

复杂产品开发工程管理的 动态决策理论与方法

杨善林^{1,2}, 钟金宏^{1,2}

(1. 合肥工业大学管理学院, 合肥 230009;

2. 过程优化与智能决策教育部重点实验室, 合肥 230009)

[摘要] 复杂产品开发是一个技术与管理深度融合的系统工程。本文阐明了复杂产品开发工程管理应该从战略统筹的高度整合开发工程实践的多元价值目标,提出了复杂产品开发工程的管理思路,构建了由开发项目组合的战略选择、开发工程的分解与分级优化、开发过程的动态管理、技能型员工调度、供应商协同管理以及相应的决策支持系统技术组成的动态决策理论体系框架,设计了多种优化、调度与决策模型及其求解方法,提出了基于信息资源库和决策方法库的复杂产品开发决策支持系统技术与多阶段反馈式复杂产品开发决策支持系统技术,总结了复杂产品开发工程管理动态决策理论体系中的几类决策方法,并展望了云计算技术在复杂产品开发工程管理中的应用前景。

[关键词] 复杂产品开发工程管理;动态决策理论体系;分级优化;动态管理;员工调度;供应商协同管理;决策支持系统

[中图分类号] C931 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)12-0025-16

1 前言

复杂产品是指产品构成复杂、产品技术复杂、开发过程复杂、加工制造复杂、工程管理复杂的一类产品^[1]。它既具有用户需求的特异性、产品技术的创新性、产品构成的集成性和开发过程的协同性等产品特征,又具有时代性和永恒性、区域性和全球性、相对性和普遍性等时空特征。

复杂产品开发是一类重大工程,具有巨大的包容性和与时俱进的创新性^[2]。通过对复杂产品开发工程的科学管理,能更好地协调工程管理系统与工程管理环境的关系,协调工程所需的人力、物力和财力等资源,协调工程组织中的各个部门、单位以及每个人的工程活动,从而能更好地实现预期的工程目标,因此必须从更广阔的视野来分析研究复杂产

品开发工程管理的价值目标、管理思路和理论方法。

1.1 复杂产品开发工程管理的多元价值目标

在复杂产品开发过程中,人们将各类资源、新兴技术与各种创意相结合,创造出具有独特市场魅力、知识技术密集的复杂产品,而科学合理的复杂产品开发工程管理能够从战略统筹的高度整合开发工程实践的多元价值目标。首先,复杂产品开发工程管理必须注重自然价值目标,以满足人类生存与社会可持续发展的需要,使复杂产品开发工程达到合规律性与合目的性的统一,促进人与自然的协同共进^[3]。其二,必须注重社会价值目标,充分考虑公众的利益与情感,承担必要的道德义务,从而将可能发生的利益冲突消弭在萌芽状态^[4],促进社会有机体的和谐运行与快速发展。其三,必须注重经济价值目标,工程管理作为一种经济组织行为,应该而且

[收稿日期] 2012-06-18

[基金资助] 国家自然科学基金资助项目(71131002,71071045,71171072)

[作者简介] 杨善林(1948—),男,安徽怀宁县人,教授,博士生导师,主要从事决策科学与技术、信息管理与信息系统和工程管理等领域的研究工作;E-mail:hgdyssl@gmail.com

必须要有盈利,因为利润是经济组织存在和发展的前提与基础,是经济组织行为的基本动因,较好的经济效益也有助于其未来经济和社会职能的承担。其四,必须注重科技价值目标,现代工程管理实践需要以先进的管理科学与管理技术为支撑,然而在复杂产品开发工程的管理实践中,常常会提出新的科学与技术难题,从而推动工程管理科学与技术的创新发展。其五,必须注重人的价值目标,复杂产品开发工程能够创造出十分珍贵的物质成果,然而经受了工程的严格考验的管理者,思想境界更为高远,攻克难关的能力进一步增强,他们是工程创造出来的最为珍贵的成果,因此复杂产品开发工程管理应该是一类“成物”与“成人”高度统一的实践过程。最后,必须注重文化价值目标,任何一项复杂产品开发工程及其管理过程必然受到特定历史时期的人类文化、民族文化和组织文化的深刻影响,在复杂产品开发工程管理中,应该充分发挥先进文化的感召力、凝聚力、创新力和组织力作用,以便更好地实现工程目标;同时,还应该加强文化建设,注意文化积淀,促进工程管理文化进一步发展。

1.2 复杂产品开发工程管理的总体思路

市场需求的多样化和日益激烈的竞争环境,使得企业需要综合考虑内部和外部的各种影响因素以及开发项目间的相互关系,从战略层进行统筹规划,合理选择复杂产品开发项目组合;复杂产品开发工程的技术含量高、质量要求严、任务工期紧、资金投入大,必须紧密结合开发项目的组合特征、技术难点和资源状况,研究解决开发过程中的工程分解、逐级优化等工程管理问题;复杂产品开发是一个技术与管理深度融合的系统工程,在开发过程中经常遇到事先难以预见的问题,必须进行动态管理;复杂产品开发是主体企业与众多供应商协同合作的过程,主体企业不仅要加强自身的能力建设,还必须关注供应商的能力建设,更好地协同推进复杂产品的开发进程。因此,复杂产品开发工程必须按照“战略统筹、系统规划、科学分解、分级优化、动态控制、协同推进”的管理思路,从整体出发,恰当处理全局与局部的关系,按照复杂产品开发工程的具体要求,研究制定程序化的管理步骤,用以规范开发工程的进展,并创造性地运用各种先进的工程管理理论和管理技术,对开发工程进行科学决策和动态控制,更好地协调各类工程要素,合理配置各种开发资源,推进开发工程的顺利进行。

1.3 复杂产品开发工程管理的动态决策理论体系框架

“管理就是决策”^[5],复杂产品开发工程管理也不例外。复杂产品开发工程管理中的决策,不仅表现在它的战略决策阶段,而且浸透在复杂产品开发工程管理的全过程中。复杂产品开发工程管理决策过程是一个具有多阶段性和多层次性的前馈-反馈决策过程,在各个决策层次中,前一阶段的决策既引起当时状态的变化,又直接影响后一阶段的决策,而后一阶段的状态或工程要素的变化又可能导致前一阶段的重新决策,因此它是一个复杂的动态决策过程。本文从决策功能、决策方法和决策技术3个维度来研究复杂产品开发工程管理理论体系的结构,图1是笔者在工程管理实践的基础上,提出的复杂产品开发工程管理的动态决策理论体系框架。

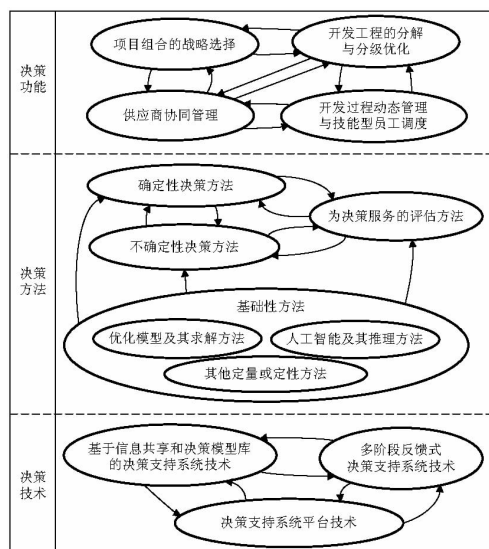


图1 动态决策理论体系框架示意图

Fig.1 The framework of dynamic decision-making theoretical system

从决策功能来看,复杂产品开发工程管理的决策过程主要包括开发项目组合的战略选择、开发工程的分解与分级优化、开发过程的动态管理、技能型员工调度与供应商协同管理等;从决策方法来看,贯穿于复杂产品开发工程管理全过程的主要方法有确定性决策方法、不确定性决策方法以及为决策服务的评估方法,而其中有些决策问题适合于用定量优化模型来描述,有些决策问题可用人工智能的方法进行推理,还有些决策问题必须用其他相关的定量或定性方法处理;从决策技术来看,支持复杂产品开发工程管理的信息系统技术主要有基于信息共享和决策模型库的决策支持系统技术、多阶段反馈式决

策支持系统技术以及决策支持系统平台技术。

首先从决策功能维度,较系统地论述复杂产品开发项目组合的战略选择,以及开发工程的分级优化、动态管理、员工调度和供应商协同管理;然后从决策技术维度,分析复杂产品开发过程协同决策环境,讨论复杂产品开发工程管理决策支持系统中的关键技术问题;最后从决策方法维度,总结融合在决策功能和决策支持系统中的几类决策方法,以及与其相关的优化方法和人工智能方法等基础性方法。力图构建复杂产品开发工程管理的动态决策理论体系。

2 复杂产品开发项目组合的战略选择

企业在并行开发多种型号的复杂产品时,不同产品之间既有资源竞争问题,又有资源共享问题;并行开发的复杂产品项目之间既有相互制约的关系,又有相互依赖的关系。因此,在进行开发项目组合的战略选择时,必须对项目与企业战略的一致性和项目间的相互关系进行评价,并根据评价结果对项目组合进行动态选择,选择模型中的一般性资源约束应该考虑为开放系统中的可置换资源。由于复杂产品开发项目的周期长,往往需要分期完成,所以项目组合选择应设计为多期滚动的方案。

2.1 复杂产品开发项目与企业战略的一致性评价

复杂产品开发项目与企业战略的一致性评价是项目组合选择的基础。在复杂产品开发的不同阶段,企业战略目标和重点可能不同,因而评价指标体系也不同,指标间可能存在相关性,有些指标还具不确定性。因此需要紧密结合企业实际情况,构建多维度的全生命周期的评价指标体系和相应的评价方法。

项目与企业战略的一致性指项目和企业战略目标相匹配的程度。一致性程度不仅体现在利润目标、产品目标 and 市场目标等经济性方面,还体现在品牌优势、可持续发展和社会责任等非经济性方面。本文构建基于平衡计分卡(BSC)^[6]的面向复杂产品开发项目全生命周期的战略一致性评价指标体系^[7]。在这个指标体系中,包含4个一级指标和15个二级指标。指标间存在广泛的联系,尤其是过程性指标与结果性指标之间有因果关系,因此采用战略地图来描述评价指标及其相关性,如图2所示。

在复杂产品开发项目生命周期的不同阶段,评价指标取舍和权重设置有所不同。并可结合运用网络分析法(ANP)和BSC方法来构建评价模型,再通过模糊综合评价法得到一致性评价结果。

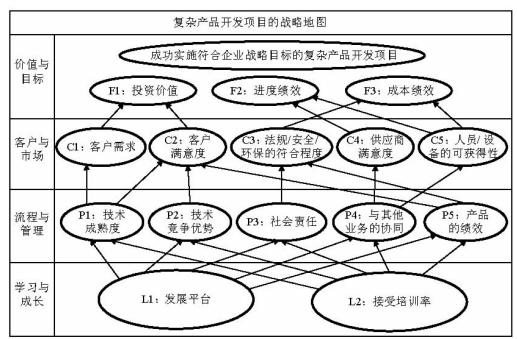


图2 复杂产品开发项目的战略地图

Fig. 2 The strategy map of complicated product development project

2.2 复杂产品开发项目组合的动态选择

复杂产品开发项目组合选择面临的场景多样,下面简要阐述考虑项目依赖性、多技能人、环境不确定性和资源可置换情形下的单期项目组合选择问题。

考虑项目依赖性的项目组合选择。企业在并行开发多个型号复杂产品时,经常因资源竞争而冲突不断,传统的各项目独立管理的策略难以合理调配开发资源,必须根据项目间的依赖关系选择开发项目组合,实现企业级的项目组合管理。为此,首先对项目间的依赖关系进行定性分析,以确定项目依赖关系的类型;再建立项目依赖矩阵和关联性分配矩阵,并据此建立项目间的收益、资源、进度和风险等依赖关系的定量模型;然后建立考虑项目依赖性的项目组合选择模型;最后可用改进的模拟退火算法,求取考虑项目依赖性的最优项目组合。

考虑多技能人的项目组合选择。复杂产品开发需要大量具有多方面技能的人员参与,在复杂产品开发项目组合选择时,应充分考虑多技能人的合理调配和充分利用,组成技能结构合理的项目开发团队。可建立考虑多技能人的项目组合选择模型^[7],设计元启发式求解算法,实现项目组合选择和项目团队组建的联合决策。

考虑情景不确定性的项目组合选择。在复杂产品开发过程中存在市场、资源和供应商等多方面的不确定性,企业为谋求获利的稳定性,在项目组合选择时,必须提高项目组合选择模型的鲁棒性。为此,可建立模糊情景下复杂产品开发项目组合选择的最小-最大遗憾值模型(MMR)和最小-最大相对遗憾值模型(MMRR)。运用可能性理论^[8]对模型中的模糊变量进行确定性转换,采用遗传算法(GA)等元启发式算法求解,获取不确定情景下的最优项目组合。

考虑资源可置换的项目组合选择。在复杂产品

开发过程中,经常出现一些资源相对短缺,而另一些资源又相对富余。对于一般性资源,企业可利用外部租赁市场,通过资源的双向流动,实现资源置换。因此,在项目组合选择模型中的资源约束应看作是一个整体约束,而不是某类资源的约束。显然,这样既能提高开发资源的利用率,又能提高项目组合选择的灵活度。

设有 N 个候选复杂产品开发项目,候选项目 $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ 的模糊价值为 \tilde{v}_i , x_i 为决策变量,选择项目 i 时 $x_i = 1$, 否则 $x_i = 0$; 完成项目 i 需要资源 a 的数量为 $r_{a,i}$, 需要资源 b 的数量为 $r_{b,i}$, 需要资金的数量为 f_i ; 企业现有资源 a 的总量为 R_a , 资源 b 的总量为 R_b , 总资金量为 F , 且存在资金相对占优; p_a , p_b 分别表示通过外部租赁市场出租剩余资源 a 和 b 获得的单位收益; c_a , c_b 分别表示使用现有资金从外部租赁市场租借不足资源 a 和 b 的单位成本。

假定企业资源出租收益小于资源租赁成本, 即 $p_a < c_a$, $p_b < c_b$; 候选项目具有相同的开始和结束时间, 不考虑资金的时间价值; 企业与外部市场间的租赁行为均可实现, 忽略市场供求波动和价格的影响; 项目收益在项目完成后获得, 项目选择和执行基于企业现有资源; 只考虑与外部租赁市场间的资源置换, 不考虑大集团间的调拨和其他合作形式。则考虑资源可置换的项目组合选择模型为

$$\text{Max} \sum_{i=1}^N \tilde{v}_i x_i \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^N r_{a,i} x_i \leq R_a \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N r_{b,i} x_i \leq R_b \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N f_i x_i \leq F \quad (4)$$

式(1)为目标函数, 最大化所选项目的总模糊价值, $\tilde{v}_i = (v_{i,1}, v_{i,2}, v_{i,3})$ 为三角模糊数。式(2)和式(3)为实体资源约束, 式(4)为资金软约束。

为了求解模型(1)~(4), 必须建立资源可置换情况下的约束违反判断规则。在此基础上, 可设计启发式 GA 算法求解上述模型^[9]。实验和实践表明, 考虑资源的可置换性能够使企业获得更大收益。

2.3 复杂产品开发项目组合的多期滚动选择

大型复杂产品开发项目往往需要划分为若干个标准执行单位, 对其进行多期滚动调度。在下面的项目组合多期滚动选择模型中, 重点考虑项目的多期滚动性、项目价值和资源需求的不确定性、战略均衡匹配度以及前一期项目组合的增益效应。

价值不确定性包括完成项目收益和项目组合收

益不确定, 资源不确定性包括项目资源需求和资源约束不确定。资源增益效应指资源呈现动态递增趋势, 前一期项目组合的获利可转化为资源, 投入下一期的项目组合选择中, 增加了后期项目的可用资源总量。战略均衡匹配是指所选项目组合的战略贡献能够在各个维度上均衡地、最大限度地满足企业的战略需求, 而不是只突出一两个战略目标。

战略均衡匹配度指所选项目组合的总体战略贡献度 \bar{G} 与企业的战略目标 \bar{B} 的相近程度, 用 zLz 表示。模糊变量 \bar{G} 和 \bar{B} 的贴近度公式为

$$\rho_q(\bar{G}, \bar{B}) = 1 - d_q(\bar{G}, \bar{B}) \quad (5)$$

$$d_q(\bar{G}, \bar{B}) = \left\{ \sum_{z=1}^Z [\omega_z (\mu_{\bar{G}}(u_z) - \mu_{\bar{B}}(u_z))]^q \right\}^{1/q}$$

式中, u_z 为战略目标, $z = 1, 2, \dots, Z$, 其中 Z 为战略目标数量; $\mu_{\bar{B}}(u_z)$ 为战略目标 u_z 上的需求度; $\mu_{\bar{G}}(u_z)$ 为所选项目组合在战略目标 u_z 上的综合贡献度; ω_z 为战略目标的权重。但这种贴近度没有方向概念。

战略均衡匹配度 zLz 有方向上的要求, 即所选项目的总体战略贡献度高于企业战略需求时, 会对企业的战略发展起到拉动作用; 当低于企业战略需求时, 虽也有促进作用, 但不如高时明显。为此, 定义上方贴近度和下方贴近度的概念。

定义1: 如果 $\sum_{z=1}^Z (\mu_{\bar{G}}(u_z) - \mu_{\bar{B}}(u_z)) \geq 0$, 则称 $\rho_q(\bar{G}, \bar{B})$ 为 \bar{G} 对 \bar{B} 的上方贴近度, $1 - d_q(\bar{G}, \bar{B})$ 为贴近度值; 如果 $\sum_{z=1}^Z (\mu_{\bar{G}}(u_z) - \mu_{\bar{B}}(u_z)) < 0$ 则称 $\rho_q(\bar{G}, \bar{B})$ 为 \bar{G} 对 \bar{B} 的下方贴近度, 贴近度值为 $d_q(\bar{G}, \bar{B}) - 1$ 。

从定义1可看出, 上下方贴近度的取值范围分别为 $[0, 1]$ 和 $[-1, 0]$ 。用 \overline{zLz} 表示上方贴近度, 称为上方战略均衡匹配度; 用 \underline{zLz} 表示下方贴近度, 称为下方战略均衡匹配度。因此, $zLz \in [\overline{zLz}, 1]$ or $[-1, \underline{zLz}]$ 。

令 $t = 1, 2, \dots, T$ 为企业的标准单位战略计划执行期, 每期有 N_t 个候选项目到达, 作为当期可选项目, 当期未选的项目不进入下期; $k = 1, \dots, K$ 为资源类别, K 为资源类别数; $\tilde{r}_{i,k}$ 为 t 期项目 $i (1, 2, \dots, N_t)$ 对资源 k 的需求, $\bar{R}_{t,k}$ 为 t 期对资源 k 的总约束; $R_{t,k}$ 为 t 期资源 k 的量, $R_{t+1,k}$ 为增益后的 $t+1$ 期资源 k 的量, δ 为资源增益系数; $\tilde{v}_{i,t}$ 为完成项目 i 所获得的收益, \tilde{f}_t 为 t 期的获利; $x_{t,i} \in \{0, 1\}$ 为决策变量, 在 t 期选择项目 i 值为 1, 否则为 0。

在考虑战略均衡匹配约束条件下, 可建立如下

$$\text{Max } \tilde{f}_t = \sum_{i \in A_{t-2}} \tilde{v}_{t-2,i} + \sum_{i \in A_{t-1}} \tilde{v}_{t-1,i} + \sum_{i \in A_t} \tilde{v}_{t,i} x_{t,i} \quad (6)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i \in A_{t-2}} \tilde{r}_{t-2,i,k} + \sum_{i \in A_{t-1}} \tilde{r}_{t-1,i,k} + \sum_{i \in A_t} \tilde{r}_{t,i,k} x_{t,i} \leq \tilde{R}_{t,k} \quad (7)$$

$$R_{t+1,k} = R_{t,k} (1 + \delta \%) \quad (8)$$

$$z\tilde{l}z_{A_{t-2} \cup A_{t-1} \cup A_t} \in ([z\tilde{l}z, 1] \text{ or } [-1, z\tilde{l}z]) \quad (9)$$

式中, A_{t-1} 为 $t-1$ 期选择的项目中, 延伸到 t 期的项目集合; A_{t-2} 为 $t-2$ 期选择的项目中, 延伸到 t 期的项目集合; 当 $t=1$ 时, $A_{t-2} = \emptyset, A_{t-1} = \emptyset$; 当 $t=2$ 时, $A_{t-2} = \emptyset$ 。目标(6)最大化 t 期所选项目组合的总价值; 式(7)为 t 期资源约束; 式(8)和式(9)表示战略均衡匹配与资源增益关联约束。

不确定多期滚动项目组合选择模型为模糊优化模型, 因此, 首先应用可能性理论对其进行确定性转换, 然后可设计包含路径再连接局部搜索过程的改进 GA 求解算法^[10]。

3 复杂产品开发过程的分级优化

复杂产品开发工程需要分属不同部门(如市场、规划、设计、工艺、试制试验、制造、采购部门等)的开发设计人员的协调配合以及客户和供应商广泛参与的协同合作, 需要集成多种理论、技术、方法、工具和设备。在这个过程中, 必须协调优化人与资源、人与人、人与组织、组织与组织之间的关系。因此首先必须将开发过程分解为数以千计、万计的开发活动, 再根据开发活动间的关系, 建立分级优化与决策模型, 对开发流程进行分级优化和动态决策。

下面简要阐述复杂产品开发主流程和二级流程的分解优化问题, 其他各级的分解优化思路基本类似, 但各级的具体分解优化方法均有所不同。

3.1 复杂产品开发主流程优化

复杂产品开发工程的主流程是指通过逻辑划分形成的一系列共同创造价值且相互关联的主要工作阶段的有序集合, 可分解为产品型谱规划、立项论证、设计开发、试生产和市场导入等阶段。主流程优化旨在对开发过程的主要阶段进行总体规划, 明确开发过程各阶段的目标和要求, 确定各阶段优化的目标和范围, 为拟定开发过程各阶段的计划、预算以及资源需求等奠定基础。下面简要阐述基于并行工程的主流程优化方法、基于关键链管理思想的主流程优化方法和集成并行度及关键链项目管理(CCPM)的主流程优化方法。

基于并行工程的主流程优化方法。主流程中各项开发活动之间并不总是具有严格的前序或后序关

系, 有些工作可以采取并行工程^[11]的方式进行同步处理。主流程优化时, 时间和风险是影响决策者制定优化或决策方案的关键因素。因此, 可根据复杂产品开发企业的实际情况, 构造以时间成本与风险成本为目标的并行度决策模型。

设有 $j=1, 2, \dots, n$ 项工作, 有 $k=1, 2, \dots, K$ 种资源, R_k 为第 k 种资源的总量, LT_{ij} 表示工作 i 相对于工作 j 的最小提前时间, r_{jk} 表示工作 j 所需的第 k 种资源的量, d 为并行度, 项目要求的最低并行度为 D , 决策变量 ST_j 为工作 j 的计划开始时间, 则并行度决策模型为

$$\text{(PDP) Min } C(d) = f(d) + g(d) \quad (10)$$

$$\text{s. t. } d \geq D \quad (11)$$

$$ST_j - ST_i \geq LT_{ij} \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^n r_{jk} \leq R_k \quad (13)$$

其中, $d = 1 - (SF_j - T_0)/(T - T_0)$, SF_j 为全部 n 项工作的完成时间; T 和 T_0 分别为工作完全串行和完全并行时的项目完工时间; $f(d)$ 为考虑时间因素的成本, 是关于 d 的减函数; $g(d)$ 为考虑风险因素的成本, 是关于 d 的增函数。

可建构启发式或元启发式算法求解上述模型, 得到所有工作的最佳安排, 进而计算出项目完成时间 SF_j 和优化的项目并行度 d 。

基于关键链管理思想的主流程优化方法。由于复杂产品开发工程中的诸多因素具有高度的不确定性, 很难严格遵循项目任务顺序安排的进程来执行, 因此可采用 CCPM^[12] 的思想来建立主流程优化调度模型, 以加强项目执行中所需资源的计划与调度, 使项目资源分布更均衡, 启动时间更灵活, 从而提高整个项目按期完成的概率。

设 AFT_j 为全部 n 项工作的实际要求完成时间, PB 为项目缓冲区尺寸, P_0 为项目按计划完工的期望概率, 则基于 CCPM 思想的优化模型为

$$\text{(PCC) Min } SF_j \quad (14)$$

$$\text{s. t. } ST_j - ST_i \geq LT_{ij} \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^n r_{jk} \leq R_k \quad (16)$$

$$P(AFT_j \leq (SF_j + PB)) \geq P_0 \quad (17)$$

目标函数(14)为最小化项目工期, 式(15)为工作间的紧前关系约束, 式(16)为资源约束, 式(17)保证项目按计划完工概率大于事先给定的期望完工概率。

可运用基于优先规则的启发式算法, 求解所有工作的近优调度计划。在此基础上, 运用 CCPM 方法进一步优化, 从而得到主流程的调度计划。

CCPM 方法的具体步骤为:a. 项目中各项任务执行时间存在不确定性,以 50 % 可能完成执行时间作为工作的估计执行时间;b. 考虑紧前关系约束、工作执行时间和资源约束,确定制约项目工期的关键工作序列,即关键链;c. 考虑到项目执行中的不确定因素,在非关键链到关键链的入口处设置输送缓冲区,在关键链尾部设置项目缓冲区,并采用根方差法对缓冲区尺寸进行设置。

集成并行度和 CCPM 的主流程优化方法。在模型(PCC)中引入并行度概念,可实现利益(最小化工期)和风险(项目延期失败)的平衡。基于并行度和 CCPM 的集成优化模型为

$$(PDC) \quad \text{Min } C(d) = f(d) + g(d) \quad (18)$$

$$\text{s. t.} \quad ST_j - ST_i \geq LT_{ij} \quad (19)$$

$$\sum_{j=1}^n r_{jk} \leq R_k \quad (20)$$

$$P(AFT_j \leq (SF_j + PB)) \geq P_0 \quad (21)$$

$$d \geq D \quad (22)$$

3.2 复杂产品开发二级流程优化

复杂产品开发的二级流程是通过对一级流程各阶段的再分解而形成的。从工程管理的角度看,设计开发阶段最为复杂,下面简要论述这个阶段的二级流程,即复杂产品开发的概念设计、数字化工程设计和试制试验流程的优化原理,并以试验任务排程为例说明相关的优化方法。

复杂产品开发概念设计流程优化。复杂产品概念设计是围绕新产品设计主题开展的关于造型与材料、结构与功能的设计活动,具有前瞻性和引导性的特点。其流程优化直接影响概念设计效率、市场投放速度以及市场竞争力。复杂产品概念设计阶段主要包括造型设计、效果图评审以及 CAE/CAD 评审等环节。复杂产品造型设计过程可抽象为寻找满足约束条件和预定要求的造型件组合。考虑到该过程存在大量难以结构化和量化的隐性决策目标,以及设计者偏好的不确定性,采用六元组 $\langle N, X, f, c, Y, P \rangle$ 描述造型设计中的隐性目标决策问题,其中 N 是决策者集合, X 是可行方案集合, f 是问题的目标函数, c 是约束条件, Y 是集合 X 在映射 f 下像的集合, P 是决策者的取舍准则。可设计基于群体一致的交互式进化计算求解建立在该六元组上的优化模型。效果图评审和 CAE/CAD 评审可采用基于群体一致的群决策方法。

数字化工程设计流程优化。复杂产品数字化工程设计过程由一组并行、串行或交叉执行的设计任务

组成。为实现数字化工程设计流程优化,首先需要对该流程中包含的任务和作业过程进行工作结构分解,建立任务作业分解结构。在此基础上,运用关键路径法获取作业一览表、持续时间和作业间的前后逻辑关系;然后可实施调度,进一步优化作业安排。

复杂产品的试制试验流程控制与优化。复杂产品试制是指新部件或新产品在完成初步设计与工艺准备之后进行的试制生产,目的在于验证新部件或新产品设计是否达到预期的质量和效果要求。可采用样品制造质量连续改进指数评价法和基于多元相关分析的产品偏差源快速诊断法来分析与控制试制质量,以加速试制过程进化。

通常复杂产品试验的费用贵、周期长,且资源有限,因此有必要挖掘试验任务间的相关性,抽象共性试验任务,最大程度地减少价值微小或无价值的重复试验。可采用相似系统工程方法优化确认试验任务,其流程如图 3 所示。

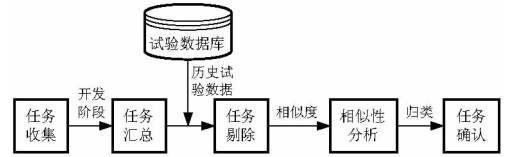


图 3 试验任务确认流程

Fig. 3 The confirmation process of test tasks

为实现试验任务与试验资源的最优配置,应该建立试验任务排程的多目标优化模型,并运用合适的求解方法求解该模型,获取满意的试验任务安排。

假定有 I 项试验任务需要完成,任务 $i=1,2,\dots,I$; 完成这些任务共需要 K 类仪器设备,设备类别 $k=1,2,\dots,K$; k 类设备中有 J_k 台同类设备,设备 $j=1,2,\dots,J_k$; 完成所有任务的最大允许时段数为 T , $\tau=1,2,\dots,T$ 为具体时段; ST_i 和 SF_i 分别表示任务 i 的开始和结束时间, ST_i 为决策变量; P_i 表示任务 i 的紧前任务集合, T_{kj} 表示 k 类设备 j 的可用处理时间; t_{ikj} 为完成任务 i 需占用 k 类设备 j 的时间, π_{ikj} 为任务 i 使用 k 类设备 j 的单位时间成本, $x_{ikj\tau}$ 为 0 ~ 1 变量,当 k 类设备 j 在 τ 时段开始处理任务 i 时为 1, 否则为 0, 则试验任务安排的多目标优化模型为

$$\text{Min } TC = \sum_{\tau=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} x_{ikj\tau} \cdot t_{ikj} \cdot \pi_{ikj} \quad (23)$$

$$\text{Min } SF_{\max} = \max \{ SF_i \mid i = 1, 2, \dots, I \} \quad (24)$$

$$\text{Min } D_k = \sum_{\tau=1}^T \sum_{j=1}^{J_k} \left| \sum_{i=1}^I x_{ikj\tau} \cdot t_{ikj} - \frac{T_k}{J_k} \right|, \quad k = 1, \dots, K \quad (25)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^I x_{ikj\tau} \leq 1 \quad (26)$$

$$ST_i \geq ST_l + \sum_{\tau=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} x_{ikj\tau}, \quad \forall l \in P_i \quad (27)$$

$$\sum_{\tau=1}^T \sum_{i=1}^I x_{ikj\tau} \cdot t_{ikj} \leq T_{kj} \quad (28)$$

$$ST_i \geq 0 \quad (29)$$

$T_k = \sum_{\tau=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_k} x_{ikj\tau} \cdot t_{ikj}$ 为试验期间 k 类设备的总处理时间, $SF_i = \sum_{\tau=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J_k} x_{ikj\tau} t_{ikj} + ST_i$ 为目标(23)最小化试验期间的总成本, 目标(24)最小化完成所有试验任务的总工期, 目标(25)使各类设备中的设备利用均衡, 包含多个目标, 式(26)表示一台设备只能同时处理一项任务, 式(27)为任务间的优先约束关系, 式(28)表示试验期间对某台设备的使用不能超出其最大可用时间, 式(29)为非负性约束。

4 复杂产品开发过程的动态管理

在复杂产品开发过程中, 开发任务、开发环境、开发要求和开发资源都具有很大的不确定性, 因此其管理过程也具有动态性。为了提高质量、保证进度、降低成本、控制风险, 必须对复杂产品开发过程进行统一的动态调度。为此, 首先必须建立多层次并能支持产品开发过程持续改进的动态管理模型, 其次必须分析复杂产品开发过程中的管理活动及其对资源的需求, 还必须制定有效的动态调度策略。

4.1 复杂产品开发过程的动态管理模型

复杂产品开发过程的动态管理模型主要包括多维描述、组织结构、管理模式和协调机制等。

为了实现复杂产品开发过程的动态优化调度, 有必要在统一的多维空间中展现复杂产品开发过程。以国际标准化组织的 CIM - OSA 体系结构^[13]为基础, 结合产品开发周期优化(PACE)、集成产品开发(IPD)和门径管理系统(SGS)等产品开发管理模式, 本文提出了一个复杂产品开发过程的三维集成化模型, 见图4。

目标任务维描述各开发阶段的任务集合; 资源配置维表示开发过程中需要使用的各类开发资源, 主要有人力资源、技术资源、资金资源、设备资源、市场资源等; 过程控制维表达开发过程中对各项开发活动都必须进行严格考核的各种管理目标函数, 如开发质量、工期、成本、风险、工艺等。目标任务维和过程控制维都是分级结构。在管理过程中, 管理者根据目标任务和资源配置的相关情况, 围绕各种管

理目标, 对工程进行动态综合管理。

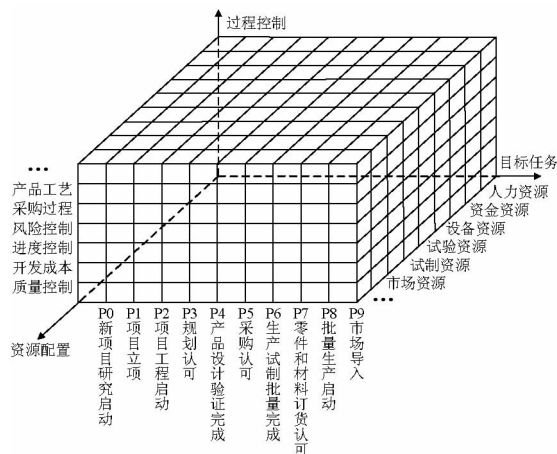


图4 复杂产品开发过程的集成化三维模型

Fig. 4 The integrated 3D model of complicated product development process

复杂产品开发过程包含众多互异的开发活动, 开发团队包含知识背景和经验偏好不尽相同的多类专业人员, 因此必须设计一种包含虚拟组织的矩阵式管理组织结构, 创立以业务建模、项目管理、数据管理和知识管理为主要内容的集成管理模式, 建立过程责任矩阵和会议交流协商机制, 以规范产品开发流程管理, 提升企业的研发能力。

复杂产品开发过程是一个不断改进和提升的过程, 开发过程的动态管理也呈现出螺旋式上升式的改进。可以基于 PDCA 循环思想, 建立复杂产品开发过程的动态管理模式持续改进机制。

4.2 复杂产品开发过程中的动态管理活动

按照复杂产品开发过程的动态管理模型, 可将复杂产品开发工程管理过程分解为数以万计的动态管理活动, 下面简要阐述与产品规划、任务抽取、实时任务调度和动态知识管理相关的几类。

产品规划。运用质量功能展开方法(QFD)^[14]可细化和明确复杂产品开发过程中的具体任务。QFD采用矩阵(也称质量屋)的形式, 将顾客需求逐步展开, 分层转换为产品工程特性、零件特征、工艺特征和质量控制方法。QFD从顾客需求开始, 经历产品规划、零件配置、工艺规划和工艺/质量控制规划等阶段, 上一阶段的输出是下一阶段的输入, 构成瀑布式分解过程。

任务抽取。根据复杂产品开发过程的动态管理模型, 可建立开发任务的工作分解结构(WBS), 运用相关软件工具抽取最底层的WBS作业。考虑到这些作业间可能存在耦合, 不利于后续管理中的作

业调度。为此,可以基于设计结构矩阵(DSM),研究耦合作业的分解算法和割裂算法,以获取相对独立的合理作业。

实时任务调度。作业任务调度是复杂产品开发工程管理的经常性基础工作。需建立以总工期最小化为目标的考虑作业顺序依赖的调度模型,并设计能解决适当规模实际问题的调度策略和优化方法。

动态知识管理。复杂产品开发是与知识紧密联系的系统工程,复杂产品开发工程管理体现出知识经营工程管理模式^[15]的特征。可根据复杂产品开发过程中企业对知识管理的需求,构建面向服务架构的知识门户,为企业提供统一的知识管理服务。

4.3 复杂产品开发过程的动态调度策略

在复杂产品开发过程中,开发任务和开发资源是动态变化的,可采用事件触发式的动态调度策略。设 K_1, \dots, K_N 为开发项目中按优先级排序的已执行任务队列, y_1, \dots, y_N 为它们的优先级,关键任务优先级设定为最高,非关键任务则依据其特性逐级往下设定; z_1, \dots, z_N 为各项任务执行所需的资源量,则事件触发式动态调度策略可按任务和资源的变动情况进行表述。

新任务加入。复杂产品开发过程中,需求变更会导致不断有新任务加入开发项目。设新任务 K_{N+1} 的优先级为 y_{N+1} ,所需开发资源数为 z_{N+1} ,则加入策略为:a. 若 K_{N+1} 为关键任务,即满足 $y_{N+1} \geq y_n$, $n = 1, 2, \dots, N$,则采取剥夺式策略中的轮转调度算法^[16];从 K_1, \dots, K_N 中选择 x 项非关键任务,按一定的策略分别剥夺它们的部分开发资源,使它们在资源非饱和和情况下轮转执行。b. 若 K_{N+1} 为非关键任务,则采取非剥夺式策略中的FCFS调度算法^[17],自头至尾顺序扫描任务队列 K_1, \dots, K_N ;若存在 $y_{N+1} > y_n$,则将 K_{N+1} 插入到任务 K_n 之前,并按一定的策略分别剥夺 K_n 之后队列中 x 项非关键任务的部分开发资源;否则,将 K_{N+1} 放置在任务队列末尾,等待前序任务结束时的资源释放。

任务撤销。在复杂产品开发过程中,许多任务因决策者预先考虑的不足,以及企业固有资源或技术能力的限制,不能顺利实施,需要及时撤销。这将引发任务队列变更和开发资源调整,需要进行动态调度,具体方法为:a. 若 K_n 为关键任务,采用非剥夺式策略中的优先级调度策略^[18];自 K_n 至尾扫描任务队列 K_n, \dots, K_N ,若存在任务 $K_m(m > n)$ 满足 $y_m = y_n$,则对 K_n 及与其直接相关的非关键任务

(K_{n+1}, K_{m-1})进行集中撤销,释放所有撤销任务的占用资源,并按一定的策略分配给后续关键任务;为保证开发项目的持续稳定运行,关键任务撤销后,需要开发人员或决策者及时补充新开发任务。b. 若 K_n 为非关键任务,自 K_n 至前逆向扫描任务队列 K_1, \dots, K_n ;若发现优先级最大的任务 K_m ,主观判定 K_n 与 K_m 的关联度;如无关联,则采取剥夺式策略中的轮转调度算法,撤销任务 K_n 的同时,将所释放资源 z_n 交由队列中的关键任务进行轮转调度;如存在关联,则需开发人员或决策者及时补充新开发任务。

任务变更。任务变更通常包括优先级变化、资源需求增加和资源占用减少等3类。若属任务优先级变化,可按新变更的优先级重新排序任务序列,以维持项目正常运行,过程易于实现。若为资源需求增加或减少,可采用下述方法:a. 若 K_n 为关键任务且需增加 z_i 单位资源,可再次采取轮转调度算法,选择 K_1, \dots, K_N 中的 x 项非关键任务,按一定的策略分别剥夺它们的部分开发资源,以确保变更后项目的持续执行。b. 若 K_n 为非关键任务且需增加 z_i 单位资源,则对其前序任务队列 K_1, \dots, K_{n-1} 中的非关键任务进行重排序,采取非剥夺式策略中的最短工作优化(SJN)调度算法^[19],按照作业时间短先执行的原则,调整该前序队列中的非关键任务,以便提前释放资源,最大程度优化项目的执行时间。c. 若 K_n 可减少 z_i 单位资源,则选择任务队列中的 m 项关键任务,并按一定策略分别增加若干单位的开发资源,加速复杂产品整机开发项目的执行。

任务结束。任务队列中,不同任务的执行时间不同,任务 K_n 结束将会给复杂产品开发项目提供更多可利用资源,这些资源可补充给队列中的各项关键任务,促进项目提前完工。若队列中有 m 项关键任务,则按一定策略分别为它们同时增加若干单位的开发资源。

资源加入。新资源的及时补充是促进项目加速执行的有力保障。复杂产品开发过程中,新进开发人员、增加相关硬件设备、购置新软件等都会给项目的顺利执行带来有力的推动。可采取优先级调度策略合理调度这些新加入资源:首先判断队列中关键任务的资源饱和度,若存在关键任务资源未饱和,即增加资源可有效缩短项目执行周期,则将新增的 z_i 单位资源按一定的策略分配给队列中资源未饱和的关键任务;若所有关键任务均达到饱和状态,即增加资源不会缩短项目执行周期,则将剩余新增资源按

一定的策略分配给队列中的非关键任务。

资源退出。复杂产品开发过程中,资源退出对项目的顺利执行有较大影响,需及时采取如下调度策略:a. 若 z_i 单位资源属于关键任务 K_n ,则使用优先级调度与轮转调度相结合的策略,选择队列中优先级小于 y_n 、已分配资源量大于 z_i 的任务,在这些任务上轮转调度 z_i 单位资源;在保证关键任务 K_n 顺利执行的同时,尽量降低对项目整体进度的影响。b. 若 z_i 单位资源属于非关键任务 K_n ,则使用 FCFS 调度策略,对 K_n 后续队列中第一个满足 $y_m \leq y_n$ 的非关键任务 K_m 进行资源分解,划出 z_i 单位资源以支持任务 K_n 的顺利实施;对 K_m 后续队列采取同样的调度方法,将资源前置以支持任务 K_m 的顺利实施。如此反复,直至前面已完结任务释放的资源达到 z_i 单位为止。

5 复杂产品开发过程中的员工调度

在复杂产品开发过程中,技术人员往往是瓶颈资源。技术员工的调度是一类复杂的任务进度安排和人力资源配置问题,需综合考虑诸多因素,如员工技能、员工效率、学习形态、工资水平和优化目标等。

5.1 员工调度问题的求解思路

员工技能和员工效率是员工调度中两个最基本和最重要的要素。员工技能一般分为单技能、多技能和完全技能,单技能和完全技能可以看作多技能的特例;员工效率可分为同质效率和异质效率,分别指不同员工在同一技能上的效率相同和不同。在研究员工优化调度时,可从这两个维度划分员工调度问题,具体包括:单技能效率同质型(I类)、单技能效率异质型(II类)、完全技能效率异质型(III类)、完全技能效率同质型(IV类)、多技能效率同质型(V类)和多技能效率异质型(VI类)等。其中,由于完全技能效率同质型员工可看成具有单一综合技能且效率同质的员工,故IV类问题可归入I类问题。

在大量企业调研的基础上,以贴近复杂产品开发实际和简单实用为原则,可以分别建立上述5类(PII)

问题的调度模型。在这些模型中,根据实际情形需要分别考虑项目工期、总误工时间和成本最优等优化目标,以及学习形态、工资水平、任务间的优先关系和资源受限等约束条件。

在设计调度算法时,可采取下述思路和策略:a. 先易后难,即先考虑基础的简单模型,如单技能和完全技能员工调度问题,再考虑一般的多技能员工调度问题;b. 通过研究系统模型的各方面性质和问题本身的领域知识,获取一些启发式规则,并应用到算法设计中;c. 对非NP难问题,设计复杂性尽可能低的多项式动态规划算法,对NP难问题,将优先考虑启发式算法,特别是一些元启发式算法;d. 为测试和验证所设计算法的有效性和效率,必须进行试验仿真和应用验证,前者主要是改进和完善算法,后者是实际检验模型和算法的实用性。

下面分别讨论单技能、完全技能和多技能员工的调度问题,并假定某复杂产品开发项目的任务集合为 $J, j=1, 2, \dots, |J|$ 为具体任务;参与该项目的员工集合为 $M, m=1, 2, \dots, |M|$ 为具体员工;每位员工均可在一个时段处理完一个任务;任务间具有任意的优先约束关系,一项任务仅能在其紧前任务完成后才能开始。

5.2 单技能员工调度方法

对该问题来说(I类和II类),单技能员工大大限制了可行调度的解空间,追求项目工期最小化成为首要目标。因此优化问题是寻找到一个最优任务调度使项目工期 C_{\max} 最小。这里以II类问题为例加以说明。

令 T 为最大允许的时段数, $t=1, 2, \dots, T$ 为具体时段; $t=0$ 表示项目开始, $|J|+1$ 为虚拟任务,表示项目结束; E_j 表示具有技能 j 的员工集合,员工 m 处理任务 j 的时间为 p_{jm} , C_j 为任务 j 的完成时间, P_j 为任务 j 的紧前任务集合, L 为一适当正整数,决策变量 x_{jmt} 指示在时段 t 员工 m 是否处理任务 j , 则II类问题可用如下整数线性规划模型表示

$$\text{Min } C_{\max} = \max \{C_j \mid j \in J\} \quad (30)$$

$$\text{s. t. } \sum_{m=1}^{|M|} \sum_{t=1}^T x_{jmt} = 1, \quad \forall j \in J \quad (31)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} x_{jmt} \leq 1, \quad t=1, \dots, T, \quad \forall m \in M \quad (32)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} x_{jmt} - \sum_{i=1}^{|J|} x_{imt-1} \leq 0, \quad \forall t \in \{2, \dots, T\}, \quad \forall m \in M \quad (33)$$

$$C_j - C_i + L(2 - x_{jmt} - x_{jmt-1}) \geq p_{jm}, \quad \forall i, j \in J, \quad i \neq j, \quad \forall m \in M, \quad \forall t \in \{2, \dots, T\} \quad (34)$$

$$C_j \geq \sum_{t=1}^T p_{jm} x_{jmt}, \quad \forall j \in J, \quad \forall m \in M \quad (35)$$

$$C_j - C_i \geq \sum_{m=1}^{M} \sum_{t=1}^T p_{jm} x_{jmt}, \quad \forall i \in P_j \quad (36)$$

$$x_{jmt} = \begin{cases} 1, & \text{在时段 } t \text{ 员工 } m \text{ 处理任务 } j \\ 0, & \text{在时段 } t \text{ 员工 } m \text{ 未处理任务 } j \text{ 或 } \forall j \notin E_j \end{cases}, \quad \forall j \in J, \forall m \in M, t = 1, \dots, T \quad (37)$$

$$C_j \geq 0, \quad \forall j \in J \quad (38)$$

目标函数(30)为最小化项目工期,式(31)限定每项任务在某时段内只能由一位员工处理,式(32)限制某员工在某时段最多处理一项任务,式(33)表示仅那些在上一时段有处理任务的员工才能在下一时段处理另一任务,式(34)表示员工完成某时段任务的时间至少是该任务处理时间加上上一时段任务完成时间,式(35)表示每项任务完成时间不少于该任务的处理时间,式(36)确保任务间的优先关系,式(37)指示决策变量何时取1何时取0,式(38)为非负性约束。设计了改进的模拟退火算法求解该问题。

5.3 完全技能员工调度方法

在这类问题(III类)中,完全技能员工给可行调度以很大解空间,此时可根据开发项目所追求的首要目标来定优化目标,因此分别针对工期、总误工时间和总成本3类常见目标建立优化模型。

考虑项目工期最小化的III类问题模型(PIII_t)与(PII)类似,只需将式(37)改为式(39),可设计基于优先规则的启发式串行搜索算法,借助增量式启发过程构造问题解。

$$x_{jmt} = \begin{cases} 1, & \text{在时段 } t \text{ 员工 } m \text{ 处理任务 } j \\ 0, & \text{在时段 } t \text{ 员工 } m \text{ 未处理任务 } j \end{cases}, \quad \forall j \in J, \forall m \in M, t = 1, \dots, T \quad (39)$$

将模型(PII)中的式(37)改为式(39),目标函数(30)改为式(40)即可得考虑总误工时间最小化的III类问题模型(PIII_d)。

$$\text{Min } TT = \sum_{j=1}^{J} \max(C_j - d_j, 0) \quad (40)$$

式中,TT为总误工时间, d_j 为任务j的工期。可构建混合优化算法求解该问题,用基于优先规则的启发式算法产生一半初始种群染色体,然后基于概率进化进行GA搜索。

考虑总成本最小化(增长型工资和时间成本)的III类问题模型(PIII_c)为非线性整数规划模型

$$\text{Min}_{m \in M} TC = \sum_{j=1}^{J} [Q(C_j) + \sum_{t=C_j-p_{jm}}^{C_j} a_{t,m}] \quad (41)$$

$$\text{s.t. } C_k \leq C_j - p_{jm}, \quad \forall k \in P_j, \forall j \in J, \forall m \in M \quad (42)$$

$$C_j \geq p_{jm}, \quad \forall j \in J, \forall m \in M \quad (43)$$

式中, $Q(C_j)$ 是任务j完成时间 C_j 的折算成本, $a_{t,m}$

为时间段 $[t-1, t]$ 中员工m的工资,随时间呈阶梯状递增。目标函数(41)为最小化完成项目的总成本,包括时间折算成本和增长型工资成本。式(42)和式(43)分别为任务优先约束和完成时间约束。设计了动态规划算法求解该问题。

5.4 多技能员工调度方法

在该类问题(V类和VI类)中,员工具有多种不同技能,给调度以更大的选择空间,但也增加了问题的复杂度。V类问题,员工效率相同,使工期要求不再突出,因此以总成本为目标建立优化模型;VI类问题,员工效率不同,且熟练程度随时间增加,故以工期为目标建立模型。这里以VI类问题为例。

令 ST_j 为任务j的开始时间, δ_j 为任务j需要的技能, J_s 为需要技能s的任务集合, G_m 为员工m的技能集合; $\pi_{mst} = \sum_{\tau=1}^{t-1} \sum_{j \in J_s} y_{jmt}$, $\forall m \in M, \forall s \in G_m, t = 2, \dots, T$ 为员工m在第t天前从事需要技能s任务的天数; eff_{ms0} 为员工m的s技能的初始效率, b 为效率因子, $eff_{mst} = eff_{ms0} + b \pi_{mst}$, $\forall m \in M, \forall s \in G_m, t = 2, \dots, T$ 为员工m在第t天s技能的效率;决策变量 x_{jmt} ,如调度中员工m处理任务j,则等于1,否则为0;决策变量 y_{jmt} ,如员工m在第t天处理任务j,则等于1,否则为0。VI类问题的非线性整数规划模型为

$$(PVI) \text{ Min } C_{\max} = \max\{ST_j + d_j \mid j \in J\} \quad (44)$$

$$\text{s.t. } V_j = \sum_{m \in E_j} \sum_{t=ST_j+1}^{ST_j+d_j} x_{jmt} \times eff_{m\delta_j}, \quad \forall j \in J \quad (45)$$

$$\sum_{m \in E_j} x_{jmt} = 1, \quad \forall j \in J \quad (46)$$

$$\sum_{j=1}^{J} y_{jmt} \leq 1, \quad \forall m \in E_j, t = 1, \dots, T \quad (47)$$

$$ST_j \geq ST_i + d_j, \quad \forall j \in J, \forall i \in P_j \quad (48)$$

$$\sum_{t=ST_j+1}^{ST_j+d_j} y_{jmt} = x_{jmt} \times d_j, \quad \forall m \in E_j, \forall j \in J \quad (49)$$

$$x_{jmt} \in \{0, 1\}, \quad \forall m \in E_j, \forall j \in J \quad (50)$$

$$y_{jmt} \in \{0, 1\}, \quad \forall m \in E_j, \forall j \in J, t = 1, \dots, T \quad (51)$$

目标函数(44)为最小化项目工期,式(45)保证任务工作量在实际工期内刚好完成,式(46)确保每项任务仅被某个员工处理,式(47)保证每个员工在同一天最多处理一个任务,式(48)为任务间的优先约束关系,式(49)保证任务处理时间且不可中断,

式(50)和式(51)为0~1变量约束。可设计包含优先规则启发的混合粒子群优化算法求解该问题。

6 复杂产品开发过程中的供应商协同管理

在复杂产品开发过程中,主体企业按照一定的技术联系和制造可能性将复杂产品分解为若干个功能单元,其中部分单元的开发任务必须与供应商密切合作。为了充分利用供应商的开发技术与创新能力,应该合理选择供应商,构建协同关系,并加强协同过程管理。

6.1 供应商评价指标体系

供应商选择是一个准入、评审、合作和优化的多人多准则、多阶段多层次的动态决策过程,在不同的决策阶段和决策层次,有不同类型的决策指标。分析企业需求、明确供应商评价标准、构建供应商评价指标体系是供应商选择的基础。由于指标体系的多样性,既有定性和定量的指标,又有序数和基数指标,还有未知的和不确定的指标,因此需要设计一种相应的供应商评价指标体系。

Dickson^[20]识别的23个供应商选择准则,涵盖了质量、交货、历史表现、担保、价格、技术能力和财务状况等方面,至今仍然适用,是供应商评价的常用指标。目前,最流行的供应商评价指标体系有:BOCR^[21]指标体系,包括利益、机会、成本和风险4个维度;SCOR体系^[22](供应链运作参考模型),最新版本包括可靠性、响应、敏捷性、成本和资产5类一级绩效指标;BSC体系^[6],包括价值与目标、客户与市场、流程与管理、学习与成长4个维度;QCDS/QCDD/QCDI^[23]指质量、成本、交货期、服务、设计和创新。它们可作为构建具体评价体系的参考框架。

在复杂产品开发的供应商动态选择过程中,主体企业根据内部条件和外部环境,在供应商准入阶段的评价与选择时可参考BSC,在供应商合作阶段的评审与选择时可参考BOCR、QCDD、QCDI;在供应商的动态绩效评估和优化选择时可参考SCOR。

6.2 供应商选择方法

供应商的准入选择和绩效评估是供应商管理的基础工作,鉴于它们具有多属性和不确定性等特点,可采用证据推理方法^[24]。该方法的核心是采用基于评价准则的分布式置信结构建模,并运用概率统计和人工智能中的近似推理方式进行多指标综合。

从供应商管理策略和应对外部变化需求考虑,对同种零部件,企业通常会选择多家供应商进入其

供应商体系。在实际订货时,并非每次都向所有相关供应商订货,存在一个供应商动态选择过程。由于供应商选择是多准则决策问题,应建立考虑不确定性需求的多目标数学规划模型,可采用模糊折衷规划^[25]方法来求解,实现供应商选择和订单分配的联合决策。

供应商评价模型的建立和客观公正的评价指标量化表示是困扰供应商选择的两大难题。QFD^[14]将顾客要求转换为产品的工程特性,较好地解决了这两类问题,为供应商选择模型建立提供了新的思路和方法。但QFD方法有一个缺点——未区分不同类型需求对顾客满意度的影响,将QFD和Kano模型结合可解决该问题。

基于QFD和Kano模型的供应商选择方法的流程包括建模和决策两个阶段。建模过程为:确定客户需求(CR)集合及CR间的相对权重;确定产品工程特性(EC)集合及EC间的相关矩阵;确定CR-EC关系矩阵;计算EC权重并分类。评价过程为:获取候选供应商产品在各工程特性上的值,并进行无量纲化处理;使用所建模型计算各候选供应商的得分,进行供应商排序。

令 A_p 表示第 p 个供应商; CR_i 为第 i 种顾客需求, \tilde{W}_i 为其权重, $i=1,2,\dots,I$; EC_j 为第 j 个工程特性, \tilde{K}_j 为其权重, $j=1,2,\dots,J$; $\tilde{R}_{i,j}$ 为 CR_i 与 EC_j 间的相关关系,标准化为 $\tilde{R}'_{i,j}$; $\tilde{r}_{l,j}$ 为 EC_l 与 EC_j 之间的相关关系, $l,j=1,2,\dots,J$; $X_{p,j}$ 为 A_p 产品在 EC_j 上的值,标准化后为 $X'_{p,j}$; S_p^{au} 为不考虑Kano模型时 A_p 的总得分; \tilde{b}^q 为第 q 个专家给特征 b 的评分值, $q=1,2,\dots,D$; d_q 为第 q 个专家的权值, $q=1,2,\dots,D$; S_p^{au} 为引入Kano模型时 A_p 的总得分。

在上述符号中, \tilde{b}^q 、 \tilde{W}_i 、 \tilde{K}_j 、 $\tilde{R}_{i,j}$ 、 $\tilde{R}'_{i,j}$ 和 $\tilde{r}_{l,j}$ 为模糊集,可采用三角模糊数表示。为后续符号的简洁,令 \tilde{f} 表示模糊集, (f_l, f_m, f_r) 为其三角模糊数表示, $(f)_\alpha^U$ 和 $(f)_\alpha^L$ 分别为 \tilde{f} 在 α 水平下的上下限, $\alpha \in [0,1]$ 。则有

$$(b_l, b_m, b_r) = \sum_{q=1}^D d_q \cdot (b_l^q, b_m^q, b_r^q) \quad (52)$$

$$(f)_\alpha^U = f_r - \alpha(f_r - f_m) \quad (53)$$

$$(f)_\alpha^L = f_l + \alpha(f_m - f_l) \quad (54)$$

式(52)计算被评特征 b 的最终得分,式(53)和式(54)计算模糊集 \tilde{f} 在 α 水平下的上下限。

对 $\tilde{R}_{i,j}$ 进行标准化处理,得

$$(R'_{i,j})_{\alpha}^U = \frac{\sum_{l=1}^J (R_{i,l})_{\alpha}^U (r_{l,j})_{\alpha}^U}{\sum_{l=1, l \neq j}^J \sum_{k=1}^J (R_{i,k})_{\alpha}^L (r_{k,j})_{\alpha}^L + \sum_{l=1}^J (R_{i,l})_{\alpha}^U (r_{l,j})_{\alpha}^U} \quad (55)$$

$$(R'_{i,j})_{\alpha}^L = \frac{\sum_{l=1}^J (R_{i,l})_{\alpha}^L (r_{l,j})_{\alpha}^L}{\sum_{l=1, l \neq j}^J \sum_{k=1}^J (R_{i,k})_{\alpha}^U (r_{k,j})_{\alpha}^U + \sum_{l=1}^J (R_{i,l})_{\alpha}^L (r_{l,j})_{\alpha}^L} \quad (56)$$

工程特性 j 的权重 \bar{K}_j 由 CR 的权重、标准化后的 CR - EC 的相关关系来确定

$$(K_j)_{\alpha}^U = \frac{\sum_{i=1}^I (W_i)_{\alpha}^U (R'_{i,j})_{\alpha}^U}{\sum_{i=1}^I (W_i)_{\alpha}^L} \quad (57)$$

$$(K_j)_{\alpha}^L = \frac{\sum_{i=1}^I (W_i)_{\alpha}^L (R'_{i,j})_{\alpha}^L}{\sum_{i=1}^I (W_i)_{\alpha}^U} \quad (58)$$

QFD 和 Kano 模型结合的具体做法为:选取最小的 \bar{K}_l 作为参考项,根据式(59)计算其他各 \bar{K}_j 和 \bar{K}_l 之间的距离;然后按距离进行排序,再根据排序结果将全部 EC 划分为基本型、期望型和兴奋型。

$$D_{j,l}(\beta) = \frac{1}{n+1} \left\{ \begin{aligned} & \left[\beta \sum_{m=0}^n (K_j)_{\alpha}^U + (1-\beta) \sum_{m=0}^n (K_j)_{\alpha}^L \right] \\ & - \left[\beta \sum_{m=0}^n (K_l)_{\alpha}^U + (1-\beta) \sum_{m=0}^n (K_l)_{\alpha}^L \right] \end{aligned} \right\} \quad (59)$$

式中, β 反映决策者的偏好,在 $[0,1]$ 间取值, $\beta=0.5$ 表示决策者的决策态度中立。

引入 Kano 模型后,供应商 A_p 的总得分为

$$S_p^{aw} = \sum_{j=1}^J [\mu \times (K_j)_{\alpha}^L + (1-\mu) \times (K_j)_{\alpha}^U] (X'_{p,j})^{Q_j} \quad (60)$$

式中, Q_j 为 Kano 系数, Q_1 、 Q_2 和 Q_3 分别对应基本型、期望型和兴奋型;每个 EC 都有其相应的 Q_j ; μ 为三角模糊数精确化时的系数,在 $[0,1]$ 内取值,由决策者确定。

6.3 供应商协同过程管理

复杂产品开发工程中的供应商协同过程可从时间、控制和关系 3 个维度进行描述,3 个维度相互交织形成供应商协同过程模型。该模型可从不同维度展现产品开发各阶段中供应商参与的时机、程度以及重点协同管理的内容。

时间维表达复杂产品开发工作的进展过程,也是进行产品开发项目进度管理的关键,是设置关键里程碑节点的基础。通常,时间维可分为方案论证、设计定型、生产定型和批生产 4 个阶段。

控制维表达复杂产品开发过程中的供应商管理重点,在不同时间阶段控制的侧重点不同,但它们相互促进,共同保证产品开发的顺利进行。结合复杂产品开发项目特点和供应商管理内容,控制维包括质量、成本、创新和时间 4 个方面。

关系维表达复杂产品开发中核心企业与其供应商之间的合作关系,关系的不同决定了供应商参与的程度和时机皆有不同,而这又将影响产品开发各阶段的工作进展。考虑供应商关系动态演化的特点,关系维包括普通交易、合作伙伴、相互依存和战略合作 4 种关系。

复杂产品开发过程中,供应商协同模式可分为中心协同模式和层次协同模式。供应商协同关系在技术层、策略层和战略层上逐步演化,并最终达到稳态。在复杂产品开发过程中的每一时间节点上,满足开放性、扩展性、互补性和弹性等性能要求的可行供应商协同配置方案可能有多种,且这些方案可能各有优势,可设计基于群体一致的群决策方法^[26],优选出当前时间节点上的最终协同配置方案。

复杂产品开发过程中的供应商质量控制是保证产品质量的关键,应该设计协同供应商质量控制流程和基于先期产品质量策划思想的质量风险评估方法。复杂产品开发过程中的成本在产品成本中占有很大比重,可采用作业成本法估算供应商参与协同开发的供应商成本,并基于价值工程理论进行供应商协同成本控制。供应商协同绩效评估是使双方企业获得能力提升、实现互利共赢的必要手段,可设计基于数据包络分析的供应商协同绩效评估方法,建立协作联盟能力提升模型。

7 复杂产品开发工程管理决策支持系统技术

复杂产品开发工程管理需要功能齐全、结构开放、安全可靠,并能支持知识积累和协同交互的信息系统支撑,其中的关键技术有基于信息资源库和决策模型库的决策支持系统技术、基于多阶段反馈式决策过程的决策支持系统技术,以及集成化协同决策支持平台技术。

7.1 基于信息资源库和决策模型库的决策支持系统技术

复杂产品开发工程管理中许多半结构化和非结构化的决策问题。为了支持这些复杂决策问题的求解,应该构建基于信息资源库和决策模型库的决策支持系统,其体系结构如图5所示。该体系结构中包括信息资源库、决策模型库、数据仓库、OLAP与数据挖掘系统、问题处理系统、决策模型库、数据仓库、OLAP与数据挖掘系统、问题处理系统和人机界面等部分。

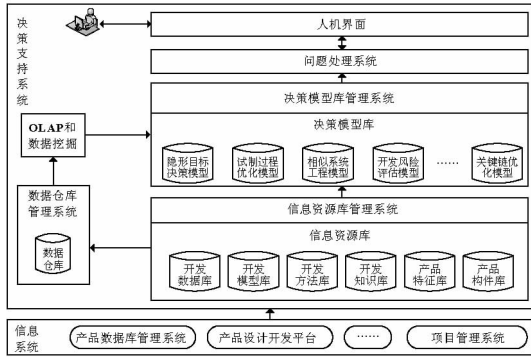


图5 基于信息资源库和决策模型库的决策支持系统体系结构示意图

Fig. 5 The structure of decision support system based on information resources database and decision models database

信息资源库是决策支持系统的最基础部件,包括产品构件库、产品特征库、开发知识库、开发模型库、开发方法库和开发数据库等。产品构件库中存放复杂产品的构件信息;产品特征库中存放协同产品开发过程中各阶段的设计特征;开发知识库中存放从实践中总结出来的开发经验及相关知识;开发模型库不同于决策模型库,存放与产品相关的设计模型和仿真试验模型;开发方法库存放开发工艺、设计方法、管理方法和模型算法;开发数据库主要包括开发技术类数据、流程类数据和管理类数据等。

决策模型库存放各种优化与决策问题的数学和计算模型,以及这些模型的多种求解方法。决策模型库中,既有目标明确的决策模型,又有目标难以表达的隐性目标决策模型。根据复杂产品开发工程管理的实际需求,决策模型库中有产品开发流程优化模型、试制验证优化调度模型、员工调度模型、供应商选择模型、新产品开发风险评估模型、多人协同工作的设计流程优化模型、关键链和关键路径优化模型、证据推理模型、相似性计算模型等。构建决策模型库系统时,采用模型组件方法,以支持已有模型的

修改和新模型的创建。

7.2 多阶段反馈式决策支持系统技术

复杂产品开发过程一般分为多个既相互联系又相对独立的决策阶段,前一阶段的决策结果作为后一阶段的决策条件进入后一阶段的决策过程;而后一阶段的决策结果又可能引发前一阶段的重新决策,从而形成多阶段反馈式的决策过程。为此,应该研究多阶段反馈式决策支持系统的体系结构和求解技术。复杂产品开发多阶段反馈式决策系统体系结构如图6所示。

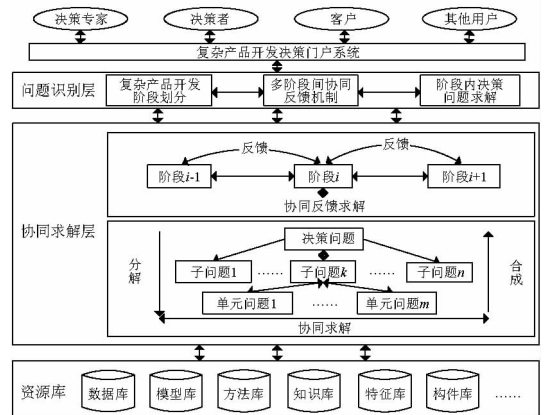


图6 多阶段反馈式决策支持系统体系结构示意图

Fig. 6 The architecture of decision support system with multi-stage feedback

图6所示的体系结构包含复杂产品开发门户网站系统、问题识别层、协同求解层以及资源库层等4个部分。决策门户网站系统将各种应用系统、数据资源和互联网资源集成到一个信息管理平台之上,为各类决策的参与主体提供友好访问界面。问题识别层用来分析和识别决策问题。协同求解层包括阶段内决策问题求解和阶段间决策问题的协同反馈求解。资源库层由数据库、模型库、知识库、方法库和特征库等组成,支持协同决策。

阶段决策相互影响的复杂产品开发过程决策问题,可采用集中和分散决策模式来建模。集中决策机制,就某个决策问题,建立整个开发过程的决策模型,借助类似拉格朗日松弛等方法,去除各开发阶段间的耦合,然后对各阶段独立决策,再通过类似拉格朗日乘子的调节实现各阶段的协同决策,达至整体最优。分散决策机制,就某决策问题,分别建立各阶段的决策模型,前阶段决策结果为后阶段输入,各阶段决策模型中设立后续阶段决策影响因子,通过类

似敏感性分析的过程,得到最终的折衷结果。这两种模式都需要 DSS 提供模型和方法上的支持机制。

阶段决策相互影响的多目标群决策更困难,可采用下面流程来解决:a. 选择适当的任务描述方法,定义复杂决策问题,建立其表达模型,并构造相关备选方案集;b. 根据复杂决策问题的多目标性将复杂多阶段群决策问题分解为显性目标子问题和隐性目标子问题集合,再运用相关方法,将分解得到的子任务按照某种性质进行聚类;c. 对聚类的子任务进行调度和协同求解,从而得到复杂多阶段群决策任务的解;d. 对决策个体的决策过程或决策结果进行一致性分析、群体适应值集结和满意度评价。

7.3 复杂产品开发协同决策支持平台技术

复杂产品开发决策支持系统平台应该能够集成相关的系统和技术,支持各类决策主体在不同情景下的动态决策过程,支持各类产品开发的全生命周期动态决策过程,支持开发过程知识的积累和运用。为此,应该研究协同动态决策平台、信息融合平台和知识管理平台的集成化协同动态决策支持平台技术。图 7 为复杂产品开发工程管理协同决策支持平台的体系结构示意图。

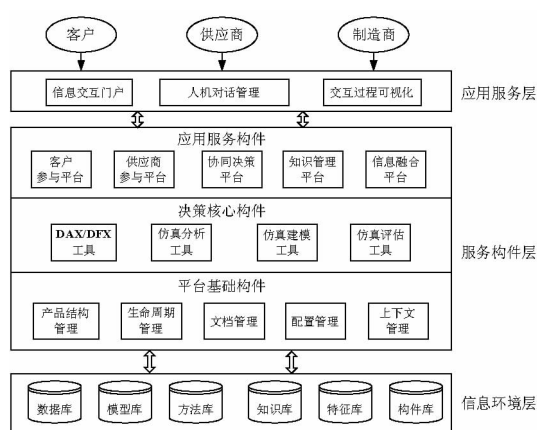


图 7 复杂产品开发协同决策支持平台体系结构示意图

Fig.7 The architecture of collaborative decision support system platform for complicated product development

该平台可提供知识管理服务、信息融合服务、协同动态决策服务和供应商协同服务等。知识管理服务包括共享协同开发参与主体的显性和隐性知识,实现显性和隐性知识的相互转换,提供知识链管理服务。信息融合服务包括实现各制造商基于共同目标的信息共享、信息交流、不同领域里所需信息的无障碍转换与获取。协同决策服务包括提供支持协同

决策所需的环境和组件,例如流程优化、动态管理等。供应商协同服务主要为主体企业提供供应商协同管理服务。

8 总结与展望

本文是在团队关于轿车整车开发工程管理方面科研工作的基础上提炼与拓展而成的,是对团队著述的《复杂产品开发工程管理理论与方法》^[7]一书的精炼与提升。十多年来的研究工作实践使笔者深刻地认识到:复杂产品开发工程的鲜明特点是以高技术为基础,以创新为动力,它打破了传统工程的固有边界,远远超出了经济与技术的范畴,是一类十分复杂的综合造物活动。

复杂产品开发工程管理是由一系列多阶段多层次多维度的决策过程构成的,是一个动态决策系统。本文结合复杂产品开发工程管理的实践,提出了由决策功能、决策方法和决策技术构成的复杂产品开发工程管理的动态决策理论体系。

关于复杂产品开发工程管理动态决策理论体系中的决策功能和决策技术在前文已有较系统的论述。该体系中的主要决策方法包括:确定性决策方法、不确定性决策方法以及为决策服务的评估方法等。这些决策方法在工程管理实践中经常互为补充、相向配合,并且融合在各个决策功能和决策支持系统中,下面逐一简要阐述。

复杂产品开发工程管理中有许多确定性决策问题,如产品谱系规划、开发项目的优化组合、各级开发流程优化、开发资源的优化调度、开发任务的动态优化调度等。本文通过抽象共性典型优化问题和考虑问题自身特殊性,建立了优化模型,并设计了求解算法。在模型建立上,针对关键任务和核心资源建模,以符合复杂产品开发实际为原则,不追求模型的过度抽象和简化;根据任务的层次和场景设定合理的优化目标,可能是单目标、多目标或隐性目标;根据复杂产品开发的影响因素,将模型涉及的复杂约束主要归为两类:开发资源的限制和各种作业任务间的序列依赖关系。在模型求解上,综合考虑解质量和算法效率,充分利用问题本身性质和领域知识建立启发式规则,开发能在合理时间内解决适当规模实际问题的优化算法,求取模型的满意解。

复杂产品开发工程管理中有许多不确定性决策问题,如市场调查与分析方案决策、供应商选择与协同开发方式决策、产品开发过程各阶段决策、试制与

实验方案决策、试生产工艺方案决策等。为解决这些决策问题,一方面需要运用不确定信息的获取、表达、融合与推理等方面的理论与方法,利用复杂产品开发过程的知识积累,进行意向性和多层次不确定性智能决策;另一方面需要大批企业领导、设计专家、供应商、客户等多方参与者协同工作,共同决策,即进行群体决策。对前者,将其归结为不确定信息融合与推理、不确定多属性决策、案例推理、协同和数据挖掘等智能决策问题,并设计基于多类合成策略的智能关联分类方法、基于证据信度效用的不确定信息融合与推理方法,以及基于置信信念函数的决策方法。对后者,设计群决策中的专家与指标权重确定方法、群决策的结果集结和过程集结方法。

复杂产品开发工程管理中有很多评估问题,如产品开发的阶段性评估、产品开发过程的风险评估、产品开发过程中的供应商评估、产品开发项目与企业战略的一致性评估等。解决这些评估问题,需要建立科学的评估指标体系,选择合理有效的评估方法,以及正确表达和融合评估信息。为了建立合理的评估指标体系,在详细分析评估对象的主要特征的基础上,建立了符合评估问题实际的层次指标体系。在评估方法方面,设计了基于群体层次分析法的评估方法、基于模糊权重和效用的证据推理评估方法、基于区间语言信息评价方法。

在动态决策理论体系中,常用的基础性方法主要有优化理论与方法、人工智能理论与方法以及其他定性或定量方法。优化理论与方法既能较好地解决一些确定性决策问题,又能借助变量或问题的模糊描述或概率描述,解决一些不确定性决策问题。人工智能理论与方法,如证据推理理论、定性推理理论、遗传算法等,这类方法一方面能够较好地应用于不确定性决策问题的求解过程,另一方面又能用于求解复杂的优化问题。在决策方法中还经常用到一些其他定量或定性方法,在此不再赘述。

科学技术特别是信息技术的快速发展必然会进一步推动复杂产品开发工程管理理论、方法、技术的创新与变革。云计算技术与产品开发技术的结合产生了“云开发”,它为复杂产品开发工程管理提供了新的服务模式、运作模式和盈利模式,具有广阔的应用前景。在云开发方面,研究的主要热点问题有:开发资源和开发能力的虚拟化与服务化,云开发各环节的集成与协调,云开发过程中的质量、成本、风险和进度控制,云开发中的知识管理,云开发中技术创

新与知识产权保护等。云开发的研究与实践刚刚起步,提高云开发工程管理的虚拟化、敏捷化、集成化、协同化、网络化水平,探索云开发的新型管理模式,需要人们长期不懈的努力。

参考文献

- [1] 李伯虎,柴旭东,朱文海. 复杂产品集成制造系统技术[J]. 航空制造技术,2002(12):17-20.
- [2] 殷瑞钰,汪应洛,李伯聪. 工程哲学[M]. 北京:高等教育出版社,2007.
- [3] 汪应洛,王宏波. 工程科学与工程专业[J]. 自然辩证法研究,2005,21(9):59-63.
- [4] 何继善,王孟钧. 哲学视野中的工程管理[J]. 科技进步与对策,2008,25(10):1-3.
- [5] 赫伯特·西蒙. 管理决策新科学[M]. 李柱流译. 北京:中国社会科学出版社,1982.
- [6] Kaplan S R, Norton D P. The balanced score card-measures that drive performance, harvard business review [J]. Harvard Business Review, 1992, January-February: 71-79.
- [7] 杨善林. 复杂产品开发工程管理理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [8] Zadeh L A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility [J]. Fuzzy Sets and Systems,1978,1(1):3-28.
- [9] Liang C Y, Wang Y S, Jiang L Y. Optimization study of project portfolio selection considering resources conversion under uncertain conditions [C]// The 4th Conference on Systems Science, Management Science & System Dynamics (SSMSSD), 2010.
- [10] 王勇胜,梁昌勇,鞠彦忠. 不确定多期滚动项目组合选择优化模型[J]. 系统工程理论与实践,2010,32(6):1290-1297.
- [11] Winner R I, Pannel J P, Bertrand H E. The role of concurrent engineering in weapons system acquisition [R]. Alexandria, VA: Institute for Defense Analysis, 1998.
- [12] Goldratt E M. Critical Chain [M]. North River Press Publishing Corporation, Great Barrington, MA,1997.
- [13] Querenet B. The CIM-OSA integrating infrastructure [J]. Computer Control Engineering Journal,1991,2(3):118-125.
- [14] Akao Y, Mazur G H. The leading edge in QFD: Past, present and future [J]. International Journal of Quality & Reliability Management,2003,20(1):20-35.
- [15] 王众托. 创建知识系统工程学科[J]. 中国工程科学,2006,8(12):1-9.
- [16] Pun K H, Hamdi M, Distro. A distributed static round-robin scheduling algorithm for bufferless close-network switches [C]// IEEE Global Telecommunications Conference, 2002: 2298-2302.
- [17] Schmid U, Blieberger J. Some investigations on FCFS scheduling in hard real time applications [J]. Journal of Computer and Systems Sciences, 1992,45(3):493-512.
- [18] Lu W C, Hsieh J W, Shih W K. A faster exact schedule ability analysis for fixed-priority scheduling [J]. Journal of Systems and Software,2006,79(12):1744-1753.

- [19] Kant K. MVA approximations for SJN scheduling [J]. Performance Evaluation,1992,15(1):41-61.
- [20] Dickson G W. An analysis of vendor selection systems and decisions [J]. Journal of Purchasing,1966,2(1):5-17.
- [21] Saaty T L. Decision Making in Complex Environments —The Analytic Network Process for Decision Making with Dependence and Feedback [M]. USA: RWS Publications,2001.
- [22] Supply Chain Council. Overview of the SCOR model V10.0 [EB/OL]. [2012, 6]. <http://supply-chain.org/f/SCOR-Overview-Web.pdf>.
- [23] Handfield R B, Walton S V, Sroufe R, et al. Applying environmental criteria to supplier assessment: A study in the application of the analytical Hierarchy process [J]. European Journal of Operational Research,2002,141(1):70-87.
- [24] Yang J B, Singh M G. An evidential reasoning approach for multiple-attribute decision making with uncertainty [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics,1994,24(1):1-18.
- [25] Li L, Lai K K. A fuzzy approach to the multiobjective transportation problem[J]. Computer and Operations Research,2000,27(1):43-57.
- [26] Fu C, Yang S L. The group consensus based evidential reasoning approach for multiple attributive group decision analysis [J]. European Journal of Operational Research,2010,206:601-608.

Dynamic decision-making theories and methodologies on engineering management of complicated product development

Yang Shanlin^{1, 2}, Zhong Jinhong^{1, 2}

(1. School of Management, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Key Laboratory of Process Optimization and Intelligent Decision-making, Ministry of Education, Hefei 230009, China)

[Abstract] Complicated product development (CPD) is a system engineering that combines technology with management deeply. The diverse values of development engineering practice should be integrated from the height of strategic coordination are demonstrated in this paper. The management principles of CPD engineering are proposed. The theoretical framework of dynamic decision-making, which consists of the strategic choice of the CPD projects, the decomposition and hierarchical optimization of the development projects, the dynamic management of the development process, skilled staff scheduling, collaborative management of suppliers, and corresponding decision support systems techniques, is constructed. Variety of optimization, scheduling and decision models and their corresponding solving methods are designed. The decision support system techniques based on information resources database, decision methods database and multi-stage feedback decision support system techniques are also proposed. The common methods used in the engineering management of CPD are summarized and the application of cloud computing to the engineering management of CPD is forecasted.

[Key words] engineering management of complicated product development; theoretical system of dynamic decision-making; hierarchical optimization; dynamic management; workforce scheduling; supplier collaborative management; decision support system