

Energy-saving Application Research of Modular Design

Yu Qi¹, Xiao-Bao Wu²

¹ School of Management and City Colleg, Zhejiang University, Hangzhou City, PR China

² School of Management, Zhejiang University, Hangzhou City, PR China

Email: userqiyu@yahoo.com.cn; xbwu@zju.edu.cn

Abstract: Modular design method not only is an important base for mass customization, agile manufacturing, but also is an important technology for green manufacturing. The paper focuses on the energy-saving characteristic analysis of modular design rules. Through separating the framework and component structural characters of modular system, we expound the energy-saving advantages, main business modes and operational rules of modular design method. The paper also studies the case of Energy Department Mansion of Tsinghua University, and discusses the energy-saving realization path of modular design.

Keywords: modular design; green manufacturing; energy-saving; mass customization

模块化设计的节能应用研究

齐 羽¹, 吴晓波²

¹ 浙江大学管理学院、城市学院, 杭州, 中国, 310058

² 浙江大学管理学院, 杭州, 中国, 310058

Email: address, address

摘 要: 模块化设计方法是实现大批量顾客定制和敏捷制造的重要基础, 也是实现绿色制造的重要技术。本文聚焦于模块化设计规则的节能特征分析, 在分解模块化系统结构特征的基础上, 阐述了模块化设计的节能优势、主要实现模式和应用操作符, 并通过清华大学能源系大楼的案例分析, 讨论了模块化设计在节能领域的应用思路。

关键词: 模块化设计; 绿色制造; 节能; 大规模定制

1 模块化设计的内涵与特征

模块化设计方法是实现大批量顾客定制和敏捷制造的重要基础, 也是实现绿色制造的重要技术。它通过对不同标准模块的敏捷组合, 达到以有限模块组合设计产出尽可能多的差异化品种, 以满足对能源、材料的节约与快速响应差异化需求的目标。目前, 这种设计方法被认为是工程领域中最优设计的范式之一。

在模块化设计原理上, 西蒙(1962)、鲍德温和克拉克(1997、2000)、青木昌彦(2003)、瑞明杰(2009)等学者分别从模块化原理、模块化经济价值、模块化创新等角度进行了研究。从模块化设计结构的原理看, 它存在着以下基本特征: 一是模块化体系本身可以实现对复杂系统的简明控制, 对集成了不同功

能模块的复杂系统实现多元独立自治体(Multi-agents)控制, 因此能对多种节能技术进行有效整合和集成化应用; 二是不同模块之间的连接规则可以是进化的, 即可依赖自下而上的标准竞争实现设计规则的进化, 这有助于对最新节能降耗成果的开放式吸收, 并且可以包容对系统的局部颠覆; 三是模块设计诀窍的“包裹化”封装, 即模块内部的设计可以是自由的和保密的, 只需遵循系统接口界面标准, 即可被系统采纳。这样的设计规则不仅有利于整体系统的改进和创新, 而且有利于知识产权的保护和中小科技组织参与产业技术创新。因此, 不管是产品(系统)层的模块化设计, 还是产业层的模块化分工, 均可以加速提升竞争性节能技术的创新速度和多元节能技术的集成化应用效果。

作者认为, 模块化设计是在模块化系统结构界面的基础上, 按照系统集成和柔性组合秩序建立起的动

基金资助: 国家社科基金重点课题(编号: 08AJY036); 杭州市社科规划重点课题(编号: A09GL02); 杭州市科技发展计划软科学课题(20091334M13)

态开放系统。其构成模块在遵循界面要求和设计规则的基础上可以动态重组，因此赋予了模块本身半自律性的特点，并赋予系统半封闭性和自适应性的特点，使系统可以根据技术发展和需求变化敏捷实现同步演化。其模块化的设计结构和组合机制正是保持内部组成和外部环境匹配性的关键机制。实现这种“敏捷”机制的基础包含以下三个方面：第一，模块化产品设计在把握产品体系演变的前提下，将产品的多样化开发纳入预先设定的以单元组合为变化依据的设计规则中；第二，产品构成模块之间的接口界面是“松散”的，这赋予模块单元一定程度的独立性，即每种模块的设计特征可以被封装在独立模块中，其变异不会对系统产生改动影响；第三，模块的接口界面是标准化的，使系统中的功能模块可以便捷实现更换、替代、合并、升级，从而赋予模块化产品体系足够的“设计柔性”。

2 模块化设计的节能优势与应用模式

2.1 模块化设计的节能优势

模块化设计的节能优势，可以归纳为“可重用、可回收、可拆卸、可组装、可升级”等特征，借助模块化设计可以实现建筑工程、制造工程等领域的“节能、节材、节地、环保”功能和优势。与传统非模块化设计相比，模块化设计具有敏捷性好、资源能耗低等特征：一是在技术升级上，无须对设计与工程装备进行整体重新开发，只需针对升级技术模块进行局部开发；二是在产品升级上，可以灵活通过更新模块实现功能升级；三是在部件通用性上，因为模块化设计大量运用通用的模块接口设计，因此部件通用性远高于传统设计；四是在部件回收上，可方便回收部件模块，经修复后重用；五是在满足大规模低成本定制上，可通过对模块的灵活组合搭配，以更少的基础模块实现更多的差异化组合，从而满足大规模定制的需要（见表1）。因此，实行模块化设计，可以显著降低资源和能源消耗，提升单位产品的差异化和附加值。

2.2 模块化设计的节能应用模式

为推动模块化设计方法在节能领域的应用，必须探索具有可推广性、可复制性的商业模块。作者将模块化设计的节能应用归纳为以下三种主要模式，涉及七种模块化操作符，见图1。

第一种是“模块化节能规则”模式，即在模块化设计结构的基础上，建立比较完善的节能技术标准体

系和节能绩效评估体系、节能模块择优体系，使模块化设计规则实现节能导向。这种模式主要涉及“分割”和“归纳”两种模块化操作符。其中，“模块分割”是根据产品系统内在的功能独立性和技术独立性两个维度将设计任务分割成若干独立的模块；而“规则归纳”操作符是归纳出适合节能需求定制要求的产品模块化开发规则，推动系统创新向节能规则方向演进。该模式为节能模块的整理、分类和筛选奠定了基础，因此具有先导意义。

表1. 模块化敏捷设计与传统非模块化设计的比较

设计特征	传统非模块化设计	模块化设计
技术升级	必须对设计与工程装备进行整体重新开发	只需针对升级模块进行局部开发，无须整体重新开发
产品升级	须进行重新开发	通过置换模块升级
部件通用性	比例低	比例高
部件回收	随主机淘汰	模块可回收重用
低成本定制	不能	能
总体差异	刚性设计，敏捷性差，资源、能耗高	柔性设计，敏捷性好，资源、能耗低

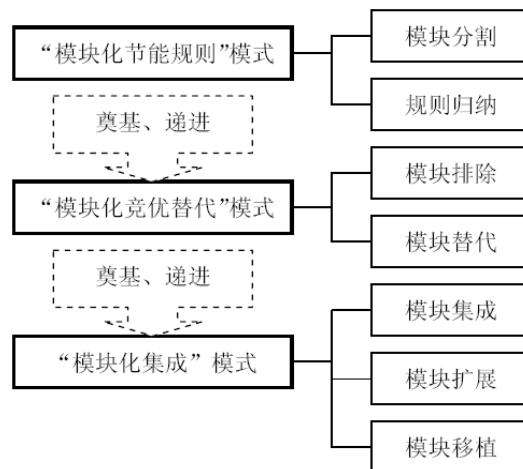


图1. 模块化设计的三种节能应用模式及其操作符

第二种是“模块化竞优替代”模式，即通过模块选择权竞争机制（即优秀的组件模块通过优胜劣汰的竞争成为产品某个环节的主导设计）赋予的行业升级压力，经由市场机制实现具有更优节能特征的产品组件和技术模块及时替代次优的产品组件和技术模块。这种模式主要涉及“排除”和“替代”两种模块化操作符。其中，“模块排除”是从系统中排除某个节能特征次优的产品技术模块；而“模块替代”是用一种节能特征更优、与市场需求更匹配的产品技术模块替

代次优模块。

第三种是“模块化集成”模式，即通过将多元节能技术与零部件通过模块化界面集成在产品系统平台上，实现多种节能降耗技术的协同作用和统筹优化。如将太阳能利用技术模块、自然采光集成技术模块、设备余热利用节能技术模块、地热利用技术模块、照明节能产品模块和智能化控制模块有机集成在节能建筑平台上，通过多元节能效应的叠加，实现系统节能的最优化。这种模块主要涉及“集成”、“扩展”、“移植”三种模块化操作符。其中，“模块集成”是将关联节能模块有机地集成到系统平台上；“模块扩展”是将新出现的节能技术模块增加到系统中；“模块移植”是将其它系统中应用有效的节能模块移植到本系统中。

以上三种模块化节能应用模式体现为继起和递进的关系，即前一种模式为后一种模式的实现创造条件，而后一种模式是在前一种模式基础上的发展和升华。

3 对清华大学能源系大楼的模块化集成节能案例的讨论

3.1 案例的模块化特征与功能

据统计，房地产与建筑产业碳排放约占社会碳排放总量的 50%，该产业约占社会总能耗的 40%。我国新建筑中八成以上为高耗能建筑，存量建筑中 95% 以上是高耗能建筑。因此，房地产业的节能应用意义重大，是我国中长期实现低碳战略目标的重要基础。

清华大学超低能耗示范楼是国家“十五”科技攻关项目“绿色建筑关键技术研究”的技术集成平台，用于展示和实验各种低能耗、生态化、人性化的建筑形式及先进的技术产品，并通过其体现“高科技”、“绿色”、“人性化”设计为 2008 年奥运会办公建筑提供节能示范。该建筑采用模块化集成设计技术，根据节能、生态、智能化的要求，将经过优化集成匹配的系列产品模块和技术模块（包括材料技术、工程技术、产品技术等）有机地集成于建筑平台上，通过模块化集成平台统筹实现建筑物的综合节能降耗，优化声、光、热、空气等物理环境控制，并通过建筑智能化控制系统实现各子系统模块的协同工作。

该项目除了具有显著的“模块化集成”模式特征外，其采取典型模块化设计的空调系统是建筑节能的又一亮点。由于采用模块化设计，该建筑内部可根据使用要求的变化，极其方便地改变空间布局，从而实

现建筑空间的多用途化。为支持这种设计特征，实现建筑节能目标，该建筑对空调和强弱电系统采取典型的模块化结构设计，从而可以根据内部空间使用要求的差异的实现最大程度的智能化节能。其措施是依托具有模块化特征的电力布线和楼宇智能化综合布线系统，在建筑物内提供模块化的空调末端配置，使空调系统能根据房间布局调整合实际使用情况灵活组合，采用多种空气调节方法实现综合节能。如在人员密度低的办公室采用集成冷辐射吊顶模块、辐射墙模块和可调的空调末端送风模块来消除室内的显热负荷。在送风工位模块设置上，为每个办公人员的活动区域提供独立送风端口，该端口可根据需要调节风口角度、出风速度来满足差异性降温要求。而对室内人员密度高的报告厅和会议室，除采用冷辐射吊顶模块和置换通风模块外，系统还扩展了仿自然风的动态风 FCU 模块来消除室内尖峰负荷。通过对节能技术的模块化集成应用，该建筑实现了比常规建筑节能 70% 的目标。

3.2 对本案例模块化设计方法的讨论

在本案例中，清华大学能源系大楼在验证性实施模块化规则设计的基础上，在楼宇系统平台载体上集成了多种节能模块。这些模块根据差异化需要进行择优应用，通过在综合节能最优化规则的指导下形成若干差异化的组合配置。如图 2 所示，该项目在模块化系统集成平台上，通过模块化集成界面和系列节能空调技术模块的选配，实现了多样化的“模块组合选择权”，即可以根据实际需求的变化快速地进行模块配置调整，以实现“按需供能”，最大限度地减少因冗余空调配置造成的能源浪费。

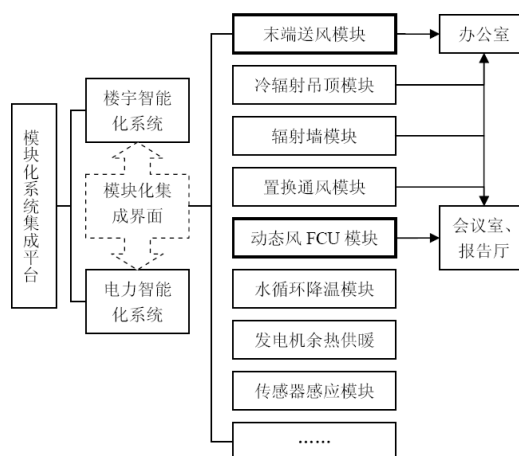


图 2. 清华大学能源系节能楼的模块化空调系统配置结构

这样的设计,实现了以下五项模块化特征和优势:一是体现了对节能需求的差异化定制,通过灵活配置功能模块,实现“按需供能”;二是采取“模块化集成”模式,集成多种节能模块,实现节能叠加效应;三是通过模块化智能系统配制提高节能系统的自适应性、智能性和自组织性;四是保持了技术与产品的可升级性,可技术发展集成最新的节能技术模块;五是实现了系统设备和部件的通用性,一定程度上节省了材料和维护费用。

作者认为,要推广建筑节能的模块化应用工程,首先要鼓励优秀企业、优秀工程项目率先采取模块化方法集成和整合包括地源热泵系统、置换新风系统、同层排水系统、隔音降噪系统、低碳型建筑空气调节系统等在内的建筑节能成套技术,形成住宅节能产业化的应用示范效应。事实上,在目前建设部认定的八

大住宅产业化示范基地建设中,万科集团的模块化住宅和海尔集团的“智能家居”均采用模块化设计方法。

References (参考文献)

- [1] CHENG Xiangdong. Modularization and Its Applications to Firm Level Strategy Designs for Knowledge Management in Manufacturing Industries Modularization Strategy in Subcontracting Projects by Chinese Aviation Companies [J], Journal of China Industrial Economy, 2004 (1), 36-42 (Ch).
- [2] Baldwin C Y, Clark K B. Managing in an Age of Modularity[J]. Harvard Business Review, 1997, 75 (5): 84-93.
- [3] Baldwin C Y, Clark K B. Design Rules : The Power of Modularity[M]. Cambridge, MA :MIT Press. 2000.
- [4] Simon H A. The Architecture of Complexity[J]. Proceedings of American Philosophical Society, 1962, 106: 467-482.
- [5] Koren Y, Ulsoy A G. Vision ,Principles and Impact of Reconfigurable Manufacturing Systems[J]. Powertrain International, 2002: 14-21.
- [6] Aoki Masahiko, Ando Haruhiko. Modularization era: the essence of new industrial structure[M]. Shanghai: Shanghai Far East Press, 2003 (Ch).