

# 大型航天企业复杂产品体系的关键技术选择

王 刚<sup>1</sup>, 刘靖东<sup>1</sup>, 陈向东<sup>2</sup>, 王玉娟<sup>2</sup>

(1 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:** 本文首先总结了复杂产品体系资源结构特性中的技术宽度与技术深度, 然后根据已有研究得出航天企业复杂产品体系的群技术选择方法, 最后提出了航天企业复杂产品体系技术开发过程中的技术资源选择框架。

**关键词:** 技术选择; 复杂产品体系; 大型航天企业; 群技术选择

中图分类号: F403.6 文献标识码: A 文章编号: 1002-980X(2010)11-0019-05

## 1 研究背景

大型航天企业的产品体系开发均可纳入复杂产品系统的研究与开发框架, 而复杂产品系统( complex product and system, CopS) 的概念出自 20 世纪 90 年代中后期英国 Sussex 大学科技政策研究中心( science and Technology policy Research, SP-RU) 的学者队伍, 是从大技术系统( large technical system) 演化而来的, 最终由霍布德( Hobday)<sup>[1]</sup> 等著名学者较为全面、系统地提出。而复杂产品系统在成为独立的研究对象之前, 某些初步研究见于“军事系统”、系统复杂性测度、大技术系统、项目管理、产业组织理论等的相关文献中, 其中航天飞行器就曾作为特殊案例开展此类研究。技术创新领域的重要前沿学者 Nelson 和 Rosenberg 曾提到过复杂系统, 但是他们既没有对复杂系统进行界定, 也没有特别将复杂系统与一般产品类别相区分<sup>[2]</sup>。胡福斯( Hughes) 关于大技术系统的研究给出了一个复杂系统的原则概念——“由相互作用、相互联结的部分组成的具有一致性结构的体系”, 这个概念比较接近后来由霍布德等所界定的复杂产品系统的概念——研发成本高、规模大、顾客定制、工程密集的大型产品系统。

综合来看, 复杂产品系统概念已被提出近 10 年, 但仍未达成一致的认识, 学者们提出的相应定义和复杂产品体系的典型特征如表 1 所示。

表 1 复杂产品体系的重要特征及其分类标准(典型研究)

复杂产品体系的特点	典型研究者
高附加值、资本品、控制单元、网络和高技术模式; 一次性或小批量生产; 研发过程重点在设计、项目管理、系统工程与系统集成	H abday <sup>[1]</sup>
高成本、工程密集及信息密集、大量专用子系统和元器件体系, 个性化产品; 主要从成本、项目周期、复杂程度、技术不确定性、系统层次、个性化定制程度、开发风险、元器件种类、知识和技能含量、软件应用范围等方面鉴别复杂产品体系	H ansen 和 Rus h <sup>[3]</sup>
研发成本高、规模大、技术含量高、小批量生产或单件生产的大型产品系统或基础设施	H obday 和 Rus h <sup>[4]</sup>
高成本、高工程含量、具有亚系统构造的产品体系, 创新过程中的动力机制、竞争策略、工业化的联合分类等均与简单产品和大批量生产的产品有本质不同	P rencipe <sup>[5]</sup>

Hobday 曾借用 Woofward 的传统产业分类方法, 认为复杂产品体系包括大型电信通讯系统、大型计算机、电力网络控制系统、大型船舶、空中交通管制系统、飞机引擎、银行自动处理系统、散装货轮、化工厂、广域网、空间站、水源供应系统等, 突出了这类产品的高研发成本、技术密集、工程密集、顾客定制、小批量生产等特性。复杂产品系统是一类特殊的产品体系, 是相对于低成本、基于标准零部件的大规模制造产品而言的。航空航天类产品应属于典型的复杂产品系统。

国内学者如杨志刚<sup>[6]</sup>、陈劲<sup>[7]</sup> 等也对 CoPS 进行了定义, 特别指出复杂产品具有高成本、技术密

收稿日期: 2010-06-30

作者简介: 王刚(1972-), 男, 河北人, 北京宇航系统工程研究所高级工程师, 硕士, 研究方向: 技术管理、人力资源管理; 刘靖东(1979-), 男, 河南人, 北京宇航系统工程研究所工程师, 硕士, 研究方向: 战略规划管理、技术创新管理; 陈向东(1953-), 男, 山东人, 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、国际技术转移, 中国技术经济研究会会员登记号: 1030100582S; 王玉娟(1982-), 女, 吉林人, 北京航空航天大学经济管理学院硕士研究生, 研究方向: 国际技术创新与技术转移。

集、创新生命周期较长、市场垄断程度高、创新过程中必要的政府介入等特征。

显然,相对一般的技术密集产品而言,复杂产品体系的研究与开发机构具有很多特殊的性质,需要有针对性地展开研究。特别是大型航天企业的复杂产品体系所对应的技术选择问题是最为关键的技术资源管理问题之一。

## 2 复杂产品体系技术资源结构特性中的技术宽度与技术深度

探讨复杂产品体系的技术选择问题,首先要考察复杂产品体系的技术资源特性,对此可通过复杂产品体系对技术深度与宽度的需求、对新知识和传统技术融合运用程度的需求以及对高水平的个性化程度的需求等方面来把握。

复杂产品系统通常由许多不同技术领域的元件、次级系统集成而成,因此复杂产品系统的本质特征是不同的技术在系统的不同层次水平上相互作用的多技术系统(multi-technological system)。系统越复杂,所需要的技术及其相关加工能力的范围越广<sup>[8]</sup>。

以上这些原因使得复杂产品系统的性能高度依赖其组成元件、次系统和集成结构,可通过三个不同层面的技术特点来分析复杂产品系统。

(1) 复杂产品系统的元件和次系统层。元件和次系统作为复杂产品系统最为基本的组成部分,决定复杂产品系统所采用的基础技术,反映复杂产品系统的基本功能属性。

(2) 复杂产品系统层。系统层是复杂产品系统区别于简单产品和系统的特征之一,复杂产品系统各元件与次系统集成构成的整个系统,反映出元件层和次系统层所不具有的功能属性。

(3) 元件和次系统间的反馈层。复杂产品系统中的反馈层主要用于将各元件和次系统有效地进行集成,组成稳定的系统,并保持系统所具有的独特功能属性。

因此,技术变化通常发生在构成复杂产品系统的三个层面上:①构成复杂产品系统的元件和次系统;②复杂产品的集成系统;③复杂产品系统的反馈系统<sup>[9]</sup>。

由于系统和部分间的不可分割性,考虑到整个系统存在反馈及系统各元件和次系统间的依赖性,系统任何部分发生的变化都隐含着系统其他部分也将发生某种程度的变化,因此由多个元件和次系统集成而成的复杂产品系统对技术复杂效应的关注远远高于简单产品,这就要求生产复杂产品系统的企

业要有更高的掌控技术的能力。

从单纯的技术角度来讲,复杂产品体系中技术的结构与形式大多体现为一种内嵌关系。事实上,以产品内嵌的技术形式来研究产品的技术结构是非常有意义的,由此引出产品系统内嵌技术的深度和宽度两个维度来衡量产品体系的复杂程度,进而分析复杂产品系统的技术结构形式。

在此基础上,可提出相应的技术宽度和技术深度概念来达到更为精确的技术选择和管理的目的。

技术宽度可理解为产品体系所内嵌的技术领域范围。比如,多部件组成的产品和系统往往会内嵌各种技术,产品和系统所涉及的技术领域范围被认为是该产品体系的技术宽度。总体而言,产品体系内嵌的技术领域范围越广,则产品系统的复杂程度越高。从企业层面来说,企业拥有的、能够运用到产品和系统开发中的技术领域范围构成企业技术能力的宽度。

技术深度则表现为相关知识资源的积累程度和技术问题层次的丰富程度。一般来说,产品体系开发过程中的技术问题是多层次的,愈是专业知识积累丰富的技术门类,其技术层次也愈丰富,例如从设计层面到工程层面、从工程层面到生产秩序层面等都体现了特定技术门类的复杂性。因而,可将通常技术攻关瓶颈意义上的技术问题应用技术深度来刻画,得出不同产品体系产出能力上的复杂程度。

显然,如果从航空航天复杂产品体系开发的要求来考察,需要在技术宽度和技术深度之间取一个较适宜的中和点。当强调技术资源和功能的多样性和潜在性能时,需要拓展技术宽度;而当强调技术资源的可靠性和有效性时,需要强化技术深度。

此外,多部件组成的产品的每个部件所内嵌的技术的复杂程度可能低于其部件集成所内嵌的技术的复杂程度,此时衡量产品和系统技术深度的应该是集成技术,而不是部件所内嵌的技术。

## 3 航天企业复杂产品体系技术资源选择的理论方法

根据以上分析,复杂产品体系为一种多技术的、先进技术与传统技术融合的、集成效应显著的产品类型,因此其相关技术资源的选择也是围绕特定需求的多技术群选择,具有技术渐进和积累的特征,同时又需要充分考察集成效应。因此,复杂产品体系的技术资源选择问题是一个以政府市场为主导需求的群技术选择问题。

根据国际、国内有关技术选择和技术评价的相关研究,本文拟给出三层面技术选择模型来刻画以

大型航天企业航天产品设计、工程与生产技术为代表的复杂产品体系的技术选择框架。

### 3.1 需求和资源约束下的技术选择框架

通常意义上的技术选择主要考虑三类主要初始动力机制因素,即:①技术需求——产品质量需求、技术可靠性、产品生产数量(成本回收);②资金约束——技术开发资本成本、技术运营成本、技术开发引致的销售额增加(开发回报);③外部竞争压力约束——政府规制压力、环境规制压力、市场竞争压力。

而一旦技术被选定并投入企业的正常开发轨道,则导入技术的过程仍然存在多种选择,具体表现为:

#### (1) 技术导入的适宜度制约。

①集成适宜度制约:新技术是否可导入现存的组织机构。②可使用度制约:技术资源是否可用于满足期望的需求目标。③供应商适宜度制约:技术供应商是否适宜于特定的组织。④战略适宜度制约:导入技术资源是否适合于特定组织的既定战略。⑤风险制约:导入的技术资源可能带来的风险(如技术生命周期的大致约定)。

(2)同时,新技术的导入还有可能受内部和外部商业开发过程因素的影响和制约,具体可定义为:①内部因素准备——生产功能、金融功能、人力资源功能。②外部因素约束——客户(企业、政府、个体消费者)、技术供应商、竞争者、政府政策制约机制。

### 3.2 复杂产品体系的群技术选择——以航天企业产品为代表

就航天产品所代表的复杂产品体系而言,上述技术资源选择的基本框架仍可以参照。但如前所述,航天产品所代表的复杂产品的相关技术资源的宽度和深度问题更为突出,因此相应的资源准备和制约因素的复杂性也具有重要差异,特别是其技术选择对应的是技术群,而非单一技术。

本文依据国际上的相关研究工作,提出将基于基因算法的技术识别评估和选择(GA-TIES)方法作为航天产品技术选择的分析工具。这种方法用遗传算法(genetic algorithm, GA)来为每一给定约束选择不同的技术组合,通过技术识别评价和选择(technology identification, evaluation and selection, TIES)过程来针对特定目标和约束达到识别、评价、选择的目的。

事实上, TIES 提供了一种框架,通过建立通用模型来评估技术对系统的影响,并在此基础上实现技术选择。该模型以一组表面反应方程的形式得出相关影响,反应方程表现特定的目标,每个目标对应

一个方程。而群技术之间的相互影响可通过技术相容矩阵和技术影响矩阵来表达。其中,表现相容特征的技术间的相关性由技术相容矩阵(technology compatibility matrix, TCM)代表,而 TIM(technology impact matrix)则代表每类技术对主要参数  $k$  的影响。技术组合评估模型如图 1 所示。

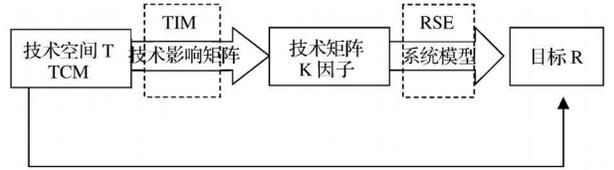


图 1 技术组合评估流程图

如图 1 所示,技术空间通过技术影响矩阵(TIM)映射到  $k$  因素空间上;而图 1 中的反应面方程(response surface equation)可以作为最终选取技术集合的系统响应(系统模型),得到将  $k$  因素映射到目标空间的函数。因此,每一项源自于技术空间 T 的技术都与一个 R 中的目标向量相对应。该构架被称作技术影响预测系统(technology impact forecasting),它是技术识别、评价和选择方法的核心。一旦某一个系统含有该技术影响预测系统,给定技术兼容矩阵和技术影响矩阵,便可对任何相关技术进行评估<sup>[10]</sup>。

基因算法在技术影响预测环境中使用广泛,可用以评估大量的技术组合,实现最优技术组合集合的选择。GA 通过构建一个技术组合池实现在技术影响模型中对这些技术组合进行评估,从中可估计技术组合是如何影响系统表现的。这些技术组合彼此间可进行对比,然后从中筛选出较好的技术组合放置在总体中,作为下一次评估的基础。该过程会重复多次,直到实现全局收敛。

在这一分析技术的应用层面,技术选择的双级优化方法具有更大的应用潜力,即:(1)在满足相容约束的条件下,为了达到特定的目标取得最优的  $k$  向量;(2)找到最优的  $k$  后,第二步就是找到这样的技术组合——该技术组合产生的  $k$  向量与最优的  $k$  尽可能接近。

而在单级优化中,优化变量是技术组合,目标函数是总的评估标准。但在双级优化方法中,最优变量是规则矩阵  $k$ 。

从技术空间到规则空间的转换仅仅是一种线性的转换。由于存在这种简单的线性关系,因此从技术空间到规则空间的转换很容易。相比较而言,从规则空间到系统空间的转换则要涉及二阶的反应面方程  $k$  RSEs,大大增加了计算量,因而增加了技术

选择过程的复杂性。

在单级 TIES 方法中,所有三个空间都是离散的,所以整个过程是一个组合优化问题。但在双级优化方法中,仅从技术空间到  $k$  空间有关的部分才作为组合优化处理,因而节省了很多的计算量。当技术影响矩阵(TIM)的维度越高时,由技术组合产生的  $k$  越接近理想的  $k$  向量,双级优化方法越有效。

此外,亦可采用帕累托技术选择方法<sup>[11]</sup>。在二维空间中,当目标由一个与成本和风险有关的矩阵组成时,可使技术组合的行为随着相关约束而变化的关系更清晰地显示出来。通常表现为沿着帕累托边界的技术组合分布,一组在帕累托边界上的技术组合允许决策制定者在概念设计阶段在不同的目标间做出权衡。最终解决方案沿着帕累托边界分布如图 2 所示。

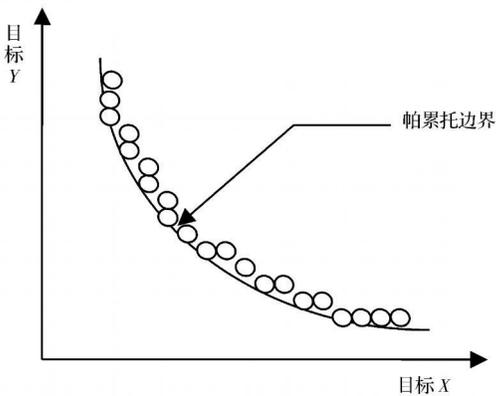


图 2 最终解决方案沿着帕累托边界分布

在此基础上,还可针对多目标决策应用帕累托

最优给出技术组合。多目标决策即为给定技术数目  $t$  和目标数目  $n$ ,同时必须找出满足所有要求的最优技术组合。多目标决策与技术问题相关,它要求设计最好的组合满足所有的约束且达到所有的要求。

在帕累托最优解决方案中,如果要使一个目标改进,就不得不使其他目标函数中的至少一个劣化,如图 3 所示。图 3 显示了当 2 个目标  $x$  和  $y$  最小化时,帕累托最优解点  $a, b, c, d$ ,目标空间被分成 4 个象限来评估点的占优条件。左下象限由比点  $e$  占优的点组成,右上象限由劣于点  $e$  的点组成,其他两个象限属于中性的。同样的逻辑可以被扩展来评估一个在多维空间中的点的占优条件。

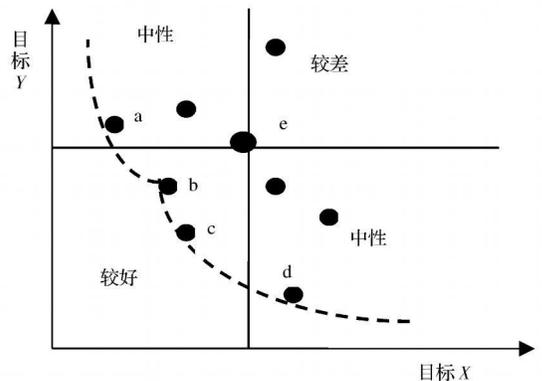


图 3 帕累托决策和非占优

#### 4 航天企业复杂产品体系技术开发过程中的技术资源选择框架

根据以上分析,本文给出航天企业复杂产品技术开发过程技术资源选择的一般框架,见表 2。

表 2 技术资源选择一般框架

模式	技术宽度选择	技术深度选择	内外部制约因素	关键导入制约类
渐进模式	单(关键)技术目标	维持原有技术深度	内部制约因素为主	可使用度制约
	单(关键)技术目标	深化原有技术深度	外部制约因素为主	集成度制约
	多技术目标	深化原有技术深度	外部制约因素为主	集成/ 供应商制约
激进模式	单(关键)技术目标	转移原有技术深度	内部外部因素	可使用/ 战略制约
	多技术目标	转移原有技术深度	内部外部因素	可使用/ 战略制约

根据技术宽度和深度选择的不同,技术选择框架可分为渐进模式和激进模式。

在渐进模式下,当只有单技术目标时,可以维持原有的技术深度或深化原有的技术深度。维持原有的技术深度的技术目标主要以内部因素制约为主;若深化原有的技术深度则以外部制约因素为主。而在多技术目标的情况下,由于技术选择的复杂性增加,因而一般要深化原有的技术深度。GA-TIES 方法主要应用在集成度制约的多目标决策中,根据给定的约束(如资金的约束)对技术的不同组合进行评

估,通过其对系统集成的影响来反馈这些组合的优劣,从而深化原有技术的深度。当然,在这个过程中,为了促进技术积累,可通过双级优化的方法,由系统的反应找到最优的约束,这个过程是对技术的第一层累积,然后再通过优化的约束因子去寻找最优的技术组合,达到对技术的第二层累积,也即更深一层次的优化。

在激进模式中,无论是单目标还是多目标技术决策,在技术深度的选择上都是转移原有技术深度。帕累托技术选择可作为这样技术选择模式的一个例

子。无论是单目标还是多目标,为了达到同样的目标可能存在多种技术组合,这些技术组合都位于观念性的帕累托最优边界上,我们可根据期望的需求或特定的战略来选择技术组合,也即在这些帕累托边界上的技术组合之间进行转移。

## 5 结论

鉴于航空航天产品体系的复杂性,本文对关键技术选择的问题进行了研究,得出了技术选择的一般框架。在对技术进行选择之前,首先要分析企业内外部的各种可用资源,其次要考虑技术选择过程中的一些约束,如资金约束或政府规制约束等。然后,根据关键技术导入制约的不同应用不同的关键技术选择方法。如果技术在导入过程中受集成度的制约,则可应用双级优化方法来选择技术组合,既能实现深层次的技术积累,同时节省了计算量。同样,当技术导入时存在战略上或需求上的期望的话,可应用帕累托技术选择方法来达到多目标的权衡。在不同的制约下,应用的选择方法可能会不同,但理念都是实现项目整体上的最优化。因此,本文得出的技术选择框架不失为一种可以借鉴的航空航天复杂产品体系关键技术的选择框架。

### 参考文献

- [1] HOBDA Y M. Complex system vs mass production industries: a new innovation research agenda [ C ]. Paper Prepared For CENTRIM/SPRU/OU Project on Complex Product Systems, EPSRC Technology Management Initiative, GR/K/31756, 1996.

- [2] HOBDA Y M, RUSH H, TIDD J. Innovation in complex products and system [ J ]. Research Policy, 2000, 29: 793-804.
- [3] HANSEN K, RUSH H. Hotspots in complex product systems: emerging issues in innovation management [ J ]. Technovation, 1998, 18(9): 555-561.
- [4] HOBDA Y M, RUSH H. Technology management in complex product systems (CoPS): ten questions answered [ J ]. International Journal of Technology Management, 1999, 17(6): 618-638.
- [5] PRENCIPE A. Breadth and depth of technological capabilities aircraft engine control system [ J ]. Research Policy, 2000, 29(7/8): 895-911.
- [6] 杨志刚, 吴贵生. 复杂产品的创新及其管理 [ J ]. 研究与发展管理, 2003, 15(3): 32-37.
- [7] 陈劲, 吴沧澜, 黄建樟, 等. CoPS 开发网络组织及组织能力探索 [ J ]. 研究与发展管理, 2005, 17(1): 21-27.
- [8] 邹树梁, 陈甲华, 刘兵. 面向复杂产品系统的虚拟企业建模研究——以核电站项目为例 [ J ]. 南华大学学报: 社会科学版, 2005(2): 20-25.
- [9] 陈劲, 黄建樟, 董亮. 复杂产品系统的技术开发模式 [ J ]. 研究与发展管理, 2004, 16(5): 65-70.
- [10] UTTURWAR A, RALLABHANDI S, DELAURENTIS D, et al. A bi level optimization approach for technology selection [ R ]. AIAA/ISSMO, Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Atlanta: Georgia, 2002.
- [11] PATEL C B, KIRBY M R, MAVRIS D N. Niche'd pareto genetic algorithm for aircraft technology selection process [ R ]. AIAA/ISSMO, Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Portsmouth: Virginia, 2006.

## Research on Key Technology Selection for Complex Product System of Large Aerospace Enterprise

Wang Gang<sup>1</sup>, Liu Jingdong<sup>1</sup>, Chen Xiangdong<sup>2</sup>, Wang Yujuan<sup>2</sup>

(1. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;

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

**Abstract:** This paper first summarizes the width and depth of technology in structural properties of resource of the complex product system, and then concludes the method on selecting group technology for the complex product system of aerospace enterprises through following the existing study. Finally, it puts forward the framework on technology resource selection during the process of technology R&D for the complex product system of aerospace enterprises.

**Key words:** technology selection; complex product system; large aerospace enterprise; group technology selection