

面向区块链的协同业务建模及其并行优化算法

上官子卓¹, 李东鹤¹, 杨清宇^{1,2}

(1. 西安交通大学自动化科学与工程学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学精密微纳制造技术全国重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对供应链管理面临的协同高效性、信息可追溯性和信任危机等问题, 提出了一个解决区块链多要素矛盾问题的并行计算模型 PNSGA-III。首先, 深入挖掘区块链、链主企业和链上企业的制约关系, 将链主企业成本、服务积分, 链上企业参与数量以及区块链稳定性等参数具象为多级多业务协同模型; 其次, 从提高遗传算法产生子代缓存区的效率角度出发, 将交叉变异部分并行化处理, 极大缩短模型求解时间; 此外, 为了解决帕累托解不能相互支配的问题, 采用 TOPSIS 计算欧氏距离并决策理想解; 最后, 通过 10 组仿真实验验证了所提模型的有效性。结果表明: PNSGA-III 的计算时间比非并行算法节约了 16.37%; 区块链的矛盾制约机制提供了更广泛的选择范围, 增强了其适应复杂需求的能力; 在动态任务流程下, 经过优化的 S8 场景的服务积分比未优化的场景高出 45%。研究为供应链管理提供了新的视角和工具。

关键词: 区块链; 协同业务; 并行优化算法; 多准则决策

中图分类号: TP3 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202412013 **文章编号:** 0253-987X(2024)12-0131-10

Collaborative Business Modeling and Parallel Optimization Algorithm for Blockchain

SHANGGUAN Zizhuo¹, LI Donghe¹, YANG Qingyu^{1,2}

(1. School of Automation Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In response to challenges encountered in supply chain management such as collaborative efficiency, information traceability, and trust crises, a parallel computing model, PNSGA-III, is introduced to tackle the multifaceted issues in blockchain. Initially, by exploring the interactions among blockchain, the blockchain lead enterprises (BLEs), and blockchain on-chain enterprises (BOEs), parameters such as costs for BLEs, service points, the number of participating BOEs, and blockchain stability are transformed into a multi-level multi-business collaborative model. Subsequently, to enhance the efficiency of the genetic algorithm in generating offspring cache areas, the crossover and mutation components are processed in parallel, leading to a substantial reduction in the model's solution time. Furthermore, to handle the challenge of non-mutually dominant Pareto solutions, TOPSIS is employed to calculate the Euclidean distance and determine the optimal solutions. Finally, the effectiveness of the proposed model is verified through 10 sets

收稿日期: 2024-07-08。 作者简介: 上官子卓(2000—), 女, 博士生; 杨清宇(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金

项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB3301700)。

网络出版时间: 2024-08-21

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240821.1104.002>

of simulation experiments. The results indicate that the computation time of PNSGA-III is 16.37% shorter than that of non-parallel algorithms. The conflicting constraint mechanism of blockchain provides a wider range of options, enhancing its adaptability to complex requirements. Under dynamic task flows, the service points of the optimized S8 solution are 45% higher than those of the unoptimized solution. This research provides fresh insights and tools for advancing supply chain management practices.

Keywords: blockchain; collaboration business; parallel optimization algorithm; multi-criteria decision making

随着全球化经济的不断发展和供应链的日益复杂化,企业之间的合作与协同已成为提高竞争力和满足客户需求的关键^[1-2]。在传统供应链管理中,协同业务通常由链上企业或链主企业负责,而这一过程往往面临着诸多挑战,包括信息不对称^[3],缺乏实时性和灵活性,以及在多企业环境中计算资源的大量消耗和业务分配的低效^[4]。这些问题不仅影响了生产效率,也制约了供应链对市场快速变化的响应能力。因此,有必要针对这些问题,深入研究一种高效稳定的协同决策场景,以提升企业间合作的效率,增强整个供应链的竞争力和市场适应性。

区块链技术作为一种去中心化和防篡改的分布式账本技术,被首次提出并成功应用于比特币之中。随着其在各个领域的不断拓展,区块链技术正逐渐成为一种为企业之间高效稳定合作协同提供新解决方案的重要工具^[5-6]。区块链的关键特性包括分布式存储、去中心化管理和加密安全机制,这能够有效地解决业务协同过程中诸如信息不对称、数据安全性不足等问题^[7-9]。

在业务协同过程中,企业间协同效率低和信息溯源问题常常会影响到供应链的稳定运作^[10]。区块链技术通过将数据分布式存储在多个节点上,并使用加密算法确保数据的安全性和完整性^[11-12],为企业间的信息共享和溯源提供了可靠的技术支持。此外,区块链的智能合约功能还可以自动执行合同条款,提高了业务协同过程的透明度和效率^[13]。近年来,国内外许多学者对区块链在业务协同领域的应用表现出了极大的关注和兴趣。Chen等^[14]提出了一种深度优先启发式算法,解决了电子订单履行过程中的任务分配和调度问题,以最小化完成时间,并针对实际数据验证了其优化效果。Islam等^[15]通过结合集成的需求预测和多目标优化策略,解决了供应链管理中的供应商选拔与订单配置问题,并通过加拿大食品供应链数据验证了模型在提高预测精度和优化决策中的作用。Di等^[16]研究了具有高操

作可变性的供应链中的绿色业务协同问题,综合考虑了用户、供应商和社会绩效等指标,并通过数值示例展示了其应用效果。Wang等^[17]考虑具有多个供应商和多个需求方的两级供应链中的业务协同问题,提出了一种包括两阶段协商协议和两种启发式协商算法的协商机制,成功实现了不同供应链环境下的业务协同。尽管现有文献在区块链上业务协同的建模问题上取得了一定的进展,但在建模过程中并未充分挖掘多要素制约机制,且在多个企业参与的情境下,计算效率问题尚未得到充分解决。为了提升计算效率,通常需要引入并行计算技术来处理复杂的业务协同问题。

并行计算能够通过通过在多个处理器或计算节点上同时执行任务来大幅提升交易处理速度和效率^[18],在提升计算效率方面应用广泛。苏裕林等^[19]针对复杂装配体在多指标需求下装配精度计算问题,开发了一种基于统一计算架构的多误差传递路径装配精度并行计算模型,极大提升了计算速度。Zhao等^[20]提出一种基于增强状态更新方法和高效任务分配策略的并行计算框架,克服了人群模拟实时仿真大规模计算成本的限制。肖兮等^[21]设计并实现了一种层次化并行计算模型,为流体机械仿真的高效性和准确性提供了新的视角和解决场景。然而,虽然并行计算在上述领域取得了显著的研究成果,其在区块链业务协同任务中的应用仍然较为有限。随着图形处理器(GPU)技术的快速发展,将区块链业务协同的非支配性遗传算法转化成轻量级并行模式有助于进一步显著增强处理能力,缩短决策时间。

本文在充分分析链主企业与链上企业之间关系的基础上,综合考虑了链主企业成本、链上企业利润以及区块链的稳定性等因素,提出了一种基于多目标遗传算法的多级多业务并行协同场景。该场景将区块链的标准和特征融入到协同任务中,通过多目标遗传算法实现了业务的高效稳定分配。

1 区块链上综合因素协同模型

综合因素协同模型的目标是建立一个考虑链主企业订单需求、生产能力、供应能力等因素与链上企业的生产能力、物流成本、生产成本等因素相结合的业务协同模型^[22],如图 1 所示。

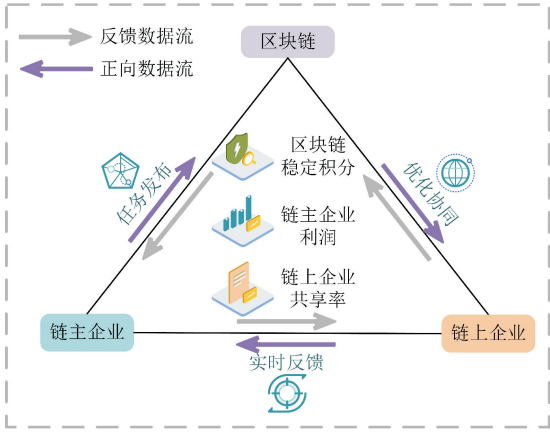


图 1 区块链业务协同框架

Fig. 1 Blockchain business collaboration framework

在该模型中,链主企业作为供应链交易的枢纽,负责订单管理与协调,将各订单任务分配至链上企业,投资资金以获取生产外包服务,针对链主企业,考虑以最小化成本和完工时间,最大化服务质量为优化目标

$$C_p = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^{M_l} \sum_{n=1}^N C_a x_i + \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^{M_l} C_b + \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^{M_l} C_d \quad (1)$$

$$T_f = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^{M_l} \sum_{n=1}^N T_a x_i + \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^{M_l} T_b + \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^{M_l} T_c \quad (2)$$

$$Q_s = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^{M_l} \sum_{n=1}^N Q_i x_i \quad (3)$$

式中: C_p 为生产成本; T_f 为完工时间; Q_s 为服务质量; C_a 为链上企业 n 加工第 l 个任务的第 m 个子任务所产生的服务费用; C_b 为第 l 个任务中,第 m 个子任务与前一个子任务 $m-1$ 之间的物流成本; C_d 为同一任务 l 中第 m 和子任务 $m-1$ 之间的仓储成本; T_a 为链上企业 n 加工第 l 个任务的第 m 个子任务所需的加工时长; T_b 为物流过程所需的时间; T_c 为仓储所需时间; Q_i 为第 n 个备选链上企业在第 l 个任务的第 m 个子任务中的服务质量积分,该积分是链主企业是否选择链上企业的一项重要依据。

对上述 3 个优化目标进行归一化处理,并根据

不同链主企业的侧重点赋予相应权重,从而得到链主企业的优化目标函数

$$T_1 = \min \left(\alpha \frac{C_p - \min C}{\max C - \min C} + \beta \frac{T_f - \min T}{\max T - \min T} - \gamma \frac{Q_s - \min Q}{\max Q - \min Q} \right) \quad (4)$$

式中: α 、 β 、 γ 分别为加工成本权重、加工时间权重和加工质量权重。

链上企业在供应链协同中,通过最大化其在子任务加工中的参与度,以增加订单次数为优化导向,实现利益最大化,即

$$T_2 = \min(1 / (\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^{M_l} x_i)) \quad (5)$$

式中: $x_i = 1$ 表示第 n 个企业参与订单任务; $x_i = 0$ 表示该任务由其他链上企业完成。

作为区块链共识机制参与者,节点所获得的稳定积分收益对于激励其网络贡献和维护网络稳定性至关重要,是影响区块链信任基础的主要变量。因此,在业务协同的研究中,通过优化信任积分的累积,将稳定积分收益作为提升区块链稳定性的策略,确保了积分收益较高的节点在订单分配中的优先性,区块链稳定性目标函数为

$$T_3 = \min(1 / (\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^{M_l} \sum_{n=1}^N S_i)) \quad (6)$$

式中: S_i 为链上企业对区块链稳定运行所做的贡献。历史运行越稳定,则积分越高。

本研究以链上企业订单计划为数据基础,结合资源、产能与进度等约束,构建了一个数学模型,该模型综合考虑了子任务的节点专属加工、时间与成本的约束条件,以及节点加工能力与时间窗口的多重限制,通过订单协同分配策略,优化对供应商的选择与配额规划,以增强产业链中供应链的运行效率和资源配置效率,模型中的约束条件如下

链上企业的代号为 0 或 1 时

$$x_i = 1 \text{ 或 } 0 \quad (7)$$

(1) 成本预期约束。链主企业可接受的最大生产成本不超过 $\max C_p$, 即

$$C_p < \max C_p \quad (8)$$

(2) 时间预期约束。链主企业可接受的最长完工时间不超过 $\max T_f$, 即

$$T_f < \max T_f \quad (9)$$

(3) 加工过程约束。企业最大的可服务时间不小于实际加工时间与储存时间之和,即

$$E_s \geq T_a + T_c \quad (10)$$

式中: E_s 为企业最大可服务时间。

(4)时间约束。任何子任务的整个流程(从结束、经过物流与存储阶段,到下个环节的开始)必须契合其后继服务提供者的生产时间窗口

$$T_{\min} \leq T_a + T_b + T_c \leq T_{\max} \quad (11)$$

式中: $T_{\min}$ 为后续企业提供的最小生产时间窗口; $T_{\max}$ 为最大生产时间窗口。

2 基于 PNSGA-III 的区块链业务分配

针对区块链任务分配问题,构建基于问题特征的启发式算法,本文设计了 PNSGA-III,以提高搜索效率并缩短优化时间。

2.1 基于问题特征的并行优化解决方法

传统的启发式算法在复杂问题下需要较长时间来达到满意解,大量消耗了计算资源和计算时间^[23]。本文根据区块链任务分配问题的特征,从产生子代的效率角度出发,对遗传算法的编码效率做了重要改进,极大提高了求解速度。区块链业务分配算法流程如图 2 所示。PNSGA-III 的具体步骤描述如下。

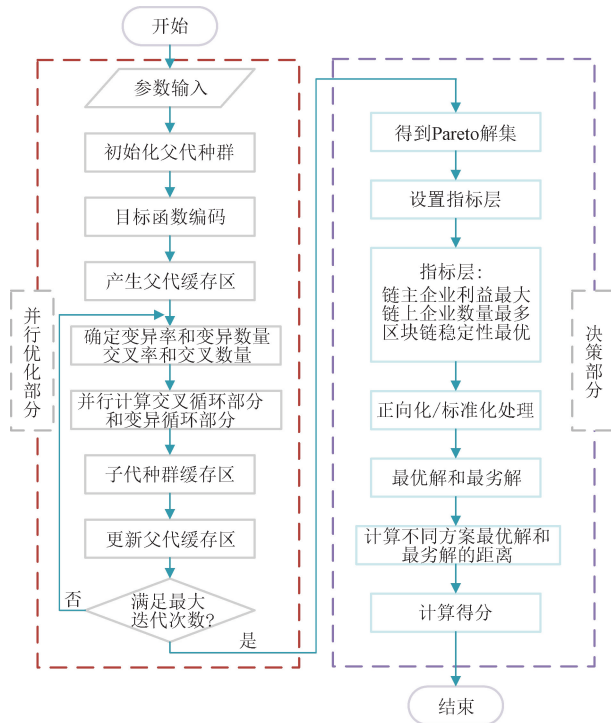


图 2 基于 PNSGA-III 的区块链业务分配算法流程

Fig. 2 Blockchain business distribution algorithm based on PNSGA-III

(1)初始化父代种群:生成满足式(7)~(11)的种群 Gen1。

(2)目标函数编码:将链上子企业的成本、完工时

间、历史服务质量等企业信息转化为企业矩阵数据集,将区块链的稳定积分收益转化为可插值的三维曲面。

(3)建立父代缓存区:根据函数编码结果建立父代缓存区 ZONP。

(4)非支配性排序筛选 ZONP 中的最优集合:对于给定 ZONP 中的个体 i ,首先计算其支配个体的集合 W_i 和支配它的个体数量 $w(i)$ 。然后根据 $w(i)$ 的值对个体进行非支配排序。假设 ZONP 中个体数量为 N ,用 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ 表示 ZONP。对于 ZONP 中的任意个体 p_i ,定义其支配个体集合^[24]

$$W_i = \{p_j \in P | p_i \succ p_j\} \quad (12)$$

每个个体 p_i 的被支配个体数量为

$$w(i) = |\{p_j \in P | p_j \succ p_i\}| \quad (13)$$

拥挤度计算:拥挤度根据个体在目标空间中的分布密度来计算^[25]。假设个体的目标空间表示为

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_M\} \quad (14)$$

计算个体 p_i 在目标空间中最近的个体 p_a, p_b 之间的欧氏距离,将各个距离按照目标函数的数量进行加权求和,得到个体 p_i 的拥挤度值。

(5)确定交叉变异参数:以交叉数量 N_C 和变异数量 M_C 评估并行循环量,设定最大循环并行数 N_P 。

(6)并行计算交叉循环部分和变异循环部分,算法描述如下,其中 $t_{\max}$ 为最大迭代数。

算法:并行以提高子代产生效率

```

1  For 1 to  $t_{\max}$ 
2      并行 For 1 to  $N_C$  (实际循环次数  $N_C/N_P$ )
3          从父代中随机生成整数交叉序号  $a_1$ ,
4          从父代中随机生成整数交叉序号  $a_2$ ,
5          交换  $a_1$  和  $a_2$  的部分决策变量,生成
6          新的决策变量组合  $A_1$  和  $A_2$ ,
7          计算  $A_1$  和  $A_2$  的目标函数值。
8      end
9      建立并行交叉后的交叉缓存区
10     并行 For 1 to  $M_C$  (实际循环次数  $N_M/N_P$ )
11         从父代中随机生成整数变异序号  $b_1$ ,
12         计算  $b_1$  的目标函数值。
13     end
14     建立并行变异后的变异缓存区
15     合并父代缓存区、交叉缓存区、变异缓存区
16 end

```

(7)非支配性排序筛选最优子代,组成子代缓存区,同步骤(4)。

(8)判断是否大于最大迭代次数,如果是转到步骤(9);若否,返回步骤(6)。

(9)优化之后得到帕累托解集,使用 TOPSIS 法决策唯一最优解。

2.2 TOPSIS 多准则决策法

TOPSIS 通常在多个备选场景之间进行排序和选择^[26],该方法通过计算备选场景与理想解和负理想解之间的相似度,为决策者提供了一种直观且易于理解的评价结果。假设共有 $x, x \in \mathbf{N}^+$ 个备选场景, $i = 1, 2, \dots, x$ 表示任意一个场景,每个备选场景有 $y, y \in \mathbf{N}^+$ 个评价指标,其中 $l = 1, 2, \dots, y$ 表示任意一个评价指标。将原始数据 X 归一化为 Z

$$Z_{il} = \frac{X_{il} - \min X_l}{\max X_l - \min X_l} \tag{15}$$

式中: $\min X_l, \max X_l$ 分别表示指标 l 在所有备选场景中的最小值和最大值。

在归一化数据之后确定理想解 A^+ 和负理想解 A^-

$$\begin{cases} A^+ = (A_1^+, A_2^+, \dots, A_y^+) \\ A^- = (A_1^-, A_2^-, \dots, A_y^-) \end{cases} \tag{16}$$

$$\begin{cases} A_l^+ = \max Z_{il}, \quad l = 1, 2, \dots, y \\ A_l^- = \min Z_{il}, \quad l = 1, 2, \dots, y \end{cases} \tag{17}$$

分别计算场景 i 与理想解、负理想解之间的欧氏距离 D_i^+, D_i^-

$$\begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_{l=1}^y (Z_{il} - A_l^+)^2} \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{l=1}^y (Z_{il} - A_l^-)^2} \end{cases} \tag{18}$$

计算场景 i 与理想解和负理想解的相似度

$$\begin{aligned} C_i^+ &= \frac{D_i^+}{D_i^+ + D_i^-} \\ C_i^- &= \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \end{aligned} \tag{19}$$

根据场景与理想解和负理想解的相似度,计算

综合得分

$$V_i = \frac{C_i^-}{C_i^- + C_i^+} \tag{20}$$

得分最高的确定为最优解。

3 案例及结果分析

3.1 区块链业务协同实验设置

为验证本文提出的业务协同模型及其结合的 PNSGA-III 算法的有效性,本节实验设定了特定的参数和条件,以模拟真实情况下的业务协同过程。设定在实验中区块链上链主企业数量为 $\delta = 1$,链上企业数 $k = 12$,主任务 $T = [t_1, t_2, t_3, t_4]$,每个主任务包含 4 个子任务 $\varphi_{kj}, k, j \in \{1, 2, 3, 4\}$ 。链主企业的目标是最小化成本和完工时间,最大化服务质量,链上企业的目标是提高子任务参与度,在进行高效业务协同的同时考虑到区块链的稳定性。具体地,链上企业 7、8、10 的稳定性较高,链上企业 9 稳定性较低。

3.2 业务协同实验类别

为了研究所提算法在不同场景下的适应性其及计算效率提升效果,本文设置 10 种主要计算场景。第 1 种场景到第 3 种场景按照不同 α, β, γ 比例划分,第 4 种场景固定 α, β, γ 分别为 0.4、0.4、0.2,并由链主企业主导协同任务分配,第 5 种场景将 16 个子任务随机分别分配给 12 个链上企业,剩余 4 个任务随机分配给 4 个企业,第 6 种场景按企业的最高积分分配给 8 个企业,一个企业同时承担 2 项子任务。第 7 到第 10 种场景分别为第 1 到第 4 中场景的并行计算模式。具体实验设计参数如表 1 所示。所有场景基于 Matlab2019a 编码,在 6 核 CPU、16 GB RAM 的计算机运行。

表 1 10 种场景实验参数

Table 1 The 10 scenarios of experimental parameters

场景	α, β, γ	T_1, T_2, T_3 状态	优化类型	分配原则	算法设计是否并行
S1	0.4, 0.4, 0.2	on, on, on	三目标	平衡各方利益,链主企业 存在差异化需求	否
S2	0.4, 0.2, 0.4	on, on, on	三目标		否
S3	0.2, 0.4, 0.4	on, on, on	三目标		否
S4	0.4, 0.4, 0.2	on, off, on	双目标	链主企业为主导	否
S5	0.4, 0.4, 0.2	off, off, off	无优化	随机分配	否
S6	0.4, 0.4, 0.2	off, off, off	无优化	企业服务积分最高	否
S7	0.4, 0.4, 0.2	on, on, on	三目标	平衡各方利益,链主企业 存在差异化需求	是
S8	0.4, 0.2, 0.4	on, on, on	三目标		是
S9	0.2, 0.4, 0.4	on, on, on	三目标		是
S10	0.4, 0.4, 0.2	on, off, on	双目标		是

3.3 并行优化的稳定性及决策最佳场景

为了验证本文所提 PNSGA-Ⅲ算法的有效性,将 S1~S4 和 S7~S10 场景各运行 10 次并统计平均运行时间,结果如图 3 所示。

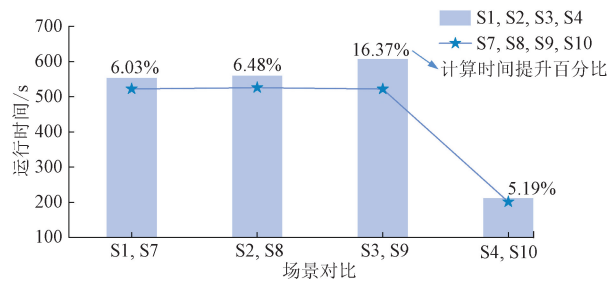
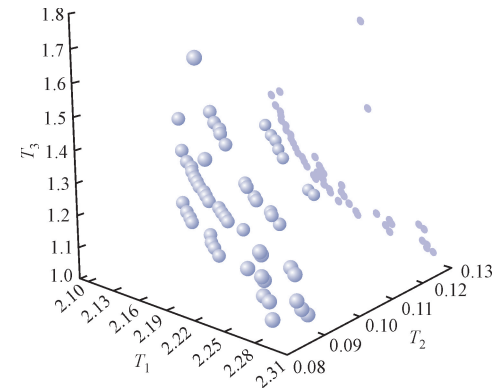


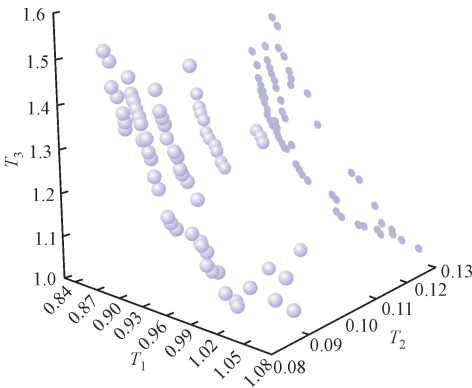
图 3 PNSGA-Ⅲ的计算效率提升效果

Fig. 3 Computational efficiency improvement effect of PNSGA-Ⅲ

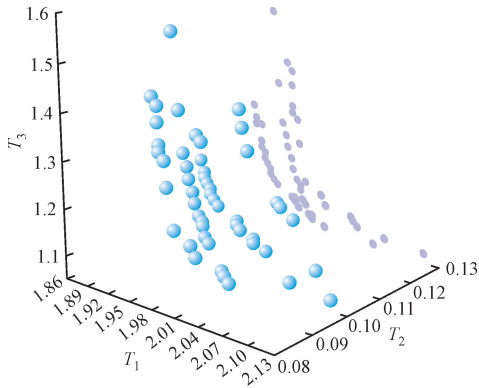
并行设计的 S7~S10 计算效率均有明显提升,



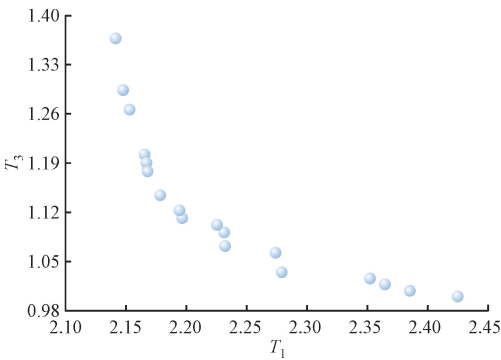
(a) S7 帕累托前沿



(b) S8 帕累托前沿



(c) S9 帕累托前沿



(d) S10 帕累托前沿

图 4 S7~S10 场景的帕累托前沿

Fig. 4 Pareto frontiers for S7—S10

表 2 S7~S9 场景的系数响应关系

Table 2 Coefficient response relationship for S7—S9

场景	α, β, γ	相对生产成本均值	相对时间成本均值	服务积分均值
S7	0.4, 0.4, 0.2	803.62	147.91	134.34
S8	0.4, 0.2, 0.4	778.01	159.34	139.80
S9	0.2, 0.4, 0.4	824.12	154.08	142.39

最少提升为 S10 的 5.19%,这是由于 S10 为双目标优化,消耗的计算资源较少。最大的提升为 S9,提升了 16.37%,表明并行设计的 PNSGA-Ⅲ具有显著的计算效率提升作用。可以预计的是,当链上企业和任务量有更高量级时,并行方法会节约大量的计算时间。

图 4 为 S7~S10 场景的帕累托前沿,4 个场景都表现出良好的收敛性,符合多目标优化最优解的三角空间分布特征,其中 T_1 、 T_3 表现出明显的矛盾性,这证明了本文做提出的区块链多要素平衡机制的有效性。此外,目标函数 T_2 在解空间上是离散的,导致帕累托解集呈现出条状特点,随着 T_2 的增大,条状解集并没有明显的规律性,这可能是由于 α 、 β 、 γ 的差异,造成直观上的不确定性。因此,为了衡量优化的稳定性,本文统计了 S7~S9 场景的 T_1 解集中的子函数均值,如表 2 所示。

S7、S8、S9 代表了区块链上主企业不同的需求侧重点,S7 侧重于生产成本和时间成本,S8 侧重于生产成本和链上企业服务质量,S9 侧重于时间成本和服务质量,为了明确 3 种场景下系数对于优化结果的响应关系,表 2 统计了 3 种场景 100 组解的均值,生产成本,时间成本、服务质量表现最好的场景分别为 S8、S7、S9,结果表明场景对于系数具有良好的响应反馈,同时证明本文所提模型具有求解稳定性。

S7~S9 场景为并行三目标优化,S10 为并行双目标优化,具有多组非支配解,本文利用 TOPSIS 方

法决策各场景的最优解。图 5 为各场景的解成员得分,最高得分的解成员兼顾了 T_1 、 T_2 、 T_3 这 3 个目标函数,以满足区块链各要素的平衡需求。在各场景的解成员得分中,极大值的数量并不唯一,而且某些极大值和最大值非常接近,S8 的解成员最高得分为 1.54(第 55 个解成员),逼近该值的成员有 7 个,其范围在 1.51~1.54,这些解的业务协同策略存在很大的差异性,然而得分相差不大,表明在一种场景中,有多种可以满足多要素平衡要求的场景,这种特征为区块链运行状态的决策提供了更多的选择,提高了其适应复杂需求的能力。

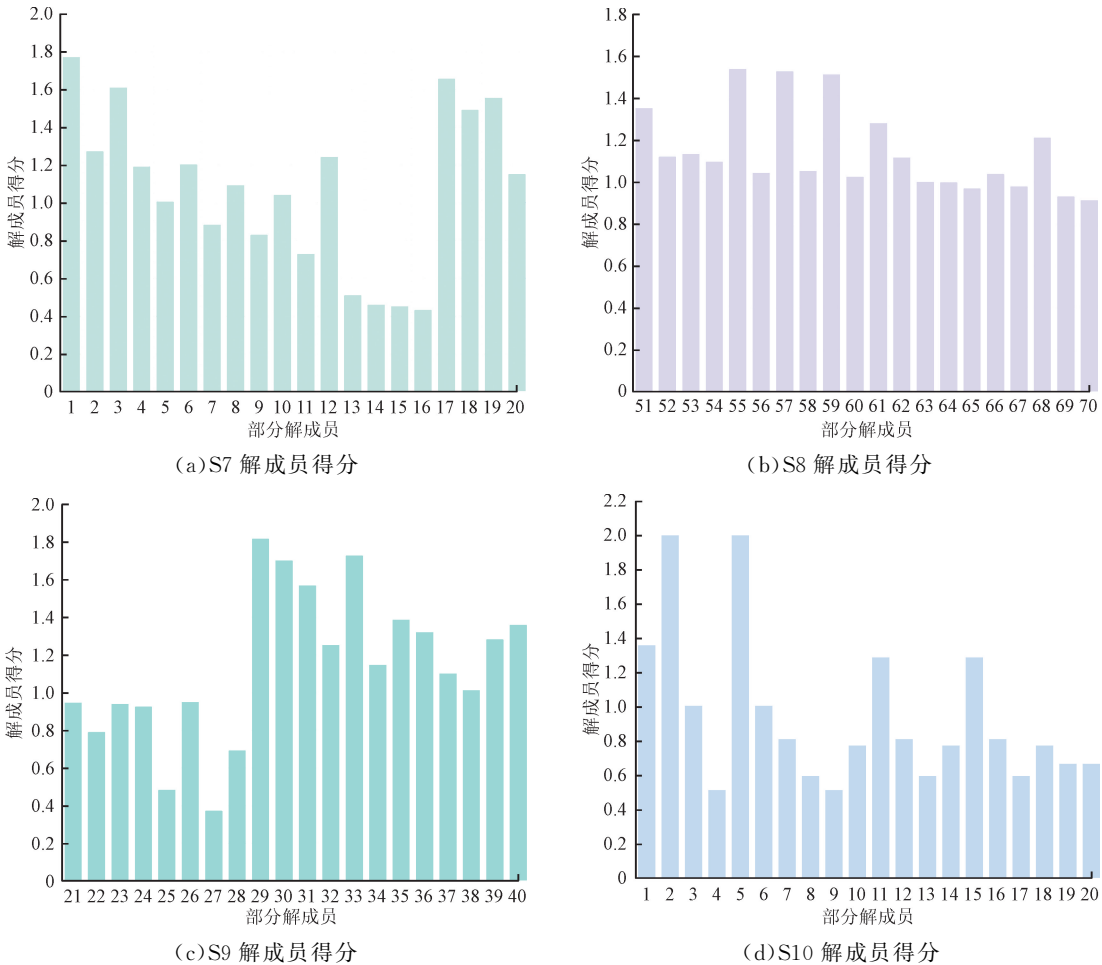


图 5 S7~S10 的解成员得分
Fig. 5 S7—S10 decommissioning scores

3.4 场景的差异化平衡效果

经过决策过程,S5~S10 场景的最优场景指标统计如表 3 所示。在 6 个场景中,S8 除了时间成本指标外,其余 4 个指标均有最佳的表现。在适当增加时间成本的前提下,本文认为 S8 是最可取的场景。S5 依据链上企业编号分配订单,值得注意的是,虽然该场景具有最小的时间成本,但是稳定积分

指标表现消极,甚至降低到 98,与其他场景相比,该场景对区块链运行无疑是危险的。S6 依据链上企业的历史稳定积分最大值执行分配计划,可以预料,该场景服务积分有良好的表现,然而其服务积分是所有场景中最低的。这表明,依据历史经验简化分配任务,并不能带来预期的效果,优化方法合理且有效,正如 S7~S10 所表现出的卓越性能。

表 3 各场景最优场景指标统计

Table 3 Statistics on indicators of optimal solutions for each scenario

场景	相对生产成本	相对时间成本	服务积分	参加企业数量	稳定积分
S5	887.00	137.66	111.00	12	98.00
S6	863.00	157.33	100.00	8	107.00
S7	773.00	166.33	134.00	8	118.00
S8	773.00	150.00	145.00	8	125.00
S9	842.00	164.67	147.00	8	120.00
S10	812.00	172.00	128.00	6	117.00

S8、S6 作为性能最优和最劣的场景,分配细节表现出较大不同,任务分解流程如图 6 所示,图中的纵坐标为链上企业,矩形长度代表链上企业任务执行时间,不同颜色用来区分不同企业。S8 参加企业有 8 家,仅有 P7、P8 企业承担了连续的子

任务,这种连续性有助于节省物流成本。然而,尽管 S8 场景被认定为最优,但这种连续性特征并不普遍存在于所有参与企业中。这说明对链主企业而言,物流成本的节约并不是优化生产成本的关键因素。

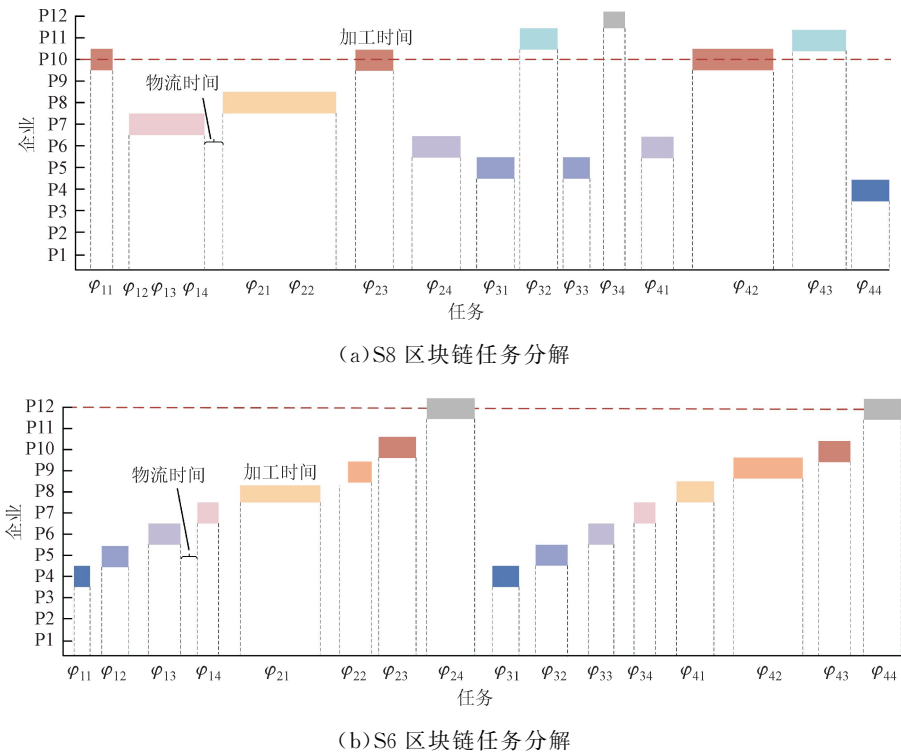


图 6 S8、S6 最优场景任务分解流程

Fig. 6 S8, S6 optimal solution task decomposition processes

在 S6 场景中,8 家历史服务积分较高的企业被选为参与者。然而,这种基于历史积分的选择策略,在实际的业务协同过程中,并未能有效利用区块链技术的关键要素,这在一定程度上限制了场景的整体性能。S8、S6 目标函数对比如表 4 所示,与 S6 场景相比,S8 场景在目标函数 T_1 、 T_3 的表现上,分别实现了 6.67%、23.33% 的显著提升。

表 4 S8、S6 场景目标函数的对比

Table 4 Comparison of S8 and S6 objective functions

场景	T_1	T_2	T_3
S8	2.173	0.125	1.253
S6	2.318	0.125	1.545
变化率/%	6.67	0	23.33

4 结 论

针对区块链上企业任务分配中存在的弱协同性和低稳定性问题,本研究创新性地提出了一种链上多要素制约机制,将企业的参与度、区块链的稳定性以及链主企业的利益转化为一个综合的平衡优化问题。此外,本研究还创新性地开发了一种多目标并行遗传算法,旨在提升计算效率。通过对 10 种不同场景的深入分析,得出以下结论。

(1)链主企业的子目标函数受到系数导向作用的影响,能够满足其差异化需求。这种机制为供应链业务协同提供了新的视角,有助于实现更加精准的任务分配。

(2)在模型构建方面,本研究所提出的模型在特定场景下能够提供多种满足多要素平衡要求的场景。这一特征为区块链的运行状态决策提供了更广泛的选择范围,增强了其应对复杂需求的能力。

(3)企业的历史服务积分可以作为订单任务分配的一个参考标准,但不应作为最终决策的唯一依据。例如,在 S6 场景中,仅依赖历史服务积分的分配方法导致稳定性积分比经过优化的场景低了 20%以上。在动态任务流程下,经过优化的 S8 场景的服务积分比 S6 场景高出 45%,这对区块链管理者提出了警示,强调了在任务分配中考虑多要素的重要性。

虽然本研究提出的 PNSGA-III 在特定场景下表现良好,但其在不同区块链架构和不同业务逻辑下的适应性尚未得到充分验证。此外,当前模型主要针对静态或半静态任务分配问题,对于高度动态变化的任务分配场景,模型的响应速度和准确性可能需要进一步优化。

参考文献:

[1] 刘路,李文欣,宋晓,等. 基于模糊群决策的绿色供应商选择和订单分配方法 [J]. 系统仿真学报, 2023, 35(10): 2133-2149.

LIU Lu, LI Wenxin, SONG Xiao, et al. A fuzzy group decision-making-based method for green supplier selection and order allocation [J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(10): 2133-2149.

[2] 张梦钗. 考虑云制造订单协同分配与动态接受的生产调度研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2022.

[3] 孙德琳. 供应不确定环境下 J 企业采购订单分配研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2022.

[4] XU Mengtian, FENG Guorui, REN Yanli, et al. On

cloud storage optimization of blockchain with a clustering-based genetic algorithm [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(9): 8547-8558.

[5] TAPSCOTT D A. Blockchain revolution: how the technology behind bitcoin is changing money, business, and the world [M]. New York, USA: Portfolio, 2016.

[6] 张乐君, 刘智栋, 谢国, 等. 基于集成信用度评估智能合约的安全数据共享模型 [J]. 自动化学报, 2021, 47(3): 594-608.

ZHANG Lejun, LIU Zhidong, XIE Guo, et al. Secure data sharing model based on smart contract with integrated credit evaluation [J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(3): 594-608.

[7] LI Yilin, LI Donghe, YANG Qingyu. A blockchain-based semi-centralized business system for multi-enterprise [C]//The 42nd Chinese Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 8859-8864.

[8] HAO Fei, GUO Yueming, ZHANG Chen, et al. Blockchain= better food? The adoption of blockchain technology in food supply chain [J]. International Journal of Contemporary Hospitality Management, 2024. (2024-02-09) [2024-06-06]. <https://doi.org/10.1108/IJCHM-06-2023-0752>.

[9] 牛淑芬, 陈俐霞, 李文婷, 等. 基于区块链的电子病历数据共享方案 [J]. 自动化学报, 2022, 48(8): 2028-2038.

NIU Shufen, CHEN Lixia, LI Wenting, et al. Electronic medical record data sharing scheme based on blockchain [J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(8): 2028-2038.

[10] CHOI T M, SIQIN T. Blockchain in logistics and production from blockchain 1.0 to blockchain 5.0: an intra-inter-organizational framework [J]. Transportation Research: Part E Logistics and Transportation Review, 2022, 160: 102653.

[11] NAIDU P R, BOLLA D R, G P, et al. E-voting system using blockchain and homomorphic encryption [C]//2022 IEEE 2nd Mysore Sub Section International Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2022: 1-5.

[12] 陈思光, 王倩, 张海君, 等. 区块链赋能物联网中联合资源分配与控制的智能计算迁移研究 [J]. 计算机学报, 2022, 45(3): 472-484.

CHEN Siguang, WANG Qian, ZHANG Haijun, et al. Resource allocation and control co-aware smart computation offloading for blockchain-enabled IoT [J]. Chinese Journal of Computers, 2022, 45(3): 472-484.

[13] 李程, 袁勇, 郑志勇, 等. 基于区块链的联邦学习: 模

- 型、方法与应用 [J]. 自动化学报, 2024, 50(6): 1059-1085.
- LI Cheng, YUAN Yong, ZHENG Zhiyong, et al. Blockchain-enabled federated learning: models, methods and applications [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2024, 50(6): 1059-1085.
- [14] CHEN Nan, KANG Wenxuan, KANG Ningxuan, et al. Order processing task allocation and scheduling for E-order fulfilment [J]. *International Journal of Production Research*, 2022, 60(13): 4253-4267.
- [15] ISLAM S, AMIN S H, WARDLEY L J. Machine learning and optimization models for supplier selection and order allocation planning [J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 242: 108315.
- [16] DI PASQUALE V, IANNONE R, NENNI M E, et al. A model for green order quantity allocation in a collaborative supply chain [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 396: 136476.
- [17] WANG Jian, MIAO Huimin, YU Mingzhu. Interdependent order allocation in the two-echelon competitive and cooperative supply chain [J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(4): 1190-1213.
- [18] 刘军, 任建华, 冯硕. 一种规模化混杂生产线缓冲区容量优化分配技术 [J]. 自动化学报, 2023, 49(5): 1073-1088.
- LIU Jun, REN Jianhua, FENG Shuo. Optimal allocation technology for buffer capacity of large-scale hybrid production lines [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(5): 1073-1088.
- [19] 苏裕林, 刘浩, 苏琦, 等. 统一计算架构下的装配精度并行计算模型 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(6): 105-114.
- SU Yulin, LIU Hao, SU Qi, et al. Parallel computing model for assembly accuracy with compute unified device architecture [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(6): 105-114.
- [20] ZHAO Hantao, GUO Tan, TONG Weiping, et al. PaCS: a parallel computation framework for field-based crowd simulation [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(11): 12659-12670.
- [21] 肖兮, 刘闯, 何锋, 等. 面向流体机械仿真的层次化并行计算模型 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(2): 121-127.
- XIAO Xi, LIU Chuang, HE Feng, et al. Design and implementation of a parallel computing model for fluid machinery [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(2): 121-127.
- [22] 吴磊. 面向共享制造的智能合约设计方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2023.
- [23] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based non-dominated sorting approach: part I solving problems with box constraints [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, 18(4): 577-601.
- [24] 徐宜刚, 陈勇, 王宸, 等. 改进 NSGA-III 求解高维多目标绿色柔性作业车间调度问题 [J/OL]. 系统仿真学报. (2023-09-18)[2024-06-06]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0694>.
- XU Yigang, CHEN Yong, WANG Chen, et al. Improving NSGA-III algorithm for solving many-objective green flexible job shop scheduling problem [J/OL]. *Journal of System Simulation*. (2023-09-18)[2024-06-06]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0694>.
- [25] 柴依扬, 张乐乐, 窦伟元, 等. 基于并行 NSGA-III 算法的高速列车车体侧墙结构高维多目标优化 [J]. 机械工程学报, 2024, 60(6): 321-333.
- CHAI Yiyang, ZHANG Lele, DOU Weiyuan, et al. Parallel NSGA-III based multi-objective optimization for side wall section size of high-speed train car-body [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(6): 321-333.
- [26] 杨文晋, 李永东, 王洪广, 等. 采用多准则决策分析的高功率微波源多目标优化设计 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(6): 74-85.
- YANG Wenjin, LI Yongdong, WANG Hongguang, et al. Multi-objective optimization design of high-power microwave source based on multi-criteria decision making [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(6): 74-85.

(编辑 赵炜)