

考虑“时间-资源”的大型客机协同研制 GERT 网络优化

王嵩华^{1†}, 朱建军², 姚雨辰¹

(1. 金陵科技学院 商学院, 南京 211169; 2. 南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106)

摘 要: 研究大型客机协同研制过程中项目活动时间和投入资源具有不确定性的图示评审技术(GERT)网络优化问题. 采用 GERT 网络表征复杂项目研制过程, 给出基于 GERT 的项目完成费用计算方法, 提出项目时间与资源投入数量影响下的完工实现概率表征方式; 为实现对复杂产品研制项目中时间-费用-资源优化调整, 针对项目各活动和整体完工时间的不确定性, 建立总完工时间、资源、实现概率受限情况下的时间规划与资源调度优化模型, 并给出问题求解的差分进化启发式算法; 考虑到大型客机全面试制过程是衡量能否按期完工的关键, 以此过程为例进行案例分析, 从而表明所提出方法的可行性和有效性.

关键词: 协同研制; 时间规划-资源调度; 图示评审技术; 差分进化算法; 大型客机; 不确定性

中图分类号: F270

文献标志码: A

GERT network optimization with consideration of “time-resource” on large aircraft collaborative development

WANG He-hua^{1†}, ZHU Jian-jun², YAO Yu-chen¹

(1. School of Business, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China; 2. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: The paper studies a graphic evaluation and review technique (GERT) network optimization problem with uncertain project activity time and resources invested in the collaborative development process of airliners. Firstly, the development process of the complex product is characterized by a GERT network which is considered as a basis of calculating the project completion cost, then a form denoting the completion probability is proposed considering the influence of project duration and resources involved in the project. Then, to adjust and optimize the time-cost-resources involved in the project when each activity time and the total project completion time are uncertain, a time planning and resource scheduling optimization model is proposed under the limitation of the total completion time, resources and implementation probability, and a difference evolutionary heuristic algorithm is developed to solve the model. Finally, as the comprehensive trial-manufacture process of airliners is the key to measure whether the project is completed on schedule, this paper considers it as the background of the case study to verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords: collaborative development; time planning-resource scheduling (TP-RS); GERT; differential evolution algorithm; large aircraft; uncertainty

0 引 言

资源消耗费用最小和项目完工时间最短是项目管理领域常用的两个优化目标^[1]. 经典资源受限项目调度问题 (Resource constrained project scheduling problems, RCPSP) 的研究主要集中在每个活动具有确定工期的情况下对资源的需求, 通过优化项目某一

目标 (如时间、费用、资源等), 实现对项目的优化调度^[2-3]. 经典的 RCPSP 问题早已被证明是 NP-hard 问题, 针对此类问题的研究主要集中在基于特定情境的项目优化调度模型构建及相应的解析算法设计^[4]. 文献[5]建立了资源可用量可变情景下的多模式项目调度问题的双目标优化模型, 采用非支配排序遗传算法

收稿日期: 2018-01-23; 修回日期: 2018-05-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71502073); 教育部人文社会科学基金项目 (14YJC630120); 国家社会科学基金重点项目 (14AZD049); 金陵科技学院科研启动基金项目 (jit-b-201419); 江苏省高校“青蓝工程”项目.

责任编委: 李登峰.

作者简介: 王嵩华 (1977-), 女, 讲师, 博士, 从事供应链风险、决策理论与方法的研究; 朱建军 (1976-), 男, 教授, 博士生导师, 从事群决策理论与方法、灰色系统理论等研究.

†通讯作者. E-mail: 543973824@qq.com.

来获取问题的最优解;文献[6]构建了活动重叠模式下的期望工期最小化的优化调度模型,结合DSM设计结构矩阵思想,分析活动重叠模式对缩短项目工期的影响.现有针对项目管理统筹优化模型构建的研究中,文献[7-9]均给定了项目中各活动的时间以便于进行优化排程.然而,在管理实践中项目管理者在执行初期,由于项目的复杂性和有限的信息,往往只能估计各活动大约完成的时间以及项目整体的完工要求.项目活动时间不确定情景下资源的优化调度问题可以看成是对经典RCPSP问题的扩展.

GERT(Graphic evaluation and review technique)在表征活动间复杂的逻辑关系、活动过程中各种不确定性等方面具有较强的适应能力和描述能力,因而在项目时间规划、资源优化配置、流程优化等方面得到了广泛的应用. GERT相关研究大致可归成3类:第1类是GERT网络的现实应用,如文献[10]基于应急抢险过程背景,建立了一种综合考虑灾害自身演化过程及外界相互作用关系的GERT网络模型;文献[11]采用GERT将再制造运作过程表征为随机网络的一个预测模型,以预测产品回收的数量、时间和几率、可回收的零部件/物料及处置.第2类是考虑不确定信息的GERT拓展模型,如文献[12]研究了输出结果受控情景下的项目管理优化方法,将灰数与GERT网络相结合,能较好地考虑网络传递过程中信息的不确定性;文献[13]针对能源生产和供应部门与其他部门的价值传递过程,提出了一种考虑多信息参量传递的GERT网络模型;文献[14]结合STA(成功树分析)法和GERT网络,构建了一种基于双网络的复杂产品制造服务质量评价模型,为复杂产品质量评价提供了一种有效的方法.第3类是GERT网络的参数优化,较为典型的成果有:文献[15]提出了一种基于GERT模型和设计特征函数的数值解,利用反演公式推导出产品开发完成时间的概率分布;文献[16]考虑信息传递的复杂性,研究了并行框架下的新产品开发资源调度问题;文献[17]构建了以特征函数和传递概率为传递函数的CF-GERT网络模型,并提出了对应的矩阵式表示方法,可推导出时间等概率密度函数.

在GERT网络的应用过程中,项目完工时间和费用的确定是关键问题.但目前研究存在较大的局限性,主要体现在两个方面:一是对项目初始规划时各活动时间不确定性缺乏深入研究,关于项目中各活动时间与资源的投入对完工概率的影响分析研究不够;二是运用GERT进行网络分析时,大多数研究均给定具体时间,针对总时间受限情景下的各活动时间规划

研究不足.针对现有研究的不足,本文提出一种考虑“时间-资源”的大型客机协同研制GERT网络优化方法.本文主要的创新之处为:1)建立基于GERT网络的活动时间、资源投入与完工概率的综合分析模式,用区间变量表征项目规划过程中各部分活动时间的不确定性,探析活动中时间与资源投入对完工概率造成的影响,并构建数学方式加以刻画;2)建立了考虑活动关系、时间、资源投入和实现概率等多参数的GERT网络优化模型,以项目完工时间最短为目标,构建总完工时间、资源、实现概率受限情景下的时间规划与资源调度的优化模型,设计相应的解析算法,并以某大型客机协同研制问题为例,对项目中各活动的时间和资源进行优化,从而表明本文方法的有效性.

1 主要方法与结果

1.1 基于GERT的项目完成费用计算

GERT网络模型由箭线、逻辑节点和信息流3个要素组成.箭线由某一节点出发连接到另一节点,表示一种活动;节点是箭线之间的连接点,表示各活动之间的逻辑关系^[18-19];信息流反映网络中各活动传递参数,由于事件发生的不确定性,其传递参数按一定概率分布取不同的值. GERT网络基本构成单元如图1所示.

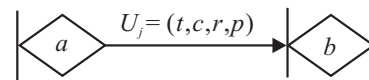


图1 GERT网络基本构成

图1中:节点 a 、 b 表示项目中活动完成状态; U 表示从节点 a 到节点 b 的信息流; t 、 c 、 r 分别表示活动 j 实现所需时间、费用、资源,且服从一定分布; p 表示当节点 a 实现时,通过时间、费用、资源等投入后活动 j 实现的概率.

定义1 复杂产品研制包含较多的项目活动,定义活动集合为 $N = \{1, 2, \dots, n\}$,活动 j 工期为 $d_j (j = 1, 2, \dots, n)$.在初期项目管理者进行规划时,仅能给出各部分活动所需完成的时间区间.因此,活动 j 的完成时间为随机变量 $t_j (j = 1, 2, \dots, n)$, $t_j \in [DEt_j, DLt_j]$. DEt_j 、 DLt_j 分别表示活动 j 最早、最迟完成时间.当项目活动时间规划完成后,可得确定性活动执行工期向量 T 为

$$T = [t_1, t_2, \dots, t_n], t_j \in [DEt_j, DLt_j]. \quad (1)$$

定义2 在复杂产品研制过程中,假设活动 j 需 K 种可更新资源,第 $k (k \in \{1, 2, \dots, K\})$ 种资源的已有可用量为 R_{jk} ,项目中各活动资源实际投入量为 R'_{jk} .区别于一般项目资源约束方式,复杂产品研制过程中,若某一活动研制过程中出现瓶颈时,则大幅

度地增加资源投入以降低该活动实现风险,即针对某一活动该资源是充沛的,但对于整个研制项目该资源是受限的.增加资源量会产生额外的费用,设每增加或减少一个单位 k 种资源,单位成本增减为 c_k .用 C_f 表示大型客机协同研制所需要的费用,则有

$$C_f = \frac{\partial M_c(S)}{\partial S} \Big|_{S=0}, \quad (2)$$

$$W_{jc}(S) = p_j M_{jc}, \quad (3)$$

$$c'_j = c_j + c_k (R'_{jk} - R_{jk}). \quad (4)$$

其中: $M_c(S)$ 、 M_{jc} 分别表示整个研制过程所需费用和活动 j 所需费用的矩母函数; $W_{jc}(S)$ 表示活动 j 的等价传递函数,包含传递概率和所需费用; c'_j 表示通过调整资源投入后活动 j 所需费用; c_j 表示初期规划时项目中各活动所需费用; S 是一个实数,即 $S \in R$.

1.2 基于GERT的项目完工概率计算

用 T_f 表示大型客机协同研制进行的时间,则

$$T_F = \frac{\partial M_T(S)}{\partial S} \Big|_{S=0},$$

$$t_j (j = 1, 2, \dots, n), t_j \in [DEt_j, DLt_j]; \quad (5)$$

$$W_{jt}(S) = p_j M_{jt}. \quad (6)$$

其中: $M_T(S)$ 、 M_{jt} 分别表示整个研制过程所需时间和单个活动 j 所需时间的矩母函数; $W_{jt}(S)$ 表示活动 j 的等价传递函数,包含传递概率和完成时间.

定义3 复杂产品研制过程中,各活动的性质通常具有两种:一是具有较高实现风险的研发类活动;二是实现风险较低的生产制造类活动.两者的区别在于,研发类活动较生产制造类活动的实现与资源投入关系更为密切,增加研发类活动中资源的投入比增加时间投入更能够提高研发活动的实现概率,生产类活动反之.设资源投入量与完工时间和研制活动实现概率关系为

$$p'_j = \begin{cases} p_j + (1 - p_j) \left(\omega_1 \frac{c'_j}{C_f} + \omega_2 \frac{t'_j}{T_f} \right), & j \in RD_j, \omega_1 + \omega_2 = 1; \\ p_j + (1 - p_j) \left(\omega_3 \frac{c'_j}{C_f} + \omega_4 \frac{t'_j}{T_f} \right), & j \in PP_j, \omega_3 + \omega_4 = 1. \end{cases} \quad (7)$$

其中: p_j 表示活动 j ($j \in \{1, 2, \dots, n\}$)的完工概率, t'_j 为调整后活动 j 的完成时间, p'_j 为调整活动资源与时间投入后的实现概率, ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、 ω_4 分别表示资源配置与完工时间对该活动实现概率的影响的属性权重,可根据历史经验并结合专家意见给出; RD_j 、 PP_j 分别表示研发类和生产制造类活动 j .

用 P_f 表示整个项目研制成功的概率,结合信号流程图原理和矩母函数,有

$$P_f = W_f(S)|_{S=0} = P_f M_f(0) =$$

$$P_f \int_{-\infty}^{\infty} e^{Sx} f(x) dx \Big|_{S=0}. \quad (8)$$

$$M_f(S) = E[e^{Sx}] = \begin{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{Sx} f(x) dx, & \text{连续随机变量;} \\ \sum_{\text{所有}x} e^{Sx} p(x), & \text{离散随机变量.} \end{cases} \quad (9)$$

其中: W_f 、 M_f 分别表示项目整体的等价传递函数和矩母函数; x 为随机变量,表征网络中传递的时间流、费用流.存在两种情况:当随机变量 x 有界时,式(9)中的数学期望 $E[e^{Sx}]$ 对于所有 S 均存在;若 x 无界,则对于某些 S , $E[e^{Sx}]$ 存在;而当 S 取其他数值时数学期望可能不存在;但 $S = 0$ 时, $M_f(S) = E[e^{Sx}] = 1$ 必定存在.

1.3 优化目标及模型构建

项目管理领域中,针对项目中各活动时间规划与资源投入研究较多,但仍有不足,表现在两个方面:1) 大多数研究均给定各部分活动时间并构建优化模型,通过改变各活动时间实现对项目整体完工时间的优化调整,然而,在实践中,项目管理者只能给出项目整体完工时间和各活动的大致分布范围;2) 较少探析项目中各活动时间与资源投入对各活动完工概率的影响,增加时间与资源投入能够一定程度提高完工概率,减少返工出现的可能性,从而减少项目完工时间.

考虑到复杂产品研制过程中,针对某一活动该资源是充沛的,但着眼于整个研制项目,该资源是受限的这一特点,本文以项目整体完工费用最低为优化目标,在总时间、总费用、完工概率受限情景下,考虑活动中资源与时间的投入对完工概率的影响,实现对复杂产品研制项目中时间-费用-资源优化调整.项目活动时间与资源优化调度问题优化模型表述如下:

$$\min C_f. \quad (10)$$

$$\text{s.t. } T_f = \frac{\partial M_T(S)}{\partial S} \Big|_{S=0} \leq T_l; \quad (11)$$

$$C_f = \frac{\partial M_c(S)}{\partial S} \Big|_{S=0} \leq C_{\max}; \quad (12)$$

$$p_f = W_f(S)|_{S=0} \geq p_{\min}; \quad (13)$$

$$P'_j = \begin{cases} p_j + (1 - p_j) \left(\omega_1 \frac{c'_j}{C_f} + \omega_2 \frac{t'_j}{T_f} \right), & j \in RD_j; \\ p_j + (1 - p_j) \left(\omega_3 \frac{c'_j}{C_f} + \omega_4 \frac{t'_j}{T_f} \right), & j \in PP_j; \end{cases} \quad (14)$$

$$\omega_1 + \omega_2 = 1, \omega_3 + \omega_4 = 1; \quad (15)$$

$$M_f(S) = E[e^{Sx}] = \begin{cases} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{Sx} f(x) dx, & \text{连续随机变量;} \\ \sum_{\text{所有} x} e^{Sx} p(x), & \text{离散随机变量;} \end{cases} \quad (16)$$

$$c'_j = c_j + c_k(R'_{jk} - R_{jk}); \quad (17)$$

$$c'_j, t'_j, R'_{jk}, t'_j \in [EDt_j, DLt_j], j \in N. \quad (18)$$

上述优化模型中:目标(10)为最小化项目完工费用;式(11)表示项目整体完工时间受限;式(12)表示总资源投入受限;式(13)表示因复杂产品研制对成功要求较高,故总体完工概率受限;式(14)和(15)分别为研发类活动与生产制造类活动完工概率和属性权重;式(16)为随机变量的矩生成函数;式(17)为资源投入与项目费用的函数关系;式(18)为调整后项目中各活动费用、时间与资源投入。模型的决策变量是 t'_j 和 R'_{jk} ,即通过调整项目中各活动时间与资源投入,实现项目完工费用最小的目标。

从模型来看,具有以下特点:1)模型的输入和输出是两组高维度的决策变量 c'_j 和 R'_{jk} ,当项目中包含的活动越多时,模型维度越高,针对每一个活动 j 的完工时间 t'_j 是属于 $[DEt_j, DLt_j]$ 中的随机变量;2)活动时间与费用的投入影响着该活动完工概率,而且影响着项目整体的完工时间、完工费用以及实现概率,各变量间的关联性较强且具有复杂的关系。

1.4 GERT的差分进化算法设计

资源受限情景下的项目资源调度是NP-hard问题,运用传统的优化算法并不能得到理想的结果^[20]。本文中当项目中活动较多时,决策变量 c'_j 和 R'_{jk} 维数较高,且项目中各活动时间和费用投入影响着活动本身的完工概率,也影响着项目整体的完工时间、费用及完工概率,各因素间关联性较强。考虑到差分进化算法在解决高维问题时收敛速度快、结果精确,且差分进化算法一定程度上考虑了多变量间的相关性,因此,本文采用具有解决组合优化问题突出能力的差分进化算法求解此问题。差分进化算法是1995年提出的一类求解连续全局优化问题的演化算法,基本思想是运用当前种群个体的差来重组得到中间个体,运用父子混合个体适应值竞争得到新一代个体^[21]。针对本文构建的优化模型,算法求解步骤如下。

Step 1:个体编码并初始化。确定种群规模NP、杂交概率 $CR \in [0, 1]$ 等差分进化算法基础参数,依种群规模随机生成时间向量和资源向量 $T^0 = (T_1^0, T_2^0, \dots, T_{NP}^0)$, $R^0 = (R_1^0, R_2^0, \dots, R_{NP}^0)$ 。考虑到项目由 N 个活动构成,因此 T_i^0 、 R_i^0 为 N 维向量,分别对应 N

个活动的时间和资源投入。时间向量与资源向量一一对应,构成全部的NP个初始随机个体,所有个体的集合构成初始种群。将初始种群中最优个体的时间和资源投入分别记为 T_{best}^0 、 R_{best}^0 ,置 $t = 0$ 。

Step 2:变异个体生成。为了避免算法在循环迭代过程中陷入局部最优,并使算法的搜索范围覆盖整个实数域,采用差分策略生成变异个体。根据变异个体的生成方法不同,存在不同的差分进化新个体生成策略。以 T_i^t 为例说明本文变异个体的生成方式, R_i^t 与之类似。对当前种群中每一个个体的时间投入(资源投入)作如下操作:

$$V_i^t = T_i^t + \alpha(T_{\text{best}}^t - T_i^t) + \beta(T_{r_1}^t - T_{r_2}^t), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (19)$$

其中: T_i^t 为待变异个体; T_{best}^t 为当前种群中适应度最好的个体的时间投入向量; $T_{r_1}^t$ 、 $T_{r_2}^t$ 为从当前种群中随机选择个体的时间投入; $\alpha \in (0, 1)$ 为附加控制变量,通过引入当前最好的个体向量,以加速算法向最优解收敛的速度; $\beta \in 0, 1$ 为缩放因子,通过对新生成的个体增加随机扰动,以增加种群的多样性,避免算法收敛于局部最优解。通过多次实验对比,设定 $\alpha = \beta = 0.5$ 。

Step 3:边界条件处理。根据本文问题设定,项目中各活动 t'_j 应为属于 $[DEt_j, DLt_j]$ 的随机变量,但根据本文变异个体生成算法,新产生的元素参数值 t'_j 可能超出边界范围 $[DEt_j, DLt_j]$,此时解为不可行的。因此,本文需进行边界情况的处理,将不符合边界约束的时间投入(资源投入)用在可行域中随机产生的数值代替。

Step 4:实验个体生成。差分进化算法一方面能够保证算法向最优解收敛,另一方面又避免算法过早收敛于局部最优解,这得益于其实验个体生成策略,实验个体的作用在于保留优良个体并增加种群多样性。采用随机选择的方式确定将原始个体作为实验向量,仍将原始个体的变异个体作为实验向量。将种群中的第 j 个个体的时间投入记为 T_i^t ,与其对应的变异个体的时间投入记为 V_i^t ,通过随机选择产生实验个体 U_i^t ,每个个体的资源投入实验向量生成方式与之类似。本文的实验向量生成公式如下:

$$U_i^t = \begin{cases} V_i^t, & \text{rand}(i) \leq CR \\ T_i^t, & \text{else} \end{cases}; i = 1, 2, \dots, N. \quad (20)$$

其中:rand为 $[0, 1]$ 之间均匀分布的随机数, $CR \in [0, 1]$ 。较小的CR能够增加原始时间(资源)向量作为实

验向量的可能性,从而使得算法的收敛速度加快;较大的CR能够增加变异时间(资源)向量作为实验向量的可能性,从而增强算法的全局搜索能力;但若CR过大,则会导致差分进化算法退化为随机搜索.因此,设置合适的CR是影响算法效果的关键因素.现实应用中,可以通过设置不同的CR比较解的优劣来确定CR的最终取值,本文对比多次实验,取 $CR = 0.1$ 以控制实验向量来自随机变异向量的概率.

Step 5: 种群选择操作.经典差分进化算法采用贪婪策略作为子代个体的选择方法,因此易陷入局部最优.区别于经典差分进化算法的选择策略,本文采用轮盘赌法以增强算法的全局搜索能力.由于项目管理领域中常用完工时间的方差平方根与期望的比值作为完工时间的风险度函数,本文取适值函数为

$$F(c_i) = \frac{1}{\sqrt{V(C_{f_i})}} = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{\frac{\partial^2 M_{c_i}(S)}{\partial S^2} \Big|_{S=0} - \left(\frac{\partial M_{c_i}(S)}{\partial S} \Big|_{S=0}\right)^2}}} \quad (21)$$

在适值函数构建方面,多数文献通常以优化目标的倒数作为适值函数.本文在适值函数构建方面,既考虑了项目整体的完工费用,也考虑了实现该费用的概率.因此,采用此适值函数能够综合衡量项目的完工费用和实现概率,具有较高的现实意义.子代种群的选择方法为:根据上述适应度函数计算原始个体和由原始个体生成的实验个体的适应度,采用轮盘赌策略,使得适应度值较大的个体有较大可能性进入子代.对种群中个体的实验向量采用轮盘赌策略两两比较,确定子代种群.

Step 6: 判断是否满足终止条件.算法停止条件为:经若干次迭代(如20次),如果种群中最优解不再改进,则迭代停止.同时,设置最大迭代次数(如1000次)以保证算法在有限时间内输出解.当满足算法停止条件时,输出 T_{best}^{t+1} 为近似解,否则转入Step 2.

2 案例分析

2.1 案例背景及数据提炼

大型客机属于极端复杂的工业产品,包含数以百万计的零部件,虽然目前全球民用大型客机的研制属于寡头垄断局面,但随着国际合作的不断加深,企业分工的日益细化,大型客机已形成了以主制造商为核心的主系统承包商、分系统承包商和部件供应商的协同研制产业链.此外,主制造商越来越倾向于将部分研制工作外包出去(如波音、空客等),转而抓住更具有核心价值的控制设计、系统集成、适航取证

等环节,基于知识产权把控整个民用航空飞机研制的发展.部分研制工作的外包可以较大地分散研制风险,但某种程度上增大了供应商之间协同一致的难度.如波音787飞机交付时的5次延迟,其根源在于供应商延期与设备对接不一致.大型客机协同研制具有周期长、研制过程复杂、供应链协调难度大的特点,其对飞机的安全性、数据的准确性和有效性、整个研制流程的可追溯性和可控性的要求都非常高.因此,合理的资源分配与时间规划对大型客机研制尤为重要,对研制流程的优化研究将有利于我国大型客机研制项目的顺利实施,也可为相关复杂产品的研制提供参考.

大型客机协同研制流程主要包括立项论证阶段、可行性论证阶段、预发展阶段、工程发展阶段、产业化发展阶段、交付培训阶段等.以工程发展阶段为例,其主要工作是将飞机从图纸变成实物,包含详细设计、全面试制和试飞取证等3个阶段.大型客机的全面试制包括各部件制造与转运、机体对接、部件组装、系统集成、各类试验、喷漆下线等一系列项目活动.本文重点分析大型客机全面试制部分流程的原因在于,此部分完成后,大型客机试飞的原型机已研制完成,能够衡量大型客机是否超重以及延期完工时间,是整个大型客机研制过程中的里程碑事件.因此,基于相关的调研,本文构建大型客机全面试制的GERT网络模型,如图2所示.

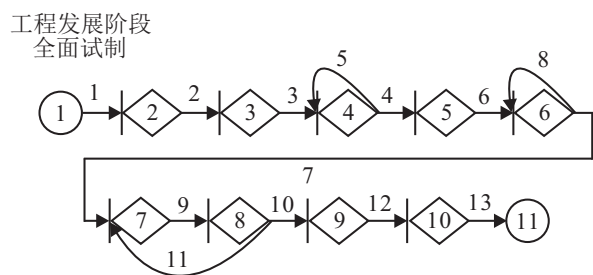


图2 大型客机全面试制GERT网络模型

以大型客机全面试制的里程碑事件为导向,有针对性地优化项目活动能够大幅度提高企业的生产效率和经济效益.大型客机协同研制参数的仿真数据如表1所示.

表1中包括了大型客机全面试制项目中的主要活动,如各部分制造、大部件转运、机翼对接、安装起落架、气密淋雨试验等一系列活动,下文以系统集成为例说明表1数据的具体含义(其他数据类似). P_j 表示系统集成成功的概率; t_j 表明该活动需要的时间大约在2~3个月之间,且时间方差为5,属于正态分布类型; c_j 表示该活动所需费用10百万元,且费用方

表1 大型客机协同研制各活动参数表

活动名称	P_j	分布类型	时间 t_j /月		费用/百万		A资源投入
			[DEt _j , DLt _j]	方差	c_j	方差	
各部分制造	0.99	正态分布	[2,3]	5	100	6	50
大部件转运	1	常数	[1,2]	-	5	-	14
机翼对接、安装起落架	1	常数	[1,2]	-	10	-	30
气密淋雨试验	0.97	正态分布	[0.5,1.5]	2	8	9	18
气密性检查、修复	0.03	正态分布	[0.5,1.5]	3	12	6	12
隔音棉/导管/线缆安装	1	常数	[1,1.5]	-	6	-	10
系统集成	0.96	正态分布	[2,3]	5	10	8	24
重新调试	0.04	正态分布	[1,3]	8	6	9	20
APU/发动机安装	1	常数	[1,1.5]	-	4	-	21
过程试验	0.95	正态分布	[2,4]	10	23	5	40
集成检验	0.05	正态分布	[1,3]	12	12	6	15
静力试验	0.92	正态分布	[0.5,1.5]	13	32	4	25
喷漆/总装下线	1	常数	[1.5,2.5]	-	5	-	10

差为8,属于正态分布类型;初始资源投入量 R_{jk} 为24个单位. 大型客机全面试制项目资金约束为2.5亿元,目标完成时间不超过25个月,实现概率不低于92%,每增加一个单位A资源,费用增加200万元. 结合专家及历史经验,属性权重 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 和 ω_4 分别取0.6, 0.4, 0.4 和 0.6. 需要说明的是,图2和表1的数据源自于相应的调研并进行了数据预处理,体现了一定的实际规律,主要说明方法的应用过程和有效性.

2.2 计算结果

根据以上数据,对于全面试制阶段,在不增加资源投入的前提下分别以各活动最长完成时间、中值、最早完成时间进行计算,此时项目活动完成所需时间、完工概率如下:

$$T_{\max} = [3, 2, 2, 1.5, 1.5, 1.5, 3, 3, 15, 4, 3, 1.5, 2.5] T_{f_{\max}} = 27.39, P_{f_{\max}} = 92.18 \%;$$

$$T_{\text{mean}} = [2.5, 1.5, 1.5, 1, 1, 1.25, 2.5, 2, 1.25, 3, 2, 1, 2] T_{f_{\text{mean}}} = 22.16, P_{f_{\text{mean}}} = 92.11 \%;$$

$$T_{\min} = [2, 1, 1, 0.5, 0.5, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 0.5, 1.5] T_{f_{\min}} = 17.94, P_{f_{\min}} = 92.03 \%.$$

依据本文所构建的GERT网络优化模型,采用差分进化算法进行寻优求解,反解出网络中各活动时间与资源配置. 通过对项目中各活动时间与资源进行重新规划与配置,实现对项目整体的优化调整. 优化后各活动时间规划及资源投入 T 和 R 如下(见图3):

$$T = [2.5, 1.44, 1.16, 1.21, 0.63, 1.39, 2.90, 1.07, 1.48, 3.26, 1.25, 1.08, 1.78],$$

$$R = [2.94, 1.70, 2.22, 2.84, 1.35, 2.09, 1.66, 1.93, 1.31, 3.26, 1.25, 1.80, 1.79].$$

此时项目整体的完工时间、费用及实现概率为

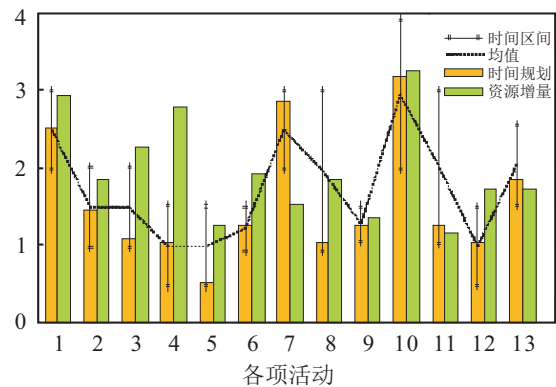


图3 大型客机全面试制各活动时间及资源增量

$$T_f = 23.59(\text{月}), P_f = 92.18 \%,$$

$$C_f = 239.70(\text{百万元}).$$

通过以上对比可以发现,反演出大型客机全面试制项目中各部分活动的时间规划与资源增量可在总资源、时间约束的情况下实现对总费用的降低,完工概率的提高. 图3中:从时间规划角度,活动7和活动10反演出的项目活动时间超出均值较多,原因在于系统集成与过程试验较其他活动更为重要,增加其时间投入能够更大地优化项目整体;从资源投入增量角度,活动1、活动4和活动10的增量显著多余其他活动,表明总资源受限情景下增加此类活动的资源投入,可以使得项目整体更优.

2.3 方法比较

为进一步验证本文所考虑优化模型对于求解此类问题的优越性,将本文的优化方法与文献[5]和文献[6]的方法进行比较. 文献[5]对项目工期和成本进行权衡,并以工期和成本为优化目标,建立资源约束情景下的双目标优化模型;文献[6]考虑活动重叠模式与资源约束下的项目优化调度,并以最小化研发项目期望工期为目标构建优化模型. 采用本文数据进

行方法比较,结果如表2所示.

表2 不同优化模型构建方法结果对比

方法	工期/月	费用/百万元	完工概率/%
本文	23.59	239.79	92.18
文献[5]	24.15	243.26	-
文献[6]	22.41	252.31	-

文献[5]对工期和成本进行权衡,构建双目标优化模型,但得到的结果不甚满意.原因在于多目标规划求解过程中极易陷入局部最优解,且当活动较多时,无法得到帕累托最优解.文献[6]考虑活动重叠模式下的项目调度优化,确实能够一定程度地缩短项目周期,但提高了项目所需费用,重叠执行的项目活动,资源增量未必与费用增量呈线型关系.此外,文献[5]和文献[6]均没有考虑时间与资源投入对各活动完工概率产生的影响.本文基于GERT网络计算项目完工时间、费用及实现概率,因此,在处理逻辑关系更为复杂的项目时,计算项目整体完工时间、费用及实现概率等方面具有一定的优越性.

2.4 参数分析

本文以项目整体所需费用最低为目标,模型中时间约束 T_f 、资源约束 C_f 及属性权重 $\omega_1 \sim \omega_4$ 会对反演出项目中各活动的时间与资源投入及项目整体工期与完工概率产生影响.假定其他参数不变,改变其中某一参数如时间、资源约束,得到如表3所示结果.

表3 不同时间和资源约束下的项目完工工期、费用及概率

时间约束/月	工期/月	费用/百万元	完工概率/%
21	20.85	246.78	91.23
23	22.67	242.64	91.65
25	23.59	239.79	92.18
29	24.24	238.56	92.16
31	24.37	238.56	92.20

资源约束/亿元	工期/月	费用/百万元	完工概率/%
2.3	24.42	224.18	91.96
2.4	24.01	232.48	92.03
2.5	23.59	239.79	92.18
2.6	23.35	241.67	92.21
2.7	23.26	242.42	92.24

对表3的结果分析其趋势及原因如下:

1) 由表3可知,当不断放宽项目时间与资源约束时,项目整体的完工概率不断增大.因为对项目某个活动时间或资源投入的增多,可以影响该活动的实现概率,从而影响项目整体的完工概率.

2) 当时间约束由21个月逐步增加至31个月时,可以发现项目工期变大,完工费用变小.因为随着时间约束的放大,项目中各活动单位时间价值变小,从而使得投入更多的时间以减少项目资源投入.从变

化趋势来看,当时间约束增大到一定程度时,项目工期与费用变化幅度越来越小,原因在于整体的工期已经逐步趋向于无约束状态,因此,项目工期和完工费用将会趋向于某一固定值.

3) 当资源约束由2.3亿元逐步提高至2.7亿元时,项目工期显著缩短并逐步趋于稳定,项目费用则反之.因为当资源约束放宽时,项目中各活动可以投入更多的资源以提高完工概率.从变化趋势来看,当资源约束放大到一定程度时,项目工期与费用变化幅度越来越小,原因在于资源投入已经饱和,过多的资源投入并不会对项目工期与完工概率产生较大影响.

3 结论

本文以项目完工费用最低为目标,考虑项目活动中时间与资源投入对活动实现概率的影响,研究了如何在各活动完工时间不确定,总时间、费用、完工概率约束情景下的时间规划与资源优化配给问题.考虑到GERT网络在表征活动间复杂的逻辑关系、活动过程中各种不确定性具有较强的适应能力和描述能力,本文采用GERT网络表征复杂的项目活动,并以区间数的形式描述项目中各活动时间的不确定性;以总体完工费用最低为目标,构建各活动时间具有不确定性且时间与资源投入影响活动实现概率的GERT网络模型;基于模型的特点,设计了问题求解的差分进化启发式算法,以费用最低为目标,总费用、时间、完工概率为约束,反演出项目中各活动时间规划和资源增量.最后,以大型客机全面试制部分流程为例对研究内容进行了验证说明.结果表明,采用本文方法能够在总资源受限情景下,识别出项目中影响整体的关键活动,并通过合理规划项目活动的时间与资源配给,提高项目完工概率,且所需费用最小化.本文工作可为相关决策者提供参考建议.

参考文献(References)

[1] 马国丰, 顾凌赞, 艾琪. 项目多资源均衡——投资成本最小的混合整数线性规划[J]. 系统管理学报, 2015, 24(6): 842-846.
(Ma G F, Gu L Y, Ai Q. Multiple resource leveling in a project: A mix-integer linear programming for minimizing the investment cost[J]. J of Systems & Management, 2015, 24(6): 842-846.)

[2] Schutt A, Feydy T, Stuckey P J, et al. Solving RCPSP/max by lazy clause generation[J]. J of Scheduling, 2013, 16(3): 273-289.

[3] Ballestín F. When it is worthwhile to work with the stochastic RCPSP?[J]. J of Scheduling, 2007, 10(3): 153-166.

[4] Damay J, Quilliot A, Sanlaville E. Linear programming

- based algorithms for preemptive and non-preemptive RCPSP[J]. *European J of Operational Research*, 2007, 182(3): 1012-1022.
- [5] 谢芳, 徐哲, 于静. 柔性资源约束下的项目调度问题双目标优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(3): 674-683.
(Xie F, Xu Z, Yu J. Bi-objective optimization for the project scheduling problem with variable resource availability[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2016, 36(3): 674-683.)
- [6] 于静, 徐哲, 谢芳. 活动重叠模式与资源约束下的项目调度优化[J]. *管理科学学报*, 2017, 26(9): 36-45.
(Yu J, Xu Z, Xie F. Project scheduling optimization with overlapping modes and resource constraints[J]. *J of Management Sciences in China*, 2017, 26(9): 36-45.)
- [7] 王海鑫, 王祖和, 温国锋, 等. 自适应粒子群算法求解资源受限多项目调度问题[J]. *管理工程学报*, 2017, 31(4): 220-225.
(Wang H X, Wang Z H, Wen G F, et al. Resource constrained multi-project scheduling based on adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. *J of Industrial Engineering/Engineering Management*, 2017, 31(4): 220-225.)
- [8] 李迁, 张怀明, 丁翔. 基于计算实验的资源受限多项目调度策略优化[J]. *系统管理学报*, 2018, 27(1): 168-175.
(Li Q, Zhang H M, Ding X. Resource-constrained multi-project scheduling optimization-based on a computational experiment analysis[J]. *J of Systems & Management*, 2018, 27(1): 168-175.)
- [9] 崔南方, 梁洋洋. 基于资源流网络与时间缓冲集成优化的鲁棒性项目调度[J]. *系统工程理论与实践*, 2018, 38(1): 102-112.
(Cui N F, Liang Y Y. Robust project scheduling based on the integrated optimization between resource flow network and time buffers[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2018, 38(1): 102-112.)
- [10] 杨保华, 方志耕, 刘思峰, 等. 基于GERT网络的应急抢险过程资源优化配置模型研究[J]. *管理学报*, 2011, 8(12): 1879-1883.
(Yang B H, Fang Z G, Liu S F, et al. Optimal resources allocation model for emergency rescue process based on the GERT network[J]. *Chinese J of Management*, 2011, 8(12): 1879-1883.)
- [11] Zhou L, Xie J P, Gu X Y, et al. Forecasting return of used products for remanufacturing using graphical Evaluation and review technique(GERT)[J]. *Int J of Production Economics*, 2016, 181(4): 315-324.
- [12] 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, 34(4): 112-119.
(Geng R, Zhu J J. Optimization model for the joint of time and probability under the controlled result of the GERT network[J]. *Systems Engineering*, 2015, 34(4): 112-119.)
- [13] 郭本海, 方志耕, 俞斌, 等. 基于能效视角的主导产业选择多参量GERT网络模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(5): 944-953.
(Guo B H, Fang Z G, Yu B, et al. Multi-parameter GERT network model of leading industry choice based on energy efficiency perspective[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2011, 31(5): 944-953.)
- [14] Xu R T, Fang Z G, Sun J Y. A grey STA-GERT quality evaluation model for complex products based on manufacture-service dual-network[J]. *Grey Systems: Theory and Application*, 2014, 4(2): 195-206.
- [15] Tao L, Wu D, Liu S, et al. Schedule risk analysis for new-product development: The GERT method extended by a characteristic function[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 167(6): 464-473.
- [16] Nelson R G, Azaron A, Aref S. The use of a GERT based method to model concurrent product development processes[J]. *European J of Operational Research*, 2015, 250(2): 566-578.
- [17] 陶良彦, 刘思峰, 方志耕, 等. 以特征函数为传递参数的CF-GERT及其矩阵法求解[J]. *系统工程理论与实践*, 2018, 38(2): 509-521.
(Tao L Y, Liu S F, Fang Z G, et al. CF-GERT model conveying characteristic function and its matrix solution[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2018, 38(2): 509-521.)
- [18] Pich M T, Loch C H, Meyer A D. On uncertainty, ambiguity, and complexity in project management[J]. *Management Science*, 2002, 48(8): 1008-1023.
- [19] Leon H C M, Farris J A, Letens G, et al. An analytical management framework for new product development processes featuring uncertain iterations[J]. *J of Engineering and Technology Management*, 2013, 30(1): 45-71.
- [20] 王海燕, 赵燕伟, 王万良, 等. 两级差分进化算法求解多资源作业车间批量调度问题[J]. *控制与决策*, 2010, 25(11): 1635-1644.
(Wang H Y, Zhao Y W, Wang W L, et al. New parallel algorithm based on DE for batch splitting job shop scheduling under multiple-resource constraints[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(11): 1635-1644.)
- [21] 胡蓉, 钱斌. 一种求解随机有限缓冲区流水线调度的混合差分进化算法[J]. *自动化学报*, 2009, 35(12): 1580-1586.
(Hu R, Qian B. A hybrid differential evolution algorithm for stochastic flow shop scheduling with limited buffers[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(12): 1580-1586.)

(责任编辑: 李君玲)