

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

陶良彦¹, 刘思峰^{1,2}, 方志耕¹, 吴利丰¹, 姜志平¹

(1. 南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 210016; 2. 德蒙福特大学 计算智能研究中心, 莱斯特 LE19BH)

摘要: 针对复杂产品研制进度规划中各级供应商与主制造商之间复杂的工作联系和博弈关系, 基于复杂产品多层次研制网络, 构建复杂产品研制多层次GERT网络模型, 求解产品研制总进度与各级供应商进度的函数关系. 进而分析博弈主体之间帕累托均衡、纳什均衡等多种均衡关系, 建立进度规划的超冲突均衡博弈模型. 通过算例表明了所提出方法的有效性和实用性.

关键词: 复杂产品; 进度规划; 超冲突均衡博弈; 多层次GERT模型

中图分类号: C935; F224.32

文献标志码: A

“Super-conflict equalization” game model for complex product development scheduling based on multi-level GERT

TAO Liang-yan¹, LIU Si-feng^{1,2}, FANG Zhi-geng¹, WU Li-feng¹, JIANG Zhi-ping¹

(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Centre for Computational Intelligence, De Montfort University, Leicester LE19BH, UK. Correspondent: TAO Liang-yan, E-mail: lytao@nuaa.edu.cn)

Abstract: Aiming at the complex working contacts and game relations between the main manufacturers and suppliers in the process of scheduling for complex product development, a multi-level GERT model is constructed based on the multi-level development network of the complex product, finding the functional relationship between the overall schedule and various suppliers schedule. By further analyzing the equilibrium relationships of game-agent, such as the Pareto equilibrium, Nash, and others, “super-conflict equilibrium” game model is established for schedule planning. Finally, a numerical example is utilized to illustrate the effectiveness and practicality of the proposed method.

Key words: complex product; schedule planning; “super-conflict equalization” game; multi-level GERT model

0 引言

在市场竞争日益激烈的当下, 进度延误往往带来市场份额减少、产生大量违约金等严重后果, 因此进度控制备受生产企业的关注. 然而, 进度规划是进度控制的基础, 科学合理的进度规划是签订合同的必要条件. 学术界针对进度规划问题已进行了大量卓有成效的研究, 取得了大量的研究成果. 概括而言有以下4个方面的内容.

1) 确定性的进度规划问题. 此部分研究的重点是资源约束型项目进度问题(RCPSP), 主要指在满足

资源约束条件下寻求最小完成时间等目标. Weglarz等^[1]在其综述性文章中提出RCPSP包含4个部分: 资源、活动、目标和进度安排, 并分别对这4部分的种类和内涵进行了详细的分析. 在项目管理软件包中, 通常使用资源平衡的方法处理RCPSP中的资源冲突问题. Kastor等^[2]研究了不同资源平衡工具的有效性问题. 由于RCPSP模型的求解是一个NP-hard问题, 学术界基于遗传算法和神经网络等设计了若干算法^[3-4]. 张静文等^[5]针对项目进度中的离散时间-费用决策问题, 建立了优化模型优选成本符合要求的进度安排方

收稿日期: 2013-08-18; 修回日期: 2014-03-16.

基金项目: 欧盟第7研究框架玛丽居里国际人才引进计划 Fellow 项目(FP7-PIIF-GA-2013-629051); “大型飞机”国家科技重大专项(2009ZX11002); 国家社会科学基金重大招标项目(10zd&014)、重点项目(12AZD102); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(NP2014105); 江苏省科技思想库项目(BR2013075); 江苏省高等学校哲学社会科学重点研究基地项目(2014JDXM015); 国家级教学团队基金项目(10td128).

作者简介: 陶良彦(1988-), 男, 博士生, 从事复杂装备研制管理的研究; 刘思峰(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 从事灰色系统理论、复杂装备研制管理等研究.

案,并设计了遗传算法进行求解.杨建国^[6]采用工作分解结构(WBS)作为工程系统模型,以相应的活动树作为计划总体模型,缺点是各活动的逻辑关系不清晰.考虑到资金的时间价值,苏菊宁等^[7]以净现值最大化为优化目标,建立了基于工程款支付进度的动态工期优化模型.

2) 不确定性的进度规划问题.在项目执行过程中,常会受到前期工期估算不准、资源不可获得和材料供应延误等各种不确定事件的影响,这导致确定性的进度规划方法不能反映实际情况,最终由于需要重新规划等原因而增加项目成本.针对此类问题,学者重点研究了 5 种方法^[8]:模糊型进度规划、随机型进度规划、稳健型进度规划、反应式型进度规划和敏感性分析.Ke 等^[9]研究了一类活动持续时间是模糊数的进度规划问题,设计了期望成本最小、置信度最大等优化模型,并结合模糊仿真和智能算法为优化模型提供了混合智能算法.何正文等^[10]设计了优化模型,将时间缓冲合理地分配到工期变化性较大的活动上,以取得项目进度计划鲁棒性的最大化,并设计了禁忌搜索、多重迭代和随机生成 3 种启发式算法以求解该模型.Ke 等^[11]针对一类活动持续时间是随机数的项目进度规划问题,建立了 3 类随机模型,以在满足完工时间限制的条件下最小化成本.Bendavid 等^[12]利用相互熵法为每个活动设定门(即每个活动不能在门时间前发生),进而利用门求解随机性进度规划问题.反应型进度规划是指在基线进度计划确定后,如果遇到不确定性事件发生,则重新制定或优化基线进度计划的方法.

3) 进度优化的激励模型.在进度规划完成后,业主设立激励机制以确保项目能够按期完成.柴国荣等^[13]建立了以项目收益净现值最大化为目标函数的 Stackelberg 主从递阶决策模型,研究了各子项目适合的激励强度,以实现业主收益的最大化.丰景春等^[14]依据合同项目工期对项目群工期所产生的影响,构建了项目群视角下的合同项目工期的奖励模型.陈建华等^[15]从项目公司和承包商双层角度,建立了以项目公司为主方、承包商为从方的 Stackelberg 主从递阶收益激励模型,以对工期目标优化问题进行协调决策.

4) 复杂产品进度规划研究.目前涉及复杂产品进度规划的研究相对鲜见,主要有 DSM、分层分级制定进度计划等 2 种方法.陈建国等^[16]针对复杂工程进度计划中耦合任务多、返工风险大的管理难题,利用设计结构矩阵(DSM)描述工作依赖关系和信息传递过程,进行进度优化.陈冬宇等^[17]提出了一种基于 DSM 的复杂产品开发流程优化遗传算法,可以有效地减少返工迭代,压缩开发时间.王星汉^[18]分 4 个层次建立

了多种约束条件下的多级供应商协同项目最短工期计划制定模型.

历经几十年的发展,进度规划问题已取得了丰富的成果,但是仍不能完全满足复杂产品研制项目的进度规划需求.具体问题如下:1) 目前有关进度规划问题的研究大部分是基于 CPM 和 PERT,从单个企业视角进行研究难以描述复杂产品研制网络的分层、回路等关系.RCPSP、不确定性进度规划等研究难以直接应用于复杂产品的研制项目.2) 进度规划激励模型研究如何在既定的工期下,进一步缩短工期,一般只考虑比较简化的承包商和业主 2 层博弈关系.而复杂产品研制往往采用“主制造商-供应商”模式,拥有大量多级供应商,他们之间存在着复杂的博弈关系,仅仅利用 Stackelberg 主从递阶决策难以刻画实际情况.3) 复杂产品研制项目进度规划的研究相对匮乏,DSM 主要从信息流角度描述作业过程,其优势在于对作业进行合理排序,减少返工迭代.对复杂产品研制进度进行分层规划是比较实用的方法,但是目前的方法没有考虑到各级供应商、主制造商之间在进度规划时面临的复杂博弈关系.

本文在深入分析复杂产品研制项目主制造商-供应商多层研制网络的基础上,构建复杂产品研制多层次 GERT 网络模型,分析多层次 GERT 网络模型的性质和定理,设计其求解算法,研究研制总进度与各层级、各级供应商进度关系.在复杂产品研制进度计划制定过程中,针对主制造商、各级供应商之间由于交易、利益关系形成的复杂博弈关系,本文构建了进度规划“超冲突均衡”博弈模型,以解决复杂产品进度规划问题.

1 复杂产品进度规划的多层次 GERT 结构分析

1.1 主制造商-供应商多层次研制网络

随着科学技术的进步,社会分工日益细化,企业专业化生产程度越来越高.复杂产品呈现出技术难度大,资金投入大,研制风险高等特点.因此,企业很难独立完成其研制工作.目前,复杂产品研制往往采用“主制造商-供应商”模式.主制造商通过优选供应商,构建高效、有竞争力的供应链组织研制工作.进度规划是主制造商管理工作的重要组成部分,主制造商与供应商之间存在着紧密的交易关系、协调联系,构成了层次清晰的主制造商-供应商研制网络.

本文主要从主制造商视角出发,重点关注一级供应商.主制造商根据供应商贡献度、重要度的不同,将其一级供应商分成了不同的类别,主要有以下 3 类:

1) 战略合作伙伴供应商.此类供应商是主制造

商研制过程中密不可分的协作者,二者的合作关系秉承“风险共担,利益共享”的原则.此类供应商工期对主制造商系统集成完成时间起着决定性的影响.

2) 核心供应商.核心供应商可供选择的厂家数目较多,主制造商按照鼓励竞争的原则选择若干家同种产品供应商,制定相关原则,激励各供应商高效地提

供高质量产品.

3) 一般供应商.此类产品市场近似于完全竞争市场,主制造商采用招标的方法选择一般供应商,如标准件供应商.

复杂产品研制的网络示意图如图 1 所示.

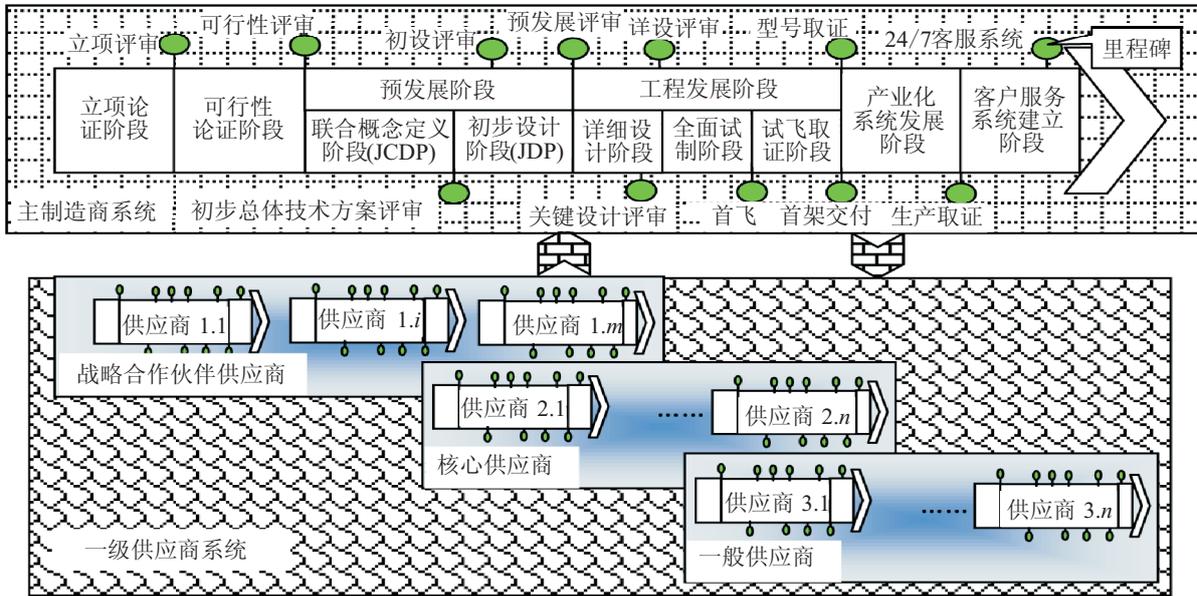


图 1 某型号大飞机的多层次里程碑协同研制网络系统

1.2 复杂产品研制的多层次 GERT 结构

考虑到技术难度、管理流程繁复等因素的影响,复杂产品的研究过程充满不确定性,因而利用随机网络描述研制过程.根据图 1 所示的研制网络,结合研制流程,首先将研制过程用广义 GAN 网络描述,然后利

用 GERT 理论,将复杂产品研制广义 GAN 网络转化为 GERT 网络.

定义 1 复杂产品研制多层次 GERT 网络结构.由复杂产品的多级、多类供应商所形成的多层研制关系网络转化而来的 GERT 网络被称为复杂产品研制多层次 GERT 结构,如图 2 所示.

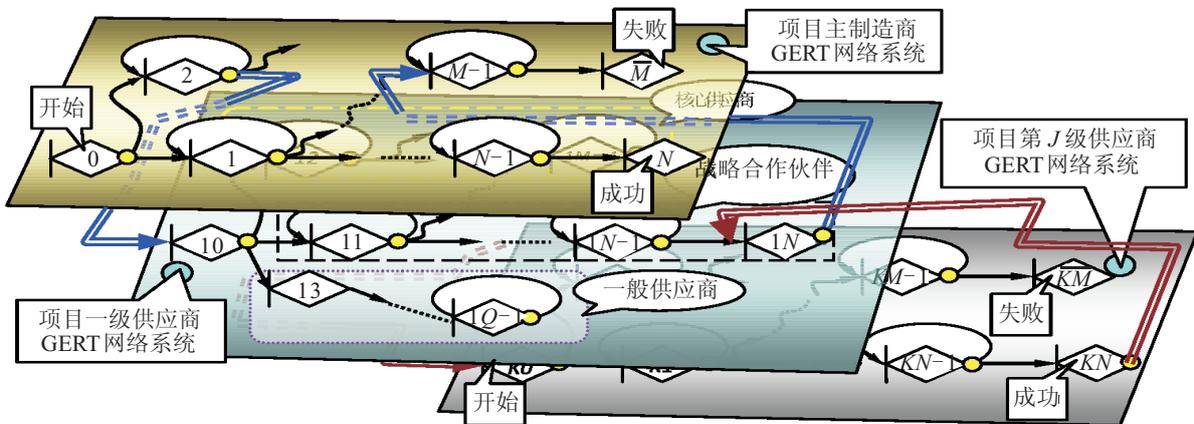


图 2 复杂产品研制多层次 GERT 模型结构

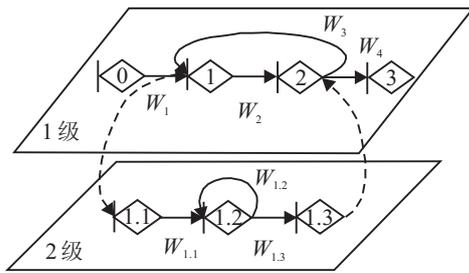
1.3 复杂产品研制的多层次 GERT 网络模型求解

从分析多层次 GERT 网络模型的特点出发,基于传统 GERT 解析算法,设计复杂产品研制多层次 GERT 网络的求解算法.

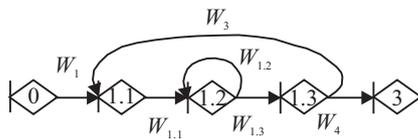
定理 1 如果存在一个多层次 GERT 网络,则可通过自底向上地求解传递函数,将多层次 GERT 网络转化为等价的单层次 GERT 网络.

证明 假设存在 2 层 GERT 网络关系,如图 3(a)

所示。



(a) 多层次 GERT



(b) 对应的单层次 GERT

图 3 GERT 网络

根据梅森公式计算 2 级 GERT 的等价传递函数

$$W_{E_2} = \frac{W_{1.1}W_{1.3}}{1 - W_{1.2}} \quad (1)$$

由图示关系可知, 2 级的活动构成了 1 级的活动 (1, 2), 二者的传递函数相等, 即 $W_{E_2} = W_2$ 。

计算 1 级的等价传递函数

$$W_{E_1} = \frac{W_1W_2W_4}{1 - W_2W_3} = \frac{W_1W_{E_2}W_4}{1 - W_{E_2}W_3} \quad (2)$$

将式 (1) 代入 (2) 可得

$$W_{E_1} = \frac{W_1W_{1.1}W_{1.3}W_4}{1 - W_{1.2} - W_{1.1}W_{1.3}W_3} \quad (3)$$

计算图 3(b) 所示的单层 GERT 网络的等价传递函数

$$W_{E_0} = \frac{W_1W_{1.1}W_{1.3}W_4}{1 - W_{1.2} - W_{1.1}W_{1.3}W_3} \quad (4)$$

比较式 (3) 和 (4) 可知 $W_{E_1} = W_{E_0}$, 说明图 3(a) 和图 3(b) 所表示的 GERT 完全等价, 即图 3(a) 所示的多层 GERT 可以转化为如图 3(b) 所示的单层 GERT 网络。□

同理可以证明 3 层及以上的多层次 GERT 可以转为单层 GERT, 即定理 1 成立。

定理 2 如果复杂产品的研制关系可以表示为如图 2 所示的多层 GERT 网络, 则顶层主制造商系统 GERT 网络的总进度 $E(T)$ 与其余层次的各级、各类供应商进度 T_j 满足关系式 $E(T) = g(T_j)$ 。

证明 由定理 1 可知, 图 2 所示的整个 GERT 系统可以等价于 1 个单层的 GERT 网络, 借助经典的 GERT 算法容易推导出等价传递函数 W_{E_0} 与下一层次的 GERT 网络传递函数 $W_{E_i}(j)$ 存在函数关系, 记为 $W_{E_0} = f(W_{E_i}(j))$, 其中 $W_{E_i}(j)$ 表示第 i 层级的第 j 个供应商工期 GERT 的等价传递函数。

利用 GERT 解析算法, 复杂产品的总研制周期的

均值 $E(T)$ 为

$$E(T) = \left. \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{W_{E_0}(s)}{W_{E_0}(0)} \right] \right|_{s=0} \quad (5)$$

由于 $W_{E_0} = f(W_{E_i}(j))$, $E(T)$ 是各下一级 GERT 网络等价传递函数 $W_{E_i}(j)$ 的函数, 记为 $E(T) = h(W_{E_i}(j))$ 。又由于 $W_{E_i}(j)$ 是下级 GERT 活动参数 (即工期 T_j) 的函数, 复杂产品的总研制周期的均值 $E(T)$ 是 T_j 的函数, 记为 $E(T) = g(T_j)$ 。□

由以上 2 个定理可知, 多层次 GERT 网络可以转化为单层次 GERT 网络。因此, 多层次 GERT 网络模型的求解思路是从底层 GERT 网络着手, 计算其等价传递函数, 并将结果代入上一层的 GERT 网络, 层层迭代, 最终计算出整个网络的传递函数。进而根据定理 2, 计算复杂产品总进度与各供应商进度及主制造商进度的关系。

2 基于复杂利益关系的研制进度规划“超冲突均衡”博弈模型

借助前一节的多层次 GERT 网络模型可以理清主制造商总进度 $E(T)$ 与各供应商工期 T_j 之间的复杂关系。在进度规划时, 为了规划整体进度, 需要确定各供应商的具体工期 T_j 。在生产实际中, 各供应商的工期 T_j 一般是在合同签订时确定的, 因此工期 T_j 是各供应商与主制造商谈判、博弈的结果。围绕工期与经费, 主制造商和不同类型的供应商出于不同的利益追求, 形成了复杂的利益博弈关系, 即“超冲突均衡”博弈, 如图 4 所示。

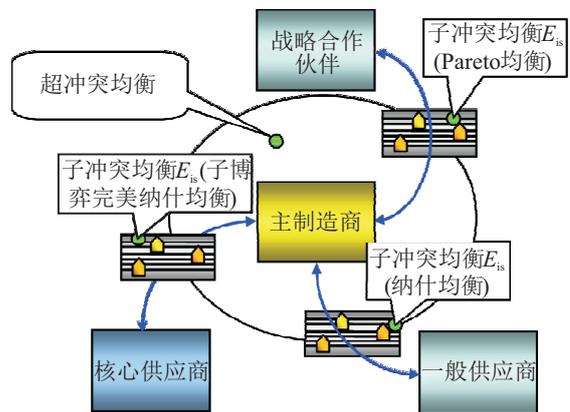


图 4 主制造商-供应商“超冲突均衡”博弈

定义 2 “超冲突均衡”博弈模型是指受多博弈主体间复杂的博弈利益关系影响所导致的 Nash 均衡、帕累托均衡等多种均衡共存的博弈模型。

定义 3 在复杂产品研制进度规划过程中, 主制造商、各级各类供应商由于地位、贡献度等差异, 追求的利益各不相同, 形成了帕累托均衡、合作博弈、纳什均衡、子博弈完美纳什均衡等多种均衡共存的博弈现象, 称之为复杂产品进度规划超冲突均衡模型。

下面将分别介绍帕累托均衡、子博弈完美纳什均衡、纳什均衡等几类主要的子博弈均衡。

2.1 主制造商-战略合作伙伴之间帕累托均衡分析

战略合作伙伴可为复杂产品主制造商带来先进技术、管理经验,并提升其核心竞争力,降低研制风险。主制造商与战略合作伙伴共享竞争优势和利益,形成长期性、战略性的协同发展关系。在这种“风险共担,利益共享”的合作背景下,主制造商和战略合作伙伴供应商不仅仅是出于个体最优考虑而追求纳什均衡,而是集体理性地追求帕累托最优。

主制造商和战略合作伙伴供应商在就工期和合同价格进行磋商时,不同的工期和合同价格给双方带来不同的效用。根据微观经济学中的交换帕累托最优相关理论,二者的帕累托均衡在契约曲线上取得,即边际替代率相等。

定义 4 主制造商的效益函数。主制造商的效益是战略合作伙伴的工期 t_{S_1} 、合同价格 H 的函数,具体形式为

$$u_M = \frac{l_1 V(t_{S_1})}{H^{r_1}}. \quad (6)$$

其中: H 为合同价格; $V(t_{S_1})$ 为主制造商对战略合作伙伴工期 t_{S_1} 的估值函数,即不同工期 t_{S_1} 对主制造商效益的影响; l_1, r_1 为相应系数。

在实际生产活动中:若供应商提前供货,则容易造成主制造商存储、保管等成本;若推后供货,则会导致整个生产进度的延误。因此,可以假设主制造商对工期的要求是适中性的,估值函数 $V(t_{S_1})$ 定义为

$$V(t_{S_1}) = \begin{cases} \frac{t_{S_1} - a}{b - a}, & a \leq t_{S_1} < b; \\ \frac{c - t_{S_1}}{c - b}, & b \leq t_{S_1} \leq c. \end{cases} \quad (7)$$

定义 5 战略合作伙伴的效益函数。战略合作伙伴的效益是合同价 H 与生产成本、总利润分成的函数,其具体形式为

$$u_S = H^{r_2} - C_1^1(t_{S_1}) + \rho \pi_M. \quad (8)$$

其中: $C_1^1(t_{S_1})$ 为战略合作伙伴的生产成本, π_M 为主制造商的总利润, ρ 为主制造商将总利润分配给战略合作伙伴的比例。

定理 3 如果主制造商和战略合作伙伴供应商的效益函数满足如下等式,则二者处于帕累托均衡:

$$\frac{\partial U_M / \partial H}{\partial U_M / \partial t_{S_1}} = \frac{\partial U_{S_1} / \partial H}{\partial U_{S_1} / \partial t_{S_1}}. \quad (9)$$

证明 由式 (6) 和 (8) 可知,主制造商和战略合作伙伴供应商的边际替代率分别为

$$\text{MRS}_{H,t_{S_1}}^M = \frac{\partial U_M / \partial H}{\partial U_M / \partial t_{S_1}}, \text{MRS}_{H,t_{S_1}}^{S_1} = \frac{\partial U_{S_1} / \partial H}{\partial U_{S_1} / \partial t_{S_1}}.$$

根据微观经济学的相关理论,当主制造商和战略合作伙伴供应商的边际替代率相等时(即 $\text{MRS}_{H,t_{S_1}}^M = \text{MRS}_{H,t_{S_1}}^{S_1}$ 时),达到帕累托均衡状态。

所以满足等式 $\frac{\partial U_M / \partial H}{\partial U_M / \partial t_{S_1}} = \frac{\partial U_{S_1} / \partial H}{\partial U_{S_1} / \partial t_{S_1}}$ 时,二者达到帕累托均衡。□

2.2 主制造商-核心供应商之间均衡分析

主制造商为了激励核心供应商提供高质量、工期优的产品,往往采用为同类零部件选择多家供应商的方法,通过订单分配,促进核心供应商相互竞争,降低缺货风险。这里有 2 个假设:质量高的核心供应商获得大订单;核心供应商之间进行 Stackelberg 博弈。本部分以 2 家同质产品供应商为例说明均衡分析的步骤。

2.2.1 主制造商策略分析

1) 主制造商根据同一部件的 2 家核心供应商的工期最大值 T_{S_2} 决定合同价格 m 。

$$m = g(T_{S_2}), T_{S_2} = \max\{T_{S_2}^1, T_{S_2}^2\}.$$

其中: $T_{S_2}^1$ 代表核心供应商 1 的工期; $T_{S_2}^2$ 代表核心供应商 2 的工期。当 $T_{S_2} < T_0$ 时, $\frac{\partial m}{\partial T_{S_2}} > 0$; 当 $T_{S_2} \geq T_0$ 时, $\frac{\partial m}{\partial T_{S_2}} \leq 0$ 。

2) 根据供应商质量的高低决定订单的数量。假设订单的总数量是 n , 大订单为 λ , 2 家供应商 S_2^1 和 S_2^2 的质量水平分别为 $Q_2^1(T_2^1)$ 和 $Q_2^2(T_2^2)$, 则 2 家供应商获得的订单数量分别为

$$O_2^1 = \lambda \delta + (n - \lambda)(1 - \delta),$$

$$O_2^2 = \lambda(1 - \delta) + (n - \lambda)\delta.$$

其中

$$\delta = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{sign}(Q_2^1 - Q_2^2);$$

$$\text{sign}(Q_2^1 - Q_2^2) = \begin{cases} 1, & Q_2^1 > Q_2^2; \\ 0, & Q_2^1 = Q_2^2; \\ -1, & Q_2^1 < Q_2^2. \end{cases}$$

质量水平 $Q(T)$ 是工期 T 的函数: 在 $T < T_1$ 时, $\frac{\partial Q}{\partial T} > 0$; 在 $T \geq T_1$ 时, $\frac{\partial Q}{\partial T} = 0$ 。这表明核心供应商的质量水平在开始阶段随着工期的增长而提高,但当工期增长到一定程度后(达到 T_1),即质量水平达到最高值 $Q(T_1)$ 时,核心供应商的质量水平不再增加。

2.2.2 核心供应商 Stackelberg 博弈分析

在主制造商确定相应规则后,核心供应商 S_2^1 和 S_2^2 根据各自的生产成本 C_2^1 和 C_2^2 进行 Stackelberg 博弈。这里假设核心供应商 S_2^1 是领导者, S_2^2 是跟随者。核心供应商的策略是在一定范围内选择交货期,以获得最大利益。博弈过程如下:

1) 领导者 S_2^1 先做出决策, 选择工期 $T_{S_2^1}$, 其决策目标函数为

$$\max d_2^1 = O_2^1(m - C_2^1(T_2^1)),$$

其中 $C_2^1(T_2^1)$ 是核心供应商 1 的生产成本和工期的函数, 可根据实际情况给出。

2) 跟随者 S_2^2 在观察到领导者的决策后, 选择自身工期 T_2^2 , 其决策目标函数为

$$\max d_2^2 = O_2^2(m - C_2^2(T_2^2)).$$

2.3 主制造商-一般供应商纳什均衡分析

一般供应商(如标准件供应商)主要采用一级价格密封招标的形式选择, 其不享受利益共享的待遇, n 家标准件供应商同时进行报价. 此类模型较为成熟, 这里选择参考文献[19]所提出的模型, 表示如下:

$$b(c) = c^u - \frac{n-1}{n}(c^u - c^l) - \varphi. \quad (10)$$

其中: c 为标准件供应商成本的估计, 服从 $[c^l, c^u]$ 的均匀分布; n 为参加投标的供应商总数; φ 为一个较小的正数, 在实际报价操作中可选择最小的报价计量单位, 例如 0.1 万元。

2.4 “超冲突均衡”博弈模型的构建

以上分析表明, 复杂产品进度规划涉及主制造商、战略合作伙伴供应商、核心供应商和标准件供应商等多方利益, 在分析复杂产品主制造商、各类供应商之间均衡条件的基础上, 构建进度规划“超冲突均衡”博弈模型, 求解使整个供应链的利益最大化时的进度规划, 以及由此带来的利益合理分配问题。

定义 6 主制造商的利润 π_M . 主制造商的收益是顾客购买复杂产品愿意支付的资金 R_M , 成本为主制造商根据合同需要支付给各供应商的资金 (H, nm, B_3) 和自己的生产成本 C_M . 主制造商的利益 π_M 为

$$\pi_M = R_M - H - nm - B_3^1 - C_M.$$

根据以上分析, 建立如下“超冲突均衡”博弈模型:

$$\max \pi_M = R_M - H - nm - B_3^1 - C_M. \quad (11a)$$

$$\text{s.t. } R_M = f_M(T_M); \quad (11b)$$

$$T_M = E(t) = \left. \frac{\partial M_E(s)}{\partial s} \right|_{s=0}; \quad (11c)$$

$$\begin{cases} d_1^1 = H - C_1^1(t_{S_1}) + \rho\pi_M, \\ \frac{\partial U_M / \partial H}{\partial U_M / \partial t_{S_1}} = \frac{\partial U_{S_1} / \partial H}{\partial U_{S_1} / \partial t_{S_1}}; \end{cases} \quad (11d)$$

$$\begin{cases} \max d_2^1 = O_2^1(m - C_2^1(T_2^1)), \\ \max d_2^2 = O_2^2(m - C_2^2(T_2^2)); \end{cases} \quad (11e)$$

$$\max d_3^1 = B_3^1 - C_3^1. \quad (11f)$$

其中: 规划(11a)用来求解主制造商利润最大化; 约束(11b)表示收益与总工期 T_M 的函数关系式; 约束(11c)表示总工期与供应商进度的关系, 本关系式由第 1 节复杂产品研制的多层次 GERT 网络获得; 约束(11d)表示主制造商与战略合作伙伴供应商关于工期博弈的均衡条件; 约束(11e)表示在主制造商制定好订单分配和支付规则的条件下, 核心供应商之间的博弈表达式; 约束(11f)表示一般供应商报价博弈的均衡条件。

式(11)的“超冲突均衡”博弈模型可按照以下步骤进行求解:

Step 1: 求解式(11)中(11d)~(11f)这 3 个子博弈均衡, 将均衡结果代入式(11a)中;

Step 2: 求解规划(11a), 计算此情形下的各供应商进度安排和各方利润。

超冲突均衡可以处理复杂装备研制进度规划工作中, 主制造商、战略合作伙伴等各参与方之间复杂的博弈关系, 而单独的 Stackelberg 模型、帕累托均衡等难以处理这一复杂的问题。

3 案例研究

3.1 基于“超冲突均衡”博弈模型的进度规划

选取某商用飞机的进度规划问题展开案例研究. 这里主要考虑主制造商、1 家战略合作伙伴(动力系统供应商)、2 家核心供应商(液压系统供应商)和标准件供应商等利益相关者. 根据 3 者的多层研制关系, 绘制多层次 GERT 关系. 已知通过计算动力系统供应商进度规划 GERT 网络, 得出其传递函数为 $p_{23}e^{t_{23}s}$, 将此传递函数代入主制造商层级的 GERT 中, 此层级网络其他活动的相关参数如表 1 所示. 依据多层次 GERT 求解算法求出主制造商的等价传递函数为

$$w_E(s) = 0.96e^{(t_{23}+t_{34}+25)s} + \frac{2s^2(e^{bs} - e^{10s})}{(b-10)s},$$

则总工期为

$$E(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\partial M_E(s)}{\partial s} =$$

$$28.8 + 0.48b + 0.96t_{23} + 0.96t_{34}.$$

3.1.1 某商用飞机主制造商-战略合作伙伴供应商帕累托均衡分析

主制造商效益的差异曲线为

$$u_M = \frac{l_1 V(t_{34})}{H r_1} = \frac{V(t_{34})}{H^{10/3}}.$$

考虑到工期具有望目特性, 将其估值函数定义为

$$V(t_{34}) = \begin{cases} \frac{t_{34} - 15}{1.5}, & 15 \leq t_{34} < 16.5; \\ \frac{18 - t_{34}}{1.5}, & 16.5 \leq t_{34} \leq 18. \end{cases}$$

表 1 主制造商进度规划 GERT 网络活动参数

(i, j)	活动	概率 $(p_{i,j})$	分布类型	参数/周	矩母函数 $\{M_{ij}(S)\}$	传递函数 $\{W_{ij}(S)\}$
(0, 1)	飞机设计	1	常数	$t_{01} = 13$	$\exp(t_{01}s)$	$p_{01}\exp(t_{01}s)$
(1, 2)	机体制造	1	常数	$t_{12} = 12$	$\exp(t_{12}s)$	$p_{12}\exp(t_{12}s)$
(2, 3)	液压系统供应	1	正态	$t_{23}, \sigma_{12}^2 = 4$	$\exp\left(\bar{t}_{23}s + \frac{1}{2}\sigma_{23}^2s^2\right)$	$p_{23}\exp\left(\bar{t}_{23}s + \frac{1}{2}\sigma_{23}^2s^2\right)$
(3, 4)	动力系统供应	1	常数	t_{34}	$\exp(t_{34}s)$	$p_{34}\exp(t_{34}s)$
(4, 5)	总装试飞	1	均匀	$[10, b]$	$\frac{\exp(sb) - \exp(10s)}{(b-10)s}$	$p_{45}\frac{\exp(sb) - \exp(10s)}{(b-10)s}$

发动机供应商效益的无差异曲线为

$$u_S = H - C(t_{34}) + 0.1\pi_M.$$

其中: 生产成本 $C(t_{34})$ 由固定成本和变动成本 2 部分组成, 根据微观经济学的相关知识, 可以将其设置为以下的形式:

$$C(t_{34}) = l_2(t_{34} - 17)^2 + C_0,$$

$$C_0 = 70, l_2 = 150.$$

由前面分析的均衡条件可知, 当满足以下等式时, 帕累托达到最优:

$$\frac{r_2H^{r_2-1} - \rho}{2l_2(17 - t_{34}) - 3.456\rho(t_M - 60)} = \begin{cases} \frac{r_1(15 - t_{34})}{1.5H}, & 15 \leq t_{34} \leq 16.5; \\ \frac{r_1(18 - t_{34})}{1.5H}, & 16.5 \leq t_{34} \leq 18. \end{cases}$$

3.1.2 主制造商和核心供应商均衡分析

主制造商选取 2 家液压供应商, 通过订单的分配激励 2 家液压供应商提供质量高、工期优的产品. 2 家液压供应商之间进行完全竞争博弈. 假设质量与工期满足关系式 $Q_2^1(T_2^1) = Q_2^2(T_2^2) = 0.96 - e^{-t}$, 决策目标如第 2.2.2 节所示, 约束条件如下:

$$\text{s.t.} \begin{cases} C_2^1(T_2^1) = 10 + 0.8(T_2^1 - 9)^2; \\ C_2^2(T_2^2) = 12 + 0.9(T_2^2 - 10)^2; \\ Q_2^1(T_2^1) = Q_2^2(T_2^2) = 0.96 - e^{-t}; \\ \lambda = 7, n = 10, m = g(t_{23}) = 35 - (t_{23} - l)^2; \\ t_{23} = \max(T_2^1, T_2^2). \end{cases}$$

解得 $T_2^{1*} = \frac{2l + 18}{3.8}$, $T_2^{2*} = \frac{2l + 18}{3.8} + \varepsilon_1$, 其中 ε_1 是开工的最小计量单位, 这里取 $\frac{1}{30}$ 月.

3.1.3 一般供应商均衡分析

据估算, 我国研制的某大型客机单机选用标准件数量约为 109 万件, 主制造商需要相当规模的标准件供应商. 考虑到市场上此类供应商的数量较多, 主制造商主要从招投标角度出发, 择优选取相应供应商.

假设本案例中有 5 家标准件供应商企业进行竞争, 成本服从 $[130, 150]$, 则供应商的最优报价为

$$b(c) = 150 - \frac{4}{5} \times 20 - 0.1 = 133.9,$$

标准件供应商的获利为

$$d_3^1 = 133.9 - 130 = 3.9.$$

3.1.4 某商用飞机进度规划“超冲突均衡”博弈模型

以上分析了各子博弈的均衡条件, 在此基础上建立如下所示的“超冲突均衡”博弈模型进度规划模型:

$$\max \pi_M = (R_M - H - 10m - P - c_M(b)) \times 0.99.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} t_M = E(t) = \left. \frac{\partial M_E(s)}{\partial s} \right|_{s=0} = \\ 28.8 + 0.48b + 0.96t_{23} + 0.96t_{34}; \\ R_M = 1500 - 1.8(t_M - 60)^2; \\ c_M(b) = 12b, b > 10; \\ m = g(t_{23}) = 35 - (T_2^{2*} - l)^2; \\ \left\{ \begin{array}{l} H > 100, \\ \frac{r_2H^{r_2-1} - \rho}{2l_2(17 - t_{34}) - 3.456\rho(t_M - 60)} = \\ \left\{ \begin{array}{l} \frac{r_1(15 - t_{34})}{1.5H}, & 15 \leq t_{34} \leq 16.5, \\ \frac{r_1(18 - t_{34})}{1.5H}, & 16.5 \leq t_{34} \leq 18, \end{array} \right. \\ t_{34} \in [16.5, 18]; \\ \left\{ \begin{array}{l} T_2^{1*} = \frac{2l + 18}{3.8}, \\ T_2^{2*} = \frac{2l + 18}{3.8} + \frac{1}{30}, \\ 9 < l < 10, \\ t_{23} = T_2^{2*}; \\ \left\{ \begin{array}{l} P = 133.9, \\ d_3^1 = 3.9. \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (12)$$

通过 Lingo 程序进行求解, 最终结果如表 2 所示.

3.2 对比分析——完全合作情形

当考虑整个供应链完全合作的情况下, 整个供应链的利益 π_T 定义如下:

$$\pi_T = R_M - C_1^1(t_{S_1}) - O_2^1C_2^1(T_2^1) - O_2^2C_2^2(T_2^2) - C_3^1 - C_M.$$

其中: R_M 为顾客支付价格; $C_M, C_1^1(t_{S_1}), O_2^1C_2^1(T_2^1), O_2^2C_2^2(T_2^2), C_3^1$ 分别为主制造商、战略合作伙伴供应

表 2 进度安排及收益情况

	超冲突均衡博弈模型			完全合作模型 ($\varpi = 0$)			完全合作模型 ($\varpi \geq 0.08\%$)	CPM 和 PERT 方法
	进度/月	利润/万元	总工期/月	进度/月	利润/万元	总工期/月		
主制造商 (b)	10	717.08		10.00	717.94		(当协调成本比例大于 0.08%, 总收益小于超冲突均衡模型结果时, 各方不会完全合作)	由于无法处理概率分支、回路等随机问题, 无法解决此问题
发动机供应商	16.92	108.67		17.00	108.67			
液压供应商 1	9.47	73.69	58.97	9.00	73.69	59.62		
液压供应商 2	9.51	157.58		10.10	157.58			
标准件供应商	-	3.90		-	3.90			

商、核心供应商和一般供应商的生产成本。此时的目标是供应链整体利益最大化。接下来如何合理分配合作带来的利益是一个重要问题^[20]，本文基于求解合作博弈的 Nash 解的方法，构建合作情况下的进度规划模型如下，其中选择上文中超冲突均衡模型求解的各方利益作为现状点（谈判时的威慑点）：

$$\max (x_M - d_M)(x_1^1 - U_s)(x_2^1 - d_2^1) \times (x_1^1 - d_1^1)(x_3^1 - d_3^1); \quad (13a)$$

$$\text{s.t. } \max \pi_T = (R_M - C_1^1(t_{S1}) - O_2^1 C_2^1(T_2^1) - O_2^2 C_2^2(T_2^2) - C_3^1 - C_M)(1 - \varpi), \quad (13b)$$

$$x_M + x_1^1 + x_2^1 + x_3^1 = \pi_T, \quad (13c)$$

$$x_M \geq d_M = 717, \quad (13d)$$

$$x_1^1 \geq U_s = 108.67, \quad (13e)$$

$$x_2^1 \geq d_2^1 = 9.47, \quad (13f)$$

$$x_2^2 \geq d_2^2 = 9.51, \quad (13g)$$

$$x_3^1 \geq d_3^1. \quad (13h)$$

其中：规划 (13b) 表示在整个供应链完全合作的情况下，求解整体供应链利益最大化， ϖ 表示完全合作时沟通协调等成本占总收益的比例；规划 (13a) 利用“Nash 解”法合理分配整个供应链利益；约束 (13c) 表示将整个供应链利益完全分配；约束 (13d) 表示各供应商分配的利润必须不小于非完全合作时的所得利润，这里不包含一般供应商；约束 (13g)~(13h) 表示各方完全合作时的收益必须不小于非完全合作时的所得利润。

以上分析了各子博弈的均衡条件，在此基础上构建如式 (13) 所示的某商用飞机进度规划博弈模型。求解式 (13) 所示的模型，得出主制造商、各供应商在完全合作情形下的进度安排和收益情况如表 2 所示。

由表 2 可知，基于“超冲突均衡”博弈的进度规划模型和完全合作模型 ($\varpi = 0$) 的进度规划模型的结果很接近。其中，基于“超冲突均衡”博弈的进度规划模型的总工期略小于完全合作情况，距理想工期 60 个月的偏差较大。但是，当沟通协调成本占总收益的比例 $\varpi \geq 0.08\%$ 时，完全合作时的总收益略小于基

于“超冲突均衡”博弈的进度规划模型结果，因此无法达成完全合作的情形。总体而言，基于“超冲突均衡”博弈是一种接近完全合作收益且容易实现的模型，对于实际问题具有较好的反应能力，是一种比较适合复杂装备进度规划的方法。完全合作模型要求进度规划各参与方无条件服从大局利益观，这在实际中较难保证。

4 结 论

本文主要研究复杂产品研制项目的进度规划问题。首先，详细分析了复杂产品研制项目的多层次研制网络关系。考虑到 GERT 网络在表征不确定性和强连接等方面的优势，在多层次研制网络关系的基础上构建多层次 GERT 网络模型，分析该模型的性质，设计求解算法，进而探究复杂产品研制总进度与各层次供应商研制进度的关系。然后，深入分析各类供应商、主制造商的博弈均衡关系，围绕主制造商利益最大化，构建复杂产品研制项目工期规划超冲突均衡模型。最后，以超冲突均衡解为威慑点，求解完全合作情况下的进度安排和利益分配。在案例中，超冲突模型和完全合作情况下的结果表明，超冲突模型结果非常接近完全合作下的收益。本文提出的方法充分考虑了复杂产品研制网络的多层次性和强连通性（回路）等特征，以及复杂产品主制造商、供应商之间复杂的博弈均衡关系，具有一定的实用价值，为有效解决复杂产品研制项目进度规划问题提供了一种新的思路。

参考文献(References)

- [1] Węglarz J, Józefowska J, Mika M, et al. Project scheduling with finite or infinite number of activity processing modes — A survey[J]. European J of Operational Research, 2011, 208(3): 177-205.
- [2] Kastor A, Sirakoulis K. The effectiveness of resource levelling tools for resource constraint project scheduling problem[J]. Int J of Project Management, 2009, 27(5): 493-500.
- [3] Valls V, Ballestin F, Quintanilla S. A hybrid genetic algorithm for the resource-constrained project scheduling problem[J]. European J of Operational Research, 2008,

- 185(2): 495-508.
- [4] Agarwal A, Colak S, Erenguc S. A neurogenetic approach for the resource-constrained project scheduling problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2011, 38(1): 44-50.
- [5] 张静文, 徐渝, 柴国荣. 项目进度中的离散时间-费用决策问题研究[J]. *系统工程学报*, 2007, 22(2): 122-127. (Zhang J W, Xu Y, Chai G R. Research on discrete time-cost trade-offs problem in project scheduling[J]. *J of Systems Engineering*, 2007, 22(2): 122-127.)
- [6] 杨建国. 树计划技术——工作分解结构进度计划模拟分析与优化[J]. *系统工程理论与实践*, 1994, (5): 14-19. (Yang J G. Tree planning technique for project management—The simulation and optimization on WBS tree planning[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 1994, (5): 14-19.)
- [7] 苏菊宁, 蒋昌盛, 刘晨光, 等. 考虑支付进度的动态工期优化[J]. *系统工程*, 2009, 27(5): 88-95. (Su J N, Jiang C S, Liu C G, et al. Dynamic project duration optimization by considering payment scheduling[J]. *Systems Engineering*, 2009, 27(5): 88-95.)
- [8] Herroelen W, Leus R. Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials[J]. *European J of Operational Research*, 2005, 165(2): 289-306.
- [9] Ke H, Liu B. Fuzzy project scheduling problem and its hybrid intelligent algorithm[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2010, 34(2): 301-308.
- [10] 何正文, 刘人境, 徐渝. 基于随机活动工期的资源约束项目鲁棒性调度优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(3): 650-659. (He Z W, Liu R J, Xu Y. Robust scheduling optimization for resource-constrained project based on random duration of activities[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2013, 33(3): 650-659.)
- [11] Ke H, Liu B. Project scheduling problem with stochastic activity duration times[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2005, 168(1): 342-353.
- [12] Bendavid I, Golany B. Setting gates for activities in the stochastic project scheduling problem through the cross entropy methodology[J]. *Annals of Operations Research*, 2011, 189(1): 25-42.
- [13] 柴国荣, 洪兆富, 亓文国. 基于进度优化的大型项目激励机制模型[J]. *系统工程*, 2008, 26(1): 102-105. (Chai G R, Hong Z F, Qi W G. The incentive mechanism of large-scale projects based on scheduling optimization[J]. *Systems Engineering*, 2008, 26(1): 102-105.)
- [14] 丰景春, 胡正人, 任亚芳, 等. 项目群视角下大中型工程合同项目工期奖励模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(6): 1369-1376. (Feng J C, Hu Z R, Ren Y F, et al. Construction period reward model of contract works for large and medium-sized projects from a viewpoint of program[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2012, 32(6): 1369-1376.)
- [15] 陈建华, 马士华. 基于工期协调的项目公司与承包商收益激励模型[J]. *中国管理科学*, 2007, 15(3): 114-122. (Chen J H, Ma S H. A revenue incentive model of project duration coordination between project corporation and contractor[J]. *Chinese J of Management Science*, 2007, 15(3): 114-122.)
- [16] 陈建国, 刘德银. DSM在复杂工程前期进度计划管理中的应用研究——以上海浦东国际机场商飞配套工程为例[J]. *工程管理学报*, 2012, 26(3): 56-60. (Chen J G, Liu D Y. Application of DSM in early schedule management of complex projects: An empirical study of the shanghai pudong international airport's commercial aircraft engineering[J]. *Construction Management Modernization*, 2012, 26(3): 56-60.)
- [17] 陈冬宇, 邱苑华, 杨青, 等. 基于DSM的复杂产品开发流程优化遗传算法[J]. *控制与决策*, 2008, 23(8): 910-914. (Chen D Y, Qiu W H, Yang Q, et al. DSM-based complex product development process optimization using genetic algorithm[J]. *Control and Decision*, 2008, 23(8): 910-914.)
- [18] 王星汉. 面向复杂产品开发的多级供应商协同项目管理研究[D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2010. (Wang X H. Research on multi-tier supplier collaborative project management for complicated product development[D]. Shanghai: School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, 2010.)
- [19] 张利荣, 王素梅. 一级密封招标的最优报价策略研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2005, 6(6): 121-124. (Zhang L R, Wang S M. The analysis of the best quoting strategy about the one-level sealed bidding[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2005, 6(6): 121-124.)
- [20] 冯庆华, 陈菊红, 刘通. 基于模糊双合作博弈的收益分配模型[J]. *控制与决策*, 2013, 28(5): 701-705. (Feng Q H, Chen J H, Liu T. Model of profit allocation based on fuzzy bicooperative game[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(5): 701-705.)

(责任编辑: 闫 妍)