

面向车联网数据传输可靠性的共识机制研究

王琼惠, 张文波

(沈阳理工大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110159)

摘要: 车联网环境中数据传输量呈指数增加, 路况信息复杂多变, 由此导致的数据传输可靠性问题愈发严重。确保车联网内各个车辆节点传输数据的统一性是应对问题的关键, 而共识机制研究则是实现该目标的重要途径。针对上述问题, 基于实用拜占庭容错 (practical Byzantine fault tolerance, PBFT) 共识算法提出一种基于信誉的 R-PBFT 共识机制: 对车辆节点提出基于直接交互值和推荐交互值的全局信誉评分机制; 设置安全信誉阈值, 通过信誉值比较将车辆节点分类为候选节点集和普通节点集; 通过随机数生成器在候选节点集中随机选取一车辆节点作为本轮共识的代理节点, 负责打包并生成区块提案; 通过奖惩机制对本轮共识过程中车辆节点的行为予以信誉奖惩并更新节点全局信誉值。实验结果表明, 相较 PBFT, R-PBFT 共识算法兼顾了时延和可靠性的优化, 不仅在高密度和高恶意节点比例的环境下表现出较好的扩展性, 而且在共识过程中提高了数据传输的可靠性。

关键词: 车联网; 实用拜占庭容错算法; 信誉值; 区块链

中图分类号: TP309.2

文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1251.2025.03.009

Consensus Mechanism Research on the Reliability of Data Transmission in the Internet of Vehicles

WANG Qionghui, ZHANG Wenbo

(Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: In the internet of vehicles environment, the volume of data transmission is increasing exponentially, and the road condition information is complex and changeable. As a result, the problem of data transmission reliability is becoming increasingly serious. Ensuring the uniformity of data transmission among all vehicle nodes in the internet of vehicles is the key to addressing this issue, and consensus mechanism research is an important way to achieve this goal. To address the above problems, a reputation-based R-PBFT consensus mechanism is proposed based on the practical byzantine fault tolerance (PBFT) consensus algorithm: a global reputation scoring mechanism based on direct interaction values and recommended interaction values is proposed for vehicle nodes; a security reputation threshold is set, and vehicle nodes are classified into candidate node sets and ordinary node sets through reputation value comparison; a vehicle node is randomly selected from the candidate node set as the proxy node for this round of consensus through a random number generator, which is responsible for packaging and generating block proposals; a reward and punishment mechanism is used to give reputation rewards and punishments to the behavior of vehicle nodes during this round of consensus and update the global reputation value of the nodes. Experimental re-

sults show that compared with PBFT, the R-PBFT consensus algorithm optimizes both delay and reliability. It not only shows better scalability in high-density and high-malicious-node-ratio environments but also improves the reliability of data transmission during the consensus process.

Key words: internet of vehicles; practical Byzantine fault tolerance algorithm; reputation value; block-chain

随着通信技术的发展,车联网成为了车辆与车辆、车辆与道路、车辆与行人之间良好的服务平台。然而,车联网环境中数据传输量呈指数增加,路况信息多变,由此导致的数据传输可靠性问题也愈发严重。网络中存在恶意车辆发布错误数据消息或篡改他人共享数据的情况,从而影响车联网中数据的可靠性。攻击者通过散布虚假信息影响交通秩序,误导车辆驾驶判断,甚至导致交通事故发生。再者,攻击者也可篡改车辆自身信息来规避事故责任。因此,如何快速有效地发现恶意车辆或对恶意消息采取有效措施进而削弱其对车联网数据传输可靠性的影响是当今的研究热点之一。

近年来,区块链广泛应用于数据管理、信任评估等多个领域,其快速发展为车联网数据传输可靠性提供了新的方向,其具备去中心化、数据无法篡改与防伪造特征,确保链上数据具有一定的安全性^[1]。共识机制的研究可确保车联网内各个车辆节点数据的统一性。其中,实用拜占庭容错(practical Byzantine fault tolerance, PBFT)共识算法在联盟链领域得到了广泛应用^[2],其优势在于良好的共识效率,但由于其设计特点,无法实时监测节点数量的变化,随着节点数量的增长,其性能显著降低,无法应用于大规模的动态网络环境。

针对 PBFT 算法主节点选择随机、通信量大和节点积极性低等问题,将共识节点根据特定属性进行分类,提升数据存储与节点管理的效率,进而降低共识过程的复杂度。文献[3]采用基于时序和八卦协议的 PBFT 共识算法,引入 gossip 协议,并将协议的 Push-Pull 模式应用于车联网节点之间的通信,采用时间序列提高节点之间通信和达成共识的效率,有效克服了车联网节点共识和鉴权方面的缺陷。文献[4]针对集群头的选择提出一种累积信任证明机制,根据车辆节点积累的信任选择特定的路侧单元(RSU)成为区块链矿工。每辆车和 RSU 向多个目的地发送交易,以避免单点故障。文献[5]在传统共识机制的基础上,提出基于区块链的车对车协同拥堵避免机制,通过对车辆节点进行分类,并根据路径损耗对验证节点进行分组,选择信道质量好的节点作为主节

点,从而提高算法性能。文献[6-7]借助散列函数对共识节点做出分类,能够尽量减少不同节点之间的频繁交互,简化网络通信过程,增强网络的扩展性,然而这种方式未能有效判断潜在的拜占庭故障节点。文献[8]提出一种基于 TRUG-PBFT 主从链和零知识证明的匿名认证方案,其通过优化 PBFT 共识流程、使用分数分组减少共识节点的数量、使用可验证随机函数选取主节点,同时使用基于点阵的零知识证明方案实现车辆的匿名认证。

本文针对车联网数据传输可靠性问题提出一种基于信誉的 R-PBFT 共识机制。首先,对车辆节点提出基于直接交互值和推荐交互值的全局信誉评分机制;其次,设置安全信誉阈值,通过信誉值比较将信誉值较高的车辆节点分类为候选节点集,其余则为普通节点集;通过随机数生成器在候选节点集中随机选取一名车辆节点作为本轮共识的代理节点,负责打包并生成区块提案;最后,通过奖惩机制对本轮共识过程中车辆节点的积极行为和消极行为予以信誉奖惩,更新节点全局信誉值。

1 实用拜占庭容错算法

1.1 PBFT 算法思想

PBFT 算法在确保系统安全可靠的基础上,实现了最多可容忍不超过三分之一的不合格节点^[9]。其要求不同节点保持相同状态,确保不同节点之间数据的统一,实施了一致性、视图切换与检查点三种基础协议^[10]。

一致性协议利用三阶段共识机制保障不同节点间数据存储的统一性,若其中代理节点发生了故障或者恶意行为,将激活视图切换协议替换故障的代理节点。

视图切换协议可以在代理节点失效时保证系统的活性,一般由超时机制触发。普通节点在接收到有效请求时,会启动计时器并等待请求执行的结果,当请求被执行时停止计时器。计时器超时,触发视图转换协议,将视图编号 N 变更为

$N+1$, 选取下一视图的代理节点。当代理节点接收到 $2f$ (f 代表系统中最多可以容忍的不合格节点的数量) 个有效的视图更换确认消息后, 进入下一视图。

检查点协议属于周期性操作, 系统设定特定时间点进行检查, 其目的是定期清理日志、优化资源使用与快速调整节点状态^[11]。

1.2 PBFT 共识流程

PBFT 共识算法强调各个节点保持统一状态, 各个节点实施的操作同步。其中一致性协议分成五个环节: 请求环节、预准备环节、准备环节、确认环节与响应环节^[12]。相关过程如图 1 所示。

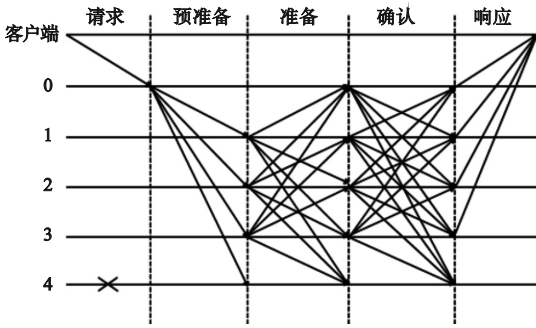


图 1 PBFT 共识流程图

Fig. 1 PBFT consensus flowchart

PBFT 算法共识的主要过程如下。

1) 请求环节: 用户将请求发送到主节点, 这个请求包括消息类型、操作内容、时间戳以及发送请求的用户信息。

2) 预准备环节: 主节点接收到请求后, 将其转发给其他节点, 所有备份节点会接收到这一请求, 并对其进行验证。

3) 准备环节: 备份节点之间相互传递预准备和准备消息, 当某个节点收到超过一定数量的有效消息后, 确认该请求的有效性, 并进入下一个环节。

4) 确认环节: 节点互相发送确认消息, 在收到足够数量的确认消息后, 才会继续处理该请求。

5) 响应环节: 节点在接收到超过 $2f$ 个不同节点的确认消息后, 会向用户发送响应, 用户因此能够确认达成了共识。

2 基于信誉的 R-PBFT 共识机制

2.1 R-PBFT 算法思想

车联网采用的 R-PBFT 算法流程如图 2 所示。

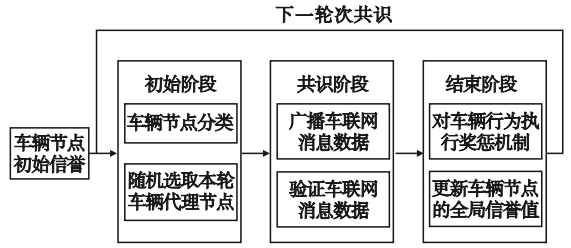


图 2 R-PBFT 算法流程图

Fig. 2 R-PBFT algorithm flowchart

1) 信誉机制: 对车辆节点提出基于直接交互值和推荐交互值的全局信誉评分机制。

2) 节点分类: 设置安全信誉阈值, 通过信誉值比较将信誉值较高的车辆节点分类为候选节点集, 其余则分类为普通节点集, 只有候选节点参与共识, 以达到减少通信成本、增强系统处理能力的目的。

3) 代理节点随机选取: 通过随机数生成器在候选节点集中随机选取一名车辆节点作为本轮共识的代理节点, 负责打包并生成区块提案, 防止“刷分作恶”概率的发生。

4) 降低共识参与消耗: 代理节点打包完成新区块之后, 会把该区块广播至整个车联网, 当所有候选车辆节点接收到待验证的新区块时, 将对该区块进行验证投票, 若候选节点集中超 $2/3$ 是赞同票, 则新区块通过验证, 将由 RSU 上传至区块链进行存储。

5) 奖惩机制: 通过奖惩机制对本轮共识过程中车辆节点的积极行为和消极行为予以信誉奖惩。奖惩机制旨在提升车辆节点在共识过程中的参与度与系统数据传输可靠性, 进而减少出现中心化风险的可能性。

2.2 R-PBFT 共识流程

R-PBFT 共识机制通过设置安全信誉阈值, 将全部车辆节点分类为代理节点、候选节点集和普通节点集, 只有当节点全局信誉值超过安全信誉阈值才能进入候选节点集参与共识, 普通节点的职责是进行账本记录, 以此减少网络通信的成本、提升系统的处理能力。R-PBFT 共识流程图如图 3 所示。

步骤 1 系统检查是否设置代理节点和候选节点集, 若未设置, 执行步骤 2 中系统设计的规则进行候选节点集和代理节点的选择。若已设置好, 则执行步骤 4。

步骤 2 通过信誉机制计算节点全局信誉值, 与安全信誉阈值比较进行节点分类。若大于

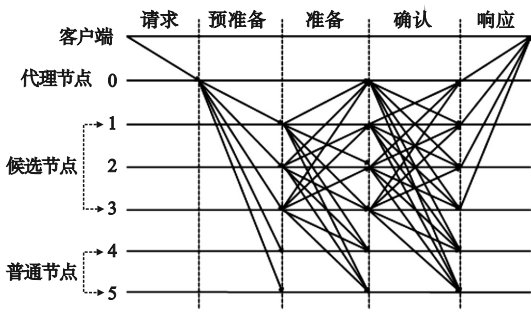


图3 R-PBFT 共识流程图

Fig.3 R-PBFT consensus flowchart

安全信誉阈值,则进入候选节点集参与共识;若小于安全信誉阈值则成为普通节点负责记账。

步骤3 在候选节点集中通过随机选择机制选取一名节点作为本轮的代理节点,负责生产区块。

步骤4 客户端向代理节点提交请求,代理节点把请求播送给网络中其余节点,进入预准备阶段。

步骤5 在预准备环节,代理节点负责为用户端的请求分配序列号,随后将预准备消息传输到网络中的其他节点。本环节是为用户端的请求配置序列号,再将其传输到其余节点。

步骤6 在准备环节,当其他节点获取预准备消息后,将对这个消息是否合法进行验证(包括代理节点的信息摘要和视图编号)。只要验证成功,候选节点便会向其他节点发送准备消息,而且附上自身的编号(ID),并接受来自其余候选节点的准备消息。

步骤7 在提交环节,接收到准备消息的节点会对这个消息是否合法进行检查,若检查合格,该消息将被记录在消息日志内,之后候选节点会创建确认消息,并将其传播至其他节点,告知其他节点提案目前已经进入准备环节,完成共识。

步骤8 代理节点与候选节点把结果反馈到客户端,客户端对获取的信息做出验证处理,若存在来自不同节点的消息,其中至少有三分之二结果相同,从而认定请求处理完毕,执行步骤10。若在此过程中出现代理节点响应超时或由于车辆节点的恶意行为导致未达成共识,则触发视图切换,执行步骤9。

步骤9 当候选节点检测到代理节点响应超时或由于车辆节点的恶意行为导致未达成共识时,发起视图切换请求并进行广播,根据随机数选取下一个代理节点,当代理节点接收到超过 $2f$ 个视图更换确认的消息后,进入下一视图,等待下一

轮共识。

步骤10 根据系统监测在共识过程中节点的行为表现,通过奖惩机制计算并更新节点的综合信誉评分,等待下一轮共识。

3 R-PBFT 算法设计

3.1 信誉机制

定义1:直接交互值。指基于车辆节点间直接通信的历史交互形成的信任评分。评估 t 时段车辆节点 m 的直接交互值,应当分析该节点在RSU节点 n 的历史通信状况。直接交互值 $D_t(m, n)$ 的计算公式为

$$D_t(m, n) = \begin{cases} \frac{R_t(m, n)}{R_t(m, n) + F_t(m, n)}, & T_t(m, n) > 0 \\ D_0, & T_t(m, n) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $R_t(m, n)$ 代表节点 m 和节点 n 通信过程中,RSU接收的节点 m 发出的数据包数量; $F_t(m, n)$ 代表节点 m 和节点 n 通信过程中,节点 m 传输的数据包被RSU拒绝接收的数量; $T_t(m, n)$ 代表节点 m 在和节点 n 通信时传输的数据包总量,且 $T_t(m, n) = R_t(m, n) + F_t(m, n)$ 。如果二者未有任何通信行为,则车辆节点 m 的直接交互值将维持在其初始信任水平 D_0 。

定义2:推荐交互值。指车辆 m 和路边基站RSU的通信交互历史评估得到的信任评分。假设 t 时间段内,节点 m 并未和其他节点间实现有效通信或者通信频次较低,则RSU应当借助 $t-1$ 时段内和车辆节点 m 进行过通信的其他RSU节点估算其交互水平。这种指标可以视作对车联网内积极主动参与通信的车辆节点的信任激励。

PageRank算法^[13]的基本理念是通过链接结构来评估网页的重要性,一个网页的重要性不仅取决于其自身内容,还取决于链接到的其他网页的重要性。在车联网领域,这种概念可类推为在特定时间段内车辆和的通信频次越多,其取得的交互值更高。通信次数少,则交互值相对较低。因此,可借助经过改进的算法来估算车辆的推荐交互值,其计算公式为

$$PR_t(m, n) = d \sum_{u \in U(u_1, u_2, \dots, u_i)} \frac{PR_{t-1}(n, u)}{C(u)} + \frac{1-d}{N} \quad (2)$$

式中: $U(u_1, u_2, \dots, u_i)$ 代表在 $t-1$ 时间段内和车辆节点进行通信的全部RSU的集合; d 代表阻尼

因子,能够防止初始推荐交互值归零; $PR_{t-1}(n,u)$ 代表在 $t-1$ 时间段内 RSU 节点 u 通过与其他 RSU 节点 n 交互得到的推荐交互值; $C(u)$ 代表 RSU 节点 u 在 $t-1$ 时间段内的总通信频次; N 代表该时期的车辆数量。车辆节点的推荐交互值 $PR_t(m,n)$ 取决于与节点 m 通信的 RSU 节点集合 $U(u_1, u_2, \dots, u_U)$ 。假设 RSU 节点在这一时间段处于离线状态,则该节点将从集合 U 中移除。假设 RSU 节点在 $t-1$ 时间段内和车辆节点 m 通信频次不足一次,系统将为车辆节点 m 赋值,即初始推荐交互值 $(1-d)/N$ 。

定义3:全局信誉值。交互值的迅速提升可能无法准确评估节点信誉的增长,为了防止该现象,本文采用 logistic 回归模型对直接交互值与推荐交互值进行权重均衡,从而计算得到全局信誉值。全局信誉值 $S_t(m)$ 的计算公式为

$$S_t(m) = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha D_t(m,n) + \beta PR_t(m,n) + A_0)}} \quad (3)$$

式中: α β 代表直接交互值与推荐交互值的权重因子; A_0 代表偏移量,用于调节车辆初始信任度 D_0 。

3.2 节点分类

通过信誉机制计算每个车辆节点的全局信誉值,设定信誉值超过信誉阈值 T 的车辆节点归入候选节点集成为候选节点。

$$\text{候选节点} = \{n | \text{信誉值}(n) > T\} \quad (4)$$

候选节点集中,利用真随机数生成器(TRNG)生成一个随机数,假设本轮信誉值超过阈值 T 的车辆候选节点有 k 个,TRNG 生成一个在 0 到 $k-1$ 之间的随机整数 a ,根据生成的随机数 a 索引由车辆 ID 组成的候选节点列表,确定代理节点。由代理节点负责本轮次区块的打包以及在车联网中广播新区块。节点分类方案如图 4 所示。

3.3 奖惩机制

通过节点共识率及奖惩综合计算车辆节点奖惩信誉评分值。

定义4:节点共识率。节点共识率指车辆节点在参与共识过程中成功完成共识的概率。当车辆节点成功完成共识过程,就会产生有效的区块,该行为定义为节点的积极行为;节点产生无效区块、未在要求期限内完成区块生成,或者未传递信息参与记账,被归类成消极行为。节点共识率指标能够反映出节点在共识过程中的诚信度,节点 m 的共识率 G 计算式为

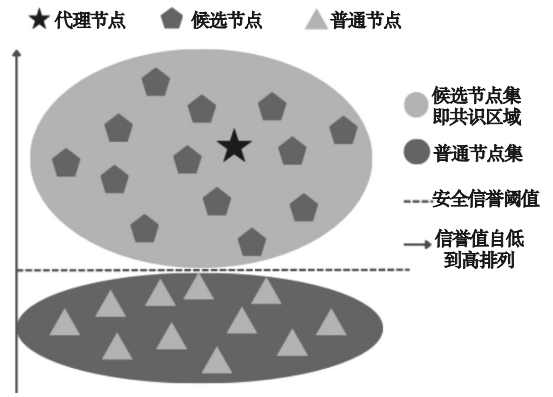


图4 R-PBFT节点分类方案示意图

Fig.4 Schematic diagram of R-PBFT node classification scheme

$$G(m) = \frac{s}{p} \quad (5)$$

式中: p 是节点参与共识的次数; s 是节点成功完成共识的次数。正常诚实节点的 G 值是 1,当初始值 p 为 0 时, G 值为 1。若节点出现消极行为, s 值减小, G 值将随之减小。

定义5:奖惩机制。在车辆交互环节,对于积极行为,代理节点将获得最高信誉奖励,参与共识的候选节点将得到相应的信誉奖励,而普通节点能获得一定程度的信誉奖励,对消极行为节点进行信誉惩罚。车辆节点 m 的信誉值 $S_{\text{new}}(m)$ 计算公式为

$$S_{\text{new}}(m) = G(m) (S_t(m) + \Delta r) \quad (6)$$

$$\Delta r = \begin{cases} +0.7, & \text{代理节点} \\ +0.5, & \text{候选节点} \\ +0.2, & \text{普通节点} \\ -0.1, & \text{消极行为} \end{cases} \quad (7)$$

式中 Δr 为节点共识表现评分变化。若代理节点正常产出区块完成共识,信誉值提升 0.7,且其成功参与共识的次数相应提升一次。如果候选节点能够正常传递消息,其信誉值将提升 0.5,且顺利参与共识的次数也增多一次。每次记账操作成功,普通节点的信誉值将增多 0.2,从而有望晋升至候选节点集合。

4 仿真实验及结果分析

4.1 实验环境

本算法在车载自组织网络仿真平台 SUMO 1.11.0 + Veins 5.2 + OMNeT + +5.7 上进行仿真模拟。以 Veins 为基础的车联网仿真框架,使用 SUMO 进行交通仿真,建立仿真场景,定义道路及车流

跟随模型,并通过 OMNeT++ 实现网络通信仿真。

本实验中使用的地图是通过 OpenStreetMap 手动选择沈阳市内大小约 4 km × 3 km 的道路信息区域(如图 5 所示)截取形成的 map.osm 文件,利用 SUMO 软件自带脚本文件形成相应的车辆行为文件.rou.xml 与道路文件.net.xml。

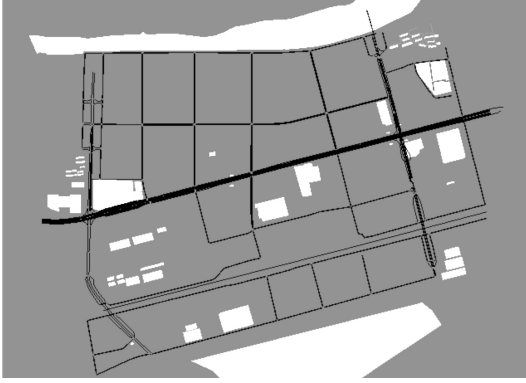


图 5 道路场景图

Fig. 5 Road scene diagram

基于仿真地图的道路布局,在街区的交叉点安装 RSU,在车辆对车辆(Vehicle-to-Vehicle, V2V)与车辆对基础设施(Vehicle-to-Roadside, V2R)通信活动中形成的数据被 OMNeT++ 记录,后续将根据收集到的信息进行性能分析。根据文献[12],将客户端发送的每 100 条交易打包成一个区块进行一次共识,根据不同的共识轮次仿真发起不同次数的交易。表 1 为本文仿真实验具体参数设置。

表 1 仿真实验参数设置

Table 1 Simulation experiment parameters

参数	值
仿真区域大小/(km × km)	4 × 3
MAC 层协议	802.11
仿真时间/s	500
车辆数	10 ~ 60
客户端发起共识轮次	0 ~ 1 000
共识反馈阈值	2/3
节点恶意概率	0.1
直接/推荐信任权重	0.5
直接/推荐信任初值	65

4.2 实验结果与分析

低时延算法在面对网络波动或节点故障时,仍能保持数据传输的可靠性。通过模拟不同数量的车辆参与共识过程,对比分析 R-PBFT 与 PBFT

共识算法的平均共识时延,对比结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,随着参与共识过程的车辆数量逐渐增加,PBFT 的平均共识时延出现了显著的增长,而 R-PBFT 的时延上升趋势明显较为平缓。PBFT 算法依赖于所有节点进行多轮消息交换,通信开销的急剧上升增加了共识时延。而 R-PBFT 则通过信誉机制筛选出了信誉较高的节点进行共识,消息传递的数量减少,从而有效降低了共识时延,且这些节点通常具有较好的通信能力和较高的可靠性,表明 R-PBFT 在处理大规模车辆网络中的共识过程时具有更好的扩展性和效率。

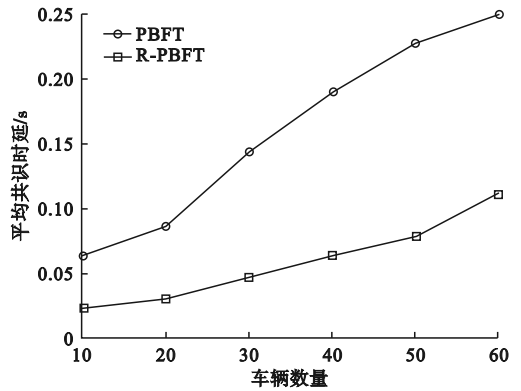


图 6 不同车辆数量下平均共识时延比较

Fig. 6 Comparison of average consensus latency under different numbers of vehicles

图 7 为不同共识轮次下 R-PBFT 与 PBFT 的平均共识时延比较。

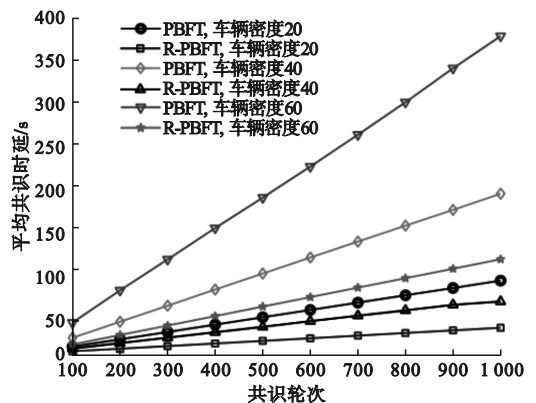


图 7 不同共识轮次下平均共识时延比较

Fig. 7 Comparison of average consensus latency under different consensus rounds

从图 7 可以看出,随着仿真场景中车辆密度的增加,R-PBFT 的时延性能变化相较于 PBFT 稍缓,且随着共识轮次的增长,时延增加趋势相对平稳,表明 R-PBFT 对网络密度变化的适应性强,能够有效管理在密集网络环境下的消息传递和处

理,具有更低的时延和更好的扩展性。同时,低延迟能够确保车联网中关键信息的实时传输,提升了数据传输的可靠性。

视图切换次数是衡量共识算法在面对恶意节点时车联网系统内数据传输可靠性的重要指标。

通过恶意概率随机分配车辆的行为性质,根据调整恶意车辆在全局车辆节点中所占比例,对比分析 R-PBFT 与 PBFT 共识过程中视图切换次数,结果如图 8 所示。

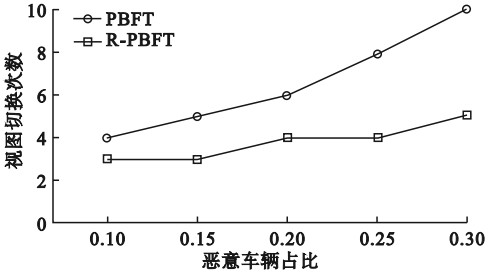


图 8 不同恶意车辆比例下视图切换次数比较

Fig. 8 Comparison of view change counts under different proportions of malicious vehicles

从图 8 可以看出,当恶意节点的占比增加时, PBFT 的视图切换次数明显增加,而 R-PBFT 视图切换的次数一直小于 PBFT,即 PBFT 算法在面对不可靠节点的情况下,需要进行视图切换以寻找新的领导者,而 R-PBFT 算法通过奖惩机制和代理节点的随机选择,减少了恶意车辆节点对共识过程的干扰,从而提高了车联网中数据传输的可靠性。

5 结论

车联网环境中数据传输量呈指数增加,路况信息复杂多变,由此导致数据传输的可靠性问题愈发严重。针对上述问题,提出一种基于信誉的 R-PBFT 共识机制。该机制引入信誉评分机制,通过设置安全信誉阈值对节点进行分类,利用随机数生成器选取代理节点,最后通过奖惩机制更新节点信誉值。从共识时延、视图切换次数等方面进行了对比分析和实验测试,验证了本文提出的 R-PBFT 共识算法兼顾了时延和可靠性的优化,不仅在高密度和高恶意节点比例的环境下表现出较好的扩展性,而且在共识过程中提高了数据传输可靠性,使 R-PBFT 有望成为一个适合多种应用场景的共识机制,特别是在对时效性和可靠性有较高要求的领域。

参考文献 (References):

- [1] 李莹,于亚新,张宏宇,等.基于 TBchain 区块链的高可信云存储模型[J].计算机科学,2020,47(9):330-338.
LI Y, YU Y X, ZHANG H Y, et al. High trusted cloud storage model based on TBchain blockchain[J]. Computer Science, 2020, 47(9): 330-338. (in Chinese)
- [2] 阎红灿,窦桂梅,陈子昂,等.基于动态信任值的实用拜占庭容错算法的优化[J].华北理工大学学报(自然科学版),2023,45(1):99-108.
YAN H C, DOU G M, CHEN Z A, et al. Optimization of practical Byzantine fault tolerance algorithm based on dynamic trust value[J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 45(1): 99-108. (in Chinese)
- [3] HU W, HU Y W, YAO W H, et al. A blockchain-based Byzantine consensus algorithm for information authentication of the internet of vehicles[J]. IEEE Access, 2019, 7: 139703-139711.
- [4] MERSHAD K, CHEIKHROUHO O, ISMAIL L. Proof of accumulated trust: a new consensus protocol for the security of the IoV[J]. Vehicular Communications, 2021, 32: 100392.
- [5] LI C, WU H, XIONG L, et al. An IoV-PBFT consensus-based blockchain for collaborative congestion avoidance and simulation test[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, 2022: 9676370.
- [6] YANG J, JIA Z H, SU R G, et al. Improved fault-tolerant consensus based on the PBFT algorithm[J]. IEEE Access, 2022, 10: 30274-30283.
- [7] XU G X, WANG Y S. Improved PBFT algorithm based on vague sets[J]. Security and Communication Networks, 2022, 2022: 6144664.
- [8] JIANG W X, GUO Z P. An anonymous authentication scheme for Internet of vehicles based on TRUG-PBFT master-slave chains and zero-knowledge proof[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, PP(99): 1.
- [9] 郝悦.区块链共识算法性能仿真及可视化平台的设计与实现[D].北京:北京邮电大学,2019.
- [10] 吴晓彤,柳平增.基于备选投票机制的低时延 PBFT 改进研究[J].计算机工程,2021,47(7):117-125,134.
WU X T, LIU P Z. Delay optimization for PBFT based on alternative voting mechanism[J]. Computer Engineering, 2021, 47(7): 117-125, 134. (in Chinese)
- [11] 陈润宇,王伦文,朱然刚.基于信誉值投票与随机数选举的 PBFT 共识算法[J].计算机工程,2022,48(6):42-49,56.
CHEN R Y, WANG L W, ZHU R G. PBFT consensus algorithm based on reputation value voting and random number election[J]. Computer Engineering, 2022, 48(6): 42-49, 56. (in Chinese)
- [12] 王森,李志准,贾志鹏.主节点随机选取的改进 PBFT 共识算法[J].计算机应用与软件,2022,39(10):299-306.
WANG S, LI Z H, JIA Z P. Improved PBFT consensus algorithm with random selection of master nodes[J]. Computer Applications and Software, 2022, 39(10): 299-306. (in Chinese)
- [13] ASTE T, TASCA P, DI MATTEO T. Blockchain technologies: the foreseeable impact on society and industry[J]. Computer, 2017, 50(9): 18-28.

(责任编辑:和晓军)