

考虑质量价值水平的复杂产品供应链质量成本优化方法

王欢[†], 方志耕, 邓飞, 陶良彦

(南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106)

摘要: 优化复杂产品供应链质量成本是提高供应链质量管控能力、降低供应链质量风险的重要方法. 综合考虑产品质量水平和产品研制成本, 提出复杂产品质量价值概念, 并详细分析以供应商网络为基础的复杂产品质量价值形成机理. 建立复杂产品质量价值 GERT 网络模型, 实现复杂产品质量价值水平的量化计算, 并以此为基础, 通过识别网络中的关键供应商建立优化模型, 提出考虑质量价值水平的复杂产品供应链质量成本优化方法. 最后通过算例验证模型方法的科学性和有效性.

关键词: 复杂产品研制; 供应链管理; 质量成本; GERT 网络

中图分类号: C935

文献标志码: A

Quality cost optimization method for complex product supply chain considering quality value

WANG Huan[†], FANG Zhi-geng, DENG Fei, TAO Liang-yan

(College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106)

Abstract: To optimize the quality cost of complex product supply chain is an important way to improve the quality management capability and reduce the quality risk in supply chain. Considering the product quality level and the product development cost, the concept of complex product quality value is proposed, and based on supplier network, the formation mechanism of complex product quality value is analyzed in detail. And then a GERT network model of complex product quality value is established, the quantitative calculation of complex product quality value is realized. On the basis of identifying the key suppliers in the network and establishing the optimization model, the quality cost optimization method of complex product supply chain considering the quality value is proposed. Finally, a numerical example is used to verify the scientificity and effectiveness of the model method.

Keywords: complex product development; supply chain management; quality cost; GERT network

0 引言

目前,复杂产品的研制主要采用“主制造商-供应商”的供应链管理模式,如船舶、飞机、卫星、运载火箭等,在该模式下,主制造商负责总体设计、制定质量标准,具体的研发和制造任务由供应商承担.与传统的业务转包模式相比,主制造商可以摆脱资源占用,集中优势资源强化核心技术,全面提高研制效率.但同时,这种放权式的供应链管理也提高了供应链的复杂度和质量管控的难度,对主制造商的质量管控能力提出了更高的要求.质量成本优化是复杂产品质量管控的重要手段,为了提高产品的质量,降低复杂产品的内外部损失,主制造商不断进行质量成本优化,增加质量保障成本的投入,但质量水平提升收效

甚微,研制成本居高不下,质量损失时有发生,单一的企业内部的质量成本优化难以实现供应链质量水平的全面提升.如长征五号遥二火箭发射的失利,并不是由主制造商的产品设计问题所造成的,而是因为供应商提供的一台芯一级 YF-77 氢氧发动机存在制造缺陷.由此可见,主制造商将质量成本优化问题从企业内部上升到供应链层面是十分必要的.在资源有限的条件下,如何从供应链的角度识别关键质量环节,有针对性地优化供应链质量成本结构,降低研制成本和质量风险,提升供应链的质量竞争能力是一个值得研究的问题.

近年来,国内外学者在该领域开展了广泛的研究,成果颇丰.总体而言,相关研究主要集中在以下3

收稿日期: 2018-12-25; 修回日期: 2019-03-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71671091); 国家自然科学基金青年基金项目(71801127); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX19_0143); 南京航空航天大学博士生短期访学项目(190408DF09).

责任编辑: 李勇建.

[†]通讯作者. E-mail: huan_wang@nuaa.edu.cn.

个方面:一是复杂产品供应链管理问题, Jin等^[1]结合制造成本和产品质量的要求,提出了一种基于协同博弈理论的Shapley值法公差设计方法,陈占夺^[2]通过案例研究揭示了复杂产品系统特性与风险的关系,陈洪转等^[3]研究了“主制造商-供应商”模式下主制造商激励供应商的最优成本分担问题,徐兰等^[4]利用DSN对复杂产品供应链中的供应商进行划分,以实现供应链优化管理,张令荣等^[5]研究复杂产品供应链补货问题,提出了3种情况的最优补货策略.二是供应链质量管理问题, Castillo-Villar等^[6]将质量成本作为供应链全局性的度量指标,提出了供应链设计模型, Thun等^[7]根据德国汽车制造厂的67项调查结果,对供应链风险管理实践进行实证分析, Franca等^[8]针对供应链业务外包问题提出了供应链低质量风险评估方法, Hsieh等^[9]分析了4个非合作博弈情景对供应商和制造商的质量投资和检验策略进行了研究, Zeng等^[10]通过实证研究,认为企业内部的质量管理对供应链质量管理起到主导作用, Vanichchinda等^[11]研究了全面质量管理实践、供应链管理实践和企业的供应链性能在泰国汽车行业之间的关系,王道平^[12]等研究质量控制和各成员均损失规避背景下的供应链协调问题,揭示了损失规避和质量控制等因素与最优产品质量水平、最优订货量以及供应链效用之间的关系,刘远等^[13]应用质量屋和多目标规划方法,提出了供应链质量控制方案递阶决策模型.三是质量成本优化与控制方法, Khataie等^[14]应用系统动力学方法构建了质量成本决策模型, Naidu^[15]开发了一个数学模型以确定最佳产品公差,使得制造成本和质量损失在内的总成本降至最低,尚姗姗等^[16]分析质量成本的影响因素,利用模糊神经网络建立质量成本控制模型,王元明等^[17]考虑质量风险的传递性和反馈性,建立了供应链质量成本控制模型,张煜等^[18]针对供应链质量成本信息不对称问题,引入第三方质量成本审查策略的契约机制,潘艳华等^[19]应用系统动力学构建了以客户满意为基础的质量成本模型.

从文献检索情况看,复杂产品供应链质量成本优化问题的相关研究已经取得显著的成果,但仍有以下几点有待改进:

1) 质量成本优化问题的研究多局限于单一的企业内部,而复杂产品研制依托于复杂的供应商网络,因此现有的质量成本优化方法对复杂产品的质量成本优化问题并不完全适用;

2) 依据朱兰质量成本曲线的质量成本优化问题研究,仅从生产企业角度考虑其最优质量成本,未考虑客户质量需求,在此优化方法下,存在供应商质量

成本最优时产品质量水平不能满足客户需求的问题;

3) 缺少更适用于供应链管理的科学的供应链质量成本和质量水平核算模型方法.

基于以上分析,本文首先综合复杂产品研制成本和产品质量水平提出了供应链质量价值的概念,以复杂产品研制供应商网络为基础,分析复杂产品质量价值形成机理以及供应链质量成本优化的目标,进一步构建复杂产品质量价值GERT网络模型,为复杂产品质量价值提供量化的计算方法,详细阐述了参数设计、矩母函数、等价传递参数以及重要参数的求解方法.以此为基础,通过识别关键供应商,构建供应商质量成本优化模型,提出考虑质量价值水平的复杂产品供应链质量成本优化方法,探讨优化供应链质量成本结构,提高复杂产品研制效率的方法.最后通过一个算例验证模型方法的科学性和有效性.

1 基于供应商网络的复杂产品质量价值实现机理分析

1.1 复杂产品的质量价值

复杂产品具有研制周期长、研制投入大、研制风险高、战略意义强等特征,相比于一般产品,复杂产品研制对于质量的要求更加严苛,任何一个细微的质量问题都可能造成严重的内外部损失.如我国航天运载火箭研制提出了“高可靠、高安全和高质量”的“三高”原则,将质量视为航天的生命和航天发展的基础^[20].根据国际标准ISO9001:2008中定义,质量是一组固有特性满足要求的程度,其中质量要求来自于客户,是顾客感知价值的体现,客户的价值需求是否能够得到满足是衡量产品质量好坏的标准^[21].对于复杂产品,产品质量能够满足客户价值需求的程度体现产品的质量价值,复杂产品的质量价值主要受两个因素的影响:产品的质量水平和产品的研制成本.在研制成本一定的情况下,质量水平越高,产品的质量价值越大;同理,在相同的质量水平下,研制成本越低,产品的质量价值就越大.满足客户质量价值需求是复杂产品研制的基本目标.

1.2 复杂产品质量价值实现机理分析

在“主制造商-供应商”的供应链管理模式下,复杂产品研制的供应链主要由客户、主制造商、少量的一级供应商、大量的二级供应商、三级供应商等组成,各级供应商之间存在交叉供货和协同研制,形成了一个庞大而复杂的供应商网络^[22].复杂产品质量价值的实现依托于高效的供应商网络,实现过程如下:首先,客户提出质量价值需求,如产品的使用寿命、产品的安全性等,主制造商综合考虑供应商网络的技术

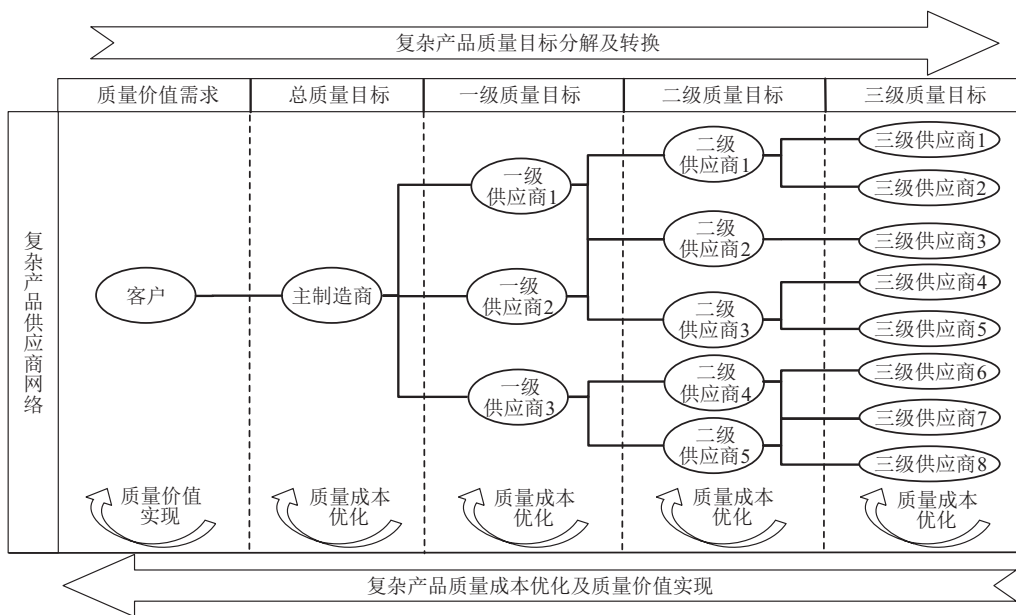


图1 基于供应商网络的复杂产品质量价值实现机理

能力、研发能力、制造能力后,将客户的质量价值需求转换为复杂产品研制过程中可参考的总质量目标,以确保型号研发的可行性;然后,伴随着产品研制任务结构分解,总质量目标也进行逐级分解,形成各供应商级质量目标,各级供应商再将各自的质量目标内化为各个研制环节的要求;最后,各级供应商投入研制成本,完成质量目标,并向其下游供应商传递产品,最终由主制造商将产品交付给最终客户以满足客户的质量价值需求. 研制成本随着产品的逐级交付在供应商网络中流动,形成了产品的总研制成本,同时,供应商网络的产品转移能力也体现了研制网络的质量水平,如图1所示.

1.3 复杂产品供应链质量成本优化

复杂产品研制是供应商网络中主制造商和各级供应商的协同过程,各级供应商为了完成研制任务,首先会投入一定的基本研制成本,如材料、设备、人工等,同时为了达到下游供应商的质量要求,投入质量保障成本(包括预防成本和鉴定成本),但不可避免地会产生质量损失(包括内部损失和外部损失),这部分质量保障成本和质量损失成本统称为质量成本^[23-24]. 与一般产品不同,复杂产品质量成本投入量大,占总生产成本的比例较高,质量成本的优化问题不容忽视. 根据朱兰质量成本理论,质量保障成本的增加可以降低质量损失,提高质量水平. 然而,在复杂产品的供应商网络中,往往存在部分供应商质量保障成本投入过低,质量损失以牛鞭效应向下游供应商传递,导致质量价值目标难以实现,或部分供应商投入过多的质量保障成本,质量水平过剩造成资源浪

费. 因此,对复杂产品供应链质量成本进行优化的目的在于,优化供应链质量成本投入量以及供应链质量成本结构,实现在达到一定质量水平的前提下,以最小的质量成本投入实现产品质量价值的最大化,满足客户的质量价值需求.

2 复杂产品质量价值GERT网络模型

2.1 模型的基本构成

定义1 复杂产品质量价值GERT网络模型由节点、箭线和流3个基本要素组成,节点为复杂产品研制各级供应商或主制造商;箭线表示节点之间的网络功能结构关系,即供应商之间的产品传递活动;流反映节点间产品传递活动的定量化关系.

基本构成单元如图2所示:节点*i*为上游供应商;节点*j*为其下游供应商或主制造商;活动(*i, j*)为供应商*i*与供应商*j*的产品传递活动; QV_{ij} 为活动(*i, j*)实现的产品质量价值; p_{ij} 为节点*i*实现的条件下活动(*i, j*)被执行的条件概率,即供应商*i*提供的产品经下游供应商*j*检测后,实际通过质量检验被供应商*j*接收的产品占全部产品的比例,即供应商*i*实现产品传递的概率; C_{ij} 为实现活动(*i, j*)所投入的总研制成本,根据以往研究对质量成本核算范围的界定^[23].

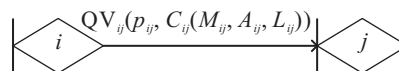


图2 复杂产品质量价值GERT网络基本构成单元

复杂产品的总研制成本包括基本研制成本和质量成本,具体可分为3个部分:基本研制成本 M_{ij} , 质量保障成本 A_{ij} , 质量损失成本 L_{ij} , 且 $C_{ij} = M_{ij} + A_{ij} + L_{ij}$. 基本研制成本 M_{ij} 是指一般的用来维持基

本研制的成本,如设计成本、材料成本、基本人力成本、车间运营成本等;质量保障成本 A_{ij} 为获得客户满意的质量并对组织外部做出质量保证而发生的费用,包括为预防产品不能达到客户满意的质量所支付的预防成本,如评审费、改进费等,以及为评定产品是否达到所规定的质量要求进行的试验、检验等鉴定成本;质量损失成本 L_{ij} 指没有达到客户满意的质量而造成的损失,包括产品在交货前因未能达到规定质量要求所造成的内部损失,如返工、返修等以及产品交付前后未能达到顾客满意的质量所造成的损失,如退货、索赔等^[24].

2.2 模型参数设计

基本研制成本是各级供应商为完成研制任务而进行的基础投入,当下游供应商或主制造商提出研制任务时这部分成本便已经基本可以确定或进行预估,因此,本文假设活动 (i, j) 投入的基本研制成本 M_{ij} 为常数,以便更直观地考虑和分析质量成本与质量水平之间的相互影响关系.

假设供应商网络中各级供应商具有较为完善的质量检验机制,上游供应商 i 有 n 个下游供应商 $j(j_1, j_2, \dots, j_n)$, 下游供应商对上游供应商 i 交付的产品进行质量检验,合格产品通过质量检验转移到供应商 j . 不合格产品分两种情况,如果是可修产品则退回到供应商 i 进行维修后再次进入产品交付流程,如图3中的活动 (i, i) ;如果是不可修产品则退回供应商 i 后直接做报废处理,如图3中的活动 $(i, 0)$. 因此,网络中供应商 i 转移到下游供应商 j 的产品的比例(活动 (i, j) 被执行的概率 p_{ij})即为供应商 i 生产的产品合格率 q_i , 体现供应商 i 产品的质量水平, $q_i = p_{ij}$.

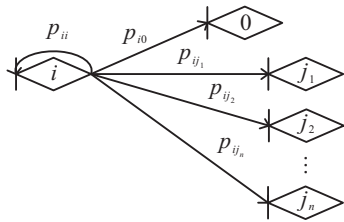


图3 供应商 i 产品合格率与网络转移概率关系

由朱兰质量成本理论,产品的质量损失成本 L_{ij} 及质量水平(产品合格率 q_{ij}) 质量保障成本 A_{ij} 有如下关系: $L_{ij} = g(A_{ij})$, $L_{ij} \geq 0, A_{ij} \geq 0$, 且 $g'(A_{ij}) \leq 0, g''(A_{ij}) \geq 0$, 即质量损失成本随着质量保障成本的增加而降低,但是质量保障成本的边际效用递减,当质量损失成本降低到最低点后,受技术和管理能力的限制,再增加质量保障成本的投入,质量损失都将不再下降. $q_{ij} = r(A_{ij})$, $A_{ij} \geq 0, 0 \leq q_{ij} \leq 1$, 且 $r'(A_{ij}) \geq 0, r''(A_{ij}) \leq 0$, 即产品的质量水平随着质量保

障成本的增加而增加,但是质量保障成本的边际效用递减,当质量水平达到最高点后,受技术和管理能力的限制,再增加质量保障成本也无法提高质量水平. $L_{ij} = g(A_{ij})$ 和 $q_{ij} = r(A_{ij})$ 的函数关系可以利用线性分段函数、指数函数、K.K.Govil 函数和 Cobb-Douglas 生产函数等进行拟合,具体函数形式及参数值由产品质量特性和供应商研制能力所决定. 由此,通过变量之间函数关系的转换,可将多参量的复杂产品质量价值 GERT 网络模型化为单参量模型.

2.3 模型的矩母函数设计及等价传递参数计算

定义2 假设质量保障成本 A_{ij} 是一个连续型随机变量,概率密度函数为 $f(A_{ij})$, M_{ij} 为常数,质量损失成本 L_{ij} 、质量水平 q_{ij} 、总研制成本 C_{ij} 也是随机变量,假设随机变量 C_{ij} 的概率密度函数为 $f(C_{ij})$, 定义随机变量 C_{ij} 的矩母函数为

$$M_{ij}(s) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{sC_{ij}} f(C_{ij}) dC_{ij}. \quad (1)$$

定义3 定义活动 (i, j) 的总研制成本 C_{ij} 等价传递函数为 $W_{ij}(s) = p_{ij}M_{ij}(s)$, 可以用 W_{ij} 代替原网络中的两个参数 C_{ij} 和 p_{ij} 对网络中的参数进行计算.

定理1 在该网络中,若 W_r 为节点 u 到节点 v 的第 r ($r = 1, 2, \dots, n$) 条直达路径的等价传递函数, $W_k(L_m)$ 为 m 阶环中的第 k 个环的等价传递系数, 则由节点 u 到节点 v 的等价传递函数 W_{uv} 为

$$W_{uv} = \frac{\sum_{r=1}^n W_r \left[1 - \sum_{m \neq r} \sum_k (-1)^m W_k(L_m) \right]}{1 - \sum_m \sum_k (-1)^m W_k(L_m)}. \quad (2)$$

证明 由于 $W_i(L_m)$ 为 m 阶环中第 i 个环的等价传递系数, GERT 网络的特征式为 $\Delta = 1 - \sum_m \sum_i (-1)^m W_i(L_m)$, 消去与第 r 条路径有关的全部节点和箭线后剩余子图的特征式为

$$\Delta_r = 1 - \sum_m \sum_{i \neq r} (-1)^m W_i(L_m),$$

其中 W_r 为节点 u 到节点 v 的第 r 条直达路径的等价传递函数, $r = 1, 2, \dots, n$. 根据信号流图的梅森公式可知节点 u 到节点 v 的等价传递函数为式(2). □

2.4 重要参数求解

2.4.1 复杂产品研制网络的质量水平

定义4 在 GERT 网络中,假设网络的源节点 S 是网络的初始供应商,终节点 T 是网络中的最终客户,若网络中有多个源节点或多个终节点,则可通过构建虚拟节点使其归一化. 网络的等价传递概率 p_{ST} 表征源节点 S 到终节点 T 之间实现产品传递的可能性大小,假设供应商网络中各级供应商均具有较为完善的质量检验机制,则活动 (S, T) 的产品转移

概率 p_{ST} 是源节点 S 到终节点 T 实现研制产品的合格率, 体现复杂产品研制供应商网络的质量水平, 即 $q_{ST} = p_{ST}$.

定理2 在 GERT 网络中, 由源节点 S 到终节点 T 的等价传递函数 W_{ST} , 可得源节点 S 到终节点 T 的产品传递概率为 $p_{ST}(s) = W_{ST}(s)|_{s=0}$, 等价矩母函数 $M_{ST}(s) = \frac{W_{ST}(s)}{p_{ST}(0)}$, 复杂产品研制网络的质量水平 $q_{ST} = p_{ST}(s) = W_{ST}(s)|_{s=0}$.

证明 由等价矩母函数的特征可知, 当 $s = 0$ 时

$$W_{ST}(0) = p_{ST}M_{ST}(0) = p_{ST} \int_{-\infty}^{\infty} e^{sC_{ST}} f(C_{ST}) dC_{ST} |_{s=0} = p_{ST},$$

则 GERT 网络源节点 S 到终节点 T 的等价传递概率, 即产品传递概率为 $p_{ST}(s) = W_{ST}(s)|_{s=0}$.

由定义3可得, GERT 网络源节点 S 到终节点 T 的等价矩母函数为 $M_{ST}(s) = \frac{W_{ST}(s)}{p_{ST}(0)} = \frac{W_{ST}(s)}{W_{ST}(0)}$.

由定义4可得 $q_{ST} = p_{ST}(s) = W_{ST}(s)|_{s=0}$. \square

2.4.2 复杂产品研制网络的研制成本

定理3 在 GERT 网络中, 由源节点 S 到终节点 T 的等价传递函数为 W_{ST} , 可得源节点 S 到终节点 T 所转移的研制成本为从源节点 S 到终节点 T 传递的参量 C_{ST} 的一阶矩 $E(C_{ST})$, 等于 W_{ST} 对参量 C_{ST} 对应的 s 求偏导后置 s 为 0 的值, 即

$$E(C_{ST}) = \frac{\partial [W_{ST}(s)/W_{ST}(0)]}{\partial s} \Big|_{s=0}. \quad (3)$$

证明

$$\begin{aligned} \frac{\partial \left[\frac{W_{ST}(s)}{W_{ST}(0)} \right]}{\partial s} \Big|_{s=0} &= \frac{\partial \left[\int_{-\infty}^{\infty} e^{sC_{ST}} f(C_{ST}) dC_{ST} \right]}{\partial s} \Big|_{s=0} = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} C_{ST} e^{sC_{ST}} f(C_{ST}) dC_{ST} \Big|_{s=0} = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} C_{ST} f(C_{ST}) dC_{ST} = E(C_{ST}). \quad \square \end{aligned}$$

推论1 由源节点 S 到终节点 T 的等价传递函数为 $W_{ST}(s)$, 可得源节点 S 到终节点 T 的传递的参量 C_{ST} 的 n 阶矩为

$$E(C_{ST}^n) = \frac{\partial^n [W_{ST}(s)/W_{ST}(0)]}{\partial s^n} \Big|_{s=0}. \quad (4)$$

定理4 由源节点 S 到终节点 T 的等价传递函数为 $W_{ST}(s)$, 可得源节点 S 到终节点 T 的传递的参量 C_{ST} 的波动方差为

$$V(C_{ST}) = \frac{\partial^2 \left[\frac{W_{ST}(s)}{W_{ST}(0)} \right]}{\partial s^2} \Big|_{s=0} - \left(\frac{\partial \left[\frac{W_{ST}(s)}{W_{ST}(0)} \right]}{\partial s} \Big|_{s=0} \right)^2. \quad (5)$$

证明 由推论1可知 $E(C_{ST}^2) = \frac{\partial^2 \left[\frac{W_{ST}(s)}{W_{ST}(0)} \right]}{\partial s^2} \Big|_{s=0}$, 则有

$$V(C_{ST}) = E(C_{ST}^2) - [E(C_{ST})]^2 = \frac{\partial^2 \left[\frac{W_{ST}(s)}{W_{ST}(0)} \right]}{\partial s^2} \Big|_{s=0} - \left(\frac{\partial \left[\frac{W_{ST}(s)}{W_{ST}(0)} \right]}{\partial s} \Big|_{s=0} \right)^2. \quad \square$$

同理, 还可以分别求出研制网络中源节点 S 到终节点 T 所转移基本研制成本 $E(M_{ST})$ 及其方差 $V(M_{ST})$, 质量保障成本 $E(A_{ST})$ 及其方差 $V(A_{ST})$, 质量损失成本 $E(L_{ST})$ 及其方差 $V(L_{ST})$, 且 $E(C_{ST}) = E(M_{ST}) + E(A_{ST}) + E(L_{ST})$.

2.4.3 复杂产品研制网络的质量价值

定义5 根据上节分析, 复杂产品的质量价值与质量水平成正比, 与研制成本成反比. 在研制成本一定的情况下, 质量水平越高, 产品的质量价值越大; 在相同的质量水平下, 研制成本越低, 产品的质量价值越大. 因此可以定义复杂产品研制网络的质量价值为源节点 S 到终节点 T 的产品质量价值, 即

$$QV_{ST} = \frac{q_{ST}}{C_{ST}} = \frac{p_{ST}}{E(C_{ST})}. \quad (6)$$

通过复杂产品 GERT 网络模型可以得到供应商网络的质量水平和研制成本, 进而得到复杂产品研制网络的质量价值.

3 基于 GERT 网络模型的复杂产品供应链质量成本优化方法

复杂产品研制网络中, 各级供应商的研制能力、质量水平参差不齐, 制约着研制网络的质量价值水平, 主制造商可以通过供应链质量成本优化对遍布全球的、数目众多的供应商进行质量管控. 首先识别网络中各级供应商中的质量价值水平薄弱的关键供应商, 有针对性地进行供应链质量成本优化, 层层推进, 力求通过质量成本的优化实现以最小的研制成本投入满足客户的质量价值需求.

3.1 关键供应商的识别

各级供应商通过自身产品的质量价值水平影响供应商网络的质量价值水平, 因此可将各级供应商中质量价值水平最低的供应商视为该供应商等级中的关键供应商.

定义6 设在第 n 级供应商中有 d 个供应商, 若 $\forall t \in [1, d], QV_{S_{nd}} \leq QV_{S_{nt}}$ 恒成立, 则 S_{nd} 为第 n 级供应商中的关键供应商.

定理5 设供应商 i 为下游供应商 j 供货, 其中 p_{ij} 产品首次成功验收供给下游供应商, 产品未通过验收退回到供应商 i 进行维修的概率为 p_{ij} , 产品不可修直接进行报废处理的概率为 p_{i0} , 付出的研制成本分别为 C_{ij}, C_{i0}, C_{ii} , 则供应商 i 的质量价值水平为

$$QV_i = \frac{p_{ij} M_{ij}}{(1 - p_{ii} M_{ii})(C_{ij} + C_{i0} + C_{ii})} \Big|_{s=0}. \quad (7)$$

证明 根据GERT网络串联、并联及自环结构的运算原理,可以得到 $W_{ij}(s) = \frac{p_{ij}M_{ij}}{1 - p_{ii}M_{ii}}$, 供应商 i 的质量水平为产品成功传递到下游供应商 j 的概率, $q_i = p_{ij} = W_{ij}(s)|_{s=0}$, 供应商 i 研制成本为供应商 i 研制活动付出的总成本, $C_i = C_{ij} + C_{i0} + C_{ii}$, 因此, 供应商质量价值水平为

$$QV_i = \frac{q_i}{C_i} = \frac{p_{ij}M_{ij}}{(1 - p_{ii}M_{ii})(C_{ij} + C_{i0} + C_{ii})} \Big|_{s=0} \quad (8)$$

综上, 定理5成立. \square

3.2 质量成本优化模型

对关键供应商进行质量成本优化能够有效弥补网络的质量短板, 提高网络质量成本效率, 实现供应链质量成本优化目标. 假设在原网络中, 关键供应商 S 的质量保障成本投入为 A'_S , 质量水平为 q'_S . 在优化后的供应商质量水平 q_S 不低于原质量水平 q'_S 的前提下, 对关键供应商 S 进行质量成本优化, 使得质量价值 QV_S 最大化, 构建质量成本优化模型, 模型的目标函数及约束条件为

$$\max Z = QV_S.$$

$$\text{s.t. } L_S = g(A_S), \quad g'(A_S) \leq 0, \quad g''(A_S) \geq 0; \quad (9)$$

$$q_S = r(A_S), \quad r'(A_S) \geq 0, \quad r''(A_S) \leq 0; \quad (10)$$

$$C_S = M_S + A_S + L_S, \quad QV_S = \frac{q_S}{C_S}; \quad (11)$$

$$0 \leq q'_S \leq q_S \leq 1, \quad M_S, A_S, L_S \geq 0. \quad (12)$$

根据 $L_S = g(A_S)$, $q_S = r(A_S)$ 的不同形式, 优化模型有不同的形式和不同的解法. 本文以 $L_S = g(A_S)$ 和 $q_S = r(A_S)$ 为线性分段函数(如图4和图5所示), 且以 $A_L \geq A_q$ 为例, 探讨质量成本优化模型的求解方法, 有

$$L_S = \begin{cases} k_1 A_S + a_1, & 0 < A_S < A_L; \\ a_2, & A_S \geq A_L. \end{cases} \quad (13)$$

$$q_S = \begin{cases} k_2 A_S + b_2, & 0 < A_S < A_q; \\ b_1, & A_S \geq A_q. \end{cases} \quad (14)$$

其中: $k_1 = \frac{a_2 - a_1}{A_L}$, $A_L \geq 0$, $a_1 > a_2 \geq 0$; $k_2 = \frac{b_1 - b_2}{A_q}$, $A_q \geq 0$, $0 \leq b_2 < b_1 \leq 1$.

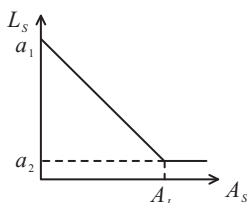


图4 质量损失成本线性函数

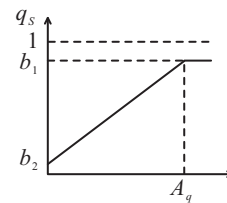


图5 质量水平线性分段函数

经过模型推导求解, 可知最优解有以下3种情况:

1) 当 $A_S \leq A_q$ 时:

① 当 $k_1 \in (-\infty, -1]$, 或 $k_1 \in (-1, 0)$ 且 $b_2 \leq \frac{k_2(a_1 + M)}{k_1 + 1}$ 时, 最优解存在且唯一, $A_S^* = A_q$, $QV_S^* = \frac{b_1}{(k_1 + 1)A_q + a_1 + M}$;

② 当 $k_1 \in (-1, 0)$, $b_2 \geq \frac{k_2(a_1 + M)}{k_1 + 1}$ 时, 最优解存在且唯一, $A_S^* = A_S$.

2) 当 $A_q \leq A_S \leq A_L$ 时:

① 当 $k_1 \in (-\infty, -1]$ 时, 最优解存在且唯一, $A_S^* = A_L$, $QV_S^* = \frac{b_1}{A_L + a_2 + M}$;

② 当 $k_1 \in (-1, 0)$ 时, 最优解存在且唯一, $A_S^* = A_q$, $QV_S^* = \frac{b_1}{(k_1 + 1)A_q + a_1 + M}$.

3) 当 $A_S \geq A_L$ 时, 最优解存在且唯一, $A_S^* = A_L$, $QV_S^* = \frac{b_1}{A_L + a_2 + M}$.

4 算例研究

大型民用飞机研制是“主制造商-供应商”模式的典型应用, 本文根据大型民用飞机研制情况构建GERT网络, 假设其供应商网络由1个客户、1个主制造商、2个一级供应商、3个二级供应商和2个三级供应商组成, 网络关系如图6所示, 其中节点1为虚拟源节点. 根据各级供应商及主制造商的研制经验及统计数据, 得到网络相关参数如表1所示.

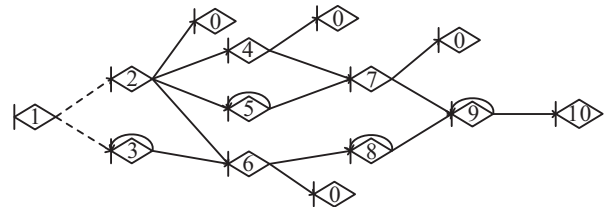


图6 大型民用飞机供应商GERT网络

根据复杂产品质量价值GERT模型, 应用Matlab软件计算得到 $P_{1,10} = 0.5945$, $E(C) = 8.3043$, 研制网络质量价值水平为0.0716.

根据复杂产品供应链质量成本优化方法, 首先识别网络中的关键供应商, 经计算, 各供应商的质量价值水平如2表所示. 因此, 一级供应商中的关键供应商为供应商2, 二级供应商中的关键供应商为供应商6, 三级供应商中的关键供应商为供应商7.

表1 大型民用飞机研制供应商网络活动参数表

(i, j)	$p_{(ij)}$	$M_{(ij)}$	$A_{(ij)}$	$L_{(ij)}$
(1, 2)	0.5	0	0	0
(1, 3)	0.5	0	0	0
(2, 0)	$N(0.1, 0.04)$	0.1	$N(0.2, 0.01)$	$N(0.5, 0.06)$
(2, 4)	$N(0.3, 0.03)$	0.4	$N(0.5, 0.02)$	$N(0.3, 0.05)$
(2, 5)	$N(0.4, 0.05)$	0.3	$N(0.6, 0.03)$	$N(0.2, 0.03)$
(2, 6)	$N(0.2, 0.01)$	0.5	$N(0.3, 0.02)$	$N(0.4, 0.04)$
(3, 3)	$N(0.3, 0.07)$	0.4	$N(0.3, 0.01)$	$N(0.3, 0.05)$
(3, 6)	$N(0.7, 0.04)$	0.7	$N(0.7, 0.06)$	$N(0.6, 0.07)$
(4, 0)	$N(0.1, 0.03)$	0.2	$N(0.3, 0.02)$	$N(0.7, 0.04)$
(4, 7)	$N(0.9, 0.08)$	0.5	$N(0.8, 0.05)$	$N(0.2, 0.03)$
(5, 5)	$N(0.2, 0.03)$	0.2	$N(0.3, 0.06)$	$N(0.5, 0.06)$
(5, 7)	$N(0.8, 0.05)$	0.9	$N(0.9, 0.08)$	$N(0.4, 0.04)$
(6, 0)	$N(0.4, 0.02)$	0.3	$N(0.4, 0.07)$	$N(0.6, 0.02)$
(6, 8)	$N(0.6, 0.03)$	0.6	$N(0.7, 0.04)$	$N(0.5, 0.03)$
(7, 0)	$N(0.3, 0.04)$	0.3	$N(0.4, 0.07)$	$N(0.6, 0.03)$
(7, 9)	$N(0.7, 0.02)$	0.7	$N(0.9, 0.05)$	$N(0.6, 0.02)$
(8, 8)	$N(0.2, 0.03)$	0.4	$N(0.4, 0.04)$	$N(0.7, 0.04)$
(8, 9)	$N(0.8, 0.03)$	0.6	$N(0.8, 0.03)$	$N(0.4, 0.06)$
(9, 9)	$N(0.1, 0.02)$	0.4	$N(0.3, 0.05)$	$N(0.4, 0.07)$
(9, 10)	$N(0.9, 0.02)$	0.8	$N(0.9, 0.06)$	$N(0.5, 0.02)$

表2 供应商质量价值水平

QV ₂	QV ₃	QV ₄	QV ₅	QV ₆	QV ₇	QV ₈	QV ₉
0.21	0.33	0.33	0.31	0.17	0.20	0.30	0.30

下面对关键供应商2、6、7进行质量成本优化, 优化前后供应商2、6、7的相关参数如表3所示. 优化后供应商2、6、7的质量价值水平分别提升4.7%、58.82%和30%. 将优化后的数据代入原GERT模型中, 应用Matlab软件计算得到, $P_{1,10} = 0.8040$, $E(C) = 8.5412$, 研制网络的质量价值水平为0.0941, 较优化前提升31.42%.

表3 关键供应商相关参数

参数	供应商2	供应商6	供应商7
k_1	-1	-1	-1
k_2	0.5	0.4	0.5
a_1	3	2.2	2.5
a_2	0.7	0.5	0.6
b_1	0.95	0.8	0.9
b_2	0.1	0.16	0.05
A_L	2.3	1.7	1.9
A_q	1.7	1.6	1.7
A_S	1.6	1.1	1.3
A_S^*	1.7	1.6	1.7
QV _S	0.21	0.17	0.20
QV _{S}^*}	0.22	0.27	0.26

5 结论

在“主制造商-供应商”模式下, 供应链质量成本优化是复杂产品质量管控的重要手段. 目前普遍应用的针对企业内部的质量成本优化方法, 并没有考虑复杂产品的质量价值, 对复杂产品供应链质量成本优化问题并不完全适用. 针对这一问题, 本文首先综合研制成本和质量水平提出了复杂产品质量价值的

概念, 以供应商网络为基础, 分析复杂产品质量价值的形成机理, 构建复杂产品质量价值GERT网络模型, 考虑供应商的质量价值水平, 提出了复杂产品供应链质量成本优化方法, 为复杂产品供应链质量成本优化问题提供了一个新的解决思路和研究方法. 通过模型及算例分析可以发现, 从供应链层面考虑复杂产品的质量成本优化问题是十分必要的, 主制造商应定期对各级供应商的产品及产品质量成本结构进行详细分析, 考虑质量价值水平, 识别质量价值薄弱的关键供应商, 有针对性地进行质量成本的优化, 可以有效地提高质量管理效率; 同时降低供应链中不可修产品的使用, 引导供应商通过技术改进提高供应链产品的可维修性, 在满足客户质量需求的前提下, 节约研制成本, 提升供应商网络的质量价值水平. 后续研究可以尝试针对多种质量成本函数关系在优化模型的求解方法上做进一步拓展, 并将该方法应用于实际问题的分析中.

参考文献(References)

- [1] Jin S, Zheng C, Yu K G, et al. Tolerance design optimization on cost quality trade off using the Shapley value method[J]. J of Manufacturing Systems, 2010, 29(4): 142-150.
- [2] 陈占夺. 复杂产品系统特性对风险后果影响的案例研究[J]. 管理学报, 2015, 12(9): 1263-1272. (Chen Z D. Case studies on the impact of complex product system characteristics on risk consequences[J]. Journal of Management, 2015, 12(9): 1263-1272.)
- [3] 陈洪转, 方志耕, 刘思峰, 等. 复杂产品主制造商-供应商协同合作最优成本分担激励研究[J]. 中国管理科学, 2014, 22(9): 98-105. (Chen H Z, Fang Z G, Liu S F, et al. Research on the optimal cost-sharing incentive of collaborative cooperation between the main manufacturer and supplier of complex products[J]. Chinese Journal of Management Science, 2014, 22(9): 98-105.)
- [4] 徐兰, 方志耕, 刘思峰. 基于设计结构矩阵的复杂产品供应链管理优化[J]. 运筹与管理, 2013, 22(1): 106-111. (Xu L, Fang Z G, Liu S F. Complex product supply chain management optimization based on design structure matrix[J]. Operations Research and Management Science, 2013, 22(1): 106-111.)
- [5] 张令荣, 张兴隆, 招干. 需求不确定下基于Supply-hub的协同补货决策[J]. 系统工程, 2016, 34(10): 98-107. (Zhang L R, Zhang X L, Zhao G. Collaborative replenishment decision based on Supply-hub under uncertain demand[J]. Systems Engineering, 2016, 34(10): 98-107.)
- [6] Castillo-Villar K K, Smith N R, Simonton J L. A model for supply chain design considering the cost

- of quality[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36(12): 5920-5935.
- [7] Thun J H, Hoenig D. An empirical analysis of supply chain risk management in the German automotive industry[J]. *International Journal of Production Economics*, 2011, 131(1S1): 242-249.
- [8] Franca R B, Jones E C, Richards C N, et al. Multi-objective stochastic supply chain modeling to evaluate tradeoffs between profit and quality[J]. *International Journal of Production Economics*, 2010, 127(2S1): 292-299.
- [9] Hsieh C C, Liu Y T. Quality investment and inspection policy in a supplier-manufacturer supply chain[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 202(3): 717-729.
- [10] Zeng J, Phan C A, Matsui Y. Supply chain quality management practices and performance: An empirical study[J]. *Operation Management Research*, 2013, 6(1/2): 19-31.
- [11] Vanichchinda A, Igel B. The impact of total quality management on supply chain management and firm's supply performance[J]. *International Journal of Production Research*, 2011, 49(11): 3405-3424.
- [12] 王道平, 赵超, 程延平. 考虑质量控制和损失规避的供应链协调研究[J]. *控制与决策*, 2018, 33(12): 2295-2304.
(Wang D P, Zhao C, Cheng Y P. Research on supply chain coordination considering quality control and loss avoidance[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(12): 2295-2304.)
- [13] 刘远, Hiple Keith W, 方志耕, 等. 复杂产品供应链质量控制方案递阶决策模型[J]. *控制与决策*, 2012, 27(11): 1685-1693.
(Liu Y, Hiple Keith W, Fang Z G, et al. Hierarchical decision model for quality control schemes in complex product supply chain[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(11): 1685-1693.)
- [14] Khataie A H, Bulgak A A. A cost of quality decision support model for lean manufacturing: Activity-based costing application[J]. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 2013, 30(7): 751-764.
- [15] Naidu N V R. Mathematical model for quality cost optimization[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2008, 24(6): 811-815.
- [16] 尚珊珊, 尤建新. 基于模糊神经网络的质量成本控制模型[J]. *软科学*, 2009, 23(12): 39-44.
(Shang S S, You J X. Quality cost control model based on fuzzy neural network[J]. *Soft Science*, 2009, 23(12): 39-44.)
- [17] 王元明, 赵道致, 黄健. 基于风险传递的供应链质量成本控制模型研究[J]. *科技管理研究*, 2009, 29(3): 155-157.
(Wang Y M, Zhao D Z, Huang J. Quality cost control model of supply chain based on risk transfer [J]. *Research on Science and Technology Management*, 2009, 29(3): 155-157.)
- [18] 张煜, 汪寿阳. 基于批发价格契约的质量成本审查模型分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(8): 1481-1488.
(Zhang Y, Wang S Y. Analysis of quality cost review model based on wholesale price contract[J]. *System Engineering—Theory & Practice*, 2011, 31(8): 1481-1488.)
- [19] 潘燕华, 肖静. 基于顾客满意的质量成本模型[J]. *系统工程*, 2015, 33(1): 74-80.
(Pan Y H, Xiao J. Based on the quality cost model of customer satisfaction[J]. *Systems Engineering*, 2015, 33(1): 74-80.)
- [20] 黄春平, 侯光明. 载人航天运载火箭系统研制管理[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 160-196.
(Huang C P, Hou G M. Manned space launch vehicle system development and management[M]. Beijing: Science Press, 2007: 160-196.)
- [21] 皮圣雷. 质量价值流及其应用研究[J]. *技术经济*, 2010, 29(8): 122-130.
(Pi S L. Quality value flow and its application[J]. *Technology Economics*, 2010, 29(8): 122-130.)
- [22] 刘远, 方志耕, 刘思峰, 等. 基于供应商图示评审网络的复杂产品关键质量源诊断与探测问题研究[J]. *管理工程学报*, 2011, 25(2): 212-219.
(Liu Y, Fang Z G, Liu S F, et al. Study on the problem of complex product key quality diagnosis and detection based on supplier GERT model[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2011, 25(2): 212-219.)
- [23] 白宝光. 质量成本决策理论与质量成本管理应用研究[D]. 天津: 天津大学管理学院, 2007: 16-17.
(Bai B G. Study on cost decision theory and application of quality management of quality cost[D]. Tianjin: School of Management, Tianjin University, 2007: 16-17.)
- [24] 方志耕. 质量管理[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 161-165.
(Fang Z G. Quality management[M]. Beijing: Science Press, 2017: 161-165.)

作者简介

王欢(1990—), 女, 博士生, 从事质量管理、供应链管理的研究, E-mail: huan_wang@nuaa.edu.cn;

方志耕(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事质量管理、工业工程等研究, E-mail: zhigengfang@163.com;

邓飞(1991—), 男, 博士生, 从事成本估算、灰色系统的研究, E-mail: 406120049@qq.com;

陶良彦(1988—), 男, 讲师, 博士, 从事复杂装备研制等研究, E-mail: lytao610@foxmail.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)