	空间桁架结构	140[9]（若为框架体系，用钢指标达 270）
金茂大厦	中国	1998	88	420.5	巨型柱-伸臂桁架-核心筒结构	66
上海国际环球金融中心	中国	2008	101	492	巨型框架-伸臂桁架-核心筒结构	175

注：1. 金茂大厦的用钢量约 1.9 万 t[10]，总建筑面积为 29 万 m^2[11]，用钢指标为 66 kg·m^{-2}；

2. 上海国际环球金融中心的用钢量约 6.7 万 t[12]，总建筑面积为 38.2 万 m^2[13]，用钢指标为 175 kg·m^{-2}.

3.2　大跨度结构

社会的发展不断向建筑提出新的功能要求，为了实现结构的更大跨度、更经济和美观，很自然地由平面的梁、拱向平面外扩展，演变成空间结构. 相对于平面结构，空间结构具有结构形式丰富、受力合理、质量轻、造价低等优点，成为结构方面近 50 年来最活跃的研究领域. 其结构体系不断创新，理论研究同步发展.

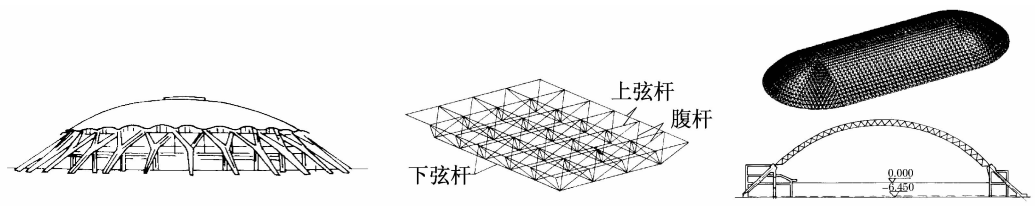
大跨度结构由早期传统的梁肋体系、拱结构体系、桁架体系、薄壳空间结构，发展到现代的以刚性杆件组成的网架、网壳等刚性空间结构体系，以索膜等柔性材料为特征的悬索结构、薄膜结构、张拉集成体系等柔性空间结构体系，由不同典型结构体系杂交组成的新的集成结构体系——杂交空间结构体系，以及可展开和可折叠结构. 其中，杂交体系可以是刚性结构之间的组合，如组合网架、组合网壳、拱支网壳等；也可以是柔性结构体系的组合，如索膜结构；以及柔性结构体系与刚性结构体系之间的组合，如拉索-网架、拉索-网壳、索-拱、张弦梁、张弦桁架和弦支网壳等[14-15]. 若按空间结构组成的基本单元，即壳单元、梁单元、杆单元、索单元和膜单元来分类，目前已有 34 类具体的大跨度结构形式[15]. 图 7 显示了其中的一些大跨度结构形式.

与高层结构体系一样，不断创新发展的空间结构新体系在其结构受力更加合理的同时，必然是体系更加经济有效，用钢指标显著下降. 近年来采用较多的膜结构，屋盖质量更轻. 巨大的英国伦敦“千年穹顶”（穹顶周长 1 000 m，直径 365 m），用钢指标仅为 20 kg·m^{-2}. 又如索穹顶结构的代表作——美国佐治亚穹顶（椭圆形平面，240.79 m×192.02 m），用钢指标不到 30 kg·m^{-2}.

从已建成的大跨度结构可以看出，其发展过程的特征是在整体上从较重向轻型体系发展，从刚性体系向柔性体系发展，并由单一的结构形式发展到各种结构形式的合理组合. 这种组合旨在集中两种或几种结构的优点，充分发挥材料强度，使结构受力更加明确合理，体系更加经济有效. 同时，采用了大量新材料、新工艺、新技术，结构体系不断创新，而且向着“柔”性化发展. 这使得结构表现出很强的非线性特征，因而每一种新结构体系的出现，都可能引出全新的问题需要解决[16]. 正因为如此，大跨度结构的发展充分反映了当代建筑结构设计计算理论和施工技术以及科学技术的发展水平，成为反映一个国家建筑科学技术水平的重要标志.

从多高层结构体系、大跨度结构体系的创新发展过程可以看出，工程中每种新的结构体系的出现，往往是在原有结构体系的基础上，结合某些新的结构概念发展起来的. 各种结构体系和设计概念相互渗透与融合，促进了结构体系的创新与发展.

从以上内容可以看出，结构体系的发展是结构创新的核心.



薄壳结构　网架结构　网壳结构

a 刚性结构体系

悬索结构　张拉膜结构　索穹顶

b 柔性结构体系

索拱结构　组合索网结构(单位:mm)　张弦桁架结构　弦支穹顶

c 杂交结构体系

图7 大跨度结构的一些结构形式

Fig.7 Some structural forms of large-span structures

4 结构功能的发展与结构创新

4.1 安装控制装置的结构

为了有效地减轻建筑结构在风、地震等动力作用下的反应和损伤累积,有效地提高结构的抗振能力和抗灾能力,结构工程领域的工作者将融合了材料、机械、传感与数据处理、计算机与控制系统等多领域高新技术的振动控制技术,应用到建筑结构中,出现了基础隔震结构、被动消能减振结构,以及主动、半主动和智能控制结构.隔震桥梁和建筑已在国内外建成了上千座;被动消能减振是继基础隔震之后走向成熟和工程应用的,国内外具有大量的工程实例.至2000年,北美已建成100余座被动消能减振建筑与桥梁;至2003年,中国也已有20余座新建或加固的被动消能减振建筑与桥梁.至2003年,国内外的主动、半主动和智能控制的高层建筑、电视塔和桥梁等大型结构已经建造70余座[17-18].这些防灾设计采用了具有创新思想的控制结构,在台风和地震作用下初步经受了考验,显示出良好的抗风和抗震性能.图8显示了国内外应用隔震和减振控制装置的一些工程实例.

4.2 安装健康监测系统的结构

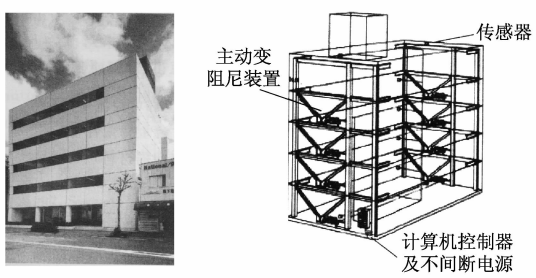
在实际使用过程中,结构会出现不同程度的损伤或性能退化.为了保障结构的安全性、耐久性和使用性,需要通过某种手段检查和监测使用中的结构性能,以评估其健康状况,必要时采取措施修复或加固.随着现代传感技术、计算机与通讯技术、信号分析与处理技术以及结构动力分析理论的迅速发展,人们提出了结构健康监测的概念.如同听诊器、X光、CT发明给人类健康带来的进步一样,结构健康监测技术也将给土木工程的建设理念带来革命性的变化.结构健康监测系统通过在结构上安装各种传感器,自动、实时地测量结构的环境、荷载、响应等,评估结构的健康状况,科学有效地提供结构养护管理的决策依据,确保结构安全运营,延长结构使用寿命[22].国内外近年新建的许多大型桥梁和我国一些大跨度空间结构,都安装了结构健康监测系统,如深圳市民中心[23]、北京奥运国家游泳中心[24]等.

4.3 具有可展开折叠、开合功能的结构

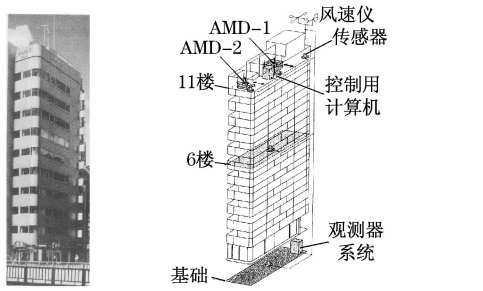
利用机电、控制、信息、传感、计算机仿真等技术,实现结构各类现代使用功能的另一个突出表现,

就是可展开、可折叠、可开合大跨度结构的建成.

可展开折叠式结构在未使用时，可收缩折叠成捆状或其他形状储存或运输，使用时，可在现场展开成型，迅速构成整体结构.该体系特别适用于中小跨度的临时性结构或流动性结构，如抗震救灾紧急需要的现场指挥部及生活用房、流动展览厅等[7].开合结构是为满足能在各种气候条件下进行体育、文艺和展览等活动的要求而产生的.开合屋盖建筑既能保证不受自然界不利气候影响，又能保持自然气息，使人们重归自然怀抱.因此，可开合结构已成为现代体育建筑的重要发展趋势.具有代表性的开合结构有：1988 年建成的、跨度 205 m 的加拿大多伦多的天空穹顶(图 9)，是当时世界上跨度最大的开合结构，为平行移动和回转重叠式的空间开合钢网壳结构；2001 年建成的日本大分体育场(2002 年世界杯足球赛赛场之一，图 10)，其直径达 274 m，开合方式为空间平行移动式，是现代开合屋盖建筑中利用刚性屋盖单元实现开合的最大规模建筑[7].我国 2006 年建成的、最大跨度达 254 m 的南通体育会展中心主体育馆(图 11)，是国内第一个采用活动开启式球冠钢屋盖的体育场，也是世界上首次将机电液压技术、移动台车多点支撑用于巨型开合结构的工程，其固定屋盖和开启屋盖均为网壳结构[25－26].有关开合空间结构移动荷载作用下的计算方法和动力反应是此类结构所特有的技术问题，需要建筑师、结构工程师和机械工程师的通力合作.

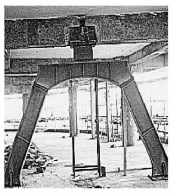


a 日本Kajima研究所办公楼(1989)[18]
(世界上第一幢应用主动变刚度控制系统的建筑)



b 日本Kyobasi Seiwa大厦(1990)[18]
(世界上第一幢应用主动质量阻尼(AMD)控制系统的建筑)

c 北京地铁地面枢纽站大面积平台上的隔震住宅楼(2001)



d 潮汕星河大厦(2003)[19] 和使用的铅粘弹性消能器

e 南京奥体中心观光塔(2004) [20] 和使用的粘滞阻尼器

f 北京通用国际时代广场(2005) [21] 和使用的防屈曲消能支撑

图 8　应用控制装置的工程实例

Fig.8　Some engineering practices with the installation of control device

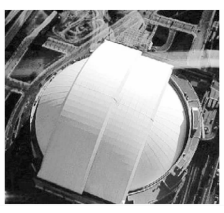


图 9　加拿大多伦多天空穹顶

Fig.9　Toronto Sky Dome in Canada

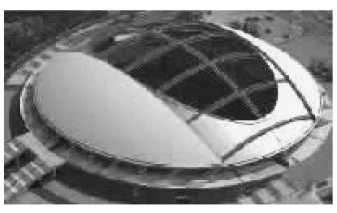


图 10　日本大分体育场

Fig.10　Ohita Dome in Japan

图 11　中国南通体育会展中心主体育馆

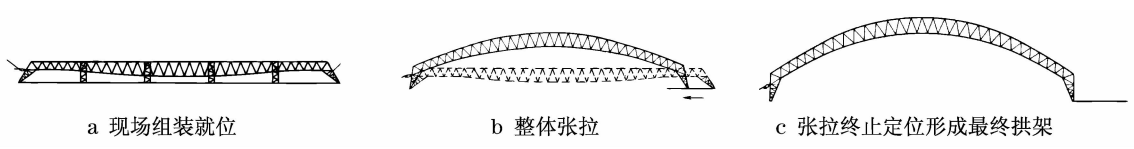
Fig.11　Retractable roof of Nantong Sport & Exhibition Center in China

从以上内容可以看出,结构功能的发展为结构创新提供了新的需求.

5 结构施工技术的发展与结构创新

随着结构材料、结构体系和结构功能的发展与创新,各种结构体系的施工技术,特别是复杂高层结构、高耸结构以及大跨度结构的施工技术,已突破传统意义上的施工方法,从单一的使用施工机械发展到机-电-计算机的一体化,并能够实现全过程自动监测和计算机控制.结构施工技术正在向着多学科、综合化、高科技的领域迈进.随着工程实践的大量进行,出现了在顶升、提升、吊升、滑移等传统施工方法的基础上创新的新技术,有的是依据结构的特点再创造,有的是几种基本方法的巧妙组合.结构施工技术的发展,使一些结构创新得以实现.如20世纪80年代,澳大利亚的科研人员提出的整体张拉预应力拱架结构STRARCH(STRessed ARCH)专利技术.其系统的核心技术,是将建筑物的施工与提升过程合为一体,一个跨度100 m左右的结构采用该项技术施工,现场张拉成形仅需一个工作日[7].STRARCH拱架的现场成形过程如图12所示.利用该项技术,世界各地已建造了80余座建筑,我国广州白云机场机库即采用了该技术.又如,著名的日本结构专家川口卫教授提出的适用于双曲率网壳的"攀达穹顶"整体施工法,已在1984年的日本神户世界纪念堂、1992年巴塞罗那奥运会主体育馆等世界上7个工程中得到应用[27].其原理是使一个穹顶在施工期间处于一种可折叠状态,组装工作尽可能地在地面完成,然后用液压顶升法把结构推举到设计标高并固定(如图13所示).我国2000年建造的河南省鸭河口电厂储煤库是目前国内跨度最大柱面网壳,该工程使用了浙江大学空间结构研究中心所提出的"折叠展开式"计算机同步控制整体提升新型施工技术[28],仅用了一个工作日,便顺利提升到位.另外,我国的整体提升施工方法和高空滑移施工方法等均具有很好的技术.如上海大剧院钢屋盖工程采用的整体提升施工技术,先在地下室顶板上拼装,然后依靠4个电梯井筒,在其上设置钢平台,以钢绞线承重、计算机控制液压千斤顶集群提升,将钢屋盖整体一次提升到位(如图14所示).该技术创造了我国建筑史上整体提升质量最大、提升速度最快、提升精度最高三项新记录[29].这些采用先进施工技术完成的结构创新,均取得了良好的社会效益和经济效益.

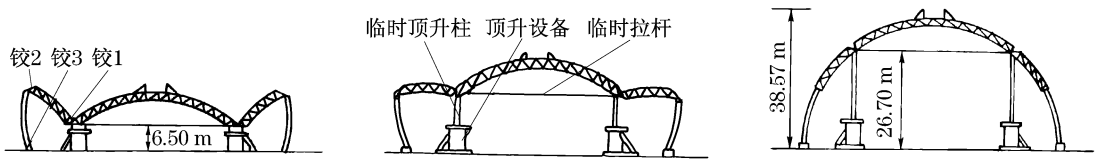
从以上内容可以看出,结构施工技术的发展,使一些需要超越常规施工技术的结构创新得以实现.



a 现场组装就位 b 整体张拉 c 张拉终止定位形成最终拱架

图12 STRARCH拱架的现场成形过程

Fig.12 Forming process of STRARCH Arc Centering



a 安装阶段 b 顶升阶段 c 最后阶段

图13 日本神户世界纪念堂施工过程

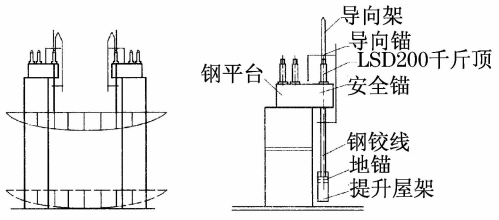
Fig.13 Construction process of Kobe in Japan

6 结构理论的发展与结构创新

随着计算机技术和有限元方法的发展,包括结构分析和结构设计在内的结构理论亦在不断发展与创新,同时给上述几个方面的结构创新提供强大的分析工具.传统材料的改良、新型材料的出现,以及结构体系与功能的发展与创新、施工过程的复杂化,均给结构分析与设计带来了新的挑战;特别是对结构单元类型多样化、数量庞大化的超高层结构和大跨度结构的分析理论及计算技术,提出了更高的要求和更新的课题.

目前,结构分析已能够超越线弹性而考虑材料非线性和几何非线性;由平面分析发展到空间整体

a 建成的大剧院实景



b 提升施工技术示意图

图 14　上海大剧院钢屋盖整体提升施工技术

Fig. 14　Steel roof integral hoisting construction technique for Shanghai Grand Theatre

和共同作用分析；已能够脱离解析解的束缚，采用数值解对结构进行仿真；不但能作静力分析，也能作动力分析；能模拟大型复杂结构施工过程中，结构局部或整体在不同阶段变边界条件、变荷载下的受力特性. 随着结构学科的进步，建筑结构在外界荷载作用下的全过程反应越来越受关注. 对于强度破坏，需深入了解结构从弹性进入弹塑性、出现塑性内力重分配，直到形成机构丧失承载能力这一整个过程的内力、应力和变形的变化情况，以及结构在丧失承载能力后的性态等. 对于失稳破坏，需了解结构在弹性失稳、弹塑性失稳过程中，力与变形的变化情况，结构在失稳后的性态，以及结构中各种初始缺陷对稳定承载力和结构性态的影响. 对于断裂破坏，需了解裂纹在结构受力过程中的出现、发展，直到结构断裂破坏等[16]. 对工程事故及对动荷载的研究表明，结构构件在反复荷载作用下存在损伤累积问题；进一步的研究表明，结构在灾害荷载作用下均存在损伤累积问题. 目前正在应用连续损伤力学解决这一问题.

结构设计理论由容许应力设计进入到基于概率理论的可靠度设计，基于可靠度理论的结构设计法从半概率法（水准一）发展到近似概率法（水准二）. 这是上个世纪结构设计理论的重大进步. 现在向着采用随机过程加以描述，并向着用概率理论对整个结构精确分析的全概率法（水准三）方向努力[30]. 进入 21 世纪之前，工程师们又在前述基础上，进一步发展了基于性能要求的设计理念. 世纪之交，结构设计理论的发展又面临着一个新的发展趋势——全寿命设计[22]. 以往的工程结构设计通常仅考虑使用阶段工程的安全性，现在，对于一些重大的工程，还需考虑使用安全以外的内容，如结构的使用功能能否得到保证、耐久性如何，以及在极端条件下的抗倒塌性能等问题，即实施考虑全“生命周期”的综合决策.

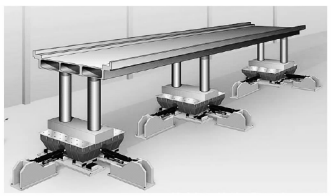
结构理论的全面发展，不但为结构创新提供了理论基础，也使结构创新更加理性和合理.

7　结构试验技术的发展与结构创新

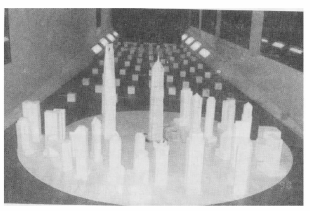
工程结构的试验技术起源于 19 世纪初. 20 世纪 60 年代中期以来，随着电液伺服加载装置的问世，结构试验开始走进现代技术的发展阶段，并以结构模拟地震加载技术、结构风洞试验技术、结构抗火试验技术为代表. 如图 15a，b，c 所示[22]. 近年来，结构试验技术的不断发展，试验设备的不断更新，使更多的科研机构有能力进行大型复杂的试验研究，并且利用互联网的远程试验技术、采用光纤等先进传感器，对结构实地实时监测，利用激光技术和数字摄影技术，对结构变形精确测量，等等[1-4].

结构试验技术的发展，对于人们研究工程结构受外部作用而变形与破坏的基本原理，发展结构分析原理与设计方法，起到了至关重要的基础作用，而且使试验研究更接近于实际结构的工作状态，为深入开展结构工程学科的研究工作创造了重要条件.

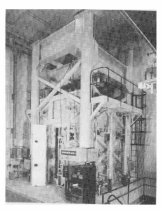
结构试验技术的发展为结构创新的安全性提供了试验验证和保障.



a 多点输入地震模拟振动台



b 风洞试验



c 结构抗火试验炉

图 15　结构试验技术

Fig. 15　Structural test technology

8　结构创新的内涵

从以上几节的阐述可以看出，一个结构工程是

否具有结构创新是可以科学界定的.它可以包括以下几个方面的考虑:

第一,应该体现在结构材料、结构体系、结构功能、结构构件、结构节点等中的一个和几个方面.

第二,应该在上述一个或几个方面有发展.例如,采用了新结构体系,提出了新结构体系的有效分析方法,对采用新材料的构件提出合理的设计方法,提出了结构抗震、抗风、抗火等防灾设计的新理念,采用了配合结构创新的新制作、安装技术和结构维护的新技术等.

第三,应具有"可持续发展"的效果.

工程师的技术创造力是无限的,但这种创造性与所处时代的工程社会责任是有关的.人类生存的危机已经需要结构工程的创新具有实现人类发展与自然和谐共生的可持续发展理念.具体来说,应该能够符合国家制定的安全、环保和耐久的政策;能够缩短建造周期;能够节省综合成本,特别是自然能源,降低总造价.

凡同时符合上述三点的,可界定为有结构创新,如不符合上述三点的,则不能界定有结构创新.因此,纯粹为了打破建筑物高度或跨度的记录,不等于结构创新;结构复杂、怪异,也不等于结构创新.真正的结构创新应该是包含创新内容且能达到积极效果的工程实践.

目前,学术界对于"创新",有"原始创新"、"集成创新"等一些术语.对于结构工程的创新来说,笔者认为:如果结构创新的成果不是通过已有的理论、方法和技术的简单组合,而是原创的,可以认为是原始创新;除此之外,可以认为是集成创新等其他创新形式.原始创新的难度是最大的,但创新程度也是最大的.但无论哪种创新形式,都需要长期的学术积累、深厚的理论基础,并具备多学科交叉融合的知识.

9 结语

从本质上讲,作为结构工程的工作者,创新应是其工作中潜意识的行为,因此,必须在工程建设中,尽可能激发这种潜意识行为并提供相应的环境.从这点上讲,需要相应的技术政策、工作环境、时间条件及激励机制,以保证实践中结构创新行为的实施.

本文通过对结构创新的动力、前提和途径的分析探讨,科学地界定了结构创新的内涵,以期能够为工程实践提供参考.由于学科知识有限,内容难免失之偏颇,恳请各界读者指正为感.

参考文献:

[1] 袁驷,韩林海,滕锦光.结构工程研究的若干新进展[C]//2006第一届结构工程新进展国际论坛.北京:中国建筑工业出版社,2006:2-7.
YUAN Si,HAN Linhai,TENG Jinguang. Some recent advances in structural engineering research[C]//Proc 1st International Forum on Advances in Structural Engineering 2006. Beijing: China Architecture and Building Press,2006:2-7.

[2] 刘西拉,袁驷,宋二祥.关于我国工程建设技术发展的战略思考[J].土木工程学报,2005,38(12):1.
LIU Xila,YUAN Si,SONG Erxiang. Strategic consideration of the development of engineering construction technology[J]. China Civil Engineering Journal,2005,38(12):1.

[3] 丁大钧,蒋永生.土木工程总论[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
DING Dajun,JIANG Yongsheng. Pandect of civil engineering [M]. Beijing:China Architecture & Building Press,1997.

[4] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部.学科发展战略研究报告(2006—2010年)·建筑、环境与土木工程Ⅱ:土木工程卷[M].北京:科学出版社,2006.
Department of Engineering & Material Science of NSFC. Report of the developmental and strategic study on architecture,environmentology and civil engineering(2006—2010)(the volume of civil engineering displine)[M]. Beijing: Science Press,2006.

[5] LI Z J,CHEN H S. The Development trend of advanced building matierals[C]//Proc 1st International Forum on Advances in Structural Engineering 2006. Beijing: China Architecture and Building Press,2006:121-206.

[6] 张其林.索和膜结构在我国的应用、发展及存在问题[C]//2006第一届结构工程新进展国际论坛.北京:中国建筑工业出版社,2006:48-78.
ZHANG Qilin. Application,development and expectation of cable and membrane structures in china[C]//Proc 1st International Forum on Advances in Structural Engineering 2006. Beijing: China Architecture & Building Press,2006:48-78.

[7] 张毅刚,薛素铎,杨庆山,等.大跨空间结构[M].北京:机械工业出版社,2005.
ZHENG Yigang,XUE Suduo,YANG Qingshang,et al. Long-span spatial structure [M]. Beijing:China Machine Press,2005.

[8] 罗福午,张惠英,杨军.建筑结构概念设计与案例[M].北京:清华大学出版社,2003.
LUO Fuwu,ZHANG Huiying,YANG Jun. Conceptual design and cases of building structures[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2003.

[9] 包世华.新编高层建筑结构[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
BAO Shihua. New edition of high-rise building structures[M]. Beijing:China Water Power Press,2005.

[10] 上海建工机施公司.钢结构施工[EB/OL].[2008-10-20]. http://www.chinasmcc.com/page5.htm.
Shanghai Mechanized Construction CO. LTD. Steel Structure [EB/OL]. [2008-10-20]. http://www.chinasmcc.com/

page5. htm.

[11] 百度百科. 金茂大厦[EB/OL]. [2008 - 10 - 01]. http://baike.baidu.com/view/25 704. htm.
Baidu Encyclopedia. Jinmao Tower[EB/OL]. [2008 - 10 - 01]. http://baike.baidu.com/view/25 704. htm.

[12] Adain. "世界第一高楼"上海环球金融中心施工纪实[EB/OL]. [2007 - 01 - 19]. http://www.build.com.cn/hangyedongtai/ShowArticle.asp? ArticleID = 1330.
Adain. Documentary Reports of Construction of Shanghai World Financial Center Named "The First Tall Building in the world" [EB/OL]. [2007 - 01 - 19]. http://www.build.com.cn/hangyedongtai/ShowArticle.asp? ArticleID = 1330.

[13] 上海环球金融中心. 建筑概要[EB/OL]. [2008 - 09 - 10]. http://www.shanghaihills.com/press/fact.html.
Shanghai World Financial Center. Outline of Building[EB/OL]. [2008 - 09 - 10]. http://www.shanghaihills.com/press/fact.html.

[14] 沈祖炎. 大跨空间结构的研究与发展[C]//那向谦，沈祖炎. 结构工程学的研究现状和趋势. 上海：同济大学出版社，1995：22 - 31.
SHEN Zuyan. Research and development of long-span spatial structure[C]// NA Xiangqian, SHEN Zuyan. Research Situation & Trend of Structural Engineering. Shanghai: Tongji University Press, 1995: 22 - 31.

[15] 董石麟，罗尧治，赵阳. 大跨度空间结构的工程实践与学科发展[J]. 空间结构，2005，11(4)：3.
DONG Shilin, LUO Yaozhi, ZHAO Yang. Practical application and research advances of long-span space structure[J]. Spatial Spaces, 2005, 11(4): 3.

[16] 沈祖炎，李国强，陈以一，等. 钢结构学[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2005.
SHEN Zuyan, LI Guoqiang, CHEN Yiyi, et al. Theory of steel structures[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005.

[17] Soong T T, Spencer B F. Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice [J]. Engineering Structures, 2000, 24: 243.

[18] 欧进萍. 结构振动控制[M]. 北京：科学出版社，2003.
OU Jinping. Structural vibration control[M]. Beijing: Science Press, 2003.

[19] 周云. 粘弹性阻尼减震结构设计[M]. 武汉：武汉理工大学出版社，2006.
ZHOU Yun. Design of structure with viscoelastic dampers[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2006.

[20] 张志强，李爱群，徐庆阳. 建筑减振粘滞阻尼器工程应用新进展[J]. 江苏建筑，2007(2)：15.
ZHANG Zhiqiang, LI Aiqun, XU Qingyang. The new development on viscous fluid dampers for vibration control of building[J]. Jiangsu Building, 2007(2): 15.

[21] 许秀珍，崔鸿超. 北京通用国际时代广场 1# 楼防屈曲耗能支撑设计[C]//第十届高层建筑抗震技术交流会论文集. 广州：中国建筑学会抗震防灾分会，2005：424 - 427.
XU Xiuzhen, CUI Hongchao. Design of No. 1 Building with buckling restrained braces in Beijing Tong-Yong Times Square [C]//The 10th High-Rise Building Seismic Technology Symposium. Guangzhou: Earthquake Disaster Preuention Chapter of Architectural Society of China, 2005: 424 - 427.

[22] 项海帆，沈祖炎，范立础. 土木工程概论[M]. 北京：人民交通出版社，2007.
XIANF Haifan, SHEN Zuyan, FAN Lichu. An outline of civil engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.

[23] 瞿伟廉，滕军，项海帆，等. 风力作用下深圳市民中心屋顶网架结构的智能健康监测[J]. 建筑结构学报，2006，27(1)：1.
QU Weilian, TENG Jun, XIANG Haifan, et al. Intelligent health monitoring for roof space truss structure of the Shenzhen Citizen Center under wind load et al[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(1): 1.

[24] 钱稼茹，纪晓东，张微敬. 国家游泳中心子结构模型损伤识别试验研究[J]. 中国科学，E 辑：技术科学，2007，37(5)：621.
QIAN Jiaru, JI Xiaodong, ZHANG Weijing. Damage detection experimental study on the substructural model of national aquatics center[J]. Science in China, Series E: Technological Sciences, 2007, 37(5): 621.

[25] 罗旭斌，马军，彭桂平. 南通市体育会展中心分叉柱底铸钢支座节点有限元分析[J]. 钢结构，2006，21(4)：46.
LUO Xubin, MA Jun, PENG Guiping. Finite element analysis of cast-steel joints at bottom of bifurcated column for center of exhibition and sports in Nantong[J]. Steel Construction, 2006, 21(4): 46.

[26] 陈以一，陈扬骥，刘魁. 南通市体育会展中心主体育场曲面开闭钢屋盖结构设计关键问题研究[J]. 建筑结构学报，2007，28(1)：14.
CHEN Yiyi, CHEN Yangji, LIU Kui. Research on the key issues about structural design of Nantong stadium retractable roofs moving along curved surface [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(1): 14.

[27] 卓新，姚纪庆. Pantadome 体系及其施工技术[J]. 施工技术，2003，32(6)：53.
ZHUO Xin, YAO Jiqing. Pantadome system and construction technique[J]. Construction Technology, 2003, 32(6): 53.

[28] 罗尧治，王轶，沈雁彬. 网壳结构"折叠展开式"施工吊点同步控制研究[J]. 施工技术 2004，33(11)：1.
LUO Raozhi, WANG Tie, SHEN Yanbin. Lifting-point synchronized control analysis of deployable lifting construction process of reticulated shell structures [J]. Construction Technology, 2004, 33(11): 1.

[29] 徐伟. 现代钢结构工程施工[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2006.
XU Wei. Modern steel structure construction[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006.

[30] 沈祖炎. 21 世纪建筑工程及技术对力学的挑战[M]//李国豪，何友声. 力学与工程：21 世纪工程技术的发展对力学的挑战. 上海：上海交通大学出版社，1999：205 - 229.
SHEN Zuyan. Challenges of development of building engineering technology to mechanics in 21 century[M]. LI Guohao, HE Yousheng. Mechanics & Engineering: Challenges of Development of Engineering Technology to Mechanics in 21 Century. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1999: 205 - 229.