

模块化局限与再集成发展模式分析

——基于复杂产品体系视角

林杨¹ 唐昭¹ 王君¹ 张翔¹ 陈向东²

¹ (中国运载火箭技术研究院北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

² (北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100191)

〔摘要〕 模块化主流研究关注在特定领域、环境或背景中如何模块化, 并没有关注其突出的局限性。模块化局限性在复杂产品体系中有显著表现, 本文基于逆模块化文献与相关理论, 在模块接口与依赖、模块边界与数量、模块化的协同限制、模块化门限和模块化陷阱与再集成发展5个方面展开分析, 以航空产品作为实例进行论证。研究发现复杂产品体系的模块化局限性分别表现在模块间接口模糊与模块高度耦合, 物理与知识模块的边界过于细小且其匹配关系具有灰色地带, 多维度模块化在多象限发散, 模块化门限无法准确获得。模块化变异突进的产品服从模块化与集成化交替的发展路径, 会产生再集成。模块化变异温和与稳定的产品分别服从以模块化为主和以集成化为主的发展路径。确定模块接口与模块间关系, 刻画模块边界, 逼近模块化门限, 管理多维度模块化变动与探索集成模块的出现与演进对模块化在复杂产品体系中的应用具有重要意义。

〔关键词〕 模块 再集成 复杂产品 模块化局限 多维度模块化 集成模块

DOI: 10.3969/j.issn.1004-910X.2021.08.011

〔中图分类号〕 F273.1; F270 〔文献标识码〕 A

引言

上世纪90年代Baldwin和Clark^[1]表示模块化时代即将到来。随着科技发展, 模块化为生产方式带来了前所未有的灵活与便利。因为整体产品可以被分割为若干子系统和子模块, 分割与加总的思想可以大大提高效率。IBM将此模式应用于PC产业, 获得了空前成功, 在随后的发展中模块化生产也确实展现出了巨大吸引力。纵观历史, 在超长期的发展中模块化的程度提高是一个必然趋势, 但是在某个发展阶段模块化与集成化的关系仍然值得我们去探讨。模块化的缺陷一直客观存在, 就现阶段而言并不是所有的产品生产都可以进行简单的分割与加总。

模块化主流研究关注如何模块化, 从而降低成本, 实现高效生产。近年来更多的前沿研究都关注特定背景、行业或其他给定条件下的模块化模式。逆模块化与反模块化思想的文献虽不占数

量优势, 但其核心思想在生产中的客观体现不容忽视。是否应当模块化? 如何模块化? 模块化到何种程度? 诸多问题困扰着厂商。Prencipe^[2]提出产品本身决定了模块化还是集成化的生产方式, 集成化使产品质量得到最大化的保障, 模块化会使产品的改变与更新更加便捷, 产品多样化提升。虽然其各具功能, 但是模块化在部分产品的生产中并不可用。Fleming和Sorenson^[3]指出中级水平的模块化会产生最有用的发明, 即使在能够应用的产业中, 也要考虑模块化的使用程度。

逆模块化与反模块化思想与模块化的局限性主要归因于随科技发展而出现的复杂产品体系。Vickery等^[4]运用回归分析证明了当产品的复杂性提高, 产品模块化会抑制新产品性能。在复杂产品体系的生产中, 模块化所获得的速度与效率终究会被测试和集成化阶段的工作所抵消, 甚至会耗费更大精力^[5]。如果进行过度精细的模块化, 不

收稿日期: 2021-05-04

基金项目: 国家重点研发计划项目“公共路权运行环境下非轨接触导向运输系统关键技术与装备研制”(项目编号: 2018YFB1201600)。

作者简介: 林杨, 中国运载火箭技术研究院北京宇航系统工程研究所高级工程师。研究方向: 技术创新管理。唐昭, 中国运载火箭技术研究院北京宇航系统工程研究所工程师。研究方向: 技术创新管理。王君, 中国运载火箭技术研究院北京宇航系统工程研究所工程师。研究方向: 技术创新管理。张翔, 中国运载火箭技术研究院北京宇航系统工程研究所工程师。研究方向: 技术创新管理。陈向东, 北京航空航天大学经济管理学院教授, 博士生导师。研究方向: 技术创新管理。

仅会使得模块化设计师在有潜在重要交互影响的选择间犯错,还可能使产品产生混沌行为^[6],安腾芯片的设计和开发过程就是如此。加之复杂产品体系中随机动态因素的冲击,模块化在复杂产品体系中的应用十分有限。

1 模块划分与依赖

模块化的一个重要前提是各模块间有清晰的接口^[7]。这需要各模块间有明确的分解点,各模块间的结合强度弱,具有高度松散的关系;模块内部结合强度高,具有高度密切的关系^[8]。PC等结构简单且稳定的产品是有清晰模块接口的范例。假设1台PC在生产中的总任务为 N ,如式(1),总任务 N 会十分容易地被分割为若干子模块,且各子模块之间高度独立。在此每个模块都由 $\omega(x_i)$ 表示,其很自然地可以被表示为连加的形式。即当分立的任务模块完成时,将各任务模块组合起来就构成了完整的总任务 N 。

$$N = \sum_{i=1}^n \omega(x_i) = \omega(x_1) + \omega(x_2) + \dots + \omega(x_i) \quad (1)$$

随产品复杂程度的提高,各模块间接口变得模糊。当接口不清晰时,产品生产总任务还为 N ,但各任务 $\omega(x_i)$ 的关系不再是连加的形式。其变为如式(2)所示的连乘形式,此时各任务 $\omega(x_i)$ 间不是相互独立的。Cabigiosu等^[9]就质疑了模块化和创新性外部资源一体化中模块的独立性,并且认为模块接口有着显著变异性,其决定因素极其复杂。原始设备制造商和供应商的能力、纵向一体化的程度及知识范围和战略选择分别是设计与施工任务分割、接口的确定过程和公司内部合作机制选择的决定因素。即使模块间接口在设计上可确认,也只是完成了经常被混淆为“模块化”(Modularization)的“模块性”(Modularity),并没有完成真正的分割。因为复杂产品的产品性能需要满足功能系统的复杂交互影响、消费者和监管者等多方需求,无法准确预测,这需要持续的一体化处理^[10]。

$$N = \prod_{i=1}^n \omega(x_i) = \omega(x_1)\omega(x_2)\dots\omega(x_i) \quad (2)$$

产品的复杂性促使任务网络中的各任务组成相互依赖的复杂系统,模块化构思的可实施性会大幅降低。当联系与依赖达到一定程度时,各模块间会产生不同程度的耦合。早在1996年,“镜

像”假说就指出模块化结构产品在各部件之间具有松散耦合的情况下能提供嵌入式协同以实现发展过程协同,从而降低集成性管理的需要^[11]。并且镜像假说还需要建立在稳定产品架构的基础上^[12],也只有在稳定产品架构的基础上才存在模块化对于集成化组织机制的替代。模块化的完美构想会被复杂产品的特性打破,复杂产品由混合组件构成,由其组件之间的高耦合度所带来的强依赖性不可避免的会带来模块间的紧密关联。此时如果将生产总任务 N 进行模块化,各任务模块 $\omega(x_i)$ 会形成无固定形式的、无法估测的连乘组合,如式(3)所示。复杂产品生产过程中还会有若干相关因素的随机变动冲击,在此表示为 $D(x_i)$,如式(3)和式(4)。这如同本文强行将式(2)表示成连加的形式,最终形式会如式(4)所示。甚至有学者直接指出只有当活动的各任务间的相互依赖程度处于中等水平时,模块化组织才是最佳的组织方式^[13]。

$$\begin{cases} \omega(x_1)\omega(x_2) \\ \omega(x_1)\omega(x_2)\omega(x_3) \\ \dots \\ D(x_i) \end{cases} \quad (3)$$

$$N = \omega(x_1) + \dots + \omega(x_1)\omega(x_2) + \dots + \omega(x_1)\omega(x_2)\omega(x_3) + \dots + D(x_i) + \dots \quad (4)$$

2 模块边界与数量

复杂产品体系在产品物理功能与模块加工技术和知识上都具有巨大的不可降解性,或两者可降解性的匹配关系是动态变化的。对于模块间具有广泛交互性的复杂产品,模块化的应用会面临知识模块边界和物理模块边界不清的情况,从而导致模块化的效果下降^[14]。对于行业标准不起决定性作用的行业,如汽车制造业,依靠模块化根本不能克服内部组件模糊的知识模块边界^[15]。再如航空制造业,陈向东^[16]针对航空飞机制造业企业分析模块化方法的适用形式和局限性,指出飞机制造是介于集成方式和分解方式之间的复杂产品制造体系,具有十分细小、复杂且模糊的物理模块边界和知识模块边界,其生产受到集成商的高度控制,实为集成化生产。

在逆模块化文献中,学者们大都将知识模块边界和物理模块边界分为大与小两个层次来表示

产品在这两方面的可降解性。如图1所示,纵轴代表知识模块边界,横轴代表物理模块边界,只有知识模块边界和物理模块边界都很大的产品(由图1中的白色方块表示)才适合被模块化。因为此时整个产品系统会被分割为有限的且清晰的模块^[8]。但是在复杂产品体系中,产品的物理模块边界与知识模块边界不可能只被划分为大与小两个层次。随产品复杂程度的提高,产品的知识模块边界与物理模块边界的匹配会产生巨大的随机性与变异性,此时知识模块边界与物理模块边界之间的关系如图2所示。图中的灰色方块由图1中表示高物理模块边界低知识模块边界和高知识模块边界低物理模块边界的结构转为表示不确定性匹配结构的灰色地带。这样的结构方块还会无限制的扩散,此时整个产品系统因无法提炼共同属性只能被分割为无数小模块^[8],且知识模块与物理模块根本无法相互联系。这会对模块化的设计与制造带来巨大的混沌效应。

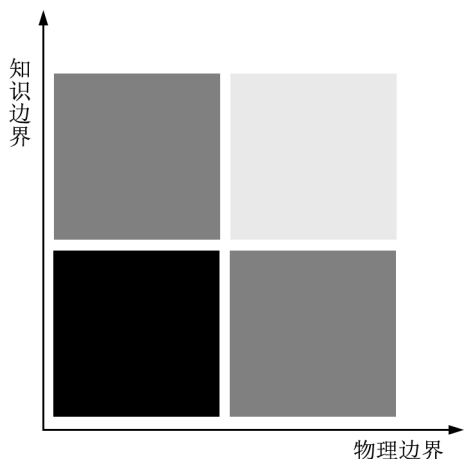


图1 传统逆模块化文献产品模块边界

3 模块化的协同限制

协同化是模块化的一个重要动机,在PC产业或其他模块化得到成功运用的产业中,模块化会给生产带来高效的协同效应,分工合作的思想在此得到了巨大发挥。在分工模式下,由于责任分摊,厂商的成本会得到节约。延续上述任务函数,在此本文引入责任函数式(5)。对于复杂程

$$\left\{ \begin{aligned} R[\prod_{i=1}^n \omega(x_i)] &= r[\omega(x_1) + \dots + \omega(x_1)\omega(x_2) + \dots + \omega(x_1)\omega(x_2)\omega(x_3) + \dots] \\ R^{other}(x) &= r[\omega(x_i)] \\ &\dots \\ R^\infty(x) &= r[\omega(U)] \end{aligned} \right. \quad (6)$$

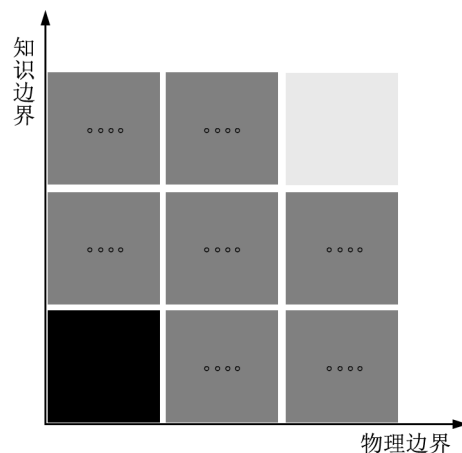


图2 复杂产品模块边界

度较低的产品,任务的高度分散化会带来责任的高度分散化,此时责任函数可以较为容易的被表示为连加的形式,分散化的责任会使各任务主体在自己的优势下完成任务。 $R'(x)$ 表示厂商自己所承担的任务, $R^{other}(x)$ 表示其他任务主体所承担的任务,此时各任务主体利用比较优势可以很好的分散责任与成本。

$$\left\{ \begin{aligned} R[\sum_{i=1}^n \omega(x_i)] &= r[\omega(x_1) + \omega(x_2) + \dots + \omega(x_i)] \\ R'(x) &= r[\omega(x_1)] \\ &\dots \\ R^{other}(x) &= r[\omega(x_i)] \end{aligned} \right. \quad (5)$$

但是当产品的复杂程度提高时,分散化的任务只能做到部分协同,此时沟通与协调、监督和性能取舍等厂商所需的必要环节会使得各任务主体间的比较优势所带来的成本降低被新的一体化整合所带来的成本所抵消,此时责任函数变为式(6),只有部分责任可以由其他任务主体独立承担,在此仍由 $R^{other}(x)$ 表示。厂商自身责任在此变为 ∞ ,如果强行进行模块化只能带来强的混沌效应,从而造成成本的异常升高,其相当于强行将责任函数表示为连加的形式,如式(6),从而无法得到一个确定形式。

混淆生产、组织、知识、技术与市场等多维度模块化是现有的一大问题，很多研究只关注了生产模块化，并没有注意因此带来的其他维度的模块化，其他维度模块化的变动过程可能不服从于生产模块化。当然在复杂度较低的产品中混淆这些概念不会带来大的问题，因为多维度的模块化会顺着相同的方向和轨迹运动，如图3所示。

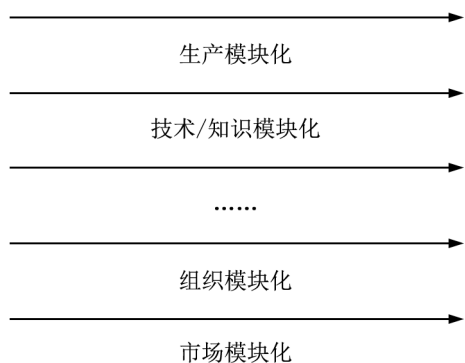


图3 低复杂度产品多维度模块化变动

复杂产品体系的知识、技术、组织与生产等多方面的模块化服从不同维度的动态发散过程。此时产品多维度模块化变动的方向和轨迹都不相同，其至少在3个维度发散。如图4所示，生产、组织与技术模块化的变异构建起了三维发展路径，如果此时加入知识、市场等其他因素的模块化变异路径，此过程会继续升维，我们将无法用简单的图形刻画此变异过程。由于模块化的基础限制；技术模块化、市场模块化与组织模块化没有自然的聚合；并且知识与组织的协同都不可能完美地被模块化产品结构自动实现，所以需要系统集成商有能力覆盖更广泛的技术领域并进行整合^[17]。简单产品的工作任务越复杂，工作部门分割就会越细致。但是复杂产品由于其可降解性下降，生产模块化程度下降，部门划分不会因任务复杂度上升而变得细致，但是组织层次却会因此上升^[18]。复杂产品体系的多维度模块化变异只能依靠集成化管理进行控制，即使在生产模块化程度极高的半导体行业，组织架构也会趋向于一体化^[19]。

4 模块化门限

对于新产品的发展，厂商虽然可以通过模块化来降低供应商一体化的重大组织间整合对产品的制造成本和性能产生的负面影响，但是只能降低到模块化的最大程度^[20]。基于上述讨论，本文认为复杂产品的生产不可能被完全模块化，且其存在着模块化与集成化相融合的稳定状态。本文将

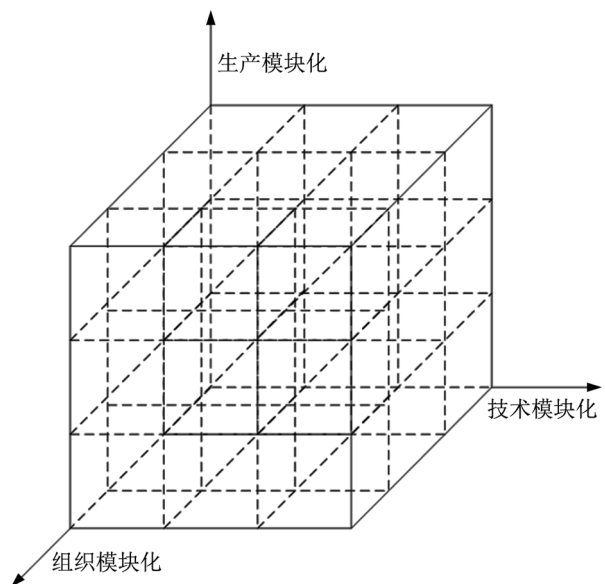


图4 高复杂度产品多维度模块化变动

构建模块化函数与集成化函数来刻画上述状态，模块化函数被定义为分段函数式(7)中的 $M = \alpha + \beta x$ ，其是斜率为 β 的增函数，而集成化函数被定义为分段函数式(7)中的 $C = \theta + \gamma x$ ，其是斜率为 γ 的减函数，此分段函数中 $\beta > 0$ ， $\gamma < 0$ 。如图5所示，当产品的复杂程度上升时，产品模块化程度会随之下降，而集成化程度会随之上升，最终其会停留在一个常数上，在此用 c 表示，此时 c 即为产品的模块化门限。

$$\begin{cases} M = \alpha + \beta x & 0 \leq x \leq k \\ C = \theta + \gamma x & \\ M = C = c & k < x \leq k' \end{cases} \quad (7)$$

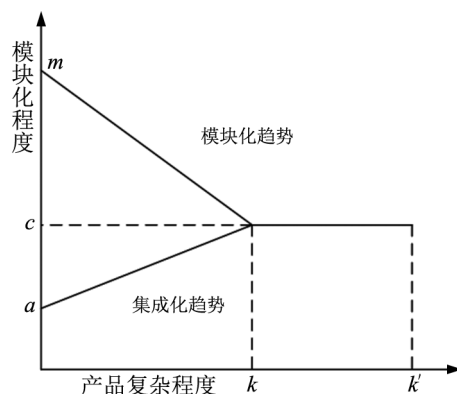


图5 基于产品复杂程度的模块化与集成化过程

上文基于一次函数对产品的模块化门限进行相关分析，然而众多情况并非像一次函数那样简单，即我们并不能得出精确的模块化门限。当产品的复杂程度进一步上升时，原有稳定的常数状态会发生改变，此时产品的模块化与集成化过程可以被恰当的刻画为两个随机过程。伊藤过程可

以很好的刻画这一现象,在此假设变量 x 的值服从以下伊藤过程,其中 dz 是维纳过程, a 和 b 为 x 和 t 的函数。变量 x 的漂移率为 a , 方差为 b^2 : $dx = a(x, t)dt + b(x, t)dz$, 即产品模块化与集成化过程都可以被描述为由漂移项 $a(x, t)dt$ 和扩散项 $b(x, t)dz$ 所构成的伊藤过程, 也即复杂产品模块化与集成化由发展过程 $a(x, t)dt$ 和混合干扰 $b(x, t)dz$ 两大基本项构成。伊藤引理说明 x 和 t 的函数 G 服从以下过程, G 也服从伊藤过程, 漂移率为 $\frac{\partial G}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 G}{\partial t^2} b^2$, 方差率为 $\left(\frac{\partial G}{\partial t}\right)^2 b^2$, $dG = \left(\frac{\partial G}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 G}{\partial t^2}\right)dt + \frac{\partial G}{\partial t} b dz$, 即 $a(x, t)$ 和 $b(x, t)$ 并不是简单的常数, 也即复杂产品模块化的发展过程与混合干扰很难被精准的找出。此时要得到模

块化的门限必须要构建如式(8)所示的随机偏微分方程组以找到两个随机过程在 T 时点的稳定状态。但是一般情况下随机偏微分方程的解析解很难得出, 即复杂产品的模块化门限虽然在理论上存在, 但无法准确刻画。但是随机偏微分方程一般可以模拟出一个近似的数值解, 即复杂产品的模块化门限只能找到一个动态且模糊的状态。除客观的技术发展与突破, 产品知识的不断积累和技术发展以及积累和发展的不平衡也会影响模块化制造^[21]。只有管理与生产经验的不断提高才能帮助厂商更加精确地刻画出在 T 时点的稳定状态, 即模块化门限。此工作需要厂商在生产中不断进行知识的学习积累、核心技术的研发攻关、管理能力的提升与管理经验的总结等。

$$\left\{ \begin{array}{l} dG = \left(\frac{\partial G}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 G}{\partial t^2}\right)dt + \frac{\partial G}{\partial t} b dz \\ dG' = \left(\frac{\partial G'}{\partial x} + \frac{\partial G'}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 G'}{\partial t^2}\right)dt + \frac{\partial G'}{\partial t} b dz' \\ F(x, t) = dG - dG' = 0 \\ \left(\frac{\partial G}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 G}{\partial t^2}\right)dt + \frac{\partial G}{\partial t} b dz = \left(\frac{\partial G'}{\partial x} + \frac{\partial G'}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 G'}{\partial t^2}\right)dt + \frac{\partial G'}{\partial t} b dz' \end{array} \right. \quad (8)$$

5 航空产品实例分析

复杂产品按照生产的特点可以分为时序型、时点型和兼有型。航空发动机、涡轮发动机叶片生产过程中的中间产品和涡轮发动机叶片是这3种复杂产品的典型代表。时序型复杂产品的复杂性主要体现在复杂的层次化生产与“禁止失控”。航空发动机的上万个部件, 如叶片、喷管、过滤器等由各个厂商进行生产, 最后进行统一的集成化装配。装配过程与各组件生产的过程绝非分离, 各组件的生产会被集成商高度控制, 控制活动包括细致的驻厂指导、监测与质检等。并且各厂商所生产的产品本身就具有高度复杂性, 会衍生新层次的耦合。

航空发动机的各部件基本是兼有型复杂产品, 涡轮发动机叶片是此类产品的典型代表。复杂性主要体现在产品的极限耦合性上, 在其中还隐含了时点型复杂产品的复杂性, 其最能体现模块化的局限性。如图6所示, 本文所描述的发动机叶片的生产可分为七大模块, 分别为制造陶瓷型芯、制造耐火性壳和制造腊模等7个工段, 7个部分为顺梯度制造。

每个工段生产结束后都会有一个模块产品出现, 但这些模块产品都属于中间产品, 这些中间产品就是时点型复杂产品的代表, 如浇灌成型的外壳和陶瓷型芯等。在模块进行拼接时, 这些中间产品全都要消失。此衔接过程即各模块产品之间的耦合是无限的。模块产品即中间产品大都一次成型, 其复杂性体现在成型前无数小工序的准备和对于成型时的高精度要求, 因为其自身要完成与其他产品的无缝对接。

如图6所示, 上述的7个工段模块可以进行两个层次的降解, 最后降解为二级工序。二级工序的数量十分繁杂, 且不完全独立。如果要将工序完全独立, 还要进行无限的细分, 物理模块化在此类产品的生产中失效。生产中所用到的技术知识也是同等道理。如图7所示, 发动机叶片核心的技术体现于散热孔的制造, 生产散热孔的技术要求极高, 此技术需要多种技术的配合与支撑。想要做到知识技术的彻底降解与独立, 需要保证知识模块无限小的边界, 但是在实际中无法做到。保证叶片的曲度和光度等也是如此, 知识模块化在此类产品的生产中也处于失效。

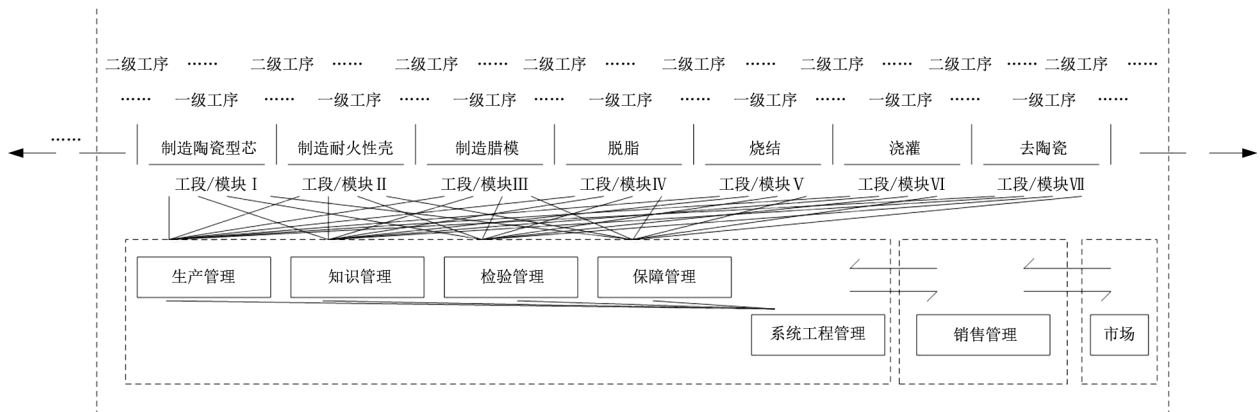


图6 涡轮发动机叶片的模块化理论应用

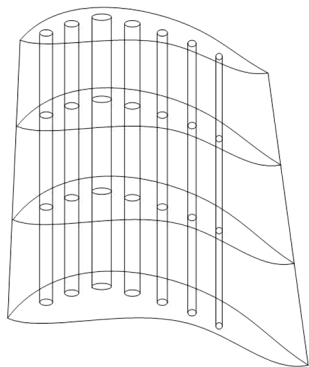


图7 涡轮发动机叶片示意图

上述的工段和其上一级工序分别由工段长与班组长负责，此生产过程的管理由工程部统一调配，其生产中的组织管理还包括知识管理、质检管理和保障管理，整个组织管理与生产的各环节相互交叉、相互联动。生产完成后，此产品将由销售部门负责销售，此时由于发动机的多层次复杂性，市场的需求是模块化的。但由于产品的特殊性，生产商只有能力供应一种发动机叶片，此种发动机叶片的供应存在较大竞争，厂商无法实施差异性市场战略。叶片的生产过程相当于一个复杂的系统工程，其全流程中所牵扯生产、知识/技术和组织等分工与划分，无法做到一一匹配，即其不是一个同方向的收敛过程，而在多维度发散。加入市场的划分后，此过程会变得更为复杂。

对叶片的生产和组织管理等分工与协作，厂商在不断进行精益化的修正。此过程包括合并与分立工段和工序，改变梯度化生产线的布局，优化原有的质检分工，降解现有的集合性知识与技术难题等。其在追求一个模块化与集成化相配合的最优状态。实现高效生产和利润最大化是每个厂商的目标，实现模块化与集成化的最优配合是实现这一目标的必经之路。最优配合即模块化的极限程度和相对应的集成化程度确实存在，但是

这一状态即门限无法找到。厂商只能通过不断地积累生产和管理经验，提高相关技术等手段无限逼近这一状态。

6 模块化陷阱与再集成化

模块化陷阱取决于产品结构的变异程度，而核心技术的发展与变化是产品结构变异的决定性因素。核心技术的高度集成性和一体化是模块化陷阱的重要解释^[22]。如表1所示，当产品结构变异稳定时，模块化动态变异性质处于稳态，此时落入模块化陷阱的可能性极小。此类产品的代表是包括航空产业在内的复杂产品。飞机与飞机发动机的制造是工业发展的巅峰，其核心技术会被牢牢把控在单一的模块化集成商手中，由于核心技术进化过程缓慢，其生产与管理的优化节奏相当平稳，只是在原有基础上进行极为有限的补充。在此基础上产品结构短期内不会有突进式变化；结构变异速度居中的产品模块化动态变异性质较为温和，此类产品落入模块化陷阱的可能性也很小，其主要源于产品结构与核心技术的发展需求不是突进式的，部分家用电器与办公用品是此类产品的代表；结构变异剧烈的产品极易落入模块化陷阱，模块化陷阱在我国可以被概括为产品的层次建构与关键部件的层次建构朝不同方向演变、产品层次建构反方向演变或商业模式建构的变化。这三方面分别对应我国的电视、MP3和VCD-DVD产业^[22]。如传统的显像管电视转变为平板电视时，其核心芯片由原来的5片变为2片或1片，此变化就是逆向的集成化变动。

集成化与模块化的生产模式一直就不是分立的，如表1所示，结构变异居中，模块化动态变异温和的产品适合于以模块化为主的生产方式，模块集成商是无足轻重的。如PC的软驱、记忆存

表1 模块化变异性质、发展模式与代表性产业

模块化动态变异性质	性质描述	模块化模式	主要产业及产品的主要研究
突进	结构变异剧烈	模块化与集成化交替发展	电视(宋磊; 谢伟) ^[22,23] 、MP3(宋磊) ^[22] 、VCD-DVD
温和	结构变异居中	模块化为主	洗碗机(Sanchez和Sudharshan) ^[24] 、PC(Baldwin和Clark; Sanchez和Sudharshan; Langlois和Robertson) ^[1,24,25] 、复印机、洗衣机
稳态	结构变异稳定	集成化为主	飞机: 播音/空客/道格拉斯(Woosley) ^[26] 、飞机发动机: 航空发动机(Prencipe; 陈向东) ^[2,16] 、汽车: 汽车行业(Zirpoli和Becker) ^[15]

储装置(硬盘)、光驱都是典型的模块部件,与专用的微处理器(CPU)进行简单装配后就能立即投入使用,当然装配即集成的过程无法被取代。

模块化绝不是发展的终极状态,产品发展会在模块化与集成化之间循环往复^[7]。长远视角下,在科技和社会发展的过程中因消费者需求的增加,产品需要不停地满足消费者与市场的新需求。Kapoor^[27]通过对半导体产业的研究,回答了为何在纵向一体化转变为专业化的浪潮中,仍然有许多企业选择一体化,其指出系统性的创新是核心要素,市场越发广泛的需求总会抵消掉一体化的成本。如表1所示,电视机和MP3的核心要件与产品结构都在逆模块化发展,逐步变为集成化生产,并且MP3和VCD-DVD已经变为其他产品的一个独立模块。这些变化都是在科技与社会的发展中,为满足消费者日益增长的需求而产生的,其经历了模块化、再集成与再模块化的过程。沈于和安同良^[28]通过“选择权价值”随技术演进的降低,解释了再集成化的逻辑。模块化的优势在于“选择权价值”,当技术进行进一步的演变和革新,这样的“选择权价值”会进一步弱化,当“主导设计”出现时会产生“再集成化”,此时模块化厂商会遭受损失。并且在实践中我们无法直接定论采用一体化还是模块化,应该根据技术性能和消费需求的差距,在产品性能尚不够好时采用一体化,在性能好过头时采用模块化,二者交替使用^[29]。

复杂产品模块化生产的本质是集成化。即使一个复杂产品的子系统被定义为一个模块,其最终也会从“模块与整体”的产品结构与维度走向“一体化”的结局^[10]。但是绝对集成化的生产不

能满足产业发展的需要,因为绝对集成化的生产无法满足厂商利润最大化要求,所以复杂产品体系如航空与汽车制造业是以集成化为主的生产方式。如表1所示,飞机机身作为主要模块,机头、机翼和尾翼等主要部件可通过与该模块的联系来制造不同规格的客机和运输机,当然此过程不是真正意义上的模块化。

综上,本文认为3种类型的产品都有向“集成模块”发展的趋势,这与Neely等^[30]提出的供应商向集成化方向发展的思路类似。在科技强势发展的逼迫下,简单的模块化制造商缺乏及时的转型与升级就必将被淘汰。科技发展背景下模块化与再集成化的不断往复运动会推动原有的模块因多方耦合而形成新的集成模块,多个集成模块所组成的集成模块化模式会构成最终的稳定状态。如表1所示,变异类型为突进和温和的产品在此方面表现明显,如电视、MP3和VCD-DVD等其本身已经成为单独的一个模块,并且很多芯片和压缩机等模块制造商已发展成为为多类型产品提供服务的厂商或独立的更完整的产品制造商。复杂产品体系变为集成模块需要较长的时间,因为其需要巨大的知识与技术积累或变革性的技术发展。

7 结论与展望

简单产品可采用模块化的生产模式是因为其模块间接口清晰,并且各模块间结合强度弱,关联疏松。复杂产品体系模块间关系密切,结合强度高,且接口模糊,会产生不可分割性与模块间的高度耦合;模块化的一大优势是分立模块,分摊责任,降低成本,利用比较优势协同发展。但是在复杂产品体系中,其责任具有粘性,无法得

到分摊,从而无法实现协同发展。复杂产品存在过于细小的知识模块边界与物理模块边界,其在产品物理功能与模块加工技术和知识上都具有巨大的不可降解性,并且两者的匹配关系会出现灰色地带。生产模块化会引起组织、技术、知识和市场等多维度模块化。简单产品的多维模块化在同象限以同方向和同速度变动。复杂产品的此过程是多象限的高维发散过程,简单的模块化过程会带来混沌效应。随产品复杂程度的提高,生产的模块化程度会降低而集成化程度会升高,从而产生模块化门限;简单产品不存在模块化门限,随产品复杂程度的提高,其可以被刻画为一个简单的常数或两个复杂的伊藤过程在T时刻共有的稳定状态,此稳定状态一般无法获取,只能依靠技术的变革和生产与管理经验的积累找到近似状态。

产品结构变异剧烈,模块化变异突进的产品最容易陷入模块化陷阱,而结构变异温和与稳定的产品不容易陷入模块化陷阱。结构变异温和的产品以模块化生产为主,结构变异稳定的产品即复杂产品以集成化生产为主。结构变异剧烈产品的生产在模块化与集成化间交替发展,会产生再集成。

通过上述研究我们发现了以下重要问题或发展方向:(1)如何精确地找出产品模块接口与模块间的依赖关系;(2)如何精确地刻画出复杂产品体系的模块化门限;(3)如何找到复杂产品知识模块边界与物理模块边界匹配的灰色地带;(4)如何有序管理多维度模块化;(5)在模块化发展过程中会产生厂商、供应商与分包商等角色和职能的演进,其最终会演化为集成模块化模式。模块化变异剧烈和温和的产品已有此经验,而模块化与产品结构变异稳定的复杂产品体系如何向此方向演进值得我们进一步探讨。

参 考 文 献

[1] Baldwin C Y, Clark K B. Managing in an Age of Modularity [J]. Harvard Business Review, 1997, 75 (5): 84.
[2] Prencipe A. Modular Design and Complex Product Systems: Facts, Promises, and Questions [R]. Working Paper: Economic & Social Council, 1998.
[3] Fleming L, Sorenson O. Technology as a Complex Adaptive System: Evidence from Patent Data [J]. Research Policy, 2001, 30 (7): 1019~1039.
[4] Vickery S Y, Koufteros X, Dröge C, et al. Product Modularity,

Process Modularity, and New Product Introduction Performance: Does Complexity Matter? [J]. Production & Operations Management, 2016, 25 (4): 751~770.
[5] Sendil K Ethiraj, Daniel Levinthal. Modularity and Innovation in Complex Systems [J]. Management Science, 2004, 50 (2): 159~173.
[6] Kauffman S. At Home in the Universe—The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity [J]. Leonardo, 1995, 29 (6): 667~672.
[7] Chesbrough H W. “Towards a Dynamics of Modularity. A Cyclical Model of Technical Advance”, in: Prencipe A, Davies A, Hobday M, eds, The Business of Systems Integration [M]. Oxford: Oxford University Press, 2003: 176~182.
[8] 童时中. 模块化设计的系统分解技法(下) [J]. 电子标准化与质量, 1995, (5): 19~22.
[9] Cabigiosu A, Zirpoli F, Camuffo A. Modularity, Interfaces Definition and the Integration of External Sources of Innovation in the Automotive Industry [J]. Research Policy, 2013, 42 (3): 662~675.
[10] Macduffie J P. Modularity—as-Property, Modularization—as-Process, and ‘Modularity’—as-Frame: Lessons from Product Architecture Initiatives in the Global Automotive Industry [J]. Global Strategy Journal, 2013, 3 (1): 8~40.
[11] Sanchez R, Mahoney J T. Modularity, Flexibility, and Knowledge Management in Product and Organization Design [J]. Strategic Management Journal, 2015, 17 (S2): 63~76.
[12] Cabigiosu A, Camuffo A. Beyond the “Mirroring” Hypothesis: Product Modularity and Interorganizational Relations in the Air Conditioning Industry [J]. Organization Science, 2016, 23 (3): 686~703.
[13] 曾楚宏, 朱仁宏, 王斌. 论模块化组织的本质及其边界界定 [J]. 外国经济与管理, 2009, 31 (10): 16~22, 53.
[14] Ulrich K. The Role of Product Architecture in the Manufacturing Firm [J]. Research Policy, 1995, 24 (3): 419~440.
[15] Zirpoli F, Becher M C. The Limits of Design and Engineering Outsourcing: Performance Integration and the Unfulfilled Promises of Modularity [J]. R&D Management, 2011, 41 (1): 21~43.
[16] 陈向东. 模块化在制造企业知识管理战略设计中的应用——我国航空企业国际转包生产的模块化战略分析 [J]. 中国工业经济, 2004, (1): 36~42.
[17] Brusoni S, Prencipe A. Unpacking the Black Box of Modularity: Technologies, Products and Organizations [J]. Industrial & Corporate Change, 2001, 10 (1): 179~205.
[18] Zhou Y M. Designing for Complexity: Using Divisions and Hierarchy to Manage Complex Tasks [J]. Organization Science, 2013, 24 (2): 339~355.
[19] Dieter Ernst. Limits to Modularity: Reflections on Recent Developments in Chip Design [J]. Industry & Innovation, 2005, 12 (3): 303~335.
[20] Salvador F, Villena V H. Supplier Integration and NPD Out-

- comes: Conditional Moderation Effects of Modular Design Competence [J]. *Journal of Supply Chain Management*, 2013, 49 (1): 87~113.
- [21] 张治栋, 荣兆梓. 模块化悖论与模块化战略 [J]. *中国工业经济*, 2007, (2): 67~74.
- [22] 宋磊. 中国版模块化陷阱的起源、形态与企业能力的持续提升 [J]. *学术月刊*, 2008, (2): 88~93.
- [23] 谢伟. 中国彩电总装企业的技术学习 [J]. *科研管理*, 2001, (2): 104~111.
- [24] Sanchez R, Sudharshan D. Real-time Market Research [J]. *Marketing Intelligence & Planning*, 1993, 11 (7): 29~38.
- [25] Langlois R N, Robertson P L. Networks and Innovation in a Modular System: Lessons from the Microcomputer and Stereo Component Industries [J]. *Research Policy*, 1992, 21 (4): 297~313.
- [26] Woosley J P. 777 [J]. *Air Transport World*, 1994, 33 (1): 22~31.
- [27] Kapoor R. Persistence of Integration in the Face of Specialization: How Firms Navigated the Winds of Disintegration and Shaped the Architecture of the Semiconductor Industry [J]. *Organization Science*, 2013, 24 (4): 1195~1213.
- [28] 沈于, 安同良. 再集成: 一种“模块化陷阱”——基于演化视角的分析 [J]. *中国工业经济*, 2012, (2): 89~97.
- [29] 闫星宇, 高觉民. 模块化理论的再审视: 局限及适用范围 [J]. *中国工业经济*, 2007, (4): 71~78.
- [30] Neely A, Hellström M, Ng I C L, et al. Solution Business Models Based on Functional Modularity—the Case of Complex Capital Goods [J]. *Journal of Service Management*, 2014, 25 (5): 654~676.

Modularization Limitation and the Analysis of Reintegration Development Model

——Based on the Perspective of Complex Product System

Lin Yang¹ Tang Zhao¹ Wang Jun¹ Zhang Xiang¹ Chen Xiangdong²

(1. Beijing Institute of Aerospace System Engineering, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

2. School of Economics and Management, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

[Abstract] The mainstream research of modularization focuses on how to modularize in the specific domain, environment or background. It does not pay attention to its outstanding limitations. The limitation of modularization is evident in the complex product system. Based on revisionist literature and related theories, we analyze the following five aspects: module interface and module dependency, module boundary and numbers, synergism restriction of modularization, modularization threshold, modular trap and reintegration. And we use aeronautical products as an example to demonstrate. The study finds that the complex product system of modular limitations was reflected respectively in the fuzzy module interface and high coupling between modules, the huge boundary of physics and knowledge and its matching relationship has grey zone, multi dimension modularization has multi-quadrant divergence, modularization threshold cannot be obtained accurately. The product of modularization mutation follows the alternate development path of modularization and integration, which will produces reintegration. The product of moderate and stable variation follow the development path of modularization-based and integration-based respectively. It is of great significance to determine the relationship between module interfaces and modules, depict the boundaries of modules, approximate the modular threshold, manage multidimensional modularization, and explore the emergence and evolution of integrated modules in the application of modularization in complex product systems.

[Key words] module; reintegration; complex products system; modularity limitations; multidimensional modularization; integration module

[Jel classification] L15; O33

(责任编辑: 杨 婧)