http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0272

复杂产品系统模块化分解模型及应用研究

闫华锋[1,*], 仲伟俊[2]

(1. 国网电力科学研究院, 南京 210003; 2. 东南大学 经济管理学院, 南京 211189)

摘 要: 模块化设计开发技术能够实现复杂产品系统(CoPS)的柔性制造,科学合理的模块化分解将会降低 CoPS 开发的管理难度和制造成本。在分析产品系统模块化理论的基础上,总结了 CoPS 的模块化处理流程,列举了 CoPS 的模块化分解原则,提出了 CoPS 的模块化分解程度的计算模型,研究并建立了系统模块化与企业绩效的相关性分析模型,并探索了模型的最佳应用实践。以电网广域监测分析控制系统(WARMAP)为例,论述了在影响因素众多的情况下,运用模块化分解模型进行计算后,WARMAP 分解为 4 大功能模块,极大缩短了系统的研发周期,提高了研发质量,充分验证了模块化分解模型的有效性,以期为企业产品模块化设计提供理论指导和决策借鉴。

关 键 词: 复杂产品系统(CoPS); 创新研究; 模块化设计; 模块化分解模型; 电网广域监测分析控制系统(WARMAP)

中图分类号: F752.69

文献标识码: A **文章编号**: 1001-5965(2017)04-0654-06

模块化思想在产品制造中的最早应用可以追溯到 20 世纪初,并于 20 世纪 20 年代首次应用于机械产品设计[1]。欧美专家于 20 世纪 50 年代开始正式提出了模块化设计的概念,并把这一概念提升到理论高度开展研究[2]。

在复杂产品系统(CoPS)领域,模块化处理是指从 CoPS 出发,研究其构成形式,依据一定的模块设计原则和分解规则,利用相关的模块分解方法,构建产品的模块体系,经过各模块的专业开发,再运用各种模块组合方法,进一步形成产品系统的过程。CoPS 的模块化降低了产品系统的复杂性,使得设计改进更为方便,也使得 CoPS 管理更为容易。与此同时,科学合理的模块化分解,也使得 CoPS 的柔性得到提高,使 CoPS 根据客户的多样化需求进行的响应更为有效。

近年来,模块化理论得到了相对深入的研究和广泛应用。目前,学者们提出了模块化分解的方法。Stone 等[3]提出了一种模块启发式探索方法来分离模块;Zamirowski 和 Otto[4]从一个产品族的产品交叉中发现共用模块;Holltt[5]提出了根据功能结构中输入输出流的相似来得到更多共用模块,用以增加模块划分规则的柔性;陈劲和桂彬旺[6]提出并论证了基于模块化开发 CoPS 的创新流程; Lau Antonio 等[7]运用结构方程建模法 AMOS4.0,实证分析了香港制造业数据,认为模块化产品制造商可以提供更好的客户服务、灵活性和交付能力; Rodrigues 和 Rocha Armada[8]采用 Baldwin 和 Clark[9]方法构造了一个一般模块化模型,分析了项目拆分的时机选择和相关价值的效用;王瑜和任浩[10-11]对模块化组织价值创新进行了深入研究分析,指出了模块化组织创新的内涵与本质、路径及其演化;文献[12-13]对复杂

收稿日期: 2016-04-07; **录用日期**: 2016-05-13; **网络出版时间**: 2016-06-15 15:50
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20160615.1550.001.html
基金项目: 国家自然科学基金(71071033)
* **通讯作者**: E-mail: yhf_sgga@163.com

引用格式: *闫华锋, 仲伟俊. 复杂产品系统模块化分解模型及应用研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(4): 654-659.*
YAN H F, ZHONG W J. Modular decomposition model of complex product system and its application[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(4): 654-659 (in Chinese).

产品模块化降低企业管理成本、支撑创新绩效的影响进行了研究;陈建勋等[14]对信息技术(IT)业和制造业进行研究,建立了结构方程模型,分析了模块化对组织绩效水平的影响。

但是,随着 CoPS 的组成元素规模日益庞大,其构造也越来越复杂。如一架波音飞机的模块规模可达两百多万,一组工业汽轮机也能超过上万个模块。现代产品的规模不断增大,随之而来的是 CoPS 模块间的关系更加错综复杂,使得模块化分解也越来越难。如何优化地确定 CoPS 的模块化分解数量成为 CoPS 创新研究的难题。

本文在研究现有 CoPS 模块化理论的基础上,总结了 CoPS 的模块化处理流程,并针对 CoPS 模块化实现过程中最关键的环节——模块化分解,提出了相应的分解模型以及企业绩效相关性分析模型。以电网广域监测分析控制系统(WARMAP)为研究案例,分析了模块化分解模型的应用过程。

1　CoPS 的模块化分解模型

对 CoPS 进行模块化分解时,除遵循一定的分解原则外,还有 2 个关键问题需要解决:①如何确定模块化分解程度;②对模块化分解程度与企业绩效的相关性做出分析。大量理论研究与实践调研表明:前者符合非线性规划模型,后者遵循非线性回归模型[15]。

1.1　CoPS 的模块化分解原则

通常,CoPS 模块化分解应遵循以下原则[16]:

1)系统等价原则。分解模型与真实系统之间必须存在信息的等价性,即模型的属性、状态等必须与真实系统相一致。

2)结构独立原则。模块分解的一个最基本原则是保持模块结构的独立性和完整性,模块之间的界面要素要便于分离与联结。

3)功能相近原则。功能相近原则主要包括结构交互、能量交换、物质交互、信号交互和作用力交互等 5 种原则。一般来说,2 个部件之间的 5 种交互作用越大,就越应划分在同一模块中。

4)绿色环保原则。绿色环保原则即提高产品资源和能源利用率、降低产品生命周期成本、最小化产品的环境污染等要求,包括重复利用准则、利于升级准则、易于维修准则、高回收性准则、方便销毁准则。

1.2　模块化分解程度的计算模型

假定实现 CoPS 的技术在短时间内不变。设 Y 为 CoPS 的模块化分解程度,X_1, X_2,…,X_m 为影响模块化分解程度的 m 个约束变量,L_1, L_2,…,L_m 为上述 m 个约束变量对模块化分解的影响权值,则可以构造如下 CoPS 的模块化分解程度计算模型:

$$Y = \max(f(X_i)) = \max\left(\sum_{i=1}^{m}(L_i X_i^{k_i})\right) = \max(L_1X_1^{k_1} + L_2X_2^{k_2} + \cdots + L_mX_m^{k_m})$$

$$\text{s.t.}\begin{cases} f_i\left(\sum_{j=1}^{i} X_j\right) \geqslant 0 \qquad 0 \leqslant i \leqslant m \\ \sum_{i=1}^{m} L_i = 1 \end{cases} \tag{1}$$

式中:X_1, X_2,…,X_m 等约束变量为功能可分性、客户定制度、技术难度系数、系统需求多样性、系统投入多样性、整体投入成本、模块分解清晰度、集成工艺先进程度、后期维护性等影响因素;k_1, k_2,…,k_m 为上述影响因素对模块化分解程度的影响关系,其值可以通过分析每个因素对模块化分解程度的影响方式确定;L_1, L_2,…,L_m 为上述影响因素对模块化分解程度的影响权重,分值可以采用多种方法确定,比如通过匿名的专家打分法确定这些影响因素的重要程度。

针对具体 CoPS 的特点,结合模块化设计师积累的经验,得到足够多的限制条件,该模型即可得出最优解,也就是系统最优的模块分解数量。

1.3　系统模块化的分解程度与企业绩效相关性分析模型

对于 CoPS 的模块化处理,如果分解的模块数量太多,就会增加模块间的连接和相互作用,使得系统整体结构虚弱,并增加模块化的设计、试验、交易和协调费用,从而影响企业的绩效;若模块数量太少,功能相对独立性和专业性就差,单个模块过于复杂,影响系统集成时的柔性,并容易导致开发、生产以及维护成本的上升。因此,CoPS 的模块化分解还需要考虑对企业绩效的影响。

经过众多模块化系统设计师的调研分析,一般表现为系统的模块化分解程度与企业绩效之间的关系曲线呈“U”字型。假设 C 为企业制造 CoPS 的成本,y 为所制造 CoPS 可以分解的模块数量。如果用 C 来衡量企业的绩效,用 y 作为衡量 CoPS 模块化分解程度的指标,则根据上述企业绩效与模块化分解程度之间的二次曲线关系,可以得到如下相关性模型:

$$C = ay^2 + by + c \qquad a、c > 0, b < 0$$

令 $a = \beta_2$, $b = \beta_1$, $c = \beta_0 + \mu$,对上述模型作变量替换,有

http://bhxb.buaa.edu.cn

$C = \beta_0 + \beta_1 y + \beta_2 y^2 + \mu \quad \beta_0 、\beta_2 > 0, \beta_1 < 0$

此即为标准的一元二次回归模型。其中,β_0、β_1 和 β_2 称为回归系数(regression coefficient)。利用最小二乘法求得此回归模型的系数,即可获得企业制造 CoPS 的绩效与模块化分解程度之间的关系,从而可以帮助优化 CoPS 的模块化数量。

2 电网广域监测分析控制系统

中国能源资源储藏与消费中心呈逆向分布,跨区域、远距离、大规模的电力输送是我国电网不可回避的问题。随着电网互联和跨区输电的发展,大范围一体化的电网运行状态导致广域动态的交互影响加剧,多种稳定形态交织显现使得电网稳定特性复杂多变,电力系统的可靠性面临着新的重大挑战,迫切需要开展电网系统时空协调的安全稳定在线自适应综合防御技术创新研究。

由国网电力科学研究院、中国电力科学研究院和国家电力调度中心等众多国内电网系统顶尖科研、开发单位共同研制的 WARMAP 通过克服特高压、交直流混联和自然灾害频发的电网复杂运行环境,构建时空协调的大停电综合防御体系,研发适应综合防御要求的安全稳定控制装置,以解决电网大停电综合防御的体系、理论、技术和装备等系列科学问题,实现电网安全稳定在线预警、预防控制、紧急控制、校正控制的一体化协调,成为了电力行业中具有代表性的一套 CoPS。

2.1 WARMAP 的模块化设计

在 WARMAP 模块设计中,从影响因素上,造成电网安全问题复杂性的因素众多,不仅涉及高纬度、强时变、强非线性特性以及微分-差分-逻辑-代数混合等特性,还包含多领域(物理、经济、信息)、多物理量(电流、电压、频率、功角)、多类稳定性(静态、动态、暂态、周期、结构)、多时间尺度(电磁暂态、机电暂态、中期、长期)、多空间尺度(局部模式、全局模式)等因素。同时,WARMAP 还存在当前电网运行状态、电网运行异常数据、电网状态控制决策和电网系统数据备份等信息流,其实现涉及信息通信、稳定性量化、数据自动采集及存储等高新技术。

从安全角度上,由于现有电力系统遵循“分区分域、等级防护”的原则,被划分为多个安全分区(由于涉密,不能具体说明分区方式)。因此,WARMAP 的模块划分还要考虑到安全分区因素。

从任务分配上,为解决电网大停电综合防御问题,WARMAP 需要具备数据汇集和整合、实时分析和预警、辅助决策和控制、在线协调和优化等功能。其中,数据汇集和整合主要根据统一时标,将能量管理系统(Energy Management System, EMS)状态估计后的稳态数据、安控装置的实测数据、实时动态监测系统(Wide-Area Measurement System, WAMS)数据、外网等值数据等整合为反映电网实际运行状态的稳态数据,用于在线安全稳定分析和策略搜索计算的基础数据;实时分析和预警主要完成电压和频率动态特性监视和分析、低频振荡在线监视和分析、系统安全稳定性在线评估、预想故障的阻尼分析等任务;辅助决策和控制主要实现系统安全稳定主导模式的在线识别、系统在线极限功率计算、预防控制在线优化辅助决策等功能;在线协调和优化主要实现安全稳定控制系统策略表刷新、预想故障发生时的紧急控制在线优化预决策以及紧急控制措施实施等功能。

从技术实现上,WARMAP 可以划分为 6 大子系统,分别为数据处理子系统、数据存储子系统、并行计算子系统、人机交互子系统、信息发布子系统和离线分析子系统。各子系统的实现功能如下:

1)数据处理子系统。数据处理子系统主要实现数据的通信、数据的转换、数据的整合和结果数据的处理等功能。根据数据处理功能的不同,又可分为外网数据整合子系统和计算数据整合子系统。其中,计算数据整合子系统可根据实际并行计算子系统中数据源的不同配置多套。

2)数据存储子系统。数据存储子系统主要实现电网安全防御系统的输入数据、输出数据以及其对应的历史数据的存储和管理。

3)并行计算子系统。并行计算子系统主要实现实时预警、辅助决策和协调控制等功能的计算。根据具体实现功能的不同,又分为在线预警和辅助决策子系统、稳控策略计算子系统、计划校核子系统(日/周)。随着应用功能的扩充支持进行扩展。

4)人机交互子系统。人机交互子系统主要实现电网安全防御系统的人机界面的交互,主要包括系统运行结果的浏览、查询,系统运行的管理和维护等功能。

5)信息发布子系统。信息发布子系统主要实现电网安全防御系统在安全Ⅲ区的信息发布,实现系统结果的浏览和查询。

6)离线分析子系统。离线分析子系统主要实现对电网历史运行工况进行研究和分析。

http://bhzb.buaa.edu.cn

2.2　WARMAP 的模块化分解

根据 2.1 节中诸多模块化设计方案,通过与领域专家咨询调研,获取了近百种模块化设计影响因素的权值,并运用本文模块化分解模型进行计算,确立 WARMAP 分解为 4 大功能模块:数据采集、分析预警、控制决策和离线研究。其中,数据采集模块主要用于采集和处理电力系统实时状态信息,为后续的安全稳定分析和控制决策提供数据源;分析预警模块主要用于根据实时工况对潜在故障进行综合评估及预警;控制决策模块主要用于在系统出现不安全或潜在不安全的情况下,启动预防控制或紧急控制策略搜索模块,向调度运行人员提供运行方式调整建议;离线研究模块主要用于对所有历史或实时的电网运行数据进行非实时的分析计算,以帮助决策制定或验证。WARMAP 的概念设计流程如图 1 所示。

协调防御系统的应用功能关系如图 2 所示。图中彩色显示的是协调防御系统的三大应用功能:实时预警、辅助决策和协调防御。协调防御系统与 EMS 和 WAMS 存在数据接口。图中:SE 为状态估计;AGC 为自动发电控制;AVC 为自动电压控制;PMU 为电源管理单元。

2.3　WARMAP 的模块化开发

WARMAP 是典型的电力领域复杂产品系统,其模块化开发涉及单位众多,开发任务繁重,开发周期较长。在 WARMAP 的模块化开发中,主要解决数据收集开发工作,包括 WARMAP 从 EMS 汇集的状态估计结果数据,比如电网参数、发电机出力、母线电压和负荷、线路/变压器潮流、状态估计后的计算节点拓扑信息等;从 WAMS 系统汇集的数据,比如母线电压、频率、发电机功角和联络线功率的动态响应轨迹数据(PMU动态数据)。

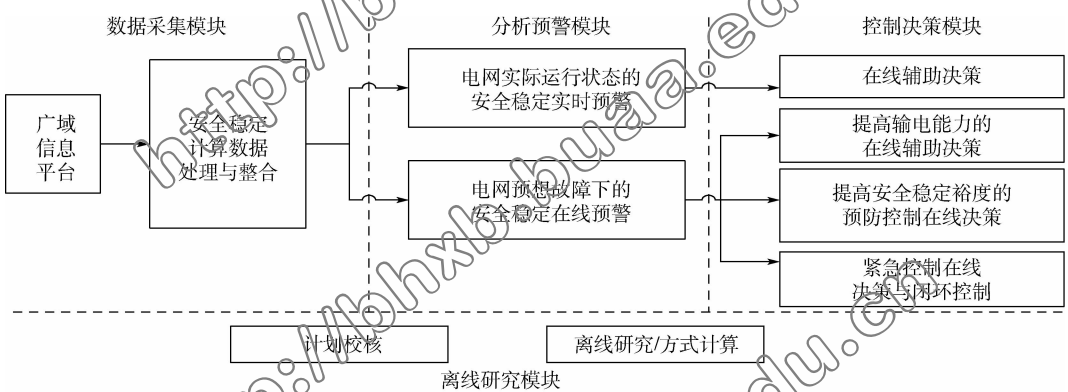


图 1　WARMAP 概念设计流程

Fig. 1　Conceptual design flow based on WARMAP

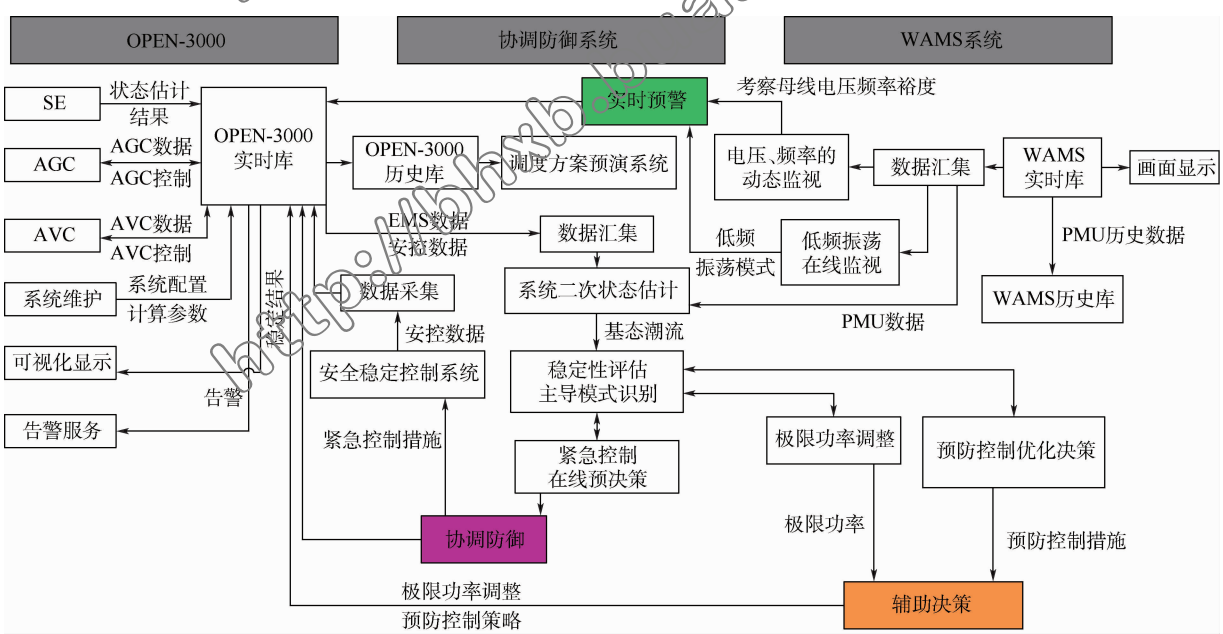


图 2　WARMAP 模块关系

Fig. 2　Relationship of WARMAP modules

http://bhxb.buaa.edu.cn

实时预警主要包括的任务有电压和频率的动态特性监视和分析、低频振荡的在线监视和分析、系统安全稳定性的在线评估和预想故障的阻尼分析;辅助决策内容主要有系统安全稳定主导模式的在线识别、系统在线极限功率计算、预防控制在线优化辅助决策等;协调防御主要包括紧急控制在线优化预决策的开发。

2.4 WARMAP 的模块仿真调试

根据仿真数据,如 EMS 状态估计的断面数据、离线仿真数据,对数据整合的流程进行验证,生成安全稳定计算需要的同时对数据的正确性进行验证。根据电网的实际数据,通过定时数据刷新,调试数据长时间运行的可靠性。

根据事先准备好的潮流、稳定和故障集等数据,顺序进行潮流和安全稳定评估计算。对于稳定的算例,进行极限功率的计算;失稳的算例,进行预防控制的策略计算。通过离线稳定分析软件的比对,验证功能的正确性。

建设仿真系统,模拟真实的电网运行方式以及故障的形态,通过仿真系统和 WARMAP 的数据接口,实现 WARMAP 的模拟调试。同时,通过 WARMAP 主站系统和稳控装置的互联,实现控制策略表的在线刷新模拟试验。

2.5 WARMAP 的工程实施及维护

按照系统出厂测试大纲,组织用户进行系统的测试,并现场实施接入实际运行环境,进行现场调试;经过一段时间的现场试运行,通过黑盒和灰盒测试,分模块快速查找问题所在,交由开发组完成 BUG 修正,或功能的完善,进而由测试组进行集成环境下的验证。对于定期巡检或用户现场提出的新功能需求,则由设计组统一汇总、分析,在模块接口不变的前提下,分模块交由开发组执行高效开发。

基于上述模块化设计、分解、开发、仿真和实施,WARMAP 以 IT 和稳定性量化技术(EEAC 算法)为支撑,通过电力 EMS 和 WAMS 系统获取发输配电网络环节的运行信息,在线跟踪电网实际运行工况,推动电网调度运行从传统的“离线预案”升级为“在线预警及辅助决策”,直至实现“在线协调控制”。在开发管理过程中,WARMAP 的设计研发单位发现,通过合理地分解 WARMAP 的模块化数量,极大地缩短了 WARMAP 的研发周期,原来计划研发和测试阶段 360 人天的开发投入,仅用了 217 人天即通过了出厂测试;由于分工进一步明确,减少了交叉和重复,节约了大量沟通协调成本,各开发人员在同一功能模块的投入提升了 20% ~30%,极大提高了 WARMAP 的研发质量。产品已在中国 19 个省级电力公司调度中心得到了应用,取得了良好的应用效果和经济效益。

3 结束语

模块化已成为解决产品系统复杂性的有效方法和有力工具,得到了深入的研究和广泛的应用。然而,在 CoPS 的开发实现过程中,如果不能恰当地分配好 CoPS 的模块化数量,不但不能起到简化系统复杂性、降低制造成本、增加系统制造灵活性的作用,还会增加 CoPS 模块化的生产、交易成本以及管理复杂性。为此,本文在分析 CoPS 模块化理论研究的基础上,明晰了 CoPS 模块化分解原则,建立了 CoPS 的模块化分解模型以及模块化分解程度与企业绩效间的关系模型,并以影响国计民生的电力行业 CoPS——WARMAP 为例分析了相应模型的有效性。企业可使用这些模型,结合自身产品系统开发管理的特点,因地制宜地找到模块分解数量和开发效率的最优结合点,以最优模块数最大限度地提升企业绩效,从而降低 CoPS 的开发制造成本和实现 CoPS 的柔性制造。

参考文献(References)

[1] SIMONH A. The architecture of complexity[J]. Proceedings of the American Philosophical Society, 1962, 106(6): 467-482.

[2] HUANG C C. Overview of modular product development[J]. Proceedings of the National Science Council, Republic of China, Part A: Physical Science and Engineering, 2000, 24(3): 149-165.

[3] STONE R B, WOOD K L, CRAWFORD R H. A heuristic method for identifying modules for product architectures[J]. Design Studies, 2000, 21(1): 5-31.

[4] ZAMIROWSKI E, OTTO K. Identifying product family architecture modularity using functionand variety heuristics[C]// 11th International Conference on Design Theory and Methodology, Lasvegas, 1999.

[5] HOLLTT K. Identifying common modules for collaborative R&D [C]// POM2002 Meeting on Production and Operations Management, San Francisco, 2002: 1-16.

[6] 陈劲,桂彬旺. 模块化创新:复杂产品系统创新机理与路径研究[M]. 北京:知识产权出版社,2007.
CHEN J, GUI B W. Innovation of modularization: Research on innovation mechanism and approach of CoPS[M]. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2007(in Chinese).

[7] LAU ANTONIO K W, YAM R C M, TANG E. The impacts of product modularity on competitive capabilities and performance: An empirical study[J]. International Journal of Produc-

http://bhxb.buaa.edu.cn

tion Economics,2007,105(1):1-20.

[8] RODRIGUES A,ROCHA ARMADA M J. The valuation of modular projects:A real options approach to the value of splitting [J]. Global Finance Journal,2007,18(2):205-227.

[9] BALDWIN C Y,CLARK K B. Design rules. Volume 1: The power of modularity[M]. Cambridge: MIT Press,2000.

[10] 王瑜,任浩. 模块化组织价值创新:内涵与本质[J]. 科学学研究,2014,32(2):282-288.
WANG Y,REN H. Value innovation of modular organization: Content and nature[J]. Studies in Science of Science,2014,32(2):282-288(in Chinese).

[11] 王瑜,任浩. 模块化组织价值创新:路径及其演化[J]. 科研管理,2014,35(1):150-156.
WANG Y,REN H. Path and evolution of value innovation in modular organization[J]. Science Research Management,2014,35(1):150-156(in Chinese).

[12] 齐建民,钟军. 模块化设计下的复杂产品成本测度研究[J]. 中国石油大学学报(社会科学版),2013,29(3):13-17.
QI J M,ZHONG J. A study of complex product cost measure under modular design[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Social Sciences),2013,29(3):13-17(in Chinese).

[13] 郑维强,刘振宇,刘连新,等. 基于模糊关联的复杂产品模块化设计方法及其应用[J]. 机械工程学报,2015,51(5):130-142.
JIA W Q,LIU Z Y,LIU D X,et al. Modular design method and application for complex product based on fuzzy correlation analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering,2015,51(5):130-142(in Chinese).

[14] 陈建勋,张婷婷,吴隆增. 产品模块化对组织绩效的影响:中国情境下的实证研究[J]. 中国管理科学,2009,17(3):121-130.
CHEN J X,ZHANG T T,WU L Z. The effect of product modularity on organization performance:An empirical study in Chinese context[J]. Chinese Journal of Management Science,2009,17(3):121-130(in Chinese).

[15] 青木昌彦,安藤晴彦. 模块时代——新产业结构的本质[M]. 周国荣,译. 上海:上海远东出版社,2003.
AOKI M,ANDO H. Module age—The nature of new industrial structure[M]. ZHOU G R,translated. Shanghai:Shanghai Far East Publishers,2003(in Chinese).

[16] BALDWIN C Y,CLARK K B. Design rules:The power of modularity [M]. Cambridge:MIT Press,2000.

作者简介:

闫华锋　男,博士,研究员级高级工程师。主要研究方向:复杂产品系统技术与应用、技术创新管理。

Modular decomposition model of complex product system and its application

YAN Huafeng[1,*], ZHONG Weijun[2]

(1. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;
2. School of Economics and Management, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Modular design and development technology can realize flexible manufacturing of complex product system (CoPS), but inappropriate modular decomposition will increase managerial difficulty and manufacturing cost. Based on the analysis of the product system modularization theory, this paper summarizes the modular processing flow of the complex product system, lists the modular decomposition principle of CoPS, proposes the modular decomposition model and modular-enterprise performance correlation analysis model, and then uses the wide area moniting analysis protection-control (WARMAP) system as an example. This paper discusses that calculation by the modular decomposition makes the wide-area monitoring and analysis control system of power grid is divided into four functional models under the complex condition, which greatly shortens the development cycle of WARMAP system, improves the quality of research and development, verifies the validity of the modular decomposition model, and provides theoretical guidance and decision-making reference for enterprise product modular design.

Keywords: complex product system (CoPS); innovation research; modular design; modular decomposition model; wide area moniting analysis protection-control (WARMAP)

Received: 2016-04-07; **Accepted**: 2016-05-13; **Published online**: 2016-06-15 15:50

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20160615.1550.001.html

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (71071033)

* **Corresponding author**. E-mail: yhf_sgga@163.com

http://bhxb.buaa.edu.cn