

毕雪皎¹ 杨 崑² 陈泽民³ 李奇莞⁴

1, 2, 3, 4. 天津大学; 1. shinb@tju.edu.cn; 2. walker_yang@tju.edu.cn; 3. chenym_arch@163.com; 4. qiyan_li@tju.edu.cn

基于 BIM 的小型形态可变建筑生命周期评价*

摘 要: 形态可变建筑可以利用变形构件, 在建筑使用阶段对环境变化做出响应, 更好地利用气象因素。但变形构件存在生产难度高、物化阶段对环境的影响较大、难以批量生产等问题。因此, 有必要从生命周期角度分析形态可变建筑, 综合评价其环境性能。建筑信息模型能够整合建筑在建造、运行和拆解过程中的相关数据, 减小建筑全生命周期评价的工作量和误差。本文基于建筑信息模型, 使用能耗模拟软件 DesignBuilder 和生命周期环境影响计算插件 Tally, 针对一座太阳能小住宅建筑, 在南向围护构件可变和固定两种情景下, 分别进行测算。通过比较使用过程中的建筑耗电量、光伏发电量, 以及建筑相关的隐含能耗和碳排放, 综合评价形态可变建筑的生命周期环境影响。结果表明, 形态可变建筑在使用过程中, 各项指标明显优于普通建筑, 普通建筑的建筑材料生命周期环境影响比可变建筑小, 但综合考虑建筑运行能耗和建筑材料的环境影响后, 形态可变建筑仍然具有优势, 如果把发电净结余也考虑在内, 优势还会进一步扩大。因此, 形态可变建筑在生命周期环境性能方面是优于普通建筑的。

关键词: 形态可变建筑; 建筑信息模型; 全生命周期; 环境影响评价

引言

在建筑领域, 形态可变建筑是一种独特的建筑类型, 指在设计阶段就考虑了多种可能性, 能通过可变体系来改变自身形态, 对外部环境条件或使用者需求的变化做出积极回应的建筑^[1]。20 世纪 60 年代, 美国建筑师弗里德曼提出, “可变性”是建筑的基本原则, 建筑在设计时应留有能够被拆除和被移动的“即兴”部分^[2]。90 年代, 利物浦大学的教授开始了对“可活动环境”这一课题的探讨研究, 认为建筑的形式应该响应环境的变迁, 满足不同范围的需求^[3]。此外, 还有许多建筑师对动态建筑的研究与实践虽然并未形成体系, 但他们的作品成为了建筑设计结合前沿技术元素的代表, 具有很高的价值, 如迈克尔·伽特泽的风力旋转公寓, 卡拉特拉瓦的瓦伦西亚天文馆等。近几十年来, 随着科学技术的发展, 新的技术和材料不断被应用到建筑中, 可动构件的生产工艺日趋成熟, 极大地拓展了建筑形态变化的可能性, 越来越多的形态可变建筑由概念走向现

实。形态可变建筑的发展呈现出智能化水平越来越高、建筑性能越来越强、绿色特征越来越鲜明的趋势。

虽然与传统建筑相比, 形态可变建筑在使用过程中对气象因素的利用率更高, 但与此同时, 形态可变建筑在物化阶段对环境的影响及造价也更高, 在形态变化时需要能源驱动, 可变构件也存在着损坏的风险。因此, 需要从全生命周期的范畴来考察形态可变建筑的环境影响才能更全面的评价。

建筑生命周期评价 (LCA) 需要研究建筑从材料生产到最终拆除的全部阶段所产生的环境影响, 计算量较大, 若采用传统的向文本格式文件中录入信息的方式进行计算, 将存在录入耗时长、实时性差、数据可靠性低等问题。建筑信息模型 (BIM) 是一种 3D 实时动态软件工具, BIM 中的建筑模型包含图形与非图形数据信息, 不仅可以导出项目的材料清单在其他的软件中进行分析, 还可以根据分析结果实时更改模型, 重新进行模拟。基于 BIM 进行建筑的 LCA 分析, 更易被建筑从业者掌握, 既可以节省大量时间, 又能有效减少计算中的错误。

* 本研究获得以下项目资助: 国家自然科学基金项目: 51478294, 51628803; 天津市应用基础与前沿技术研究计划项目: 15JCYBJC49000。

因此，本研究使用基于 BIM 的建筑 LCA 评价方法对史蒂文斯理工学院设计建造的小型形态可变住宅“SU+RE House”进行分析，比较同一建筑原型在南向围护构件固定与可变两种情景下的生命周期环境效益。

1 基于 BIM 的建筑 LCA 评价流程及工具

BIM 工具种类繁多，本研究使用 Autodesk Revit 软件建立 SU+RE House 的建筑信息模型，在建模过程中通过编辑族构件将设计信息储存在 3D 模型中。然后使用 KT Innovations 公司开发的 Revit 插件 Tally^[4]从建

筑模型中提取族信息，定义难以明确建模的材料（如粘合剂、涂层等），依托美国生命周期清单数据库和全球性数据库 Gabi 为构件进行附加的数据链接，并对在 Revit 中设置的南向围护构件固定与可变的两种设计选项进行比较。DesignBuilder 是一款针对建筑能耗动态模拟程序 EnergyPlus 开发的可视化模拟软件，使用 Revit 建立的较简单的模型可以直接导入 DesignBuilder 中，能够结合建筑所在地的气象数据对建筑的采暖、制冷、照明、通风、采光等进行全能耗模拟和经济分析^[5]。DesignBuilder 的模拟结果可以输入 Tally 中，用于计算建筑运行阶段的环境影响。

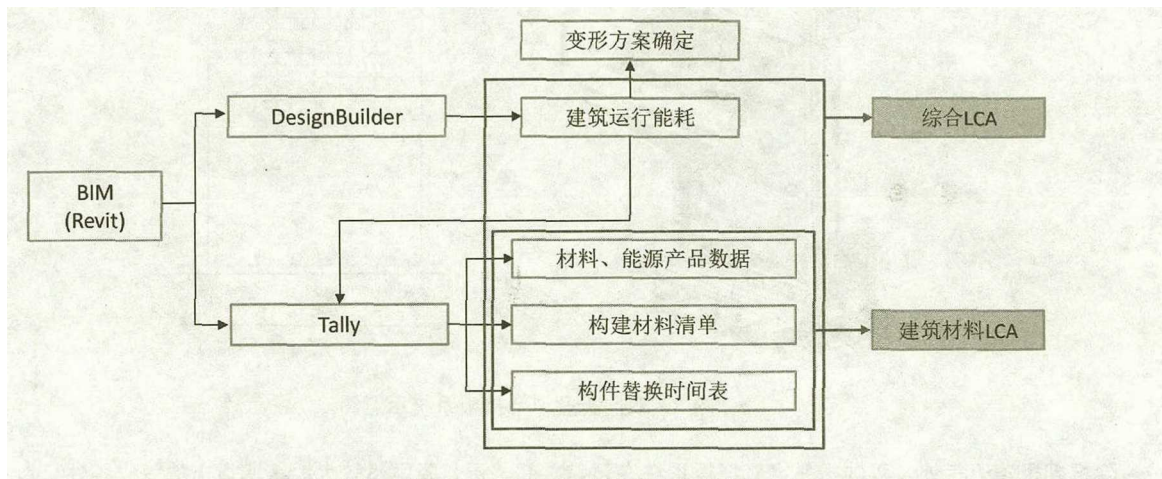


图 1 基于 BIM 的 LCA 评价方法流程图

2 案例研究

本文的研究针对能充分利用气候及其他环境要素、以达到绿色可持续为变形目标的形态可变建筑，并需要详细的设计图纸及材料信息来支撑 BIM 模型的建立。因此研究选取史蒂芬斯理工在 2015 年美国太阳能十项全能竞赛的参赛作品 SU+RE House 作为研究对象。

2.1 建筑概况

SU+RE House 是一座带有形态可变围护构件的、能够利用被动式低技术防洪的单层小住宅（图 2），在赛后被运送到新泽西，作为自由科学中心的一部分向公众开放。建筑在设计时符合新泽西建筑设计规范及太阳能十项全能的竞赛要求，以太阳能作为唯一的能量来源。

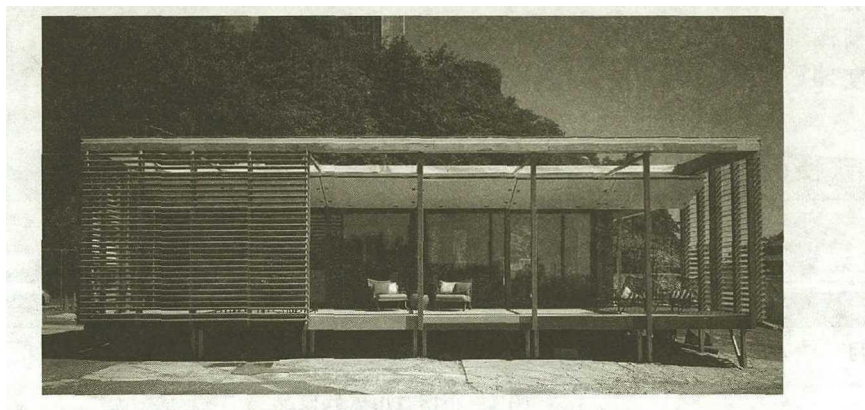


图 2 SU+RE House 实景照片

SU+RE House 专为曾受到飓风严重破坏的纽约及新泽西沿海地区设计^[6]，能在降低能耗的同时适应极端的气候条件。建筑的主体为木结构，轻质环保，围护结构是用较厚的保温岩棉填充的轻质木框架墙，保温性能好，在建筑的东甲板和南甲板处还有少数钢结构，能起到很好的稳固作用。建筑的外围护饰面使用压叠雪松木护壁板，地板的防水层向上延伸包裹了部分墙体，提高了建筑的整体性和密封性，起到很好的防水效果，适合当地滨海且多雨的地理条件。

2.2 双向折叠风暴挡板系统

SU+RE House 在设计阶段就考虑了建筑的弹性和可持续性，为了抵御飓风和洪水，在建筑窗墙比最高的南立面设置了双向折叠风暴挡板系统（图 3）。挡板的设计灵感来自于船体结构隔热板（SIP），由轻质的复合玻璃纤维板和结构泡沫芯制造而成，这是一种强度高、抗冲击性强的海洋工业材料，能够承受设计要求的荷载。挡板的自重轻，人工使用安全滑轮轨道即可轻松调节，开启方便，不耗费其他能源，满足低能耗房屋的设计要求。

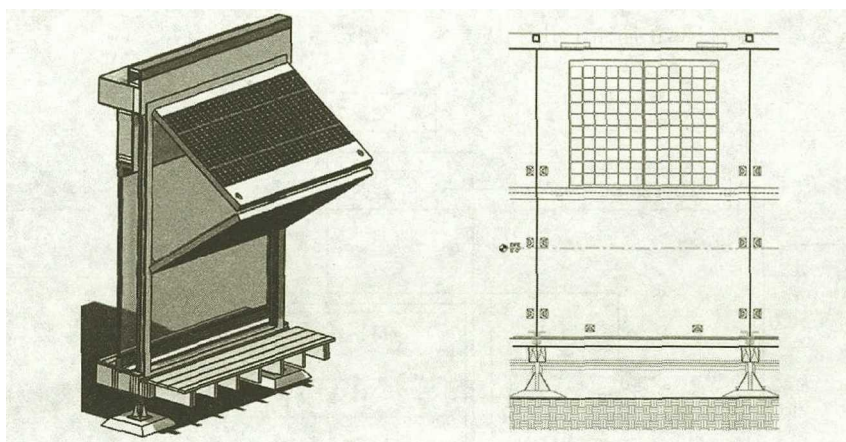


图 3 双向折叠风暴挡板系统示意图

除抵御极端天气外，双向折叠风暴挡板系统在日常生活中也有多重作用。当挡板开启时，能使用安全锁固定在滑轮系统的各个位置，使用者可以通过调整挡板的开启角度来调节室内光环境。沿海地区风速快，紫外线强，空气盐度较高，对建筑的腐蚀性强，挡板在建筑日常运营中处于关闭状态时可以减少滨海物理环境对建筑的侵蚀，延长使用年限。

3 不同情景下的建筑 LCA 分析与比较

3.1 情景的设定

案例现位于新泽西州的霍博肯，属温带大陆性气候，夏季最高温度 29℃，冬季最低温度 -3℃。全年潮

湿，降雨量较大。霍博肯市的气候条件可以大致分为两个区间：11~4 月，寒冷干燥，降雨相对较少；5~10 月，温暖潮湿，降雨量大，据统计飓风也多在这段时间登陆新泽西州。

SU+RE House 的可变构件由人力操控，可根据需要随时改变状态。同时，挡板的变形状态也存在着多块挡板分别可调，变量过多的问题。在研究中，为避免变化情况过于复杂，笔者选择将可变情景下的建筑模型简化为可变构件完全开启和完全关闭两种状态（图 5），分别在前文中的两个时间段进行模拟，通过分析比选出更优的全年建筑构件变形方案，与固定状态（图 6）进行分析比较。

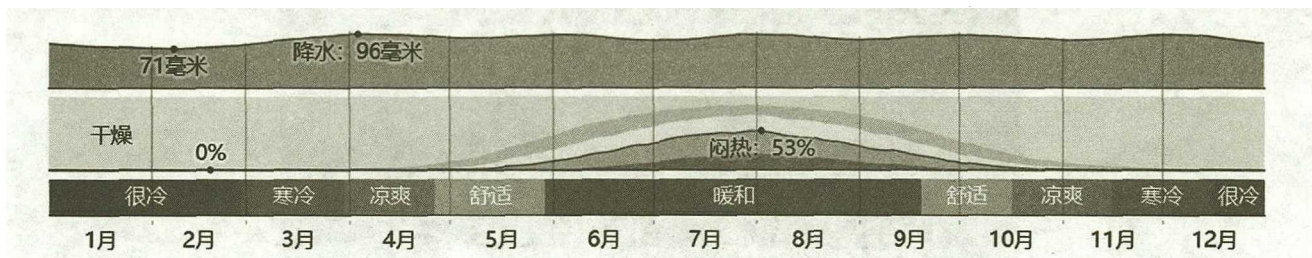


图 4 霍博肯市气候概况

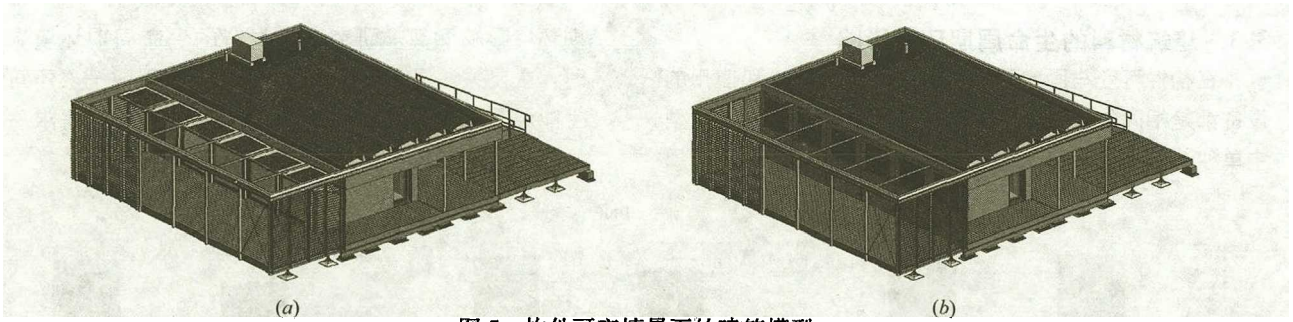


图5 构件可变情景下的建筑模型

(a) 挡板完全开启状态; (b) 挡板完全关闭状态

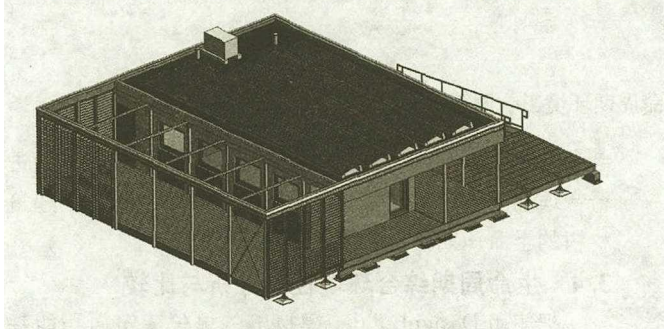


图6 构件固定情景下的建筑模型

3.2 使用阶段能耗分析与比较

将能耗计算软件 DesignBuilder 中的气候参数设定为霍博肯市。建筑采用全空气系统的组合式空调机,除湿效果好,并使用热回收通风装置来利用厨房和淋浴间的排风中带有的余热,对从屋顶引入的新风进行预处理,减少空调系统的能耗。根据太阳能十项全能竞赛的要求,太阳能是建筑运行的唯一能量来源。SU+RE 有两套太阳能光伏系统:一套是位于建筑屋顶上的功率为 280W 的 PV 板,在建筑设计团队的预想中,这套光伏

发电系统不仅足够维持建筑正常运行,还能在集中式电网因极端天气发生故障时,将产生的富余电力引至户外电力枢纽,供邻居使用;另一套是位于风暴挡板上的功率为 180W 的 PV 板,这套 PV 板产生的电与电网完全分离,直接用于提供家用热水所需的能源。

在 DesignBuilder 中分别导入挡板完全开启和完全关闭两种状态下的模型,进行 5~10 月和 11~4 月两段时间的模拟,得到一系列建筑运营阶段能耗数据(表 1),本研究主要关注单位建筑面积能耗(按电量折算),总用电量和 PV 板总发电量这三项数据。通过对比可得出,在 5~10 月,挡板关闭状态的单位面积能耗显著小于开启状态,虽然 PV 板总发电量略小,但在发电净结余方面仍有优势。在 11~4 月,挡板开启状态下的单位面积能耗小于关闭状态,发电净结余也略有提高。因此,笔者决定将形态可变情景下的全年建筑构件变形方案设置为:5~10 月,挡板尽可能多的关闭,11~4 月,挡板尽量保持开启状态。这样设置不仅能实现更小的建筑能耗和更多的光伏发电量,还能很好的应对极端天气。

可变构件在不同变形状态下的测算结果

表 1

构件状态	时间分区	单位面积能耗 kWh/m ²	建筑总用电量 kWh	PV 板总发电量 kWh
挡板完全开启	5~10 月	55.21	4420.51	7839.06
	11~4 月	47.28	3785.63	4117.31
挡板完全关闭	5~10 月	36.89	2934.45	7177.11
	11~4 月	52.55	4180.59	4251.93

方案确定后,将选定的两项半年模拟数据相加,得出构件可变情景下的建筑全年运行能耗数据,与构件固定情景下的数据进行对比(图 7)。可以看出,无论构

件是否可变,太阳能光伏发电都能达到提供建筑运行所需全部能源的设计目标,但构件可变情景下的各项运行指标均优于构件固定状态。

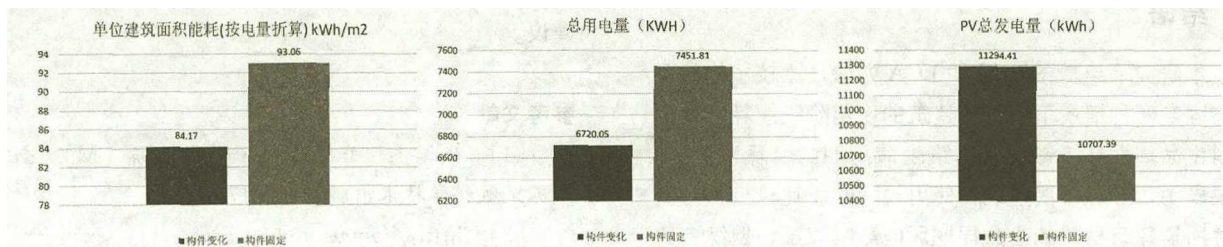


图7 建筑使用阶段数据模拟

3.3 建筑材料的生命周期环境影响

在构件可变与固定两种情况下，建筑构造和使用的设备都是相同的，为使分析结果更加清晰，笔者从模型中单独选取南立面包含的族构件进行建筑材料的生命周

期环境影响测算。研究建筑材料的生命周期环境影响时，主要关注温室气体排放潜能 (GWP)，一次不可再生能源需求总量 (PNE) 和一次可再生能源需求总量 (PE) 三个指标，测算结果如图 8 所示。

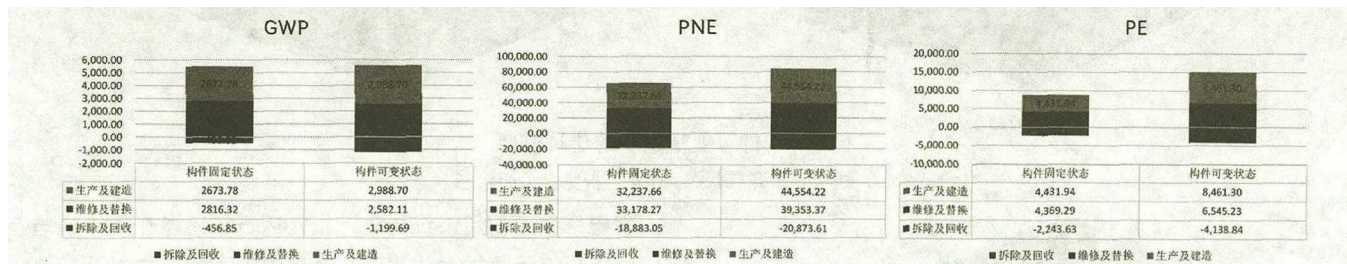


图 8 建筑材料生命周期环境影响测算

对比分析可以发现，构件可变情景下除 GWP 值较构件固定情景略低外，PE 值和 PNE 值均比构件固定情景高。产生这种结果的原因主要有两个：一方面可折叠风暴挡板不仅自身安装大量钢构件，还需要设置配套的滑轨系统，生产这些构件所需的金属材料在物化阶段对环境的影响较大，在建筑拆除后的回收率较高；另一方面，由于风暴挡板的存在，可变状态下的建筑能够比固定状态多安装四块 180W 的 PV 板，PV 板在物化阶段

会消耗大量的能源，如果能够在建筑拆除后对 PV 板进行合理的回收利用，将有助于减小构件可变情景下建筑材料的生命周期环境影响。

3.4 生命周期综合环境性能分析与比较

把使用 DesignBuilder 模拟出的单位建筑面积能耗结果输入 Tally 中，转化为建筑整个在运行阶段的生命周期环境影响，与前文中的建筑材料生命周期环境影响相加，得出建筑在全生命周期中的综合环境影响 (图 9)。

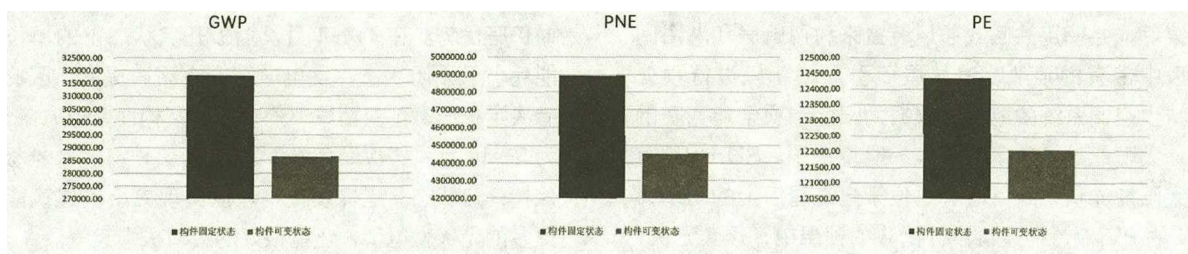


图 9 建筑生命周期综合环境性能测算

考虑建筑运行阶段对环境的影响后，构件可变情景下的 GWP 值与固定情景相比进一步减小，PNE 值和 PE 值也开始小于固定状态，各项指标都更好。因此，从全生命周期的角度来看，使用可变构件是有利于减小建筑对环境的影响的。如果把建筑的发电净结余也纳入考虑，形态可变建筑的生命周期综合环境性能将会优势更加明显。

4 结语

本研究采用基于 BIM 的 LCA 方法，比较了构件可变与固定两种情景下一座建筑的使用阶段能耗、建筑材料生命周期环境影响和建筑生命周期综合环境性能。结果表明，形态可变建筑在使用阶段的能耗较少，可变构件所需建筑材料的生命周期环境影响较高，但综合比较后，形态可变建筑与普通建筑相比还是具有明显的

优势。

研究存在两个主要局限：对全年建筑构件变形方案的设置可以继续细化，更细致的变形方案有利于突出形态可变建筑能够适应外界环境变化的特点；可变建筑的造价通常较高，研究缺乏对建筑生命周期成本的考虑，不够全面。在下一步的研究中，将改进全年建筑构件变形方案，并对生命周期成本进行分析，从而完善对形态可变建筑的生命周期评价，为形态可变建筑的设计提出建议。

参考文献

- [1] 张军杰. 非常绿建·动态建筑 [M]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2017.
- [2] <http://www.archcy.com/>.
- [3] R·Kronenburg. Flexible: Architecture that

Responds to Change [M]. Laurence King Publishing, 2007

[4] About & Reference. <http://choosetally.com/>.

[5] 王珊珊. 整合的 BIM-LCA 建筑评价模型研究 [D]. 天津: 天津大学, 2013: 28-47.

[6] J • Nastasi. SU+RE; Sustainable + Resilient

Design Systems [J]. Architectural Design, 2018(01).

[7] Drawings & Manual. <https://www.solardecathlon.gov/2015/competition-team-stevens.html>

[8] 李奇芜, 杨向群, 杨崑. 基于 BIM 的小型节能建筑生命周期环境影响和成本分析 [J]. 南方建筑, 2017, 178 (02): 45-50.