

控制与决策

Control and Decision

基于多变量GERT的复杂装备研制进度控制方法及应用

刘勇, 张静怡, 王朱程, 赵焕焕

引用本文:

刘勇, 张静怡, 王朱程, 等. 基于多变量GERT的复杂装备研制进度控制方法及应用[J]. *控制与决策*, 2025, 40(3): 963-972.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0517>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种具有非线性动力学模型的智能电网快速分布式控制

A fast distributed control of smart grids with nonlinear dynamic model

控制与决策. 2021, 36(8): 1849-1854 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1696>

基于前景优化和概率估计的显著性检测

Saliency detection based on foreground optimization and probability estimation

控制与决策. 2021, 36(4): 917-924 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1101>

基于复杂昂贵仿真的体系效能多目标优化

Complex and expensive simulation based multi-objective optimization to system-of-system effectiveness

控制与决策. 2021, 36(3): 589-598 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0844>

基于动态资源权重的多技能项目调度启发式算法

Dynamic resource priority-based heuristics for multi-skill resource constrained project scheduling problem

控制与决策. 2021, 36(10): 2553-2561 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0070>

多尺度决策系统中代价敏感的最优尺度组合

Cost-sensitive optimal scale combination in multi-scale decision systems

控制与决策. 2021, 36(10): 2369-2378 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0121>

基于多变量 GERT 的复杂装备研制进度控制方法及应用

刘勇^{1†}, 张静怡¹, 王朱程¹, 赵焕焕²

(1. 江南大学商学院, 江苏无锡 214122; 2. 无锡职业技术学院管理学院, 江苏无锡 214121)

摘要: 研制进度管理是复杂装备项目的重要工作之一, 合理的进度计划和调控措施能够保证项目研制成功和及时交付。然而, 研制进度受到工期、成本、客户需求等众多因素的影响和制约, 并且这些因素呈现一定的不确定性。为描述和解决此类进度控制问题, 考虑到工期、成本等变量的不确定性和客户质量需求的满足程度, 利用区间数、随机网络 (GERT)、优化模型等理论和方法, 构建了基于多变量随机网络的复杂装备研制进度控制方法。首先, 考虑到工期、成本、质量价值等变量的不确定性, 将区间数引入随机网络, 并考虑客户质量价值需求, 定义了基于区间数的多变量随机网络, 分析了复杂装备质量价值与产品质量水平和研制成本之间的内在联系, 进而提出产品质量价值的量化表达式; 其次, 鉴于工期、成本和质量价值之间的交互效应, 构建复杂装备研制的工期-成本-质量价值多目标优化模型, 并使用多目标遗传算法 (NSGA-II) 设计求解策略; 最后, 通过实际案例充分验证模型的有效性与合理性。

关键词: 复杂装备研制; 进度控制; 多变量; GERT 网络; 质量价值; 不确定性

中图分类号: F25 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyj.2024.0517

引用格式: 刘勇, 张静怡, 王朱程, 等. 基于多变量 GERT 的复杂装备研制进度控制方法及应用 [J]. 控制与决策, 2025, 40(3): 963-972.

Schedule control method and application for complex equipment development based on multivariate GERT

LIU Yong^{1†}, ZHANG Jing-yi¹, WANG Zhu-cheng¹, ZHAO Huan-huan²

(1. School of Business, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. School of Management, Wuxi Institute of Technology, Wuxi 214121, China)

Abstract: Development schedule management is a pivotal aspect of complex equipment projects, and reasonable schedule planning and control measures can ensure the success of project development and timely delivery. However, the development schedule is affected and constrained by many factors, such as schedule, cost, customer requirements, etc., and these factors show a certain degree of uncertainty. To describe and solve this kind of schedule control problem, taking into account the uncertainty of variables such as schedule and cost and the degree of satisfaction of customer's quality requirements, a multivariate stochastic network-based schedule control method for complex equipment development is constructed by using theories and methods such as interval number, random networks (GERT) and optimization models. Firstly, considering the uncertainty of duration, cost and quality value, the interval number is introduced into the random network, and considering the customer's quality value demand, the multivariate random network based on the interval number is defined, and the intrinsic connection between the quality value of complex equipment and the product quality level and the development cost is analyzed, and then the quantitative expression for the product quality value is put forward. Then, in view of the interaction effect among schedule, cost and quality value, a multi-objective optimization model of schedule-cost-quality value for complex equipment development is constructed, and a solution strategy is designed by using the multi-objective genetic algorithm (NSGA-II). Finally, the validity and reasonableness of the model are fully verified by actual cases.

Keywords: complex equipment development; schedule control; multivariate; GERT network; quality value; uncertainty

收稿日期: 2024-04-30; 录用日期: 2024-08-14.

基金项目: 国家社会科学基金项目 (19FGLB031); 江苏省社会科学优秀青年项目; 江苏省青蓝工程培养对象; 数字化学习技术集成与应用教育部工程研究中心创新基金项目 (1321005); 青海省社会科学基金项目 (23YQA-003); 无锡市科协软科学研究课题 (KX-24-A15).

责任编辑: 刘民.

[†]通信作者. E-mail: cly1985528@163.com.

本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

0 引言

复杂装备是国家战略性新兴产业,复杂装备研制对于提升装备制造业水平,增强产业核心竞争力,占据未来科技制高点,具有重要意义.复杂装备研制进度管理是复杂装备项目的重要工作之一,合理的进度计划和调控措施能够保证项目研制成功和及时交付.然而,受到研制成本、产品质量、工期、客户需求等众多不确定因素的影响和制约,复杂装备研制进度管理面临巨大的挑战,亟需构建一套复杂装备研制进度控制方法.

研制进度管理是复杂装备项目管理的一个重要部分,在整个项目管理中起到核心作用.研制进度管理主要是对研制项目实施进度、计划安排等进行控制和管理,以实现在工期内完成项目研制.项目研制包括3大要素:项目质量、研制成本、研制进度.项目质量是核心要素,研制成本是关键要素,研制进度是重要要素.通过梳理复杂装备研制进度管理相关文献,目前的研究主要集中在复杂装备研制进度影响因素识别和复杂装备研制进度控制方法构建两个方面.

1) 复杂装备研制进度影响因素识别.影响复杂装备研制进度的核心因素主要是研制过程中各供应商的研制工期、产品成本、质量等^[1].其中, Yang 等^[2]通过分析复杂产品关键零部件的影响因素,建立了基于模糊层次分析法的灰色关联模型; Srinivasan 等^[3]考虑质量风险的传递性和反馈性,建立了供应链进度控制模型; Yoo 等^[4]指出质量激励在包含多级供应商的供应链中展现出显著效能,能够有效促进供应商质量水平的提升,进而加快供应链研制进度; 任廷海等^[5]指出研制工期和质量的权衡有利于供应链的双方实现双赢,保证了产品研制的进度与效率; Zhou 等^[6]基于全球供应链视角,研究了碳关税的存在对供应链进度的影响; Lei 等^[7]结合复杂网络模型和风险控制策略的优化选择方法,探讨了跨国供应链情形下不同供应商与供应链结构风险传导的关系,揭示了跨国供应链风险传递的特征; 陶良彦等^[8]分析了复杂装备研制网络的主要影响因素及其相互关系,对复杂装备研制进度与多层次供应商之间的量化关系和多主体之间进行均衡分析.复杂装备作为多品种、小批量、不确定订货量订货模式的典型代表,由于其研制活动参与企业较多、生产过程复杂、不确定性高和可控性差等特点,更容易出现交付不及时和产品质量不合格等问题,增加了额外成本,降低了顾客满意度.因此,需要在研制进度控制管理

研究中综合考虑多种指标,进行权衡优化.

2) 复杂装备研制进度控制方法构建.现有研究主要通过分析研制进度与成本、质量之间的关系,构建进度控制模型,讨论如何在满足产品成本和质量要求的前提下,缩短产品研制工期.在工期、质量方面, Yang 等^[9]将质量成本作为供应链全局性的度量指标,提出了基于质量、工期、风险的供应链进度控制模型; Hajiagha 等^[10]将时间权衡问题扩展到时间、质量和风险的权衡研究,研究了疫情冲击下的供应链管理优化问题; Niu 等^[11]设计了一种基于细菌觅食算法的供应链时间、质量优化模型来保障制造型供应链的产品质量并缩短供货时间; Lalmazloumian 等^[12]在资源约束的情景下,采用分层的网络模型和加权时间资源优先级规则对活动进行重新调整,解决并行活动之间的冲突问题.在时间、成本方面, He 等^[13]讨论了供应商网络中经典的时间-费用权衡问题,简化了网络模型中时间-费用权衡问题的求解方法; 刘红旗等^[14]则运用系统工程理论,将复杂装备研制过程细化为一系列关键里程碑事件,构建了 GERT 网络模型,探索了基于总时间反推各活动时间-成本-资源的可能性方法.在成本、质量的研究方面,现有文献侧重于探索成本最小化与质量最优化的平衡路径. Hosseini 等^[15]应用系统动力学方法构建了质量成本决策模型; Haque 等^[16]提出了混合整数线性规划模型,专门解决供应链管理中的成本-质量权衡难题; Karthick 等^[17]分析了非合作博弈下供应商与制造商在质量投资与检验策略上的互动; Pariazar 等^[18]建立了多目标随机规划模型,探讨了中断发生时供应链成本与质量之间的权衡问题.学者们还综合其他影响因素对进度控制方法展开了进一步的研究. Barman 等^[19]针对供应链成本与服务水平的不确定性优化问题,提出了多目标机会约束规划模型; 耿瑞等^[20]结合 GERT 解析算法,针对非关键路径活动,构建了综合满意度最大化的优化模型; 潘燕华等^[21]运用系统动力学原理,构建了以客户满意度为导向的进度控制模型; Tian 等^[22]利用 GERT 网络对供应链生产系统进行建模、仿真,识别并优化了关键活动、事件与路径,实现了资源的有效调度与进度规划; Fu 等^[23]提出了一种分布式 MPC 策略,描述并求解了供应商独立决策而存在非合作交互和强耦合输入情况下的纳什均衡. Luo 等^[24]运用质量函数部署框架,建立了应对供应链随机扰动的弹性策略优化模型,结果表明调整供应链管理职责及实施供应商分级管理能有效优化复杂装备研制网络; 张文

博等^[25]构建了模糊多目标规划模型,利用其探讨食品供应链质量风险管控问题;王道平等^[26]研究了质量控制与损失规避下的供应链协调,揭示了它们对产品质量、订货量及供应链效能的影响机制;王翥华等^[27]构建了考虑总完工时间、资源、实现概率受限的时间-资源优化模型及差分进化算法求解,验证了其在提高项目按期完工概率上的有效性;董文杰等^[28]针对复杂产品研制中多独立参数变量的特性,探讨了不同参数对研制进度的影响。

根据以上讨论和分析可知,目前的研究虽然能够在一定程度上为解决复杂装备研制进度控制管理的时间、成本或质量均衡问题提供研究思路和解决方案,但仍存在以下问题:1)目前的研究大多将工期、成本等作为影响研制进度的单一因素,以此构建模型优化期望值,未考虑研制项目完工概率;2)现有研究没有考虑研制过程中各参数的不确定性,而实际研制过程中存在多样的不确定因素;3)当前的研究往往仅局限于单一生产企业的视角,探求其最优目标,忽视了客户对质量价值的需求,这导致了一个显著问题:供应商在质量成本上实现最优化时,所产出的产品质量水平却可能无法达到客户的期望标准。鉴于此,为描述和解决此类进度控制问题,考虑到工期、成本和质量等变量的不确定和客户质量需求的满足程度,利用区间数、随机网络(GERT)、优化模型等理论和方法,构建基于多变量随机网络的复杂装备研制进度控制方法,并以实际案例验证模型的有效性与其合理性。

1 基于多变量随机网络的复杂装备研制进度控制方法

考虑到复杂装备研制中各主体研制水平、利益诉求的差异性与研制流程的复杂性,因而造成研制进度受到研制成本、产品质量、工期、客户需求等众多不确定因素的影响和制约的特点,利用区间数引入随机网络,定义基于区间数的多变量随机网络,利用多目标优化模型实现复杂装备研制的工期、成本与质量价值之间的权衡,构建基于多变量随机网络的复杂装备研制进度控制方法。

1.1 基于区间数的多变量 GERT 网络设计

复杂装备研制是一个主制造商和各级供应商协同研制活动。为实现满足客户质量价值需求的目标,各研制主体投入时间、成本等多生产要素,形成了复杂装备研制网络,GERT网络能够有效描述和处理此类问题。考虑到研制主体间的多变量特性,本文采用多变量 GERT 网络,并做如下假设。

假设 1 在复杂装备研制中,相邻供应商同时研发零部件,实现产品由低层级供应商向高层级供应商的逐级传递,以完成整个研制流程。采用基于里程碑的方式,将研制项目表示为一个多变量 GERT 网络模型。该模型由节点、箭头和信息流构成,其中节点 i 为上游供应商;节点 j 为下游供应商或主制造商,箭线 (i, j) 反映两个供应商之间的研制活动,节点 i, j 同时代表着研制活动的开始和结束。

假设 2 由于研制流程的复杂性和主体之间研制水平的差异性,研制过程中的工期、成本、传递概率等参数并非具体的精确数,它们均为区间数。

假设 3 在复杂装备研制网络中,各级供应商投入时间和成本于研制活动 (i, j) 中,目标在于达成既定的质量指标,并逐渐向下游供应商传递产品,直至主制造商将成品交付给最终客户,满足客户价值需求,从而实现产品的质量价值。令 t_{ij} 表示活动 (i, j) 所需工期, c_{ij} 表示实现活动 (i, j) 所投入的总研制成本, QV_{ij} 表示活动 (i, j) 实现的产品质量价值。

假设 4 主制造商、供应商在研制活动 (i, j) 所承担的总成本为 c_{ij} ,包括直接成本和间接成本,后者与质量评估紧密相关。其中:直接成本是指维持基本研制的成本;间接成本包括质量保障成本和质量损失成本,质量保障成本是指为确保产品达到客户满意的质量标准所产生的费用,质量损失成本是指为修复产品传递过程中的质量问题而额外投入的费用。

假设 5 令 p_{ij} 表示节点 i 实现的条件下,活动 (i, j) (即产品传递)得以执行的概率,这实质上反映了供应商 i 提供的产品,在经下游供应商 j 的质量检测后,成功通过并被接收的比例,也即供应商 i 实现产品传递的概率。需要注意,返修流程需要供应商付出额外的工期与成本,进而制约研制活动的总进度,这是由供应商的质量水平决定的。因此,活动 (i, j) 被正常执行的概率 p_{ij} 即为供应商 i 所生产并传递的产品在质量检验环节中的合格率,体现了供应商 i 产品的质量水平。为了量化这一指标,引入 q_i 表示供应商 i 产品的质量水平,则有 $q_i = p_{ij}$ 。

1.2 多变量 GERT 网络构建

定理 1 复杂装备研制 GERT 网络中,设 $W_r(s_1, s_2)$ ($r = 1, 2, \dots, k, k \geq 1$) 为节点 u 到节点 v 第 r 条直达路径传递函数, $W_a(L_m)$ 是 m 阶环中第 a 环传递函数系数,令 $W_r(s_1, s_2)$ 为节点 u 到节点 v 的等价传递函数,则有

$$W_{uv}(s_1, s_2) = \frac{\sum_{r=1}^k W_r(s_1, s_2) \left[1 - \sum_m \sum_{a \neq i} (-1)^m W_a(L_m) \right]}{1 - \sum_m \sum_a (-1)^m W_a(L_m)}. \quad (1)$$

定理 2 若 $W_{uv}(s_1, s_2)$ 是节点 u 到节点 v 的等价传递函数, 令 p_{uv} 和 M_{uv} 分别为节点 u 到节点 v 的等价传递概率和等价矩母函数, 根据梅森公式, 则有

$$P_{uv} = W_{uv}(s_1, s_2)|_{s_1=s_2=0}, \quad (2)$$

$$M_{uv} = \frac{W_{uv}(s_1, s_2)}{W_{uv}(0, 0)}. \quad (3)$$

定理 3 令 $E[x_{uv}^k]$ 为节点 u 到节点 v 变量 x^k 的一阶原点矩 (期望), 则有

$$E[x_{uv}^k] = \frac{\partial}{\partial s_1} \left[\frac{W_{uv}(s_1, s_2)}{W_{uv}(0, 0)} \right] \Big|_{s_k=0}. \quad (4)$$

根据多变量 GERT 网络的解析算法, 由式 (2) ~ (4) 即可分别求出整个复杂装备 GERT 网络的完成概率 P_E 、等价矩母函数 M_E 、期望时间 E_T 和期望成本 E_C , 有

$$P_E = W_E(s_1, s_2)|_{s_1=s_2=0}, \quad (5)$$

$$M_E = \frac{W_E(s_1, s_2)}{W_E(0, 0)}, \quad (6)$$

$$E[T] = \frac{\partial}{\partial s_1} \left[\frac{W_E(s_1, s_2)}{W_E(0, 0)} \right] \Big|_{s_1=0}, \quad (7)$$

$$E[C] = \frac{\partial}{\partial s_2} \left[\frac{W_E(s_1, s_2)}{W_E(0, 0)} \right] \Big|_{s_2=0}. \quad (8)$$

定义 1 在复杂装备研制网络中, 令源节点 S 为起始供应商, 终节点 T 为最终客户, q_E 为研制网络的质量水平. 网络的等价传递概率 p_E 反映源节点 S 到终节点 T 成功传递产品的概率水平. 假定网络内的各级供应商均具备健全的质量检验体系, 则活动 (S, T) 的产品转移概率 p_E 为源节点 S 到终节点 T 间研制产品合格率的体现, 反映网络整体的质量水平, 即 $q_E = p_E$. 由式 (5) 可得

$$q_E = p_E = W_E(s_1, s_2)|_{s_1=s_2=0}. \quad (9)$$

定义 2 令 QV_E 表示复杂装备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. 产品的质量价值通过其满足客户价值需求的量化程度来展现. 价值维度主要受到产品质量水平和研发成本投入两大因素影响, 复杂装备的质量价值与其质量水平呈正相关, 与研制成本呈负相关, 因此可以得到

$$QV_E = \frac{q_E}{C_E} = \frac{p_E}{E(C)}. \quad (10)$$

利用复杂装备 GERT 网络模型, 可以得到供应

商网络的质量水平和研制成本, 从而推导出研制网络的质量价值.

定理 4 令 p_{ii} 、 c_{ii} 和 QV_i 分别为产品未通过验收退回到节点 i 进行维修的概率、成本和供应商 i 的质量价值水平, 如果满足 $0 < p_{ii} < p_{ij}$, $0 < c_{ii} < c_{ij}$, 则有

$$QV_i = \frac{q_i}{c_i} = \frac{\sum_{r=1}^k W_r(s_1, s_2) \left[1 - \sum_m \sum_{a \neq r} (-1)^m W_a(L_m) \right]}{1 - \sum_m \sum_a (-1)^m W_a(L_m)(c_{ij} + c_{ii})} \Big|_{s_1=s_2=0}. \quad (11)$$

定理 5 复杂装备研制 GERT 网络的输出必满足

$$\begin{aligned} P_E &\in [P_E, \overline{P_E}], \\ E(T) &\in [T_E, \overline{T_E}], \\ E(C) &\in [C_E, \overline{C_E}]. \end{aligned}$$

根据定理 5 可知, 网络输出 P_E, E_T, E_C, QV_E 均为区间数, 它能够给出复杂装备研制概率、时间、成本和质量价值的可能范围, 以及复杂装备研制的不确定程度, 为决策者提供有价值的参考依据. 但当复杂装备研制网络的输出结果的模糊度超过一定阈值时, 就失去了对现实的指导意义. 因此, 求解结果必须考虑客户需求的满足程度, 否则将失去实际应用的价值.

1.3 复杂装备研制工期-成本-质量价值多目标优化模型构建

在推进复杂装备研发进度管理的实践中, 若仅聚焦于生产企业的单方面优化, 往往遭遇供应商在追求工期与成本最优时, 难以满足客户对产品质量的期望; 或反之, 供应商过度投入于延长工期与增加成本, 造成质量过剩、研发进度受阻及费用超支, 引发资源非必要消耗. 鉴于此, 综合考虑工期、成本与质量价值, 本文构建最小化预期总工期的目标函数, 具体表达如下:

$$\begin{aligned} \min T &= E(T); \\ \text{s.t. } t_{ij} &\leq t_{ij} \leq \overline{t_{ij}}, \\ E[T] &= \frac{\partial}{\partial s_1} \left[\frac{W_E(s_1, s_2)}{W_E(0, 0)} \right] \Big|_{s_1=0}, \\ T &\leq E(T) \leq \overline{T}. \end{aligned} \quad (12)$$

其中 t_{ij} 是该目标函数的决策变量, 表示各项任务的实际工期值.

复杂装备研制中, 供应商成本分为直接成本和

间接成本两类. 直接成本(人工、材料等)随任务时长缩短而相对上升; 间接成本(管理、审核)则与时长正相关. 因此, 可以合理推断, 单个研发任务的总成本与持续时长大致呈抛物线关系.

令 t_{ij}^* 表示单项活动最优工期, c_{\min} 表示其对应的最小成本. 对应本文, 给定工期区间 $[t_{ij}, \bar{t}_{ij}]$ 和成本区间 $[c_{ij}, \bar{c}_{ij}]$, 拟合成本与工期的二次函数. 其中, 在 $t_{ij}^* = at_{ij} + (1-a)\bar{t}_{ij}$, $a \in (0, 1)$ 时, 取得 $c_{\min} = c_{ij}$. 当 $a < 0.5$, 在 t_{ij} 时取得 $c_{\max} = \bar{c}_{ij}$; 当 $a > 0.5$, 在 \bar{t}_{ij} 时取得 $c_{\max} = \bar{c}_{ij}$; 当 $a = 0.5$, 在 t_{ij}, \bar{t}_{ij} 时取得 $c_{\max} = \bar{c}_{ij}$.

据此, 求得拟合函数

$$c_{ij} = A(t_{ij} - t_{ij}^*)^2 + c_{ij}, \quad (13)$$

其中 $A(A > 0)$ 表示成本随工期变化的快慢程度.

综合复杂装备研制的研制活动成本的不确定性、总成本预算的界限性以及实施过程的循环性等特点, 构建最小化期望总成本的目标函数, 具体表达如下:

$$\begin{aligned} \min C &= E(C). \\ \text{s.t. } c_{ij} &\leq c_{ij} \leq \bar{c}_{ij}; \\ c_{ij} &= A(t_{ij} - t_{ij}^*)^2 + c_{ij}; \\ t_{ij}^* &= \alpha t_{ij} + (1 - \alpha)\bar{t}_{ij}; \\ A > 0, 1 < \alpha < 0; \\ E[C] &= \left. \frac{\partial}{\partial s_2} \left[\frac{W_E(s_1, s_2)}{W_E(0, 0)} \right] \right|_{s_2=0}; \\ C &\leq E(C) \leq \bar{C}. \end{aligned} \quad (14)$$

其中 c_{ij} 是该目标函数的决策变量, 表示各项任务的实际成本值.

在研制网络中, 供应商致力于提升零部件质量, 即成功传递概率 p_{ij} , 并降低返工活动的传递概率 p_{ii} , 以减少额外的工期和成本. 鉴于复杂装备质量难以量化, 本文引入质量价值概念衡量产品满足客户价值需求的程度, 从而体现产品的质量价值. 构建最大化总质量价值的目标函数, 具体表达如下:

$$\begin{aligned} \max QV_E &= \frac{q_E}{C_E} = \frac{p_E}{E(C)}; \\ \text{s.t. } p_{ij} &\leq p_{ij} \leq \bar{p}_{ij}, \\ c_{ij} &\leq c_{ij} \leq \bar{c}_{ij}, \\ P_E &= W_E(s_1, s_2)|_{s_1=s_2=0}, \\ E[C] &= \left. \frac{\partial}{\partial s_2} \left[\frac{W_E(s_1, s_2)}{W_E(0, 0)} \right] \right|_{s_2=0}, \\ p_E &\leq p_E \leq \bar{p}_E, \\ QV_E &< QV_E < \overline{QV}_E. \end{aligned} \quad (15)$$

其中 c_{ij} 和 p_{ij} 是该目标函数的决策变量, 分别表示各项任务的实际成本值和产品质量合格率.

以研制网络活动工期最小化、成本最小化以及质量价值最大化为目标, 根据目标函数的约束条件, 可构建复杂装备研制进度控制模型, 如下所示:

$$\begin{aligned} \min E(T), \min E(C), \max QV_E. \\ \text{s.t. } t_{ij} &\leq t_{ij} \leq \bar{t}_{ij}; \\ c_{ij} &\leq c_{ij} \leq \bar{c}_{ij}; \\ p_{ij} &\leq p_{ij} \leq \bar{p}_{ij}; \\ E[T] &= \left. \frac{\partial}{\partial s_1} \left[\frac{W_E(s_1, s_2)}{W_E(0, 0)} \right] \right|_{s_1=0}; \\ E[C] &= \left. \frac{\partial}{\partial s_2} \left[\frac{W_E(s_1, s_2)}{W_E(0, 0)} \right] \right|_{s_2=0}; \\ c_{ij} &= A(t_{ij} - t_{ij}^*)^2 + c_{ij}; \\ t_{ij}^* &= \alpha t_{ij} + (1 - \alpha)\bar{t}_{ij}; \\ QV_E &= \frac{p_E}{E(C)}; \\ A > 0, 1 < \alpha < 0; \\ T &\leq E(T) \leq \bar{T}; \\ C &\leq E(C) \leq \bar{C}. \end{aligned} \quad (16)$$

1.4 模型求解算法设计

根据以上讨论与分析, 考虑到遗传算法通过模拟自然进化机制以搜索最优解, 具备收敛迅速、鲁棒性强的优点, 本节采用 NSGA-II 算法来求解复杂装备研制中的工期-成本-质量价值多目标优化模型. 构建复杂装备研制进度控制模型及其求解的主要步骤如下.

step 1: 根据复杂装备研制活动的基本特性, 构建 GERT 网络图, 明确供应商间的传递关系.

step 2: 汇集研制网络中各项活动的基本参数, 包括研制工期、成本和传递概率等参量. 考虑信息的不确定性, 这些参数以及过往经验以区间数给出.

step 3: 采用 GERT 网络的解析算法, 计算研制网络的等价传递函数 W_E 、等价传递概率 P_E , 由相关性求出其等价矩母函数 M_E , 反演求出网络中的各相关参数 $E(T)$ 和 $E(C)$, 由 $QV_E = \frac{p_E}{E(C)}$ 推理得到 QV_E .

step 4: 根据各级供应商管理决策者需求, 在固有资源和结果受控的约束下, 构建多变量 GERT 网络多目标权衡优化模型.

step 5: 通过 NSGA-II 算法, 求解复杂装备研制进度控制模型, 比较各目标下的帕累托最优前沿面

并绘制累积分布函数图像。

step 6: 优化研制进度结果, 保证时间-成本-质量价值多目标的权衡, 以便复杂装备研制项目管理者根据需求对研制进度进行调控和管理。

2 案例研究

复杂装备研制过程中由于研制流程复杂、供应商数量众多且水平差异大, 易产生完工延期、成本超支等问题, 影响研制进度。在保证研制进度和整体利益的情况下, 交付能够满足客户需求的产品, 对研制过程进行工期-成本-质量价值的多目标优化, 实现复杂装备研制进度控制。本文以航空发动机传感器

研制案例为研究对象, 验证复杂装备研制进度控制方法的有效性和合理性。

2.1 多变量 GERT 模型构建与求解

航空发动机传感器的研制过程一般涉及多个零部件的供应商参与。以某一特定航空发动机传感器的研发为例, 其研发网络由传感器主制造商、3 个原材料供应商、4 个零部件供应商、两个系统组件供应商以及最终客户共同构成, 具体研制 GERT 网络结构如图 1 所示。在该研制网络中, 节点 1 代表虚拟源节点, 节点 12 代表终端客户, 其余节点代表各级供应商。

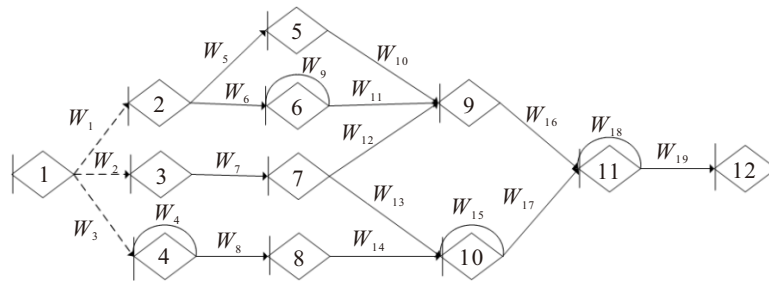


图1 航空发动机传感器研制 GERT 网络

本案例中, 研制活动的工期、成本投入以及传递概率均设定为区间数。此时, 经典 GERT 不再适用, 故采用本文提出的基于区间数的多变量 GERT 网

络模型对该案例进行分析与计算。根据以往研制经验, 得到航空发动机传感器研制网络参数, 详见表 1。其中: 成本的单位为万元, 工期的单位为天。

表1 航空发动机传感器研制网络参数

活动	活动说明	传递函数	分布类型	工期区间 t_{ij}	成本区间 c_{ij}	传递概率区间 p_{ij}
1-2	原料1准备	w_1	正态	[0.586, 3.414]	[3.586, 6.414]	[0.5, 0.5]
1-3	原料2准备	w_2	正态	[2.586, 5.414]	[2.586, 5.414]	[0.5, 0.5]
1-4	原料3准备	w_3	正态	[1.586, 4.414]	[3.586, 6.414]	[0.5, 0.5]
4-4	原料3再准备	w_4	正态	[1.586, 4.414]	[4.586, 7.414]	[0.10, 0.15]
2-5	原料1转零部件1	w_5	正态	[2.586, 5.414]	[1.586, 4.414]	[0.65, 0.70]
2-6	原料1转零部件2	w_6	正态	[4.586, 7.414]	[3.586, 6.414]	[0.60, 0.625]
3-7	原料2转零部件3	w_7	正态	[3.586, 6.414]	[6.086, 8.914]	[0.60, 0.65]
4-8	原料2转零部件4	w_8	正态	[2.586, 5.414]	[1.586, 4.414]	[0.625, 0.650]
6-6	零部件2返工	w_9	正态	[3.586, 6.414]	[4.586, 7.414]	[0.05, 0.10]
5-9	零部件1转系统组件1	w_{10}	正态	[1.586, 4.414]	[2.586, 5.414]	[0.80, 0.85]
6-9	零部件2转系统组件1	w_{11}	正态	[0.586, 3.414]	[3.586, 6.414]	[0.800, 0.825]
7-9	零部件3转系统组件1	w_{12}	正态	[1.586, 4.414]	[3.586, 6.414]	[0.65, 0.70]
7-10	零部件3转系统组件2	w_{13}	正态	[5.586, 8.414]	[8.586, 11.414]	[0.700, 0.725]
8-10	零部件4转系统组件2	w_{14}	正态	[4.586, 7.414]	[7.586, 10.414]	[0.700, 0.775]
10-10	系统组件2返工	w_{15}	正态	[3.586, 6.414]	[6.586, 7.414]	[0.05, 0.10]
9-11	系统组件1组装	w_{16}	正态	[4.586, 7.414]	[4.586, 9.414]	[0.55, 0.60]
10-11	系统组件2组装	w_{17}	正态	[5.586, 8.414]	[5.586, 8.414]	[0.75, 0.80]
11-11	整体功能检测	w_{18}	正态	[2.586, 5.414]	[6.586, 9.414]	[0.10, 0.15]
11-12	出厂	w_{19}	正态	[8.586, 11.414]	[16.586, 19.414]	[0.80, 0.85]

利用矩阵解析法求解 GERT 网络模型, 利用 Matlab 按照公式 $G = X/U = (1 - Q)^{-1}P$ 计算各

节点增益矩阵, 根据矩阵解析法可以得到起点 1 到终点 12 的等价传递函数为

$$w_{12} = \frac{w_1 w_5 w_{10} w_{16} w_9 + w_2 w_7 w_{12} w_{16} w_9}{1 - w_{18}} + \frac{w_1 w_6 w_{11} w_{16} w_9}{(1 - w_5)(1 - w_{18})} + \frac{w_2 w_7 w_{13} w_{17} w_{19}}{(1 - w_{15})(1 - w_{18})} + \frac{w_3 w_8 w_{14} w_{17} w_{19}}{(1 - w_4)(1 - w_{15})(1 - w_{18})} \quad (17)$$

根据定理 4 和表 1, 可分别计算各供应商的质量价值如表 2 所示。

表2 航空发动机传感器研制节点质量价值水平

节点序号	质量价值	节点序号	质量价值
2	[0.147, 0.441]	7	[0.084, 0.134]
3	[0.123, 0.159]	8	[0.061, 0.874]
4	[0.054, 0.062]	9	[0.074, 0.131]
5	[0.148, 0.329]	10	[0.050, 0.082]
6	[0.083, 0.144]	11	[0.031, 0.043]

根据比较可知, 节点 4、节点 10、节点 11 的质量价值水平较低, 其对应的活动 4-4、活动 10-10、活动 11-11 是研制网络中的关键路径, 供应商 4、供应商 6、供应商 10 为关键供应商。根据图 1 可知, 活动 4-4、活动 10-10、活动 11-11 为返修流程, 会带来额外的工期和成本投入, 对研制进度与产品质量价值造成不利的影响。故主制造商进行研制进度控制时, 应重点关注以上关键路径的调控管理, 以达到改善研制网络绩效的目的。

2.2 多目标均衡优化模型

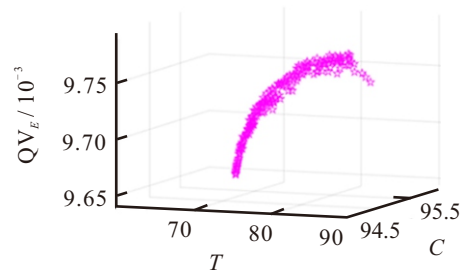
根据本文提出的方法构建多目标优化模型, 模型的相关参数设定如下: 在成本目标函数中, 选定 $\alpha = 0.5, A = 0.4$, 表示成本二次函数关于 $x = \frac{t_{ij} + \bar{t}_{ij}}{2}$ 对称。此外, 依据生产总体要求, 设定整个研制项目的总工期和总成本的约束范围分别为 $T \in [60, 90]$ 和 $C \in [90, 100]$ 。

通过分析可知, 此时质量价值最高的目标等价于成本最小, 将相关参数代入式 (16) 得到复杂装备研制进度多目标控制模型。

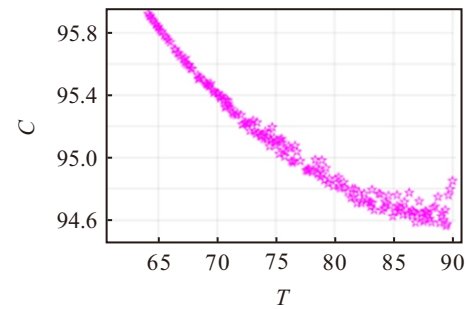
2.3 模型求解与分析

根据 NAGA-II 实现工期、成本、质量价值权衡优化模型求解, 获得不同目标和其约束条件下的一组可能的解决方案。为可视化多目标的优化情况, 绘制其帕累托前沿面, 如图 2 所示。

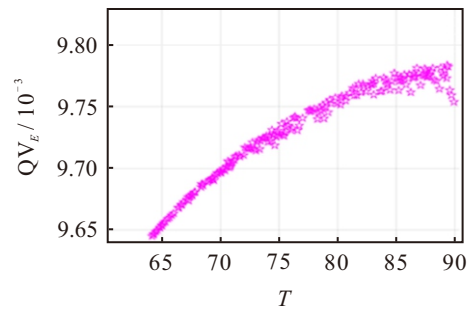
图 2(a) 表明, 所有方案下的时间、成本与质量价值目标之间相互关联影响。具体分析, 图 2(b) 表明, 航空发动机传感器研制中, 工期目标与成本目标多呈负相关, 存在冲突关系, 但在局部存在正相关关系, 这是由于随着供应商投入的工期边际效益递减, 长



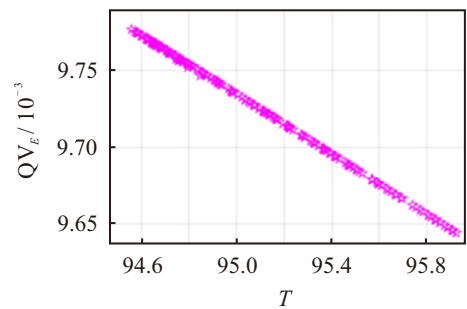
(a) 工期、成本、质量价值的多目标帕累托前沿



(b) 工期与成本的两目标帕累托前沿



(c) 工期与质量价值的两目标



(d) 成本与质量价值的两目标

图2 研制工期、成本和质量的帕累托前沿

期研制需更多成本; 图 2(c) 表明, 工期目标与质量价值目标之间总体正相关, 但过长工期会降低质量价值期望; 图 2(d) 表明, 成本目标与质量价值目标负相关, 与图 2(b) 特征相似。

根据图 2 和以上分析可知, 项目的工期、成本与质量之间存在复杂的相关性, 因此合理分配项目的资源需要综合考虑多种因素相关, 而所构建的模型能够实现复杂装备研制的研制工期、生产成本与产品质量价值之间的权衡。

利用 NAGA-II 算法和 Matlab 2017b 求解工期-

成本-质量价值多目标研制进度控制模型, 得到不同目标下的模型最优解, 如表3所示.

表3 不同控制目标下模型最优解

控制目标	$E(T)$	$E(C)$	$QV_E/\%$
工期最短	64.1579	95.9296	9.6446
成本最小	90.0001	94.5634	9.7840
质量价值最大	90.0001	94.5634	9.7840
$T - C - QV_E$	81.7220	94.8007	9.7594

由表3可知, 在工期最短的目标下, 研制活动所需总投入工期为 64.1579, 此时需要投入的总成本和产品总质量价值分别为 95.9296 和 9.6446. 对比不同优化目标下的工期、成本和质量价值期望, 可以发现, 多目标控制曲线下的工期和成本期望略劣于其单目标时的工期和成本, 但总体差距不大, 且期望质量价值优于工期最短目标下的模型, 由此可知, 多目标控制曲线下的工期、成本和质量价值 3 个期望目标相对均衡.

为对优化结果进一步分析, 根据多目标控制下研制网络的参数分别绘制多目标控制下各研制活动工期、成本最优值与约束区间均值的柱形折线组合图, 折线图表示多目标优化后各研制活动的完工时间、完工成本的最优值与其约束区间均值的差值, 取绝对值, 如图3和图4所示.

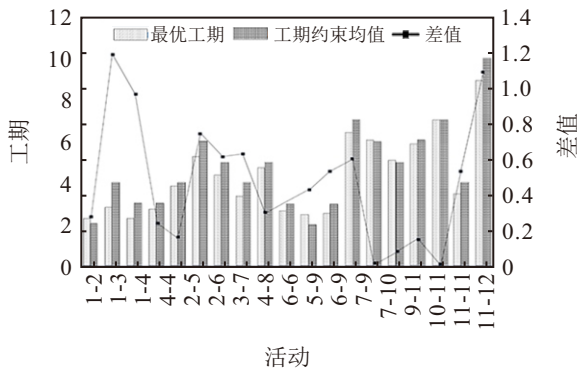


图3 各活动工期最优分配、约束均值及其差值

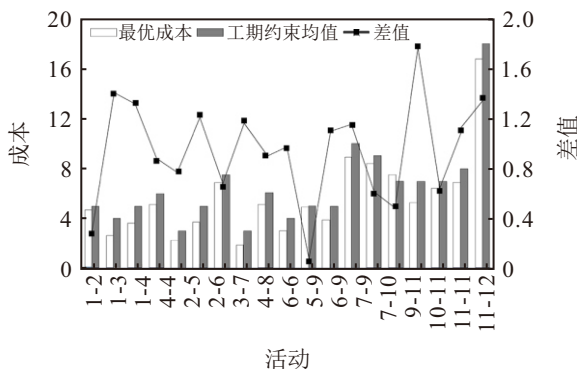


图4 各活动成本最优分配、约束均值及其差值

根据图3和图4, 各活动工期最优值都趋于接近

工期约束区间的均值, 最大差值为 1.188, 而成本最优值则普遍小于成本约束区间的均值, 最大差值为 1.775. 由此可知, 优化模型的结果, 在项目最终完工的总工期、耗费成本方面都显著优于其约束取值的均值. 具体而言, 项目工期低于约束均值的 7.14%, 项目成本低于约束均值的 14.9%. 这表明, 本文的方法能够在综合考虑工期、成本以及质量之间的非线性影响的条件下, 获得良好的效果. 同时可以发现, 活动 6-9 和活动 10-10 表现出与其他活动的差异性, 在仿真最优结果高于约束区间均值的活动中, 活动 6-9 的工期差值和活动 10-10 的成本差值明显高于其他活动, 表现出差异性. 结合表2可知, 活动 6-9 和活动 10-10 涉及的供应商 6 和供应商 9 的质量价值水平较低, 为关键供应商, 管理者需重点关注其研制进度的调控与管理.

根据模型和案例分析, 本文构建的研制进度控制模型能给出各项任务的合理分布均值, 并尽可能缩短工期、降低成本、提升产品质量价值, 从而使综合效用最大化. 该模型确保了研制网络的进度、质量价值及效率, 实现了整个研制系统的工期、成本、质量价值 3 方面的协调最优化.

3 结论

针对复杂装备研制控制管理问题, 考虑到研制过程中工期、成本等变量的不确定和客户质量需求的满足程度, 构建了基于多变量 GERT 的复杂装备研制进度控制方法, 通过复杂装备研制工期-成本-质量价值多目标优化模型和案例分析, 可得到如下结论.

1) 模型深入考量了实际研制过程中工期、成本等参数的不确定性, 采用区间数表征各参数的不确定性. 同时, 考虑客户质量需求, 构建了基于 GERT 网络的工期-成本-质量价值多目标优化模型, 以求解 GERT 网络参数的最优值. 通过给出各项任务的合理分布均值, 该模型不仅能有效缩短研发周期, 降低成本投入, 还能描述并解决复杂装备研制进度管理问题.

2) 复杂装备零部件的返修流程需要供应商投入额外的工期、成本, 对供应商和整个研制网络的质量价值水平、研制进度有着负面影响. 复杂装备研制工期与成本、质量价值均呈负相关, 而成本与质量价值也呈负相关, 所构建的模型能够实现研制工期、成本和质量价值的兼顾.

后续研究将考虑工期、成本与质量价值之间可能蕴含的复杂关系, 着手分析基于实际数据驱动的质量价值评估, 以及质量价值如何在时间与成本之

间实现动态平衡,探讨3大影响因素对复杂装备研发进程的作用。

参考文献 (References)

- [1] Moyano-Fuentes J, Bruque-Cámara S, Maqueira-Marín J M. Development and validation of a lean supply chain management measurement instrument[J]. *Production Planning & Control*, 2019, 30(1): 20-32.
- [2] Yang W M, Li C D, Yu Y Y, et al. Research on importance evaluation of complex product parts based on multilayer complex network[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2021, 2021(1): 7185830.
- [3] Srinivasan M, Hamdani M, Ma S Q. Four supply chain management systems: From supply chain strategies to human resource management[J]. *Business Horizons*, 2021, 64(2): 249-260.
- [4] Yoo S H, Choi T Y, Kim D. Multitier incentive strategies for quality improvement: Case of three-tier supply chain[J]. *Decision Sciences*, 2021, 52(5): 1137-1168.
- [5] 任廷海, 张旭梅, 但斌. 交付期与质量约束的移动应用供应链产品交付策略与合作契约[J]. *计算机集成制造系统*, 2020, 26(10): 2799-2811.
(Ren T H, Zhang X M, Dan B. Product delivery strategy and cooperation contract design of mobile application supply chain in presence of quality and delivery time constraints[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(10): 2799-2811.)
- [6] Zhou X Y, Zhu Q Y, Xu L, et al. The effect of carbon tariffs and the associated coping strategies: A global supply chain perspective[J]. *Omega*, 2024, 122: 102960.
- [7] Lei Z M, Lim M K, Cui L, et al. Modelling of risk transmission and control strategy in the transnational supply chain[J]. *International Journal of Production Research*, 2021, 59(1): 148-167.
- [8] 陶良彦, 刘思峰, 方志耕, 等. 基于多层次 GERT 的复杂产品研制进度规划“超冲突均衡”博弈模型[J]. *控制与决策*, 2014, 29(11): 2002-2010.
(Tao L Y, Liu S F, Fang Z G, et al. ‘Super-conflict equalization’ game model for complex product development scheduling based on multi-level GERT[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(11): 2002-2010.)
- [9] Yang J, Xie H M, Yu G S, et al. Antecedents and consequences of supply chain risk management capabilities: An investigation in the post-coronavirus crisis[J]. *International Journal of Production Research*, 2021, 59(5): 1573-1585.
- [10] Hajiagha S H R, Mahdiraji H A, Behnam M, et al. A scenario-based robust time-cost tradeoff model to handle the effect of COVID-19 on supply chains project management[J]. *Operations Management Research*, 2022, 15(1): 357-377.
- [11] Niu B, Tan L J, Liu J, et al. Cooperative bacterial foraging optimization method for multi-objective multi-echelon supply chain optimization problem[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2019, 49: 87-101.
- [12] Lalmazloumian M, Wong K Y, Govindan K, et al. A robust optimization model for agile and build-to-order supply chain planning under uncertainties[J]. *Annals of Operations Research*, 2016, 240(2): 435-470.
- [13] He N, Jiang Z Z, Wang J, et al. Maintenance optimisation and coordination with fairness concerns for the service-oriented manufacturing supply chain[J]. *Enterprise Information Systems*, 2021, 15(5): 694-724.
- [14] 刘红旗, 方志耕, 陶良彦. 复杂装备研制项目进度规划 GERT 网络“反问题”模型[J]. *系统工程与电子技术*, 2015, 37(12): 2758-2763.
(Liu H Q, Fang Z G, Tao L Y. Complex equipment development project planning GERT network ‘inverse problem’ model[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 37(12): 2758-2763.)
- [15] Hosseini Dehshiri S J, Amiri M. Evaluation of blockchain implementation solutions in the sustainable supply chain: A novel hybrid decision approach based on Z-numbers[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 235: 121123.
- [16] Haque M, Paul S K, Sarker R, et al. A novel heuristic approach for planning decentralised supply chain under uncertainties[J]. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 2023, 10(1): 2258778.
- [17] Karthick B, Uthayakumar R. Effectiveness of lead-time management in a sustainable supply chain under intuitionistic fuzzy environment: Analytical and metaheuristic optimisation approach[J]. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 2023, 10(1): 2252325.
- [18] Pariazar M, Sir M Y. A multi-objective approach for supply chain design considering disruptions impacting supply availability and quality[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 121: 113-130.
- [19] Barman H, Pervin M, Roy S K, et al. Analysis of a dual-channel green supply chain game-theoretical model under carbon policy[J]. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 2023, 10(1): 2242770.
- [20] 耿瑞, 朱建军. 结果输出受控下的灰色 GERT 网络时间和概率的联合优化模型[J]. *系统工程*, 2015, 33(4): 112-119.
(Geng R, Zhu J J. Optimization model for the joint of time and probability under the controlled result output of the GERT network[J]. *Systems Engineering*, 2015, 33(4): 112-119.)
- [21] 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. Quality cost model based on customer satisfaction[J]. *Systems Engineering*, 2015, 33(1): 74-80.)
- [22] Tian Q, Guo W H. Reconfiguration of manufacturing supply chains considering outsourcing decisions and supply chain risks[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2019, 52: 217-226.
- [23] Fu D F, Zhang H T, Yu Y, et al. A distributed model

- predictive control strategy for the bullwhip reducing inventory management policy[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(2): 932-941.
- [24] Luo Y, Zhu J J. Resilience strategy optimization for large aircraft supply chain based on probabilistic language QFD[J]. *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management*, 2020, 13(4): 23-46.
- [25] 张文博, 苏秦. 基于模糊多目标规划的食品供应链质量风险控制决策研究[J]. *工业工程与管理*, 2018, 23(1): 30-37.
(Zhang W B, Su Q. The control of quality risk in a food supply chain using a fuzzy multi-objective programming[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2018, 23(1): 30-37.)
- [26] 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. Coordination of supply chain considering quality control and loss aversion[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(12): 2295-2304.)
- [27] 王嵩华, 朱建军, 姚雨辰. 考虑“时间-资源”的大型客机协同研制 GERT 网络优化[J]. *控制与决策*, 2019, 34(2): 309-316.
(Wang H H, Zhu J J, Yao Y C. GERT network optimization with consideration of ‘time-resource’ on large aircraft collaborative development[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(2): 309-316.)
- [28] 董文杰, 刘思峰, 陶良彦, 等. 多参量 CF-GERT 网络作用下的复杂系统风险管控[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(11): 92-98.
(Dong W J, Liu S F, Tao L Y, et al. Risk management of complex system under CF-GERT network of multi-parameter variables[J]. *Operations Research and Management Science*, 2021, 30(11): 92-98.)
- [29] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 第 10 版. 北京: 科学出版社, 2024.
(Liu S F. Grey system theory and its application[M]. The 10th edition. Beijing: Science Press, 2024.)
- [30] 王欢, 方志耕, 邓飞, 等. 考虑质量价值水平的复杂产品供应链质量成本优化方法[J]. *控制与决策*, 2019, 34(9): 1973-1980.
(Wang H, Fang Z G, Deng F, et al. Quality cost optimization method for complex product supply chain considering quality value[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(9): 1973-1980.)

作者简介

刘勇 (1985-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为冲突分析、技术创新管理, E-mail: clly1985528@163.com;

张静怡 (2001-), 女, 硕士生, 主要研究方向为技术创新管理、大数据决策, E-mail: serendipity_zjy@163.com;

王朱程 (1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为复杂装备研制管理, E-mail: wzc18151534448@163.com;

赵焕焕 (1988-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为复杂装备研制管理, E-mail: huan983405544@163.com.