

装配式建筑的系统论研究

郝际平, 薛 强, 黄育琪, 刘瀚超

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 基于一般系统论思想与理论, 结合装配式建筑特点, 提出装配式建筑系统论. 参考工程系统论研究方法, 将装配式建筑作为一个由诸多要素构成的有机整体, 这些要素通过一定的规则, 有序分层的组织联系在一起. 建立装配式建筑系统论的理论框架, 在装配式建筑系统的不同层次, 全面地运用系统理论和方法重塑装配式建筑理念, 提升装配式建筑的研究起点, 促进装配式建筑研究和应用的科学化.

关键词: 装配式建筑; 装配式建筑系统; 一般系统论; 工程系统论;

中图分类号: TU18

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)01-0014-07

Research of prefabricated building based system theory

HAO Jiping, XUE Qiang, HUANG Yuqi, LIU Hanchao

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech, Xi'an 710055, China)

Abstract: Combined with the characteristics of prefabricated building, the theory of the prefabricated building system is put forward based on the ideology and theory of the general system. According to the research method of engineering system theory, the prefabricated building system is regarded as an organic whole that consists of many elements, which are connected by regular and orderly hierarchical organization. The theoretical framework of the prefabricated building system theory is established. To promote the starting point of the study and the scientific research and application of prefabricated building, the system theory and method are used to reshape the concept of prefabricated building at different levels in all directions.

Key words: prefabricated building; prefabricated building system theory; general system theory; engineering system theory

工业革命以来, 世界各国取得了丰富的科技成果, 但也随之产生了人口爆炸、资源匮乏、环境污染等一系列问题. 21 世纪, 我国进入工业化和城镇化的快速发展期, 对能源和资源的需求亦非常迫切. 据统计^[1], 2015 年我国建筑业能源消费量占能源消费总量的 1.79%, 而同时建筑用能的温室气体排放、水资源浪费、建筑垃圾排放严重等现象日益显著, 严重影响了建筑行业和社会的可持续发展能力. 现今我国建筑业生产方式粗放、能源消耗大、技术含量低、生产效率低、对劳动力依赖度高、集约化和规模化程度低, 对环境和资源造成极大的浪费和破坏. 面对当前困局, 我国建筑行业必须顺应时代发展进行转型升级, 走可持续发展之路, 走绿色发展之路, 走工业化发展之路, 坚持建筑全生命周期的绿色化理念, 推广绿色建筑, 推进建筑产业现代化发展,

即走工业化与绿色化的发展道路, 这是我国建筑业实现转型升级的必由之路, 而装配式建筑最贴合建筑工业化与绿色化的内涵, 发展装配式建筑是建筑行业转型的最佳选择.

装配式建筑不同于传统建筑产品, 也不同于一般的工业产品, 照搬已有的经验难以形成科学的装配式建筑发展模式, 有碍于发挥装配式建筑的优越性, 影响建筑行业的转型升级. 装配式建筑不仅仅是一种建筑形式, 更是一个复杂的系统工程, 正如我国著名科学家钱学森所说: “任何一种社会活动都会形成一个系统, 这个系统的组织建立、有效运转就成为一项系统工程”.^[2] 这其中应包含两层含义: 第一层含义是从工程或实践角度来看, 这是系统的工程或实践; 另一层含义是从科学技术来看, 既然是系统的工程或实践, 那就应该用系统工程方法去处理它的生产与管理. 人们在

收稿日期: 2018-04-22

修改稿日期: 2019-01-15

基金项目: 国家十三五重点研发计划子课题(2017YFC0703806); 陕西建设厅重点项目(2016-K86)

第一作者: 郝际平(1959—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢结构抗震研究和教学工作. E-mail: haojiping@xauat.edu.cn

通信作者: 黄育琪(1989—), 男, 博士生, 主要研究多高层钢结构装配式建筑体系. E-mail: huangyuqi_1989@163.com

工程或实践中遇到复杂问题时往往注意到了第一层含义, 却忽视用系统工程方法去解决问题, 从而造成了什么都是系统工程, 但又没有真正用系统工程的思想去解决问题的局面。单用现有的研究方法已经无法满足装配式建筑多层次、多领域、多学科融合的特点, 本文另辟蹊径, 从系统论的思想, 运用系统工程的方法研究装配式建筑这一系统。

1 系统论概述

系统一词起源于古希腊语, 原意是指事物中共性部分和每一事物应占据的位置, 即部分构成整体的意思。一般系统论的创始人冯·贝塔朗菲(Ludwig Von Bertalanffy)把系统定义为“相互作用的诸要素的综合体”^[3], 并强调必须把有机体当作一个整体或系统来研究, 才能发现不同层次上的

组织原理。美国著名学者阿柯夫(Ackoff)认为: 系统是由两个或两个以上相互联系的任何种类的要素所构成的几何^[4]。我国著名科学家钱学森认为: 系统是相互作用和相互依赖的若干组成部分结合的具有特定功能的有机整体。^[5]

大型复杂系统天然地具有复杂性(图1), 特别是各种应用型人工系统, 由于具有酝酿、设计、研制周期长, 涉及相关学科专业多, 性能指标体系庞杂, 组织管理任务繁重, 受运作机制、社会意识、经济和政治因素影响等特征, 因此无论在人力、物力、财力还是时间成本上都需要很大的投入。而对于此类复杂系统, 客观上迫切要求应用系统思维对其进行综合分析、系统设计管理及系统评价, 把握系统客观规律, 以提高系统设计和运行水平, 这是系统论存在的客观要求。

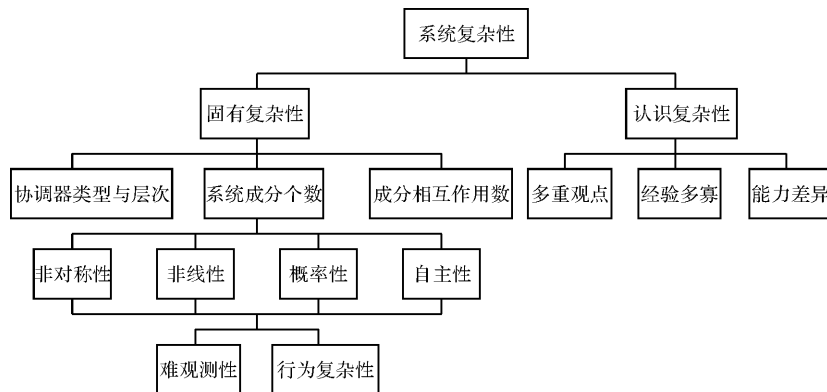


图1 大型复杂系统的复杂性分类

Fig. 1 Complexity classification of large complex system

系统论给人们提供一种科学的思维方法, 即系统思维方法。系统思维, 就是把研究对象作为一个系统整体进行思考、研究, 强调从系统的整体出发, 注重对事物的全面思考, 使人们的思维方式从时空分离走向时空统一, 从局部走向整体, 从离散方法走向系统方法。

2 装配式建筑的系统论构架

钱学森指出: 系统论是整体论与还原论的辩证统一^[6]。在应用系统论方法时, 也要从系统整体出发将系统分解, 在分解后研究的基础上, 再提炼综合到系统整体, 实现系统的整体突现(whole emergence), 最终从整体上研究和解决问题。为处理系统问题, 人们第一步所应做的工作(起步工作)是要把具体问题抽象为一个具体系统问题, 即完成系统识别和系统描述^[7]。本文以装配式建筑内容和特征为基础, 结合装配式建筑信息流、管理流和工作流, 将装配式建筑系统分解为如图2所示的六个

子系统。由图2可见, 这六个子系统分别是:

(1)装配式建筑对象系统: 对象系统是用户(包括中间顾客和最终用户)所期望的产品, 这类产品包含两种存在形态, 第一种是概念的对象系统, 即接触客观现象时, 在其头脑中显示出的各式各样的概念对象。第二种是实现的对象系统, 即真实呈现给用户的客观对象。装配式建筑对象系统包含以下四类子系统: 主体结构系统、设备管线系统、建筑围护系统和装饰装修系统。这四类子系统下又包含各自的子系统, 如图3所示^[8]。

(2)装配式建筑技术系统: 技术系统是装配式建筑中的技术活动及其全部方法和原理的有机集合体。在系统层次上, 不同活动技术领域内使用的系统方法和原理之间存在着时空联系, 它们之间存在一定程度的逻辑依赖性。基于此原理, 绘制装配式建筑技术系统空间剖面图, 如图4所示。图中的双向箭头表示技术系统不同指标之间的逻辑相依关系。

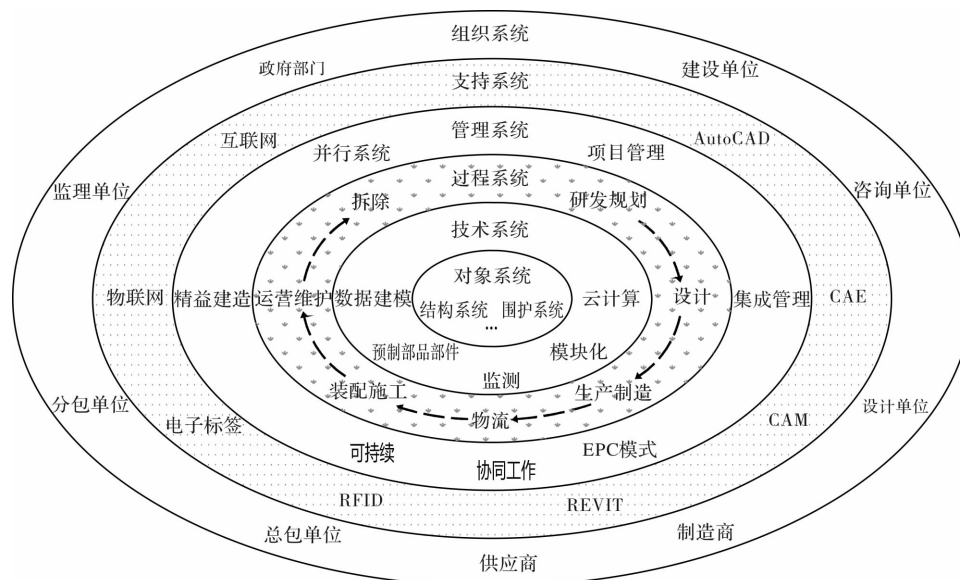


图 2 装配式建筑系统结构图

Fig. 2 Structural diagram of prefabricated building system

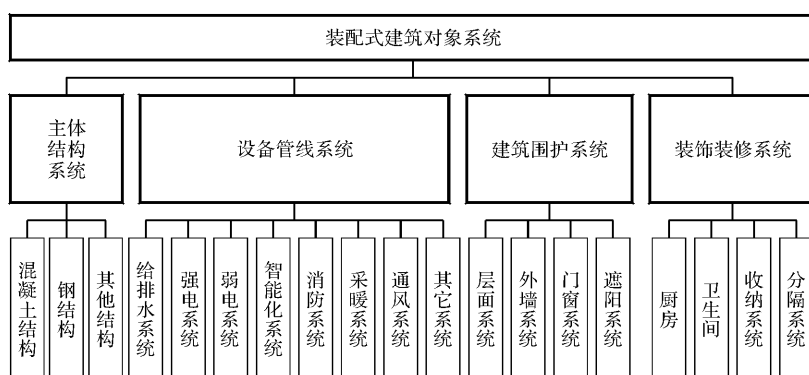


图 3 装配式建筑对象系统图

Fig. 3 Object system diagram of prefabricated building system

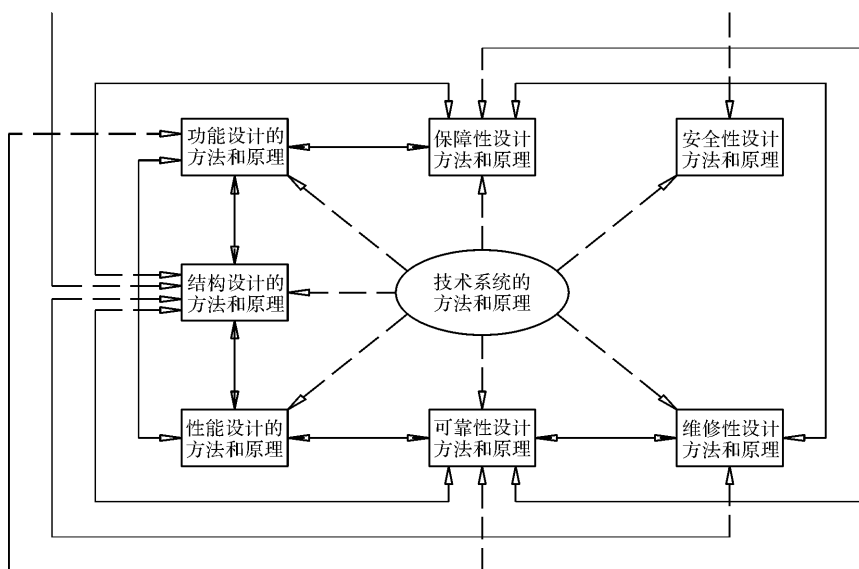


图 4 装配式建筑技术系统图

Fig. 4 Technical system diagram of prefabricated building system

(3) 装配式建筑过程系统: 概念的对象系统经由过程系统转换为实现的对象系统. 装配式建筑过程系统包含三大组成部分: 装配式建筑对象系统活动过程系统、装配式建筑支持系统活动过程系统和装配式建筑管理系统活动过程系统. 由于工程系统的主要目标之一是获取用户需要的对象系统, 因此在过程系统中, 对象系统活动过程系统在整个过程系统中占据支配地位, 它在一定程度上决定其他两个过程系统的体系应用, 是整个过程系统的中心. 本文所研究的过程系统即为装配式建筑对象系统的活动过程系统, 装配式建筑过程系统体系如图 5 所示.

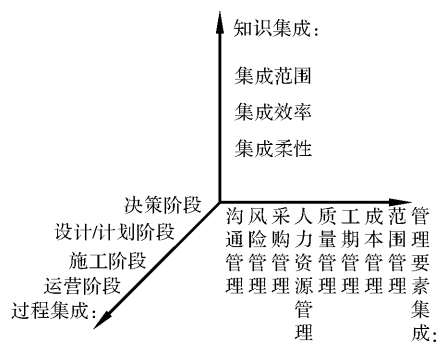


图 5 装配式建筑过程系统体系

Fig. 5 Process system of prefabricated building system

(4) 装配式建筑管理系统: 装配式建筑过程具有不同于传统建筑过程和一般加工制造业过程的复杂性, 相应的装配式建筑管理系统也体现出复杂性. 管理作为生产力支配性要素, 在当代社会生产力发展阶段通常是社会生产力系统诸要素中最重要的要素^[9]. 管理系统是整个装配式系统的协调器, 与技术系统相比, 管理系统更重要. 对于许多大型复杂系统工程案例分析表明, 造成工程失败的主要原因大部分不是技术上的失误, 而是管理决策上的失误. 管理系统涉及到装配式建筑过程系统中的各个环节, 所以管理系统的复杂性是多种复杂性的综合体.

鉴于管理系统的复杂性, 涉及到方法论、认识论, 难以通过某一两种方法解决, 有必要根据装配式建筑系统各要素间的特性和联系的本质属性, 采用集成化管理装配式建筑. 通过集成化管理实现科学化管理. 集成化管理以建设项目全生命周期为对象, 以运营期目标为导向, 采用组织、经济、信息和技术等手段, 综合考虑项目管理各要素间的协调统一, 实现项目各阶段的有效衔接, 注重各阶段和各参与方的知识运用, 从而实现项目效益的最大化^[10]. 集成化管理包含三个维度(图 6), 分别是管理要素维度、管理过程维度和知识维度.

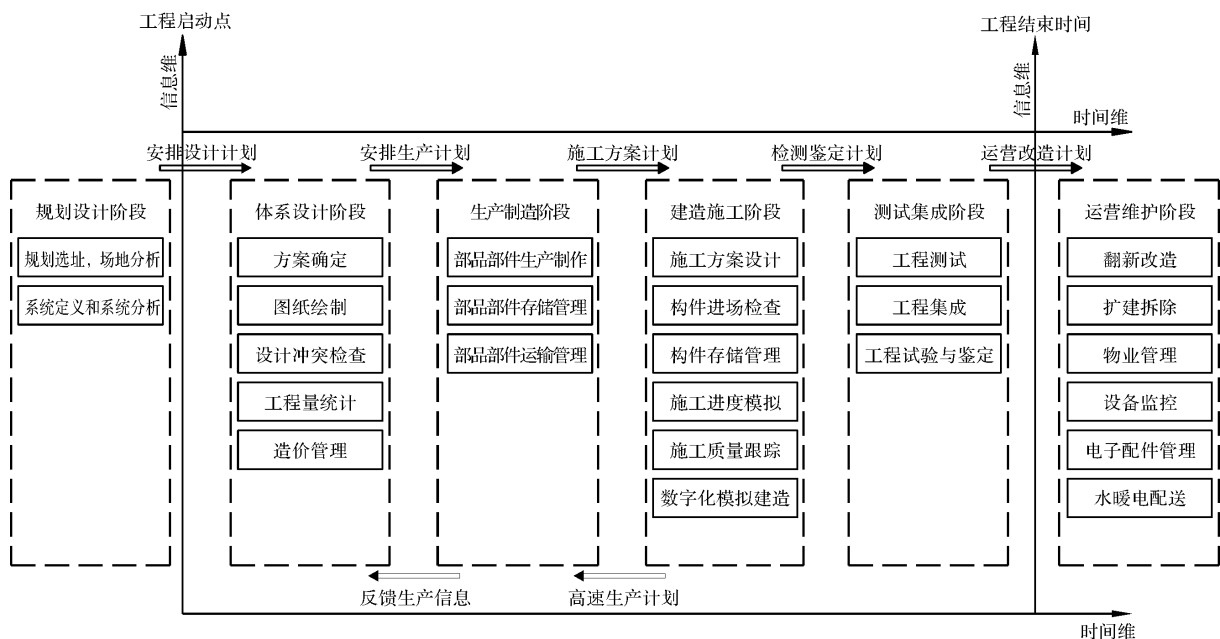


图 6 装配式建筑集成化管理系统维度

Fig. 6 Integration dimension of prefabricated building management system

(5) 装配式建筑支持系统: 支持系统是工程组织进行工程技术活动和工程管理活动所要求的全部支持活动和工程手段的有机集合体. 支持系统

是除工程人员之外的另一生产力关键要素. 当且仅当使用适当而有效的装配式建筑支持系统去解决装配式建筑系统的问题时, 才可能获得最高的

工程效率。装配式建筑支持系统的支持能力和水平不仅是判断最后实现的装配式建筑对象系统可能达到的能力和性能水平的基础,而且是鉴定装配式建筑系统与时俱进的重要标志。装配式建筑支持系统日新月异的更新速度要求参与的组织人员及工程人员摆脱传统建筑业习惯的束缚,以不

断更新的支持系统迎接日益复杂的装配式建筑对象系统所提出的新挑战。本文采用工程系统分解结构(Engineering Breakdown Structure, EBS)方法^[11],按功能和专业将装配式建筑支持系统分解为一定细度的工程子系统并形成树状结构,如图7所示。

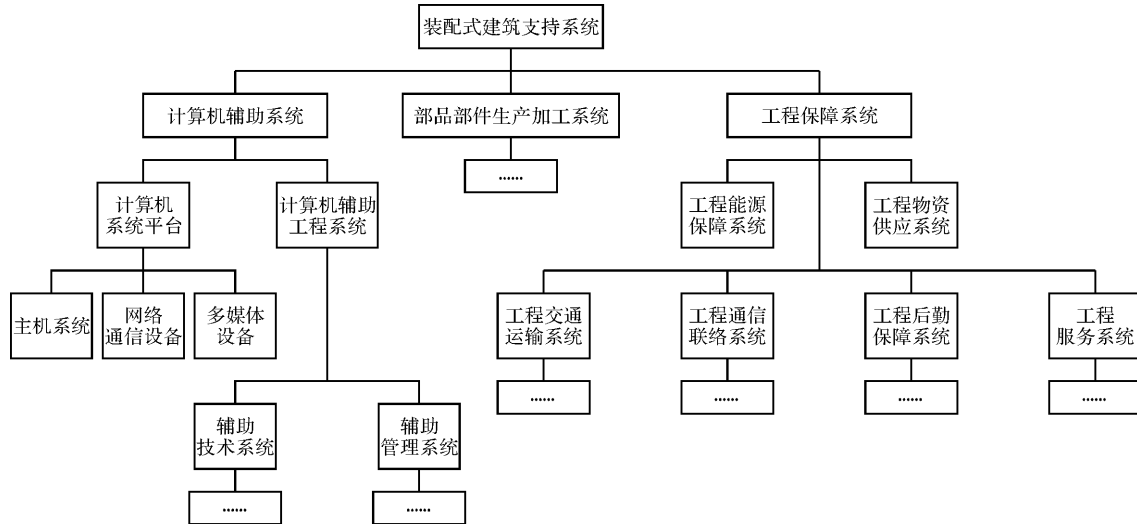


图7 装配式建筑支持系统的体系结构

Fig. 7 Components and architecture of prefabricated building support system

(6)装配式建筑组织系统:组织系统是直接从事工程技术活动、管理活动和支持活动的组织。装配式建筑项目有多个参与方,他们拥有各自领域的能力和知识。各个参与方都在实施自己的项目管理,他们之间应该形成有机的协同匹配,参与方的人员目标需与装配式建筑对象系统的大目标相适应,尽量减弱直至消除争执或冲突,从而实现对象系统的优势聚变,求得“最优”的系统问题解^[12]。装配式建筑组织系统格局见图8和图9。

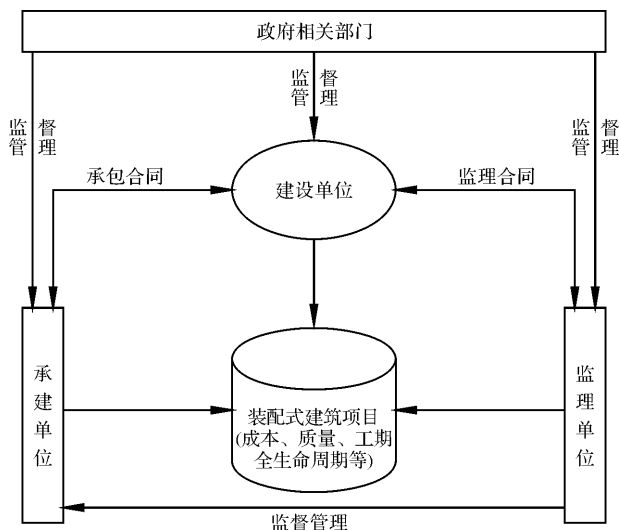


图8 装配式建筑组织系统格局一

Fig. 8 Pattern 1 of prefabricated building organization system

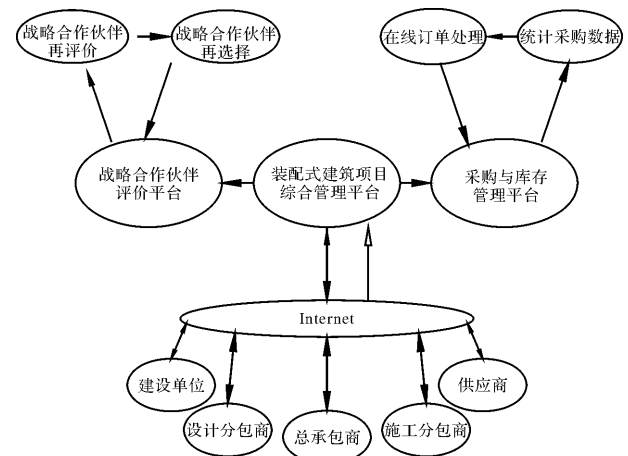


图9 装配式建筑组织系统格局二

Fig. 9 Pattern 2 of prefabricated building organization system

3 装配式建筑系统论的可行性

国内外尚无将工程系统论和一般系统论应用于装配式建筑的先例,在这方面的研究领域很宽。装配式建筑体系作为一项大型复杂系统,与系统科学联系非常密切。装配式建筑体系的技术和方法贯穿着系统科学的基本思想,它的核心思想是将装配式建筑作为一项工程产品推向市场,把功能需求计划、可行性研究和工程质量监督等理念引入装配式建筑的设计、生产和建造中,以期

获得项目三项基本要素(进度、综合成本和工程质量)的综合最佳。

装配式建筑的研发和生产建造过程具有酝酿、研发、设计周期较长, 涉及相关学科门类多, 知识面宽, 系统指标体系庞杂, 组织管理任务重, 且受运作机制、参与人员素质、市场环境诸多因素影响等特征, 因此客观上极为迫切的需要应用系统科学思想对其进行综合性管理及评价, 从而给出装配式建筑系统范式, 把握系统内在的客观规律, 促进装配式建筑研发、生产及建造水平。基于此, 装配式建筑体系研究中引入系统论的原理是完全可行的。

采用一般系统论和工程系统论来研究装配式建筑研发及其建造过程中遇到的理论和实践问题, 具有举足轻重的科研和实际意义, 然而建立装配式建筑系统论面临的障碍较大, 既有来自于技术方面的, 也有思维方面的。首先, 由于装配式建筑系统并不是连续系统, 而属于离散系统, 系统中的某一因子出现数据改变时, 离散系统可能出现较大反差, 从而体现出装配式建筑系统的稳定性相对较差。此外, 一方面, 二十世纪以来, 还原论作为人类认识世界的一项有效武器, 其具有的强大思维惯性使很多工程技术和管理人员把还原论绝对化, 对装配式建筑中出现的问题采用还原论思维处理。另一方面, 为保证系统的完整性, 系统思维需要相关工程组织在行动上协同, 而一部分工程组织人员可能为追逐自身利益, 企图局部垄断和控制工程, 拒绝与其他工程组织协同, 或向业主隐瞒工程真相, 并阻碍系统论的传播和应用。因此, 装配式建筑系统论还需要经历一个发展完善及普及的过程, 才能真正实现装配式建筑系统论的科学化、工程化和产业化。

4 装配式建筑系统论的实现方法

自 20 世纪 70 年代末以来, 钱学森一直在大力推动系统工程在我国社会主义现代化建设各个领域的运用, 我国的航空航天工程就是按照系统工程的原则组织管理, 并取得了显著成就。航天器产品的设计制造要经过两个环节, 第一个环节是分解, 即把一个航天器分解成若干个分系统, 分系统再分解到子系统, 子系统的设计又涉及到多个学科, 这一分解过程被称为 WBS 工作分解^[13]; 第二个环节是集成, 合理的分解是产品成功的必要条件而非充要条件, 多学科的系统工作完成一个子系统的设计, 多个子系统要组成一个分系统,

多个分系统才最终组成一个航天器产品, 这个过程就是集成。

航空航天工程作为一项由很多子系统组成的大型复杂系统, 设计研发人员碰到的问题的 70%~80% 来自于系统分解及集成, 也就是说在系统分解和信息传递过程中发生了错误, 并不是真正由于技术上的问题解决不了。^[14]

为合理解决信息传递问题, 对产品研发的全过程进行合理控制, 可以把有关的人员集合在一起进行产品设计。最早提出这一思想的是美国国防部 IDA Report R-338 报告, 报告中给出了并行工程的定义: “并行工程是一种系统方法, 用之对产品及其相关过程, 包括生产和支持, 进行集成化并行设计。此方法可以使开发者从一开始就考虑到产品全寿命周期(从概念到报废)的各个方面, 包括质量、成本、计划和用户要求”。并行工程最成功的一个实践案例就是波音 777 飞机的设计制造。波音公司同时组织 238 个团队采用数字化设计后, 解决了 3 000 个设计干涉问题, 减少了 90% 的更改单、50% 的时间和 90% 的重大返工, 而使飞机机身装配的精度提高了 50 倍。

类似的软件及硬件环境, 在国内经常出现。实际上我们使用“并行工程”的频率也非常高, 但大多数情况是项目前期时间没有合理安排, 在后期临近项目交付节点时, 任务完成出现了较大的困难, 在被迫无奈时, 紧急集中起来一大批相关人员成立“临时救火队”, 待问题解决之后“临时救火队”就散了。美国国防部 IDA 提出的并行工程就是把被动变主动, 规定在型号设备研制中必须用系统方法进行集成化并行设计, 这是我们有待学习和改进的。

如上文所述, 装配式建筑系统是由相互作用和相互依赖的六个子系统结合成的具有特定功能的复杂系统, 需要多学科的大量人员协同工作才能实现。这样一种复杂系统工程所面临的基本问题是: 如何才能将笼统的装配式建筑预期功能要求逐步分解为大量参与人员的具体工作, 以及如何把这些具体工作最终集成为一个技术合理、经济合算、工期可控的可协调运转系统。如此复杂的总体协调工作要求“指挥团队”能精通装配式建筑所涉及的所有专业知识, 单独一个人难以精通全部专业知识, 也不可能有足够的时间和精力来完成海量的技术协调工作。在航空航天系统工程的工作推进中, 我国国防尖端技术科研部门就建立了这样一支“指挥团队”, 即“总体设计部”^[15-17]。

借鉴航空航天系统工程的成功经验,在装配式建筑系统工程的实施中,可组建“装配式建筑系统设计部”(以下简称“系统设计部”)来实现系统工程的分解和集成工作。系统设计部设计系统的总体方案,不承担具体部件的设计,是整个装配式建筑系统的技术抓总单位,对子系统中的所有技术要求都首先从实现整个装配式建筑系统技术协调的观点来考虑。系统设计部需要研究各子系统之间的矛盾、子系统与系统之间的矛盾,并从整体协调的首要需求来制定解决方案,再由子系统具体去实施。

5 结语

运用系统论来研究装配式建筑及其在推广应用过程中遇到的理论和实践问题,具有重要的学术理论意义和工程实际意义。但是装配式建筑系统属于多学科结合的具有特定功能的复杂系统,所研究的子系统都是离散系统而并非连续系统,欲建立完整的装配式建筑系统论,面临的困难和阻力不少。本文在工程系统论和航空航天系统工程研究与应用经验的基础上,将装配式建筑系统分解为六个子系统,并分析了装配式建筑系统论可行性,最后提出组建装配式建筑系统设计部来承担系统工程的总体协调工作思路,以期构建装配式建筑系统论的科学理论框架,提升装配式建筑的研究起点,从而促进装配式建筑应用的系统化和科学化。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 国家数据[EB/OL]. [2016-12-31]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
National Statistics Bureau of the People's Republic of China. National Data [EB/OL]. [2016-12-31]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [2] 钱学森. 创建系统学(新世纪版)[M]. 上海:上海交通大学出版社,2007.
QIAN Xuesen. Establishment of systematics (New Century Edition) [M]. Shanghai: Shanghai Jiao tong University Press, 2007.
- [3] 冯·贝塔朗菲. 一般系统论:基础、发展和应用[M]. 北京:清华大学出版社,1987.
Ludwig Von Bertalanffy. General system theory: foundations, development and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1987.
- [4] 汪应洛. 系统工程理论、方法与应用[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
WANG Yingluo. Theory, method and application of system engineering [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [5] 钱学森. 论系统工程(新世纪版)[M]. 上海:上海交通大学出版社,2007.
QIAN Xuesen. System engineering (New Century Edition) [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2007.
- [6] 王连成. 工程系统论[M]. 北京:中国宇航出版社,2002.
WANG Liancheng. Engineering system theory [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2002.
- [7] 于景元. 从系统思想到系统实践的创新:钱学森系统研究的成就和贡献[J]. 系统工程理论与实践,2016,36(12):2993-3002.
YU Jingyuan. Innovation process from systems thinking to systems practice: In memory of QIAN Xuesen [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2016, 36(12):2993-3002.
- [8] 樊则森. 运用“系统工程”思维发展装配式建筑[J]. 建筑,2017(10):10-13.
FAN Zesen. Developing assembled architecture with the thought of “system engineering” [J]. Construction and Architecture, 2017(10):10-13.
- [9] 齐守印. 管理是最重要的生产力:论管理在生产要素中的地位 and 作用[J]. 管理世界,2000(3):205-206.
QI Shouyin. Management is the most important productive force: on the position and role of management in various elements of productivity [J]. Management world, 2000(3):205-206.
- [10] 李红兵. 建设项目集成化管理理论与方法研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2004.
LI Hongbing. Research on theory and methodology of integrated management for construction projects [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004.
- [11] 成虎,韩豫. 工程管理系统思维与工程全寿命期管理[J]. 东南大学学报(哲学社会科学版),2012,14(2):36-40,126.
CHENG Hu, HAN Yu. Engineering management system thinking and engineering life cycle management [J]. Journal of Southeast University (Philosophy and Social Science), 2012, 14(2):36-40, 126.
- [12] 韩明红,邓家祺. 复杂工程系统多学科设计优化集成环境研究[J]. 机械工程学报,2004(9):100-105.
HAN Minghong, DENG Jiati. Study on integrated framework of multidisciplinary design optimization for complex engineering system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(9):100-105.
- [13] 于海顺,赵娜,史妍妍,等. 航空发动机工作分解结构(WBS)构建方法[J]. 航空发动机,2018,44(3):97-102.
YU Haishun, ZHAO Na, SHI Yanyan, et al. Research on aero engine work breakdown structure [J]. Aeroengine, 2018, 44(3):97-102.

- 17(1): 25-31.
XIE Shaodong, ZHOU Ding, YUE Qixian, et al. Effect of simulated acid rain phase and pore structure of mortar strength of the material[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1997, 17(1): 25-31.
- [6] 周骏一. 模拟酸雨对乐山大佛基岩影响及其防治对策[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(1): 79-84.
ZHOU Junyi. Effect of simulated acid rain and countermeasures Leshan Giant Buddha bedrock[J]. Geological Hazards and Environment, 2005, 16(1): 79-84.
- [7] 崔振昂, 鲍征宇, 张天付, 等. 埋藏条件下碳酸盐溶解动力学实验研究[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(3): 204-207.
CUI Zhenang, BAO Zhengyu, ZHANG Tianfu, et al. Experimental study of carbonate dissolution kinetics under burial conditions[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(3): 204-207.
- [8] 冯夏庭, 赖户政宏. 化学环境侵蚀下的岩石破裂特性——第一部分: 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 403-407.
FENG Xiating, MASAHIRO SETO. Rock fracturing behaviors under chemical corrosion-Part 1: experimental study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 403-407.
- [9] 霍润科. 酸性环境下砂浆、砂岩材料的受酸腐蚀过程及其基本特性劣化规律的试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
HUO Runke. Experimental study on sandstone by acid etching process and the basic laws of property degradation of sandstone material under acidic environments [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.
- [10] 霍润科, 李静, 辛宏伟, 等. 酸雨环境下砂岩的物理化学性质变化规律分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(02): 165-170.
HUO Runke, LI Jing, XIN Hongwei, et al. Regularity analysis on corrosion progressive and physical-chemical characteristic of sandstone subjected to Acid Rain [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2016, 48(2): 165-170.
- [11] HUO R K, LI S G, HAN F, et al. CT Analysis on Mesoscopic Structure of Sandstone under Acidic Environment[J]. Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 2018, 47(5), 962-971.
- [12] HUO R K, LI S G, DING Y. Experimental Study on Physicochemical and Mechanical Properties of Mortar Subjected to Acid Corrosion[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018:1-11.
- [13] LI S G, HUO R K, WANG B, et al. Experimental Study on Physicomechanical Properties of Sandstone under Acidic Environment[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018:1-15.
- [14] 刘建, 乔丽萍, 李鹏. 砂岩弹塑性力学特性的水物理化学作用效应——试验研究与本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 20-29.
LIU Jian, QIAO Liping, LI Peng. Experimental studies and constitutive model of elastoplastic mechanical behaviors of sandstone with hydro-physico-chemical influencing effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 20-29.
- [15] 唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破坏过程数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 22-24.
TANG Chunan, WANG Shuhong, FU Yufang. Numerical test of rock failure [M]. Beijing: Science Press, 2003: 22-24.
- [16] 杨更社, 谢定义, 张长庆. 岩石损伤 CT 数分布规律的定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 279-285.
YANG Gengshe, XIE Dingyi, ZHANG Changqing. A quantitative analysis of rock damage CT number distribution[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(3): 279-285.
- [17] 张全胜, 杨更社, 任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 30-34.
ZHANG Quansheng, YANG Gengshe, REN Jianxi. New study of damage variable and constitutive equation of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 30-34.

(编辑 桂智刚)

(上接第20页)

- [14] 中国航天系统科学与工程研究院研究生管理部. 系统工程讲堂录(第二辑)[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
Graduate Management Department, China Academy of Space Systems Science and Engineering. Lecture Notes on Systems Engineering (Part 2) [M]. Beijing: Science Press.
- [15] 钱学森, 许国志, 王寿云. 组织管理的技术: 系统工程[N]. 文汇报, 1978-09-27(1).
QIAN Xuesen, XU Guozhi, WANG Shouyun. The Technology of Organizational Management-System Engineering [N]. Wenhui Daily, 1978-09-27(1).
- [16] 钱学森. 用科学方法绘制国民经济现代化的蓝图[J]. 未来与发展, 1981(3): 5-7, 20.
QIAN Xuesen. Drawing the Blueprint of National Economic Modernization by Scientific Method. [J]. Future and Development, 1981(3): 5-7, 20.
- [17] 钱学森. 社会主义建设的总体设计部: 党和国家的咨询服务工作单位[J]. 中国人民大学学报, 1988(2): 10-22.
QIAN Xuesen. General design department of socialist construction-consulting service unit of the party and the state [J]. Journal of Renmin University of China, 1988(2): 10-22.

(编辑 桂智刚)