

doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2025.05.014

基于可验证随机函数与 PBFT 共识算法的 供应链管理方案研究

董言¹, 努尔兰别克·哈巴斯¹, 谷峥², 藏哈尔·努尔兰别克³

(1. 新疆大学经济与管理学院, 新疆 乌鲁木齐 830099)

(2. 新疆工程学院控制工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023)

(3. 上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240)

[摘要] 近年来,随着供应链企业的迅猛发展,如何构建高效的供应链管理策略模型成为研究的热点.当前,供应链管理面临着库存成本高昂、通信开销巨大的问题.针对这些挑战,本文提出了一种融合机器学习与改进实用拜占庭容错(practical Byzantine fault tolerance, PBFT)共识算法的优化方案.该方案采用遗传算法与梯度算法相结合的混合优化策略,兼具全局寻优和局部精细调整的优势,从而显著降低了库存管理成本.同时, PBFT 共识机制通过引入 Honest-peer 信誉模型和可验证随机函数有效提升了节点选举过程的效率和系统的整体可靠性.仿真实验结果表明,与传统方法相比,该优化方案在降低供应链管理成本方面取得了显著效果,具体表现为库存成本平均下降了 4.6%,通信开销减少了约 50%,具有广泛的应用前景和实用价值.

[关键词] 区块链,机器学习,共识算法,供应链

[中图分类号] TP301 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2025)05-0121-08

Research on Supply Chain Management Scheme Based on Verifiable Random Function and PBFT Consensus Algorithm

Dong Yan¹, Nurlanbek Hapas¹, Gu Zheng², Zanghar Nurlanbek³

(1. School of Economics and Management, Xinjiang University, Urumqi 830099, China)

(2. Control Engineering College, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China)

(3. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In recent years, with the rapid development of supply chain enterprises, how to build an efficient supply chain management strategy model has become a hot research topic. Currently, supply chain management faces the problems of high inventory cost and huge communication overhead. To address these challenges, an optimization scheme that integrates machine learning and improved practical Byzantine fault tolerance (PBFT) consensus algorithm is proposed. The scheme adopts a hybrid optimization strategy combining genetic algorithm and gradient algorithm, which has the advantages of both global optimization and local fine tuning, thus significantly reducing the inventory management cost. Meanwhile, the PBFT consensus mechanism effectively improves the efficiency of the node election process and the overall reliability of the system by introducing the Honest-peer reputation model and verifiable random function. The experimental results show that, compared with the traditional method, the optimization scheme achieves significant results in reducing the supply chain management cost, as evidenced by an average decrease of 4.6% in inventory cost and a reduction of about 50% in communication overhead, which has a wide range of application prospects and practical value.

Key words: blockchain, machine learning, consensus algorithm, supply chain

近年来,随着工商管理下辖战略管理的快速发展,学者们对区块链和机器学习技术的应用进行了广泛研究,取得了显著成果.区块链技术以其分布式、不可篡改和透明的特点,为供应链管理提供了新的解决

收稿日期:2024-10-16.

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2020D01B20).

通讯作者:努尔兰别克·哈巴斯,博士,副教授,研究方向:人工智能与大数据,经济管理. E-mail:3501490154@qq.com

方案. 早在 2016 年, Mahmood 等^[1]开发了一种农产品供应链追溯系统, 使用区块链技术并结合 RFID, 能够达到供应链上产品溯源的效果, 开创了这一技术在供应链中的应用. Arora 等^[2]探讨了区块链在食品安全管理中的应用, 展现了其在追踪食品来源和确保食品安全方面的重要作用. Lu 等^[3]在同年提出了一种利用区块链技术来实时跟踪供应链各个阶段的产品, 让供应链的财务管理、营销管理和链上透明度得到显著改善.

在实际应用方面, Merlinda 等^[4]提出的区块链技术方案, 利用其分布式与可追溯性特点, 实现了对能源供应的有效控制. Tønnessen 等^[5]通过多案例研究, 分析了区块链技术对供应链管理的影响, 验证了其在各个领域的广泛适用性. Wong 等^[6]则研究了区块链技术在中小企业供应链管理中的影响, 特别是在微小企业的应用, 探讨了关键影响因素和应用效果.

在供应链库存管理方面, 国内学者也进行了深入研究, 提出了多种优化方案. 张娟等^[7]认为, 对于产业链中的采购溯源环节, 应该着重去强化管理, 以此减少库存成本. 钱叶霞等^[8]提出了一种运用遗传算法的优化策略进行库存管理配置选择, 对供应链中的供销进行网络优化管理.

尽管区块链技术在供应链管理中的应用已取得显著进展, 但目前的系统在数据存储去中心化、数据完整性、数据真实性及信息隐私性等方面仍存在不足^[9-13]. 现有解决方案通常依赖自建的溯源管理系统或可信第三方提供的管理服务, 未能完全满足供应链管理的所有要求. 因此, 未来的研究需要进一步探索和改进行现有技术, 以全面提升供应链管理系统的效率和安全性.

1 诚实对等实用拜占庭容错

传统的 PBFT 共识算法面临要求全节点参与的问题, 在供应链管理场景下, 这导致了通信资源的高额消耗、节点运维难度增加及共识达成时间增加等难题^[14]. 为应对这些挑战, 本研究提出了诚实对等实用拜占庭容错(honest-peer practical Byzantine fault tolerance, HPBFT)共识协议, 并整合节点评估机制, 增强了其在供应链管理环境下的适应性与效能^[15], HPBFT 算法通过以下几个关键方面的改进实现了优化:

(1) 利用 Honest-peer 信誉模型, 系统通过分析并量化每个节点的信誉得分, 来衡量它们在共识形成中的可靠性. 这种方法通过持续刷新各节点的信誉评估, 有效缓解了节点管理的潜在挑战, 进而增强了整个系统的稳健性和信赖度.

(2) 在共识节点的选举环节, 采用可验证随机函数(verifiable random function, VRF)作为核心机制. 该技术的集成, 显著增强了选举过程的随机性和不可预测性, 从根本上提升了抗操纵能力. 因此, VRF 机制不仅强化了系统的安全性, 也优化了资源利用效率.

(3) 通过引入一种创新的策略, 即融合节点信誉评估体系与优化的共识中心节点选举算法^[16]. 精准识别并选取高度可靠的共识节点, 直接促进了共识过程的精简, 尤其是在确认环节, 从而有效减少了系统资源的消耗, 显著提升了系统的处理能力.

在 HPBFT 共识协议的具体运行步骤中, 如图 1 所示, 客户端的交易请求是整个流程的起点. 若遭遇原主节点未能在预设时间窗内做出回应的异常情况, 系统将自动触发一个故障恢复机制. 接下来, 依据各节点的信誉积分排序, 网络共同推举出一个新的主节点加入到当前的共识集合中, 确保共识过程不间断地推进. 新主节点随即启动新的共识周期, 刷新共识状态, 并接力进行下一任共识节点的选拔工作, 以此循环往复, 不断驱动网络稳定而高效地运行.

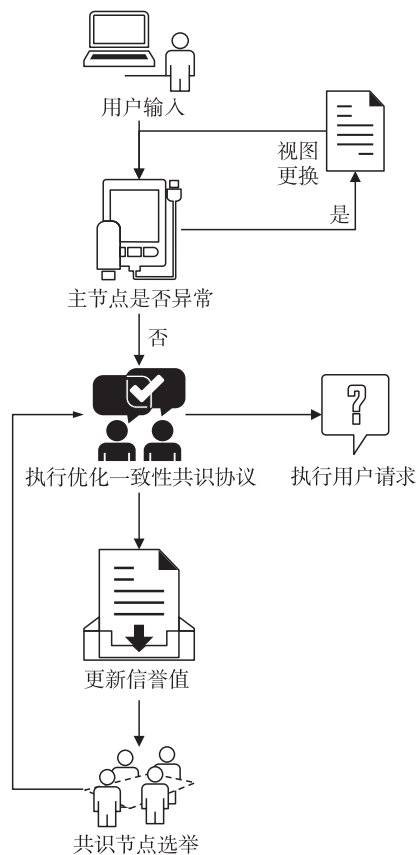


图 1 HPBFT 工作流程图
Fig. 1 HPBFT workflow diagram

2 梯度下降遗传算法

遗传算法作为一种随机搜索算法,通过定向随机搜索大大提高了效率^[17].通过模拟自然选择和遗传变异,逐步优化种群,最终找到最优解 $\max f(x)$.

$$\max f(x) = \text{s.t. } X_{\max_{\min}}. \quad (1)$$

与传统优化算法相比,遗传算法的计算过程更为简单有效.这种方法不仅能够处理复杂的优化问题,还能在实际应用中发挥重要作用,其过程如下.

2.1 个体初始化

在本研究中,每个个体 $x^n(0)$ 用一个长度为 l 的二进制码串 $\{x^1(0), x^2(0), \dots, x^n(0)\}$ 表示,其中二进制编码状态有两种状态 $\{0, 1\}$,且为随机生成.系统包含 n 个个体的群体,为了确保在生成下一代时能对选择个体,群体规模 n 设定为偶数.对每个个体应用适应度函数进行评估,并根据适应度高低选择个体交配^[18].经过一定遗传代后,进入下一阶段的过程.

2.2 形成初代种群

在此阶段涉及评估群体中每个个体的目标函数值,汇总关键统计量:总和 $f_{\Sigma}(k)$ 代表所有个体目标值的累加,平均值 $f_{\text{aver}}(k)$ 体现了群体性能的集中趋势,而最大值 $f_{\max}(k)$ 和最小值 $f_{\min}(k)$ 分别指出群体表现的最佳与最差情况.

2.3 适应度评估

- (1) 对当前群体中 $P(t)$ 的每个个体 X' 使用适应度函数 $f(x_i)$ 进行评估,得到各个体的适应度值.
- (2) 根据适应度值通过轮盘赌选择策略,从群体中选出 n 个个体组成父代群体 P_{selected} .
- (3) 从父代群体中随机选择个体进行交配,使用不同的交叉方法生成新的子代个体 $C(t)$.
- (4) 对子代个体进行变异操作,以一定的变异概率 p_m 随机改变二进制码串中的某些位.
- (5) 将变异后的子代个体作为新的群体 $P(t+1)$,用于下一代的进化^[19].

2.4 最优解

经过适应度评估后得到了复杂问题的最优或近优解.通过将问题的决策变量 $x = (x_1, x_2, \dots, x_d)$ 划分为若干子集 x_1, x_2, \dots, x_m ,每个子集包含一个或多个决策变量.对于每个子集 x_i ,使用二进制编码将其表示为一个二进制字符串 $b_i = \{b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{ik}\}$,其中 $b_{ik} \in \{0, 1\}$, k 为编码长度.求得最优解计算具体过程.

3 基于机器学习和区块链共识算法的供应链管理

本文提出了一种混合优化策略,将遗传算法与梯度算法结合,旨在优化供应链库存管理,并引入HPBFT共识机制以提升区块链网络的效率和可靠性.该方案充分利用遗传算法的全局寻优能力和梯度算法的局部精细调整优势,通过混合优化策略显著降低库存管理成本.

针对库存优化问题,遗传算法凭借其选择、交叉和变异机制,在庞大得解空间中有力推动了全局最优解的探寻.然该算法亦有局限,存在陷入局部最优而难以突破的风险.本文将梯度算法引入到遗传算法的进化过程中.每次梯度算法寻优获取的最优值用于改善遗传算法中的种群,将种群中的最优个体与梯度算法的最优值进行对比,并将较优的解作为梯度算法的起始点.通过这一过程,既提高了全局寻优的能力,又保证了局部解的精度,从而显著优化供应链库存管理,降低成本.

在供应链共识层面使用了区块链共识机制,引入Honest-peer信誉模型和VRF.该体系为网络中的每一节点赋予一个信誉评分,该评分作为衡量节点可靠程度及其过往行为记录的标尺,保障所选拔共识节点的高度信任度.信誉分数会依据节点的实时互动与行为模式动态调整,以实现节点信誉的精准反映.结合VRF,选举过程具有防攻击、低耗能和抽签结果唯一性的特点,确保了选举的公平性和安全性.通过信誉评估后的节点进行随机抽样,选出参与共识的节点,有效提升了共识过程的效率和系统的整体可靠性.

3.1 梯度算法迭代选择

梯度下降法在快速收敛至局部极小点方面表现出色,能够高效减少迭代以达到局部最优化,但其探索全局最优解的能力有限.因此,本研究旨在结合标准遗传算法与梯度下降法的互补优势,构建一个更加全

面的解决方案,以更高效地应对供应链库存管理的优化难题,实现全局优化性能的提升. 首先,初始化设置遗传算法的关键参数,涵盖种群 N 、基因串长度 L 、进化迭代次数 G ,同时确定梯度优化算法的起始设计点 x_0 及收束阈值 ϵ .

当梯度算法推进至第 k 步时,实施如下方案,选取遗传算法当前种群的最优解个体 x_{GA}^k 与梯度下降法最新探索得到的设计点 x_{GD}^k 进行对比. 随后,采纳两者中更优者作为梯度算法后续迭代的出发点,即

$$x_0^{(k+1)} = \arg \min(f(x_{GA}^k), f(x_{GD}^k)), \tag{2}$$

式中, $f(x)$ 表示目标函数值.

每次梯度算法得到的解 x_{GD}^k 替换遗传算法中的最差个体,以融合两种方法的优点. 具体为,找到遗传算法种群中适应度最差的个体 x_{worst} ,并用梯度算法的解 x_{GD}^k 替换,即

$$x_{worst} \leftarrow x_{GD}^k. \tag{3}$$

实现梯度算法和遗传算法的融合,优化供应链库存管理问题,流程如图 2.

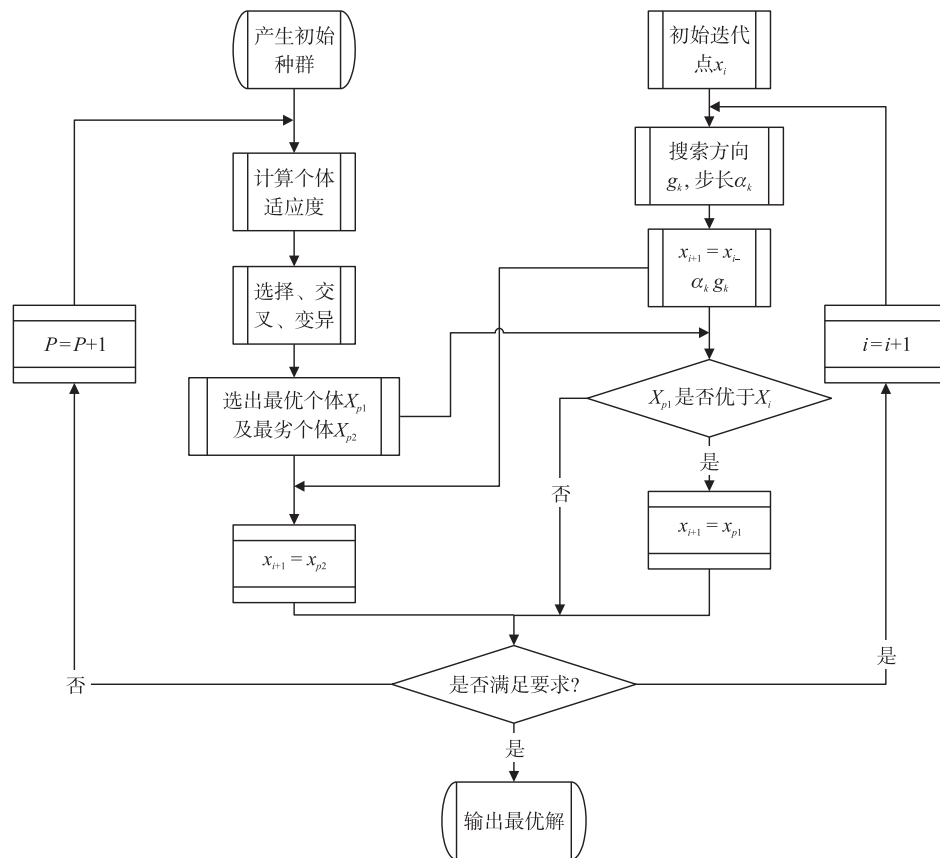


图 2 遗传算法和梯度算法结合流程图

Fig. 2 Flowchart of combining genetic algorithm and gradient algorithm

3.2 优化一致性 HPBFT 协议

采纳 Honest-peer 信誉模型构建一个名为 HPBFT 的节点信誉评价系统,旨在系统化地鉴定与评估共识节点的可靠性水平. 每个节点 i 都具有一个可靠信誉值 R_i ,取值范围在 $[0, 1]$ 之间,反映节点的可靠性. 首先,赋予所有节点相同的信誉基线值 0.5. 在 HPBFT 的共识节点挑选流程中,运用了可验证 VRF 来对已通过信誉测评的节点执行随机选取操作. 设 V_i 表示节点 i 使用 VRF 产生的随机数,将 V_i 的结果与设定的阈值 θ 进行比较,若 $V_i > \theta$,则节点 i 符合成为共识节点的条件. 选出的共识节点集合 S 和候选共识节点集合 C 通过信誉值排序.

每当一个共识周期终结,现任主节点 P_m 触发信誉值更新指令 R_u . 其他参与共识节点 $p_i (i = (1, 2, \dots, n))$ 收到指令 R_u 后,依据各自维护的最新数据记录 D_i 协同计算网络中所有节点的信誉分 V_i ,各个节点 P_i 根据其保存的信息 D_i ,独立计算各自的信誉值 S_i 更新. 更新公式如下:

$$S_i = f(D_i), \quad (4)$$

式中, f 是用于计算信誉值的函数。

然后,所有节点使用一致性协议 HPBFT 达成共识,以确定每个节点 P_i 的最终信誉值 S_i 。一旦共识达成,主节点 P_m 将新的节点信誉值 S_i 广播到全网。此过程可以表示为:

$$S_i \rightarrow \{(P_1, S_1), (P_2, S_2), \dots, (P_i, S_i)\}, \quad (5)$$

式中,每个节点 P_i 的信誉值更新为 S_i 并且这些新的信誉值将作为下一共识周期的数据基础。这一过程确保了全网节点的信誉值在每个共识周期结束后得到更新和同步。

节点的信誉评价表动态地管理节点在共识节点和候选共识节点之间的转移,使得节点根据其当前的行为和信誉值进行动态调整。具体而言,节点可以通过 VRF 每轮迭代产生的随机数和相应的证明值进行评估,验证其是否符合加入共识节点的标准。

本研究聚焦于缓解原始共识算法因通信成本偏高所带来的挑战,通过改进共识实体间的一致性达成机制实现了优化。优化协议的流程细节概览于图 3 中。一致性优化协议过程主要分三个阶段:各节点预准备阶段、中心节点预准备阶段和共识确认阶段。

在预准备步骤中,主节点 P_m 负责创建预准备消息 m 并将其广播至网络中的所有节点 P_i ,非参与节点 P_j 只需要简单传递该条信息,而参与节点则需要履行验证职责。一旦确认交易无误,将继续推入下一阶段的流程,反之则终止对该消息的进一步操作。

在数据一致性确认阶段,参与共识的所有节点 P_i 完成验证后,将结果返回至主节点 P_m ,此阶段是为了验证最终结果的一致性,进而保证链上信息的一致性和可靠性。当主节点收到的反馈确认信息超过 $2n+1$ 以上时,共识完成确认。

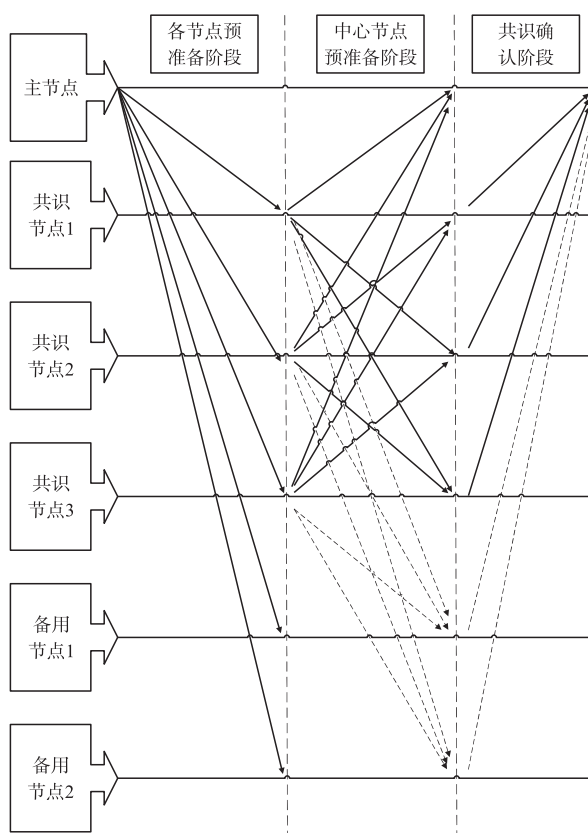


图3 优化一致性协议

Fig. 3 Optimized conformance protocol

4 实验结果与分析

4.1 通信开销

本研究对经典 PBFT 共识机制的一致性验证环节进行了创新性的优化,结合 VRF 和声誉机制来减少共识次数,引入可验证随机函数和信誉系统,以减少达成共识所需的轮次,进而降低整体的网络通信负荷。本方案采用 Hyperledger Fabric 作为技术基础,该平台主要依赖 Docker 容器技术以及 Git 版本控制系统进行应用开发。区块链环境的配置和智能合约的部署则通过 Visual Studio Code 这一集成开发环境,并采用 Go 编程语言来实现。

将 HPBFT 算法方案与现有类似方法进行了通信开销对比分析,得到如图 4 所示的结果。

根据图中数据可得知,与经典的 PBFT 算法相比,随着节点数目的增加,经过改进后的 VRF-PBFT 与 HPBFT 算法方案的通信次数得到了有效的优化;虽然 H-PBFT 与经典的 PBFT

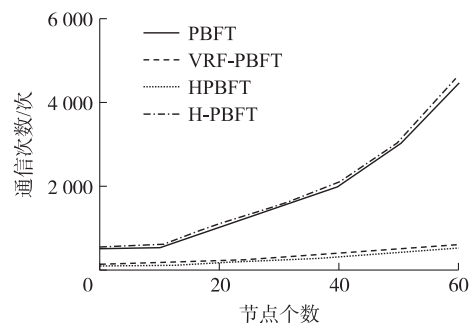


图4 算法通信开销对比

Fig. 4 Comparison of algorithm communication costs

算法相比通信次数增加了,但加入的 Honest-peer 信誉模型主要是为了提高方案节点之间的可信度,以提升方案的有效性,这一数据表明了方案改进的有效性.

除了验证算法的通信复杂度,算法的吞吐量及时延也是衡量算法实用性的两个重要指标,吞吐量越多、时延越低,方案实用性则更高. 因此,本文也通过分别对比经典 PBFT 算法与 VRF-PBFT 和 HPBFT 算法的吞吐量与时延来验证方案的有效性,吞吐量对比试验结果如图 5 所示,时延对比结果如图 6 所示.

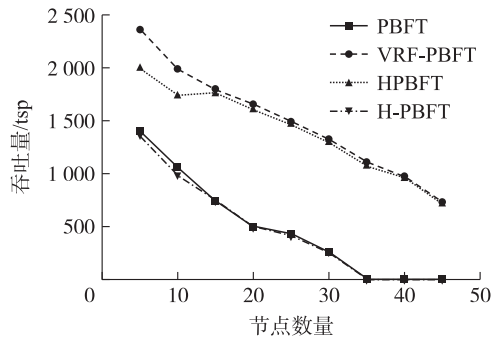


图 5 算法吞吐量对比

Fig. 5 Comparison of algorithm throughput

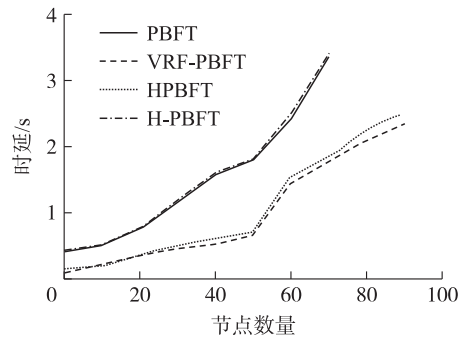


图 6 算法时延对比

Fig. 6 Comparison of algorithm delay

根据图 5 中数据可知,随着节点数量的增加,各个方案的吞吐量都有较为明显的降低,其中经典 PBFT 算法的吞吐量相较于其余两方案始终处于较低吞吐量的状态. 相较于 VRF-PBFT 算法,HPBFT 吞吐量的变化起伏较小,方案整体稳定度相对较高. 此外,根据图 6 中数据可知,随着节点数量的增加,各个算法的时延均处于正向上升趋势,其中经典 PBFT 算法的上升幅度最高,数值相对其它两方案整体较高. 而 VRF-PBFT 算法与 HPBFT 方案则均处于稳定上升的趋势. 由此可验证方案整体的效率较优.

上述实验针对经典 PBFT 共识算法中节点个数较少情况下的算法进行了分析,若节点总量为 n ,则其通信开销为 $2n^2-2n$,且共识过程分广播与确认两个阶段,两个阶段的通信开销为 $(n-1)+(n^2+1)$. 若在确认阶段因消息错误而改变了消息的共识,则通信开销为 $2n^2-2n+pn(n-1)$, p 代表每个节点需要与其他节点进行额外通信的次数(本文设 $p=1$).

同样,在 HPBFT 共识算法方案中,若节点数量为 m ,则在各节点的预准备阶段其通信开销为 $m-1$,主节点预准备阶段的通信开销为 $(m-1)^2$,在个节点的确认阶段其通信开销为 $m-1$,因此该方案的总通信开销为 m^2-1 .

由表 1 和表 2 可得知,PBFT 的通信开销明显高于本方案 HPBFT,且随着共识时不一致情况的次数的提升,HPBFT 的通信开销要远低于传统方案.

表 1 PBFT 共识算法通信开销

阶段名称	次数
广播	$(n-1)+(n^2+1)$
确认	n^2-n
总计	$2n^2-2n+pn(n-1)$

表 2 HPBFT 共识算法通信开销

阶段名称	次数
各节点预准备	$m-1$
主节点预准备	$(m-1)^2$
确认	$m-1$
总计	m^2-1

在节点数量为 100($n=100$)的情况下,传统 PBFT 算法在每次共识过程中平均需要进行约 300 000 次消息传递. 在相同条件下,HPBFT 算法的平均消息传递次数约为 210 000 次($m=100$),比传统 PBFT 算法减少了约 50%. 这表明,本方案可以有效提高基于区块链的供应链在管理时的通信效率.

4.2 梯度下降遗传算法案例应用

以非中心化的某公司的供应链库存管理为案例进行分析. 该公司共有 5 个仓库,其中仓库的商品库存如表 3 所示,给出了该公司 5 个仓库中的部分数据信息,这些信息也是解决库存最优解的必要信息. θ_k 表示商品 k 的初始库存量. μ_k 表示商品 k 的安全库存量. Q_k 表示商品 k 的订货批量,指的是每次向供应商订购商品的数量. Y_k 表示商品 k 的最低库存量. X_k 表示商品 k 的订货成本. Z_k 表示商品 k 的持有成本.

表3 仓库的商品库存

Table 3 Commodity stocks in warehouses

	$\theta_k/\text{件}$	$\mu_k/\text{件}$	$Q_k/\text{件}$	$Y_k/\text{件}$	$X_k/(\text{元}/\text{次})$	$Z_k/(\text{元}/\text{件})$
仓库 1	4	9	16	150	100	4
仓库 2	2	6	28	190	100	4
仓库 3	3	8	32	200	100	4
仓库 4	5	10	20	140	100	4
仓库 5	2	5	7	60	100	4

经过对库存数据信息的统计,确定订货时的数据信息如果想到要达到订货人员的需求,需要对库存管理进行最优方案的查询,且当达到最优方案时,供应链的成本管理问题也得到解决。

首先使用梯度下降遗传算法的实数编码方法对模型进行编码,求得解的值域。根据仓库中的数据信息,分别将本文中梯度下降遗传算法的三个参数:数量、自适应交叉概率、自适应变异概率的参数分别调整至 50、0.8 和 0.01。则可得出当达到最大的进化次数时,停止继续优化,得到最优结果值。若库存管理达到最优值,须使得总库存费用达到最小值,在库存管理费用有最大值要求时,就需要计算出一个适应度函数来表示调度所需的总费用。经过自适应变异后得到适应度均值与适应度最大值,即

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f_{\max} - f)}{(f_{\max} - f)}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ P_{m1}, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (6)$$

为了展示梯度下降遗传算法在供应链库存管理中的应用效果,以仓库 5 为例进行对比。在未优化前,该公司的年库存总成本为 9 300 元。通过应用梯度下降遗传算法,我们优化了库存策略,将库存量减少到 800 件,减少了采购次数和缺货次数。优化后的年库存总成本降低到了 8 875 元,实现了约 4.6% 的成本节约。这一改进显著提升了库存管理的效率和公司的经济效益。

为了让方案结果更加真实可信,本文将最大最小变异概率分别设定为 0.1 与 0.001。在进行进化时需要有一个最大的迭代次数,为了实验的高效性,本文将迭代次数设定为 100。经过迭代后,可以得出最终的结果。如图 7 和图 8 所示。

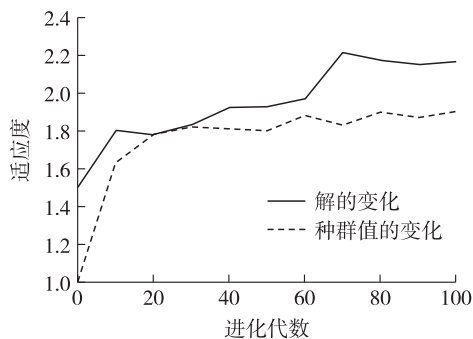


图7 基本算法性能

Fig. 7 Basic algorithm performance

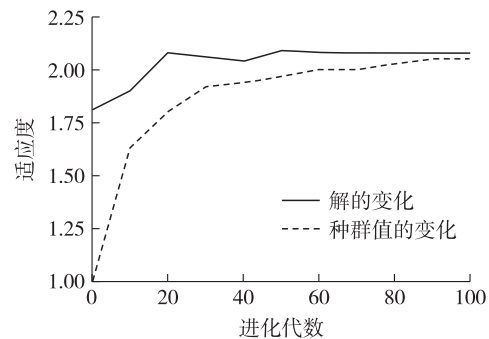


图8 改进算法性能

Fig. 8 Improved algorithm performance

可知,采用梯度下降遗传算法达到的仿真结果效果明显要优于传统的遗传算法的优化结果,能够更好的解决供应链库存最优化管理问题,进而解决了供应链成本管控问题,且改进后的算法对不同的库存管理需求具有良好的可扩展性,且不会随着仓库数量的增加使得计算复杂度呈指数级上升,具有较高的实用性。

综上,本文 HPBFT 共识方案要优于传统的 PBFT 方案,且在供应链管理时,基于遗传算法来寻找最优库存管理方案不仅提高了供应链管理的信息上链共识效率,也能够帮助更高效的解决库存管理与优化问题。

5 结论

为解决供应链管理中面临的库存成本高昂及通信开销巨大等问题,提出了一种结合机器学习与改进

PBFT 共识算法的优化方案. 该方案采用了遗传算法与梯度算法相结合的混合优化策略,充分利用了全局寻优和局部精细调整的优势,显著降低了库存管理成本. 同时,通过引入 Honest-peer 信誉模型和 VRF 改进了 PBFT 共识机制,有效提升了节点选举过程的效率和系统的整体可靠性. 实验结果表明,与传统方法相比,该优化方案在降低供应链管理成本及减少通信开销方面表现出显著的优越性. 但本方案采用的库存管理及数据上链与节点共识并不能解决现有所有供应链管理问题,因此有一定的应用局限性,后续本文也将继续改进与优化,让方案能够应用于多种不同的应用场景中.

[参考文献]

- [1] MAHMOND M, WESAM A, WALEED S, et al. Smart parking system with privacy preservation and reputation management using blockchain[J]. IEEE access, 2020, 8, 150823–150843.
- [2] ARORA S, OBEROI S, NABI T, et al. How does blockchain impact sustainable food security? Insights from literature review [J]. International journal of information management data insights, 2024, 4(2): 100276.
- [3] LU Q, XU X. Adaptable blockchain-based systems: a case study for product traceability[J]. IEEE software, 2017, 34(6): 21–27.
- [4] MERLINDA A, VALENTIN R, DAVID F. Blockchains: crypto-control your own energy supply[J]. Nature, 2017, 548(7666): 158.
- [5] TÖNNISSEN S, TEUTEBERG F. Analysing the impact of blockchain-technology for operations and supply chain management: an explanatory model drawn from multiple case studies[J]. International journal of information management, 2020, 52: 101953.
- [6] WONG L, LEONG L, HEW J, et al. Time to seize the digital evolution: adoption of blockchain in operations and supply chain management among Malaysian SMEs[J]. International journal of information management, 2020, 52: 101997.
- [7] 张娟, 王子玥, 余菲菲. 纵向供应链中新产品技术创新模式选择[J]. 管理学报, 2020, 17(11): 1697–1705.
- [8] 钱叶霞, 叶翀. 基于改进遗传算法对 LIRP 问题集成优化研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2024, 40(3): 362–369.
- [9] 李晓英. 大型餐饮企业绿色供应链管理的供应商选择与契约协调模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [10] 林文浩. 基于区块链的建筑工业化供应链金融研究[D]. 广州: 广州大学, 2022.
- [11] 陈建伟, 谢金宏, 袁曼丽. V2G 网络中支持匿名论证的隐私数据聚合方案[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2025, 41(4): 1–10.
- [12] 朱慧敏. H 公司多级库存控制应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- [13] PATIL K, OJHA D, STRUCKELL E M, et al. Behavioral drivers of blockchain assimilation in supply chains: a social network theory perspective[J]. Technological forecasting and social change, 2023, 192: 122578.
- [14] LUO X, TANG B. Byzantine fault-tolerant federated learning based on trustworthy data and historical information[J]. Electronics, 2024, 13(8): 1540.
- [15] 黄保华, 彭丽, 赵伟宏, 等. 基于可验证随机函数的实用拜占庭共识算法[J]. 计算机科学, 2023, 50(S1): 737–742.
- [16] BEIBEI L, PEIRAN W, ZERUI S, et al. Defending Byzantine attacks in ensemble federated learning: a reputation-based phishing approach[J]. Future generation computer systems, 2023, 147: 136–148.
- [17] 项晓宇, 朱敏捷, 周灵刚, 等. 基于机器学习的短期规上行业工业增加值预测[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2023, 46(2): 99–106.
- [18] 周纹萱, 徐伟. 改进蚁群算法在低碳冷链物流路径优化中的应用[J]. 物流技术, 2023, 42(5): 105–110, 137.
- [19] 康晓凤, 邵晓根. 基于遗传算法的智能商品搜索策略的研究[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2014, 37(4): 126–130.

[责任编辑: 杜忆忱]