

文章编号: 1001-0920(2012)11-1685-09

复杂产品供应链质量控制方案递阶决策模型

刘 远^{1,2}, Hiple Keith W², 方志耕¹, 袁文峰³

(1. 南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 210016; 2. 滑铁卢大学 系统设计工程学院, 加拿大 大安大略 滑铁卢 N2L 3G1; 3. 中国商用飞机有限责任公司 项目管理部, 上海 200120)

摘要: 提出一类供应链质量控制方案递阶决策模型, 辅助复杂产品主制造商更好地推广和落实质量控制方案, 以实现供应链整体质量的最优改善. 首先搭建了一类新型的供应链质量屋分析平台, 并将其表征为多目标规划模型, 确定最优方案组合; 然后, 基于复杂产品供应链多层次结构设计质量屋网络, 以控制资源为纽带构建多级多目标递阶决策模型, 实现了质量控制方案的继承和衔接; 最后, 针对某型号商用飞机供应链开展案例研究, 验证了所提出模型和方法的可行性和有效性.

关键词: 质量控制; 供应链管理; 策略选择; 质量屋

中图分类号: F272.3

文献标志码: A

Networked decision model for managing quality in supply chain of complex product

LIU Yuan^{1,2}, Hiple Keith W², FANG Zhi-geng¹, YUAN Wen-feng³

(1. College of Economic and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Department of Systems Design Engineering, University of Waterloo, Waterloo N2L 3G1, Canada; 3. Program Management Department, Commercial Aircraft Corporation of China, Shanghai 200120, China. Correspondent: LIU Yuan, E-mail: xyliu1985@126.com)

Abstract: According to the supply chain of a complex product, a multilevel model is developed for a main manufacture to control the outsourcing quality from its suppliers. A new platform is proposed to collect quality data existing in the supply chain, which can be presented into a multi-objective program. Additionally, a network, which is composed of different platforms by connecting with resources, is designed to help the suppliers to manage their outsourcing quality. Finally, an aircraft supply chain is selected to show the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: quality control; supply chain management; strategy selection; house of quality

1 引言

复杂产品是指一类结构复杂、工程技术含量高、集成度高的大型产品或系统, 如飞机、大型舰只和航天器等^[1]. 为了提高生产效率和实现专业化生产, 复杂产品主要采用“主制造商-供应商”的生产模式, 以主制造商为核心的战略企业联盟进行协同制造^[2-3]. 复杂产品质量竞争力取决于其供应链的整体质量水平^[4]. 复杂产品间的质量竞争不再局限于主制造商之间, 已拓展为彼此供应链整体质量之间的较量. 复杂产品主制造商为了维护其市场份额, 在激烈的质量竞争中占据领先地位, 会定期向质量控制团队征集质量

控制方案, 并从中确定优先实施的方案组合, 在资源约束下实现复杂产品供应链整体质量的最优改善.

然而, 复杂产品质量控制方案的优选决策是一类多主体、多目标、多交互的复杂决策问题. 一方面, 供应商数目众多, 其产品流向错综复杂且对最终产品质量贡献度不尽相同. 另一方面, 备选的质量控制方案种类繁多, 彼此之间既存在着广泛联系, 又包含着资源需求冲突. 因此, 主制造商需要从供应链的角度, 在一系列约束下确定质量控制方案的最优组合, 并为其合理分配质量控制资源(人力资源、物力资源、财力资源等), 以确保获批的方案能够顺利开展并达到预

收稿日期: 2011-07-01; 修回日期: 2011-10-24.

基金项目: 江苏省研究生培养创新工程项目(CX10B_044R); 南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金项目(BCXJ10-14).

作者简介: 刘远(1985—), 男, 博士生, 从事供应链管理、质量管理的研究; 方志耕(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事工业工程、系统工程等研究.

期效果。此外,复杂产品的各级供应商在推行和细化主制造商的质量控制方案过程中,同样需要在细化方案中优选子方案组合。如果将供应链中企业主体看作一个独立的决策系统,则供应链质量方案优选决策工作可以视为一类由许多决策系统组成的决策系统^[5-8],体现了递阶决策的重要思想。

从近年来国际高水平文献不难发现,很多学者和质量管理工作者在该领域开展了一系列相关研究,成果颇丰。这些研究大致集中在以下3个方面:

1) 复杂产品质量管理。随着复杂产品的增多及其日益广泛的应用,更多的研究集中在复杂产品质量管理领域。Tianfield^[9]提出了一类全寿命周期的复杂产品质量改善模型,分析了质量改善投资的必要性。Yu等^[2]应用web技术设计了一套联合分布式复杂产品总体质量设计方案。Xie等^[10]设计了一种基于改进流程树的生产规划算法,能够很好地保障复杂产品的总装质量。Zaretzky^[11]分析了复杂产品质量管理体系,并阐述了其中关键质量控制措施。此外,Ethiraj^[12],Wang^[13]以及Hardstone^[14]在本领域均做出了各自的贡献。

2) 供应链质量管理。主要指供应链管理和质量管理的结合与交叉,以供应链的视角分析并解决其中的质量控制问题。Foster^[15]阐述了供应链质量管理的基本概念,并强调其广泛的应用价值。Tapiero^[16]提出一种供应链质量控制战略合作方法,并为合作型供应链设计了一套质量抽检方案。Hsieh等^[17]将供应链中商业联系描述为一类非合作博弈模型,根据信息完整程度分析了制造商的质量投资和检验策略。Zhu^[18]研究了不同主体的经营决策对质量改善的作用关系。Bae^[19]和Ei^[20]也从不同角度阐述了各自对供应链质量管理的理解和看法。

3) 质量控制方案及应用。在国际市场的激烈竞争中,越来越多的企业意识到了质量管理工作的重要性,积极寻求各种质量控制方案以提升其产品的质量竞争力。Vassilakis等^[21]在某航空发动机组装工序中拓展了TQM(total quality management)的范畴,综合应用多种质量控制方法,搜集重要的生产信息并鉴别质量隐患。Sandanyake等^[22]结合计算机仿真和线性模型研究了JIT(just in time)策略对产品质量的影响,并结合某汽车零部件生产系统开展实证研究。Li等^[23]分析了DMAIC(define-measure-analyze-improve-control)方法在木材加工企业中的质量改善效果,认为该方法可以有效降低生产成本,提升客户满意度。Shu等^[24]讨论了CSC(cause-selecting chart)的应用背景,并结合某多阶段生产流程验证其质量改善效果。

纵观国内外相关文献不难看出,关于质量控制方案优选问题的研究主要局限于企业内部,没有上升到供应链层面并考虑企业之间的递阶决策问题。在复杂产品供应链内部,由于各级供应商和候选方案数目繁多,再加上方案彼此之间存在着复杂的作用关系,主制造商很难在资源约束下确定优先推行的方案组合,实现供应链整体质量的最优改善。尤其是,各级供应商在实施主制造商的质量控制方案时,仍需要优选细化后的子方案组合,以提升自身外购件质量水平。根据文献检索的结果,目前涉及供应链质量控制方案递阶决策的研究尚属理论空白,无法起到指导实践的作用,使主制造商的质量控制方案无法很好地落实到各级供应商,并难以通过合理分配质量控制资源,实现供应链整体质量最优改善。根据牛鞭效应,如果供应链前端质量控制不力,则最终产品的整体质量将受到极大的冲击。主制造商将在激烈的市场竞争中会无谓增加许多质量运作成本,使质量控制效果大打折扣。

针对上述问题,本文提出了一套复杂产品供应链质量控制方案递阶决策模型,辅助主制造商更好地在供应链中推广和落实质量控制方案,实现供应链整体质量的最优改善,为复杂产品供应链质量控制问题提供一种新的研究思路和解决方法。

2 供应链质量控制屋分析平台设计

供应链质量控制工作需要掌握多维度决策信息,如外购产品类别及其质量改善计划,质量控制方案及其相互作用关系,质量控制资源预算等。科学地分析相关重要信息及其内在关系是供应链质量方案决策的前提和基础。因此,本文结合质量展开原理,设计一种新的理论分析平台——供应链质量控制屋(HSCQ),用于辅助决策者搜集相关类别的质量决策信息,并为供应链质量控制提供强有力的决策信息支持,如图1所示。不难看出,HSCQ包含6大基本模块:屋顶、天花板、左墙、房间、右墙和地下室。各模块可以辅助决策者搜集相关的决策信息,具体分析如下。

1) 左墙模块:外购系统信息(OSI)。左墙用于描述外购系统的相关信息,主要包括系统名称、系统间质量关系及其质量权重。值得注意的是,系统间质量关系可以采用一系列图形符号来表示,并赋值量化^[25]。

2) 天花板模块:供应链质量控制方案(SCQCS)。天花板陈列着可供选择的供应链控制方案,通常是由质量控制小组提出的质量改善项目。根据供应链中企业实际情况,各方案可从不同角度细化为诸多子方案。

3) 屋顶模块:质量控制方案关联矩阵(CSCM)。由于某方案的实施过程可能会对其他方案产生促进或抑制影响,屋顶用于描述方案间的关联关系,可以采用图形化符号表示并赋予数值量化。

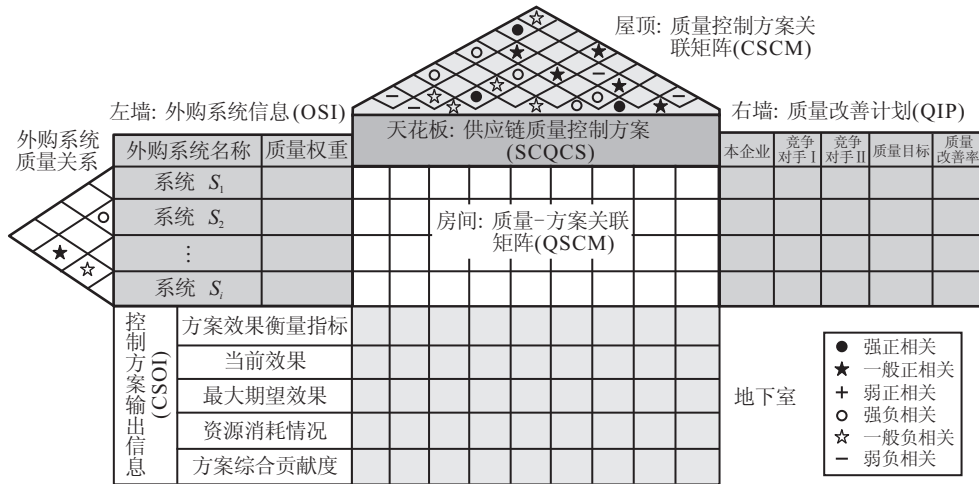


图 1 供应链质量控制屋模型示意图

4) 右墙模块: 质量改善计划(QIP). 右墙主要表示通过与竞争对手在外购系统质量上的类比分析, 制定的一系列质量改善计划. 根据外购系统质量现状和改善目标, 可以求得各系统的质量计划改善率.

5) 房间模块: 质量-方案关联矩阵(QSCM). 根据质量改善项目的效果预测, 可以大致确定质量控制方案对各外购系统质量的改善效果. 房间模块可以将系统质量改善目标转化为方案实施效果改善计划.

6) 地下室模块: 控制方案输出信息(CSOI). 地下室主要用于描述各质量控制方案的当前效果、最大期望效果和资源需求等信息, 为实现“质量改善-方案实施效果”的转化提供信息和数据支持.

3 基于 HSCQ 信息的多目标规划模型设计

根据各模块中相关信息, HSCQ 平台可以表征为一类多目标规划模型, 辅助决策者确定优先实施的质量控制方案组合, 实现供应链质量改善目标.

3.1 质量控制方案的独立改善率和综合改善率

假设左墙列有 m 个外购系统, $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$, 其质量权重为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$. 根据右墙的类比分析, 企业设计的外购系统质量计划改善率为 $H = (h_1, h_2, \dots, h_m)$. 天花板内列出了 n 项备选的质量控制方案, $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, 其当前效果和预计效果分别为 $\underline{E} = (\underline{e}_1, \underline{e}_2, \dots, \underline{e}_n)^T$ 和 $\tilde{E} = (\tilde{e}_1, \tilde{e}_2, \dots, \tilde{e}_n)^T$.

定义 1 质量控制方案 C 的独立改善率 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 是指单独推行某项方案所带来的独立改善效果; 综合改善率 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ 是指全面考虑方案之间关联关系下, 方案集 C 的综合改善效果. 因此有

$$X = |\tilde{E} - \underline{E}| / \underline{E}. \quad (1)$$

定理 1 假设屋顶内方案关联 CSCM 为线性矩阵 $A = \{a_{ij}\}_{n \times n}$, 其中 a_{ij} 为方案 c_i 与 c_j 的关联系

数(可通过统计方法或极大熵模型获得), 则质量控制措施独立改善率 X 和综合改善率 Y 满足如下关系:

$$Y = AX. \quad (2)$$

证明 由于 $a_{ij} = a_{ji}$, CSCM 为实对阵矩阵, $A = A^T$. 方案 c_i 的综合改善率可以表示为

$$y_i = 1 \times x_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} x_j = \left(1 + \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij}\right) x_i = \sum_{k=1}^n a_{ik} x_k.$$

用矩阵形式可表达为 $Y = AX$. \square

3.2 产品质量改善效果和方案质量贡献度测算

假设根据房间信息得到质量-方案关联矩阵 QSCM 为 $R = \{r_{ij}\}_{m \times n}$, 其中 r_{ij} 为方案 c_j 的综合改善率 y_j 与系统 S_i 质量改善率 α_i 的关联系数; 左墙内系统质量关联矩阵为 $O = \{o_{ij}\}_{m \times m}$, 其中 o_{ij} 为系统 S_i 和 S_j 的质量关联系数, 则考虑系统质量相互影响下的系统质量改善效果 $\Phi = \{\phi_i\}_{m \times 1} = ORY$.

定理 2 产品整体质量改善效果 Δ 与质量控制方案独立改善率 X 之间存在如下关系:

$$\Delta = V^T X, \quad (3)$$

其中 V 为控制方案对产品整体质量的质量贡献度矩阵, $V = AR^T O W^T$.

证明 产品整体质量改善效果 Δ 可以视为各系统质量改善效果的加权之和, 因此有

$$\Delta = W \Phi = W(ORAX) = (WORA)X. \quad (4)$$

由于 A 和 O 为实对称矩阵, $A = A^T$ 且 $O = O^T$, 则有

$$\Delta = [(RA)^T (WO)^T]^T X = (A^T R^T O^T W^T)^T X = (AR^T O W^T)^T X. \quad (5)$$

对比式 (3) 和 (5) 可以发现, 控制方案的质量贡献度矩阵 $V = AR^T O W^T$, 产品整体质量改善效果 $\Delta = V^T X$. \square

3.3 基于 HSCQ 的多目标规划模型

供应链质量管理工作往往存在多个优化目标, 主要体现在以下 3 个方面:

1) 产品整体质量改善目标.

制造商通过实施质量控制方案以期获得令人满意的产品整体质量改善效果, 该效果需要完成右墙设计的整体质量改善计划, 因此产品整体质量改善目标可以表示为

$$\Delta = (AR^TOW^T)^T X \geqslant WH. \quad (6)$$

2) 系统质量改善目标.

制造商寻求的不仅是完成整体质量改善计划, 而且希望能够完成各外购系统的质量计划, 因此系统质量改善目标可以表示为

$$R(AX) \geqslant H. \quad (7)$$

3) 资源消耗目标.

在方案实施过程中, 企业希望投入的质量控制资源能够控制在资源预算之内. 假设存在 k 类质量控制资源, 其预算为 $B = (b_1, b_2, \dots, b_k)^T$, 资源重要度权重为 $\Gamma = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k)$. 另设通过地下室信息得到方案资源消耗矩阵为 $G = \{g_{ij}\}_{k \times n}$, 则资源消耗目标可以表示为

$$GX \leqslant B. \quad (8)$$

由于各种主客观原因, 方案实施效果往往存在极限. 假设方案的最大期望效果为 $\hat{E} = (\hat{e}_1, \hat{e}_2, \dots, \hat{e}_n)^T$, 则方案改善率约束可表示为

$$0 \leqslant X \leqslant |\hat{E} - E|/E. \quad (9)$$

基于上述分析, 假设 $P_{\text{obj}(i)}$ 为目标 i 的执行优先级, HSCQ 可以转化为一类多目标决策模型, 即

$$\begin{aligned} \min Z &= P_{\text{obj}(1)}d_1^- + P_{\text{obj}(2)}WD_2^- + P_{\text{obj}(3)}\Gamma D_3^+; \\ \text{s.t.} &\begin{cases} (AR^TOW^T)^T X + d_1^- - d_1^+ = WH, \\ R(AX) + D_2^- - D_2^+ = H, \\ GX + D_3^- - D_3^+ = B, \\ 0 \leqslant X \leqslant |\hat{E} - E|/E, \\ d_1^-, d_1^+, D_2^-, D_2^+, D_3^-, D_3^+ \geqslant 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

其中: $D_2^* = (d_{2,1}^*, d_{2,2}^*, \dots, d_{2,m}^*)^T$, $D_3^* = (d_{3,1}^*, d_{3,2}^*, \dots, d_{3,k}^*)^T$; d_1^+ 和 d_1^- 分别为目标实现的正、负偏差. 根据经典的多目标算法, 可以得到各质量控制方案的最优独立改善率 $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)^T$, 从而获得最优的供应链质量控制效果. 如果 $x_i^* \neq 0, i \in \{1, 2, \dots, n\}$, 则表示方案 i 被批准优先执行. 此外, 制造商需要为方案 c_i 分配资源 $T_i^* = \{x_i^*g_{\bullet i}\}$, 以确保方案能够顺利开展并获得期望效果.

4 复杂产品 HSCQ 网络递阶规划决策模型

4.1 复杂产品 HSCQ 网络

根据供应链中产品流向, 复杂产品生产系统中供应商隶属于不同等级, 构成一个多层级的供应商体系. 复杂产品供应商主要包括: 系统供应商 (1 级供应商, 直接给主制造商提供系统模块), 子系统供应商 (2 级供应商, 为系统供应商提供子系统部件) 和零部件供应商 (3 级供应商, 为子系统供应商提供零部件). 在复杂产品供应链中, 各级供应商均可以构建 HSCQ 平台以控制各自外购产品的质量. 更为重要的是, 根据各级供应商的实际情况, 主制造商设计的质量控制方案在推广过程中可以得到进一步的细化和落实.

基于上述思想, 构建复杂产品 HSCQ 网络模型如图 2 所示, 其中包含着复杂产品级 HSCQ, 系统级 HSCQ 和子系统级 HSCQ.

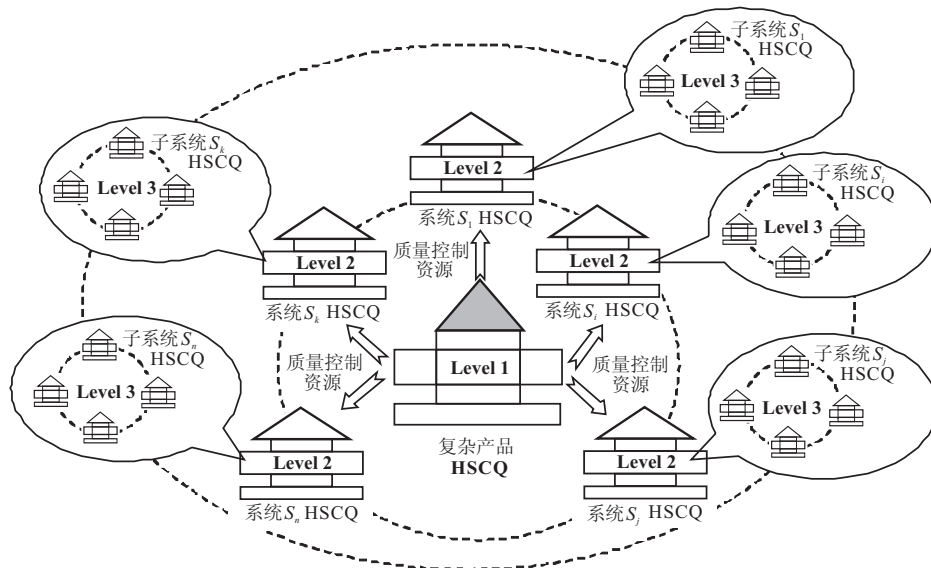


图 2 复杂产品 HSCQ 网络模型示意图

在复杂产品 HSCQ 网络模型中, 质量控制资源是联系各级 HSCQ 的纽带. 由于各 HSCQ 可以看成是一个独立的决策系统, 复杂产品 HSCQ 网络则是一类包含着众多决策系统的决策系统. 一方面, 高等级 HSCQ 控制低等级 HSCQ, 为其规划质量控制总方针并提供质量控制资源; 另一方面, 低等级 HSCQ 是高等级 HSCQ 的具体和细化, 体现着质量控制方案的衔接和继承.

4.2 复杂产品多级多目标规划决策模型

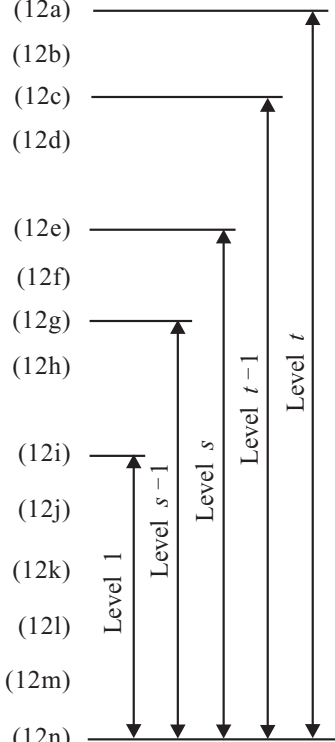
根据复杂产品 HSCQ 网络结构, 可以将其转化为一类多级多目标递阶决策模型. 假设网络共有 t 级 HSCQ, 第 $i(i \in \{1, 2, \dots, t\})$ 级某 HSCQ 的天花板含有 n^i 项备选的质量控制方案 $C^i = \{c_1^i, c_2^i, \dots, c_{n^i}^i\}$, 其独立改善率为 $X^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_{n^i}^i)^T$, 当前效果为 $\underline{E}^i = (e_1^i, e_2^i, \dots, e_{n^i}^i)^T$, 最大期望效果为 $\widehat{E}^i = (\widehat{e}_1^i, \widehat{e}_2^i, \dots, \widehat{e}_{n^i}^i)^T$; 左墙列出 m^i 种外购产品 $\{S_1^i, S_2^i, \dots, S_{m^i}^i\}$, 其质量管理矩阵为 O^i , 质量权重为 $W^i = (w_1^i, w_2^i, \dots, w_{m^i}^i)$; 屋顶的 CSCM 为 A^i , 房间的 QSCM 为 R^i ; 右墙内外购产品的质量计划改善率为 H^i ; 地下室中列有 k 类质量控制资源, 而资源预算、资源权重和方案的资源消耗矩阵分别为 B^i, Γ^i 和 G^i . 此外, 目标 j 的实现优先级为 $P_{\text{obj}(j)}^i$, 正、负偏差分别为 $(d_j^i)^{+(-)}$.

或 $(D_j^i)^{+(-)}$.

为了将高层级 HSCQ 的最优解转化为次层级 HSCQ 的资源约束, 定义 R^i 的列归一化矩阵为 $R^{i'} = \{r_{\alpha\beta}^i\}_{m^i \times n^i}$. 假设第 i 级 HSCQ 的最优解为 $X^{i*} = (x_1^{i*}, x_2^{i*}, \dots, x_{n^i}^{i*})^T$, 方案 c_j^i 的资源分配矩阵 $T_j^{i*} = \{x_j^{i*} g_{\bullet j}^i\}_{k \times n^i}$. 根据产品 S_j^i 在推行方案 c_j^i 中的质量改善贡献度 r_{lj}^i , 产品 S_j^i 的供应商可获得质量控制资源 $B^{i+1} = \{r_{lj}^i x_j^{i*} g_{\bullet j}^i\}_{k \times 1}$. 第 s 级 HSCQ ($s \in \{2, 3, \dots, t\}$) 的多目标规划模型可表示为

$$\begin{aligned} \min Z^s &= P_{\text{obj}(1)}^s (d_1^s)^- + P_{\text{obj}(2)}^s W^i (D_2^s)^- + \\ &P_{\text{obj}(3)}^s \Gamma^s (D_3^s)^+; \\ \text{s.t.} &\begin{cases} (A^s (R^s)^T O^s (W^s)^T)^T X^s + \\ (d_1^s)^- - (d_1^s)^+ = W^s H^s, \\ R^s (A^s X^s) + (D_2^s)^- - (D_2^s)^+ = H^s, \\ G^s X^s + (D_3^s)^- - (D_3^s)^+ = B^s, \\ 0 \leq X^s \leq |\widehat{E}^s - \underline{E}^s| / \underline{E}^s, \\ B^s = \{r_{lj}^{s-1} x_j^{s-1*} g_{\bullet j}^{s-1}\}_{k \times 1}, \\ (d_1^s)^-, (d_1^s)^+, (D_2^s)^-, (D_2^s)^+, (D_3^s)^-, (D_3^s)^+ \geq 0. \end{cases} \end{aligned} \tag{11}$$

将规划 (11) 中的约束条件定义为 con^s , 根据复杂产品 HSCQ 网络结构, 可以得到一类多级多目标递阶决策模型如下:

$$\begin{aligned} \min Z^t &= P_{\text{obj}(1)}^t (d_1^t)^- + P_{\text{obj}(2)}^t W^t (D_2^t)^- + P_{\text{obj}(3)}^t \Gamma^t (D_3^t)^+ & (12a) \\ \text{con}^t & & (12b) \\ \min Z^{t-1} & & (12c) \\ &\vdots & (12d) \\ \min Z^s &= P_{\text{obj}(1)}^s (d_1^s)^- + P_{\text{obj}(2)}^s W^s (D_2^s)^- + P_{\text{obj}(3)}^s \Gamma^s (D_3^s)^+ & (12e) \\ &\text{con}^s & (12f) \\ \min Z^{s-1} & & (12g) \\ &\vdots & (12h) \\ \min Z^1 &= P_{\text{obj}(1)}^1 (d_1^1)^- + P_{\text{obj}(2)}^1 W^1 (D_2^1)^- + P_{\text{obj}(3)}^1 \Gamma^1 (D_3^1)^+ & (12i) \\ \text{s.t.} &\begin{cases} (A^1 (R^1)^T O^1 (W^1)^T)^T X^1 + (d_1^1)^- - (d_1^1)^+ = W^1 H^1 & (12j) \\ R^1 (A^1 X^1) - (D_2^1)^- - (D_2^1)^+ = H^1 & (12k) \\ G^1 X^1 + (D_3^1)^- - (D_3^1)^+ = B^1 & (12l) \\ 0 \leq X^1 \leq |\widehat{E}^1 - \underline{E}^1| / \underline{E}^1 & (12m) \\ (d_1^1)^-, (d_1^1)^+, (D_2^1)^-, (D_2^1)^+, (D_3^1)^-, (D_3^1)^+ \geq 0 & (12n) \end{cases} \end{aligned}$$


其中: 式 (12i) ~ (12n) 构成第 1 级多目标决策模型, 帮助主制造商制定系统级质量控制方案的最优组合. 将第 1 级最优解 X^{1*} 转化为第 2 级模型的资源约束, 可

得第 2 级最优解和子系统质量控制最优方案组合. 以此类推, 各级最优解能够辅助供应链中各级企业优选各自的质量控制最优方案组合并制定资源最优分

配策略,进而有效地推行了主制造商制定的供应链质量控制方案,保障了质量控制方案在供应链中的传递性和继承性。

4.3 递阶求解算法设计

定理 3 假设复杂产品 HSCQ 网络共有 t 级,第 i 级 ($i \in \{1, 2, \dots, t\}$) 规划可行域为 ζ_i 且 $\forall i, \exists \zeta_i$ 有界,则规划模型 (12) 必有最优解。

证明 假设第 i 级规划的目标方程和可行解分别为 Z^i 和 X^i 。利用数学归纳法可得:

1) 当 $i = 1$ 时, ζ_1 有界。根据目标规划理论^[26],第 1 级规划必然能在其可行域边界处取到最优解 X^{1*} 。

2) 假设第 i 级规划 ($i \in \{1, 2, \dots, t-1\}$) 能在其可行域 ζ_i 上取到最优解 X^{i*} , 则根据转化规则, 可得第 $i+1$ 级规划的资源约束为

$$G^{i+1}X^{i+1} \leq \{r_{ij}^i x_j^{i*} g_{\bullet j}^i\}_{k \times 1}.$$

3) 由于可行域存在且有界,第 $i+1$ 级规划在边界处肯定能够取到其最优解 $X^{(i+1)*}$ 。

由上可知,模型 (12) 必有最优解。□

根据上述由高层级到低层级逐级迭代的思想设计递阶求解算法。为了更好地进行计算机仿真运算,编制算法流程如图 3 所示。

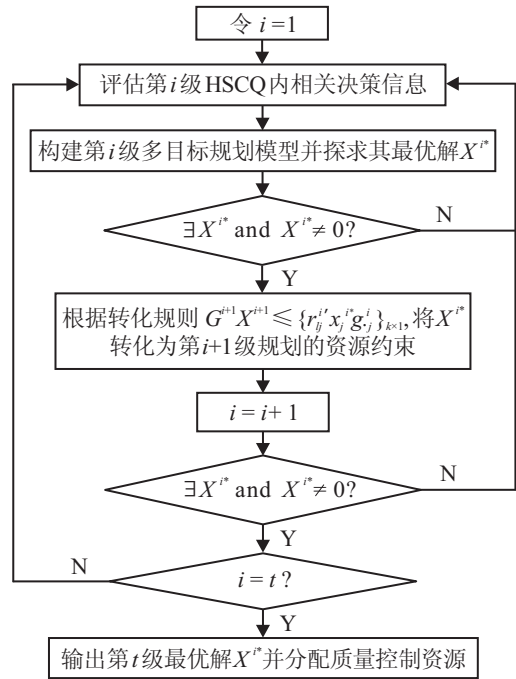


图 3 递阶求解算法流程

5 案例研究

选取某型号商用飞机供应链系统质量控制方案递阶决策问题开展案例研究。该商用飞机的外购部件有 5 大系统, 其下设 20 种子系统, 如图 4 所示。

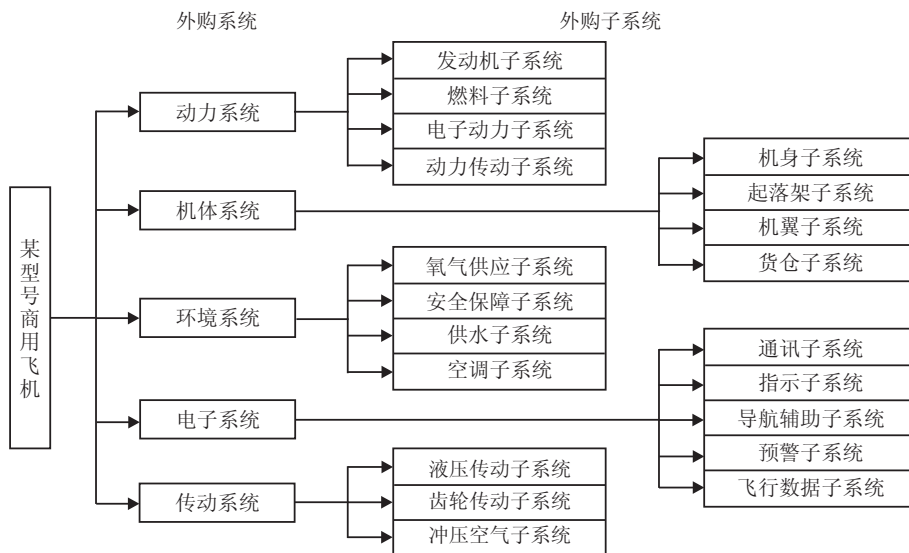


图 4 某型号商用飞机外购产品构成示意图

通过多轮评选,共有 6 项供应链级质量控制方案 $C^1 = \{c_1^1, c_2^1, \dots, c_6^1\}$ 进入终选阶段。考虑到动力系统供应商的实际情况,方案在执行过程中可细化为以下 5 种子方案: $c_{1,1}^1, c_{1,2}^1, c_{1,3}^1, c_{1,4}^1$ 和 $c_{1,5}^1$ 。根据方案申请书和专家判断结果,上述方案和子方案的最大改善效果及资源需求情况如表 1 所示。用于质量改善的人力资源总量为 40 标准当量人,财力资源为 2.5 万美元。

表 1 质量控制方案信息

质量控制方案/子方案	c_1^1	c_2^1	c_3^1	c_4^1	c_5^1	c_6^1
最大改善效果/%	8.4	5.2	7.6	10.2	4.5	5.1
需求人力资源	0.8	2.0	1.0	1.2	0.7	0.8
需求财力资源	2.2	3.5	4.2	1.7	3.8	2.4
质量控制方案/子方案	$c_{1,1}^1$	$c_{1,2}^1$	$c_{1,3}^1$	$c_{1,4}^1$	$c_{1,5}^1$	
最大改善效果/%	5.2	10.0	6.4	3.2	9.4	
需求人力资源	0.9	0.6	0.4	0.4	0.5	
需求财力资源	2.0	1.3	1.2	1.0	1.7	

根据图 1 分别为主制造商和动力系统供应商设计 1 级复杂产品 HSCQ 和 2 级动力系统 HSCQ, 并以质量控制资源为纽带建立联系. 根据规划模型 (12) 构建递阶多目标规划模型为

$$\begin{aligned}
 \min Z_1^2 &= P_{\text{obj}(1)}^2 (d_1^2)^- + P_{\text{obj}(2)}^2 (0.4, 0.3, 0.15, 0.15) ((d_{2,1}^2)^-, (d_{2,2}^2)^-, (d_{2,3}^2)^-, (d_{2,4}^2)^-)^T + P_{\text{obj}(3)}^2 (1, 1) ((d_{3,1}^2)^+, (d_{3,2}^2)^+)^T. \\
 \text{s.t. } & \left\{ \begin{aligned} & \left[\begin{array}{ccccc} 0.9 & 0.1 & 0.3 & 0 & 0.5 \\ 0.1 & 0.9 & 0.1 & -0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.1 & 0.9 & 0 & 0.1 \\ 0 & -0.1 & 0 & 0.9 & 0 \\ 0.5 & 0 & 0.1 & 0 & 0.9 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccccc} 0.7 & 0.5 & 0.7 & 0.1 & 0.1 \\ 0.3 & 0.1 & 0 & 0.3 & 0.1 \\ 0.3 & 0.5 & 0 & 0.3 & 0.5 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \end{array} \right]^T \left[\begin{array}{cccc} 0.9 & 0.3 & 0 & 0.1 \\ 0.3 & 0.9 & 0 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.9 & 0.3 \\ 0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.9 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} 0.4 \\ 0.3 \\ 0.15 \\ 0.15 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} x_{1,1}^2 \\ x_{1,2}^2 \\ x_{1,3}^2 \\ x_{1,4}^2 \\ x_{1,5}^2 \end{array} \right]^T + (d_1^2)^- - (d_1^2)^+ = \\ & (0.4, 0.3, 0.15, 0.15)(2\%, 3\%, 4\%, 2\%)^T, \\ & \left[\begin{array}{ccccc} 0.7 & 0.5 & 0.7 & 0.1 & 0.1 \\ 0.3 & 0.1 & 0 & 0.3 & 0.1 \\ 0.3 & 0.5 & 0 & 0.3 & 0.5 \\ 0 & -0.1 & 0 & 0.9 & 0 \\ 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} x_{1,1}^2 \\ x_{1,2}^2 \\ x_{1,3}^2 \\ x_{1,4}^2 \\ x_{1,5}^2 \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} (d_{2,1}^2)^- \\ (d_{2,2}^2)^- \\ (d_{2,3}^2)^- \\ (d_{2,4}^2)^- \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} (d_{2,1}^2)^+ \\ (d_{2,2}^2)^+ \\ (d_{2,3}^2)^+ \\ (d_{2,4}^2)^+ \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} 2\% \\ 3\% \\ 4\% \\ 2\% \end{array} \right], \\ & \left[\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right] \leq \left[\begin{array}{c} x_{1,1}^2 \\ x_{1,2}^2 \\ x_{1,3}^2 \\ x_{1,4}^2 \\ x_{1,5}^2 \end{array} \right] \leq \left[\begin{array}{c} 5.2\% \\ 10.0\% \\ 6.4\% \\ 3.2\% \\ 9.4\% \end{array} \right], \\ & \left[\begin{array}{ccccc} 0.9 & 0.6 & 0.4 & 0.4 & 0.5 \\ 2.0 & 1.3 & 1.2 & 1.0 & 1.7 \end{array} \right] (x_{1,1}^2, x_{1,2}^2, x_{1,3}^2, x_{1,4}^2, x_{1,5}^2)^T - \left[\begin{array}{c} (d_{3,1}^2)^- \\ (d_{3,2}^2)^- \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} (d_{3,1}^2)^+ \\ (d_{3,2}^2)^+ \end{array} \right] = B^2, \\ & B^2 = r_{11}^1 \{x_1^1, g_{\bullet 1}^1\}. \end{aligned} \right. \\
 \min Z^1 &= P_{\text{obj}(1)}^1 (d_1^1)^- + P_{\text{obj}(2)}^1 (0.4, 0.1, 0.2, 0.1, 0.2) ((d_{2,1}^1)^-, (d_{2,2}^1)^-, (d_{2,3}^1)^-, (d_{2,4}^1)^-, (d_{2,5}^1)^-)^T + \\ & P_{\text{obj}(3)}^1 (1, 1) ((d_{3,1}^1)^+, (d_{3,2}^1)^+)^T. \\
 \text{s.t. } & \left\{ \begin{aligned} & \left[\begin{array}{ccccc} 0.9 & 0.5 & 0.1 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0.5 & 0.9 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0.9 & 0 & 0.3 & 0.1 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0.9 & 0.5 & 0.3 \\ 0.1 & 0 & 0.3 & 0.5 & 0.9 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.9 \end{array} \right] \left[\begin{array}{ccccc} 0.9 & 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.3 & 0.3 \\ 0.3 & 0.3 & 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.1 \\ 0.7 & 0.3 & 0.3 & 0.1 & 0.3 & 0.5 \\ 0.7 & 0.3 & 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.3 \\ 0.7 & 0.3 & 0.3 & 0.5 & 0.3 & 0.3 \end{array} \right]^T \left[\begin{array}{ccccc} 0.9 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0.5 \\ 0 & 0.9 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0.9 & 0.3 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0.3 & 0.9 & 0.1 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} 0.4 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.1 \\ 0.2 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} x_1^1 \\ x_2^1 \\ x_3^1 \\ x_4^1 \\ x_5^1 \\ x_6^1 \end{array} \right]^T + \\ & (d_1^1)^- - (d_1^1)^+ = (0.4, 0.1, 0.2, 0.1, 0.2)(20\%, 8\%, 18\%, 17\%, 15\%)^T, \\ & \left[\begin{array}{ccccc} 0.9 & 0.5 & 0.3 & 0.1 & 0.3 & 0.3 \\ 0.3 & 0.3 & 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.1 \\ 0.7 & 0.3 & 0.3 & 0.1 & 0.3 & 0.5 \\ 0.7 & 0.3 & 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.3 \\ 0.7 & 0.3 & 0.3 & 0.5 & 0.3 & 0.3 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} x_1^1 \\ x_2^1 \\ x_3^1 \\ x_4^1 \\ x_5^1 \\ x_6^1 \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} (d_{2,1}^1)^- \\ (d_{2,2}^1)^- \\ (d_{2,3}^1)^- \\ (d_{2,4}^1)^- \\ (d_{2,5}^1)^- \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} (d_{2,1}^1)^+ \\ (d_{2,2}^1)^+ \\ (d_{2,3}^1)^+ \\ (d_{2,4}^1)^+ \\ (d_{2,5}^1)^+ \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} 20\% \\ 8\% \\ 18\% \\ 17\% \\ 15\% \end{array} \right], \\ & 100 \left[\begin{array}{ccccc} 0.8 & 2.0 & 1.0 & 1.2 & 0.7 & 0.8 \\ 1.5 & 3.5 & 1.3 & 3.2 & 4.3 & 2.4 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} x_1^1 \\ x_2^1 \\ x_3^1 \\ x_4^1 \\ x_5^1 \\ x_6^1 \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} (d_{3,1}^1)^- \\ (d_{3,2}^1)^- \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} (d_{3,1}^1)^+ \\ (d_{3,2}^1)^+ \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} 40 \\ 25 \end{array} \right], \\ & \left[\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right] \leq \left[\begin{array}{c} x_1^1 \\ x_2^1 \\ x_3^1 \\ x_4^1 \\ x_5^1 \\ x_6^1 \end{array} \right] \leq \left[\begin{array}{c} 15.6\% \\ 14.7\% \\ 10.0\% \\ 12.4\% \\ 8.7\% \\ 9.4\% \end{array} \right]. \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

1) 求解第 1 级模型, 可得最优解

$$X^1 = (x_1^1, x_2^1, x_3^1, x_4^1, x_5^1, x_6^1)^T = (15.6\%, 0, 10\%, 0, 0, 4.6\%)^T.$$

这意味着 c_1^1 , c_3^1 和 c_6^1 被选为优先执行的质量控制方案. 如果按照表 2 分配控制资源, 则可以实现复杂产品质量的最优改善效果. 其中: 复杂产品整体质量预

计提升 29.83%; 5 大系统质量分别预计提升 24.20%, 10.66%, 20.66%, 18.90% 和 20.19%.

表 2 质量控制方案资源分配

质量控制方案/子方案	c_1^1	c_2^1	c_3^1	c_4^1	c_5^1	c_6^1
需求人力资源	12.48	0	10	0	0	3.68
需求财力资源	23.40	0	13	0	0	11.04

2) 在推行方案 c_1^1 过程中, 动力系统根据其质量贡献度, 可获得人力资源 7.02 标准当量人和财力资源 1.316 万美元, 以用于改善其子系统质量. 将其代入资源总量约束并求解第 2 级规划, 可得最优解 $X_1^{1*} = (x_{1,1}^{1*}, x_{1,2}^{1*}, x_{1,3}^{1*}, x_{1,4}^{1*}, x_{1,5}^{1*})^T = (5.2\%, 0, 0, 3.2\%, 1.88\%)^T$, 这表明在推行方案 c_1^1 的过程中, 子方案 $c_{1,1}^1$, $c_{1,4}^1$ 和 $c_{1,5}^1$ 应优先执行. 如果按照表 3 分配资源, 则推行方案 c_1^1 能促使动力系统质量提升 14.78%, 其子系统质量能够分别提升 5.98%, 3%, 4.8% 和 3.76%. 值得注意的是, 最优情形下 $(d_{3,2}^2)^{+*} = 0.0364$, 这意味着要完成动力系统质量改善的目标, 仅靠主制造商分配的财力资源是不够的. 动力系统供应商仍需要投入 $100(d_{3,2}^2)^{+*} = 3.64$ 千美元以保障子方案能够顺利实施并实现预期效果.

表 3 动力系统质量控制子方案资源分配

质量控制方案/子方案	$c_{1,1}^1$	$c_{1,2}^1$	$c_{1,3}^1$	$c_{1,4}^1$	$c_{1,5}^1$
需求人力资源	4.68	0	0	1.28	0.94
需求财力资源	10.40	0	0	3.20	3.20

6 结 论

复杂产品供应链质量控制是质量管理领域的核心问题. 由于多对象、多目标及高复杂, 主制造商很难在资源约束下确定优先推行的方案组合, 并制定合理的资源分配计划, 实现供应链整体质量的最优改善. 尤其是, 复杂产品质量控制方案无法在供应链中实现有效的传递和继承, 难以实现供应链质量的最优控制效果.

本文设计了一类新型的 HSCQ 分析平台, 根据复杂产品供应链多层次结构构建 HSCQ 网络, 以质量控制资源传递为纽带构建多级多目标递阶决策模型, 辅助各级供应商优选质量控制子方案, 实现质量控制方案的有效继承和衔接. 本文不仅在理论层面对复杂产品供应链质量控制工作提供了一套崭新的分析思路和研究模式, 而且在实践层面指导主制造商更好地组织、开展和管理质量控制项目.

在本文建模过程中, 需要根据各质量小组的项目建议书来获取较完整的质量数据和相关方案信息. 如何在信息不完全的情况下, 最大限度地挖掘有价值信息是一个亟需解决的关键问题, 这是本文继续深入研究的一个重要方向.

参考文献(References)

- [1] Hobday M, Rush H. Technology management in complex product systems(CoPS): Ten questions answered[J]. Int J of Technology Management, 1999, 17(6): 618-638.
- [2] Yu J Q, Cha J Z, Lu Y P, et al. A CAE-integrated distributed collaborative design system for finite element analysis of complex product based on SOOA[J]. Advanced in Engineering Software, 2010, 41(4): 590-603.
- [3] Acha V, Davies A, Hobday M, et al. Exploring the capital goods economy: Complex product systems in the UK[J]. Industrial and Cooperate Change, 2004, 13(3): 505-529.
- [4] Hsieh Chung-chi, Liu Yu-te. Quality investment and inspection policy in a supplier-manufacturer supply chain[J]. European J of Operational Research, 2010, 202(3): 717-729.
- [5] Chan H K. Supply chain systems-recent trend in research and applications[J]. IEEE Systems J, 2011, 5(1): 2-5.
- [6] Gorod A, Sauser B, Boardman J. System-of-systems engineering management: A review of modern history and a path forward[J]. IEEE Systems J, 2008, 2(4): 484-499.
- [7] Hipel K W, Jamshidi M M, Tien J, et al. The future of systems, man and cybernetics: Application domains and research methods[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, Part C: Application and Reviews, 2007, 37(9): 726-743.
- [8] Jamshidi M M. Systems of systems engineering innovation for the 21st century[M]. New York: Wiley, 2009: 443-481.
- [9] Tianfield H. Advanced life-cycle model for complex product development via stage-aligned information-substitutive concurrency and detour[J]. Int J of Computer Integrated Manufacturing, 2001, 14(3): 281-303.
- [10] Xie Z Q, Hao S Z, Ye G J, et al. A new algorithm for complex product flexible scheduling with constraint between jobs[J]. Computer & Industrial Engineering, 2009, 57(3): 766-772.
- [11] Zaretsky A N. Quality management systems from the perspective of organization of complex systems[J]. Mathematics and Computer Modeling, 2008, 48(7/8): 1170-1177.
- [12] Ethiraj S K. Allocation of inventive effort in complex product systems[J]. Strategy Management J, 2007, 28(6): 563-584.
- [13] Wang H W, Zhang H M. An integrated and collaborative approach for complex product development in distributed heterogeneous environment[J]. Int J of Production Research, 2008, 46(9): 2345-2361.
- [14] Hardstone G A P. Capabilities, structures and strategies re-examined: Incumbent firms and the emergence of complex product systems(CoPS) in mature industries[J].

- Technology Analysis & Strategic Management, 2004, 16(2): 173-196.
- [15] Foster S T. Towards an understanding of supply chain quality management[J]. J of Operations Management, 2008, 26(4): 461-467.
- [16] Tapiero C S. Consumers risk and quality control in a collaborative supply chain[J]. European J of Operational Research, 2007, 182(2): 683-694.
- [17] Hsieh C C, Liu Y T. Quality investment and inspection policy in a supplier-manufacturer supply chain[J]. European J of Operational Research, 2010, 202(3): 717-729.
- [18] Zhu K, Zhang R Q, Tsung F. Pushing quality improvement along supply chains[J]. Management Science, 2007, 53(3): 421-436.
- [19] Bae S H, Yoo C S, Sarkis J. Outsourcing with quality competition: Insights from a three-stage game-theoretic model[J]. Int J of Production Research, 2010, 48(2): 327-342.
- [20] Ei Ouardighi F, Kim B. Supply quality management with wholesale price and revenue-sharing contracts under horizontal competition[J]. European J of Operational Research, 2010, 206(2): 329-340.
- [21] Vassilakis E, Bessieris G. An application of TQM tools at a maintenance division of a large aerospace company[J]. J of Quality in Maintenance Engineering, 2009, 15(1): 31-46.
- [22] Sandanayake Y G, Oduoza C F. Dynamic simulation for performance optimization in just-in-time-enabled manufacturing processes[J]. J of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 42(3/4): 372-380.
- [23] Li M C, Al-Refaie A. Improving wooden parts' quality by adopting DMAIC procedure[J]. Quality and Reliability Engineering Int, 2008, 24(3): 351-360.
- [24] Shu Lianjie, Tsung Fugee. On multistage statistical process control[J]. J of the Chinese Institute of Industrial Engineers, 2003, 20(1): 1-8.
- [25] Erginel N. Construction of a fuzzy QFD failure matrix using a fuzzy multiple-objective decision model[J]. J of Engineering Design, 2010, 21(6): 677-692.
- [26] Winston W L. Operations research application and algorithms[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 144-207.

(上接第1684页)

- [11] Ali Kazemy, Seyed Amin Hosseini, Mohammad Farrokhi. Second order diagonal recurrent neural network[C]. IEEE Int Symposium on Industrial Electronics. Vigo: IEEE, 2007: 251-256.
- [12] 王科俊, 李国斌. DRNN 神经网络用于船舶横摇运动的时间序列预报[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1997, 18(1): 39-45.
(Wang K J, Li G B. Time series prediction of ship roll using diagonal recurrent neural network[J]. J of Harbin Engineering University, 1997, 18(1): 39-45.)
- [13] 李占英, 王科俊, 张明君, 等. 二阶对角递归神经网络船舶横摇运动预测[J]. 华中科技大学学报, 2011, 6(39): 125-128.
(Li Z Y, Wang K J, Zhang M J, et al. Second diagonal recurrent neural network approach to ship roll prediction[J]. J of Huazhong University of Science and Technology, 2011, 6(39): 125-128.)
- [14] 王焱, 郭伟. 一种混沌神经网络的混沌时间序列预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2007, 21(6): 5-9.
(Wang Y, Guo W. Chaotic neural network approach to chaotic time series prediction[J]. J of Electronic Measurement and Instrument, 2007, 21(6): 5-9.)
- [15] 郑丽颖. 混沌神经网络及模糊混沌神经网络的研究与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学自动化学院, 2002: 61-64.
(Zheng L Y. Study and application on chaotic neural network and fuzzy chaotic neural network[D]. Harbin: College of Automation, Harbin Engineering University, 2002: 61-64.)
- [16] Li Zhan-ying, Wang Ke-jun, Tang Mo. Optimization of learning algorithms for chaotic diagonal recurrent neural networks[C]. Int Conf on Intelligent Control and Information Processing. Dalian: IEEE, 2010: 244-247.
- [17] 王兴元. 复杂非线性系统中的混沌[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
(Wang X Y. Chaos in the complex nonlinear systems[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.)