



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

区块链架构下医疗数据共享的三方演化博弈研究

杨健, 王开选

引用本文

杨健, 王开选. [区块链架构下医疗数据共享的三方演化博弈研究](#)[J]. 计算机科学, 2023, 50(6A): 221000080-7.

YANG Jian, WANG Kaixuan. [Tripartite Evolutionary Game Analysis of Medical Data Sharing Under Blockchain Architecture](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(6A): 221000080-7.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于分布式集群节点的宕机重启恢复算法](#)

Restart and Recovery Algorithm Based on Distributed Cluster Nodes

计算机科学, 2023, 50(6A): 220300205-6. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220300205>

[一种基于区块链的身份鉴证与授权机制](#)

Blockchain-based Identity Authentication and Authorization Mechanism

计算机科学, 2023, 50(6A): 220700158-9. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220700158>

[基于可验证随机函数的实用拜占庭共识算法](#)

Practical Byzantine Consensus Algorithm Based on Verifiable Random Functions

计算机科学, 2023, 50(6A): 220300064-6. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220300064>

[区块链共识算法综述](#)

Overview of Blockchain Consensus Algorithms

计算机科学, 2023, 50(6A): 220400200-12. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220400200>

[基于信用评价模型的Raft共识算法](#)

Raft Consensus Algorithm Based on Credit Evaluation Model

计算机科学, 2023, 50(6): 322-329. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220500171>

区块链架构下医疗数据共享的三方演化博弈研究

杨 健 王开选

山西财经大学信息学院 太原 030006

(yangj@sxufe.edu.cn)

摘 要 为促进健康医疗大数据的发展,积极推动医疗数据安全共享,基于区块链架构,构建了系统管理方、数据提供方和数据需求方的三方演化博弈模型。首先,将前景理论与演化博弈模型相结合,利用前景价值函数对传统演化博弈的变量和参数进行改进;其次,讨论博弈均衡存在的可能性及其演化趋势;最后,通过数值模拟探讨不同因素对区块链架构下医疗数据共享各参与方的决策影响。结果表明,初始策略选择对博弈策略稳定性有显著影响。通过提高系统管理方的监管收益、降低数据提供方的感知损失以及提高数据需求方举报不合规行为的补偿可以加快系统的演化进程,增强参与方之间的信任,进而促进信任关系的形成。

关键词: 区块链; 医疗数据共享; 前景理论; 演化博弈

中图分类号 G203

Tripartite Evolutionary Game Analysis of Medical Data Sharing Under Blockchain Architecture

YANG Jian and WANG Kaixuan

School of Information, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, China

Abstract To promote the development of health and medical big data and actively promote the safe sharing of medical data, this paper constructs a tripartite evolutionary game model of the system manager, data provider and data demander based on the blockchain architecture. Firstly, prospect theory is combined with evolutionary game, and the parameters of traditional evolutionary game are improved by the prospect value function. Secondly, the possibility of game equilibrium and its evolution trend are discussed. Finally, the influence of different factors on the decision-making of each participant in medical data sharing under blockchain architecture is discussed through numerical simulation. The results show that the choice of initial strategy has a significant influence on the stability of game strategy. The evolution of the system can be accelerated by improving the regulatory benefits of the system manager, reducing the perceived losses of the data provider, and improving the compensation of the data demander for actively reporting non-compliance behaviors, thus enhancing the trust of all participants and promoting the formation of trust relationships.

Keywords Blockchain, Medical data sharing, Prospect theory, Evolutionary game

1 引言

医院信息系统(Hospital Information Systems, HIS)是现代化医院运营的必要技术支撑和基础设施,其在患者管理、疾病诊断和治疗决策等诸多方面发挥着至关重要的作用^[1]。HIS以现代、科学、规范的手段管理医院,可有效提高医院的工作效率和医疗质量。患者的医疗数据是HIS正常运行的基础,随着医疗物联网设备的广泛部署,收集到的患者信息成指数级增长,因此HIS通常会存储和管理患者的各类健康数据。但传统HIS在运营过程中存在一些问题^[2-3]。1)系统安全问题。传统HIS将医疗数据存储在私有或云服务器中,使得系统面临恶意攻击的风险。由于第三方供应商提供的云服务器是半可信的,它们可能在未经授权的情况下窃取或篡改个人健康数据,从而造成患者隐私信息的泄露。2)医疗数据

共享困难。传统HIS中的医疗数据完全由医院管理且独立运行,除非有特殊授权,否则相关研究机构或医疗组织无法有效使用和分析这些数据资源,且大部分医疗数据处于闲置状态,造成宝贵数据资源的浪费。

因此,如何有效地平衡患者隐私安全和个人健康数据的价值开发^[4]是当前实施“健康中国”大数据战略面对的首要问题。目前,已有部分学者提出并设计了几种基于区块链的方法来解决该问题。区块链作为分布式共享账本和数据库,具有去中心化、不可篡改、共识机制、可追溯、隐私保护、容错、智能合约执行能力等特点^[5],特别适合存储隐私数据,保障数据不会因中心化机构遭受攻击或权限管理不当而出现大规模丢失或泄露的风险^[6],并被视为解决个人健康数据共享的合适解决方案。例如,Wen等^[7]提出一种融合联邦学习与区块链的医疗数据共享方案,旨在提高共享效率和实现隐私保护;

基金项目:教育部人文社会科学研究青年基金(21YJCZH197);山西省高等学校科技创新项目(2020L0252)

This work was supported by the Humanities and Social Science Fund of Ministry of Education of China(21YJCZH197) and Scientific and Technological Innovation Programs of Higher Education Institutions in Shanxi(2020L0252).

通信作者:杨健(yangj@sxufe.edu.cn)

Xia 等^[8]提出了一个基于区块链架构并在无信任环境中解决医疗大数据共享的系统;为了提高不同医院之间的共享效率, Kumar 等^[9]提出了一个使用星际文件系统(IPFS)和区块链技术的医疗数据共享方案;Liu 等^[10]将去中心化区块链技术与分布式文件存储平台 IPFS 相结合,提出一种基于 IPFS 的联合医疗区块链数据存储访问模型,以确保患者隐私数据在传输过程中的安全性以及患者控制自身医疗数据的能力;Wei 等^[11]在区块链技术的基础上,使用云服务对加密的医疗数据进行分布式存储,实现区域数据的安全共享使用;Huang 等^[12]等建立了一个基于区块链的安全 EHR 系统,使患者和医疗保健提供者能够访问和共享健康记录,进而保障数据的可用性、安全性和隐私性。

然而,仅通过基于区块链的框架来共享个人健康数据并不能完全保证数据的可信度。例如,参与数据共享的个体存在主观上提供虚假数据来骗取补偿的可能性等^[13]。从经济学的角度来看,医疗数据共享中的信任是一个持续、多主体、有限理性的过程,涉及医院、患者、政府、医药生产商等多方主体的协同合作。而博弈论作为一种描述和解决行为决策问题的方法,可以分析各主体行为的收益、成本和损失,进而动态地反映医疗数据共享过程中的决策演变及参与方的优化策略^[14-15]。同时考虑到各主体之间的差异及目的性不同,本文在传统的演化博弈模型中引入前景理论^[16],使得模型能够更加有效地解释博弈主体的非理性心理因素和风险偏好问题,从多个维度探讨医疗数据共享过程的演化规律并给出相关建议。

基于此,本文将在区块链架构下,构建医疗数据共享过程中的演化博弈模型,通过数值模拟来分析不同主体的收益和成本,比较多方决策的动态演化路径,这对更好地推动医疗数据共享具有一定的参考意义。

2 区块链架构下的医疗数据共享系统

本文提出的基于区块链架构的医疗数据共享系统由系统管理方、数据提供方以及数据需求方组成,其完整流程如图 1 所示。

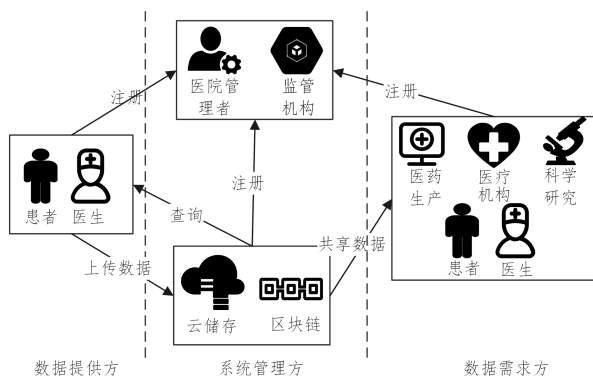


图 1 医疗数据共享系统

Fig. 1 Medical data sharing system

- (1) 系统管理方:为满足政府、医疗管理机构对医疗信息系统的监管要求,同时符合传统医院的组织管理,在基于区块链网络中,将医院管理者及相关监管机构作为系统管理方,用于用户注册、身份认证、质量认证、信用评级和系统监管等。
- (2) 数据提供方:本框架中的数据提供方包括医生和

患者。他们可将自储存的医疗数据上传到区块链网络存储并与其他用户共享。例如医生可以将诊断数据、病例记录或专家经验经数字化处理后进行共享,而患者可将医疗物联网传感设备收集到的海量个人生理监测数据(血糖、心率、体重、体温等)进行分享。

(3) 数据需求方:除了对数据有需求的医生和患者外,数据需求方还包括医药生产商、医疗保险提供方和研究机构等第三方用户,它们可采用共享的健康医疗数据研发新药,提供个性化医疗保险方案,以及从事科学研究等。

3 医疗数据共享的演化博弈模型

3.1 模型假设

在本文提出的基于区块链的医疗数据共享框架中,数据提供方和需求方是参与博弈的两大实体。数据提供方在共享数据的同时希望从数据需求方获得一些回报,数据需求方则需要做出共享数据是否值得信赖的决策。因此,数据共享中的信任^[17-18]是一个持续的过程,受到环境、监管及多方交互的影响。为了有效地研究数据提供方、数据需求方以及系统管理方之间的信任关系,在构建演化博弈模型前,本文做出了一些假设。

假设 1 数据提供方和数据需求方是本文提出的基于区块链的医疗数据交易框架中的两大实体。在博弈过程中,双方是有限理性的,并通过多场博弈来确定最优策略。由于个体策略选择主要依赖于对策略得失的主观心理感受,而前景理论是描述决策方在风险和不确定行为下的重要理论。基于此背景,本文拟将医疗数据共享过程中个体心理感知价值定义为前景价值,并通过价值函数和权重函数来描述。

$$\zeta = \sum_{i=1}^n w(p_i) v(\Delta z_i) \quad (1)$$

$$v(\Delta z) = \begin{cases} (\Delta z)^\mu, & \Delta z \geq 0 \\ -\theta(-\Delta z)^\tau, & \Delta z < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$w(p) = \frac{p^\sigma}{(p^\sigma + (1-p)^\sigma)^{\frac{1}{\sigma}}} \quad (3)$$

其中, Δz_i 表示情况*i*发生后博弈方的实际支付值和参考点的偏差,若 $\Delta z_i \geq 0$,结果被视为收益,否则为损失; p 表示情况*i*发生的概率, $w(p_i)$ 是决策权重,且 $w(0)=0, w(1)=1$;参数 μ 和 τ 是衡量价值函数的敏感程度,且满足 $0 < \mu, \tau < 1$; θ 是损失厌恶系数,反映了损失大于收益的心理现象,满足 $\theta > 1$; σ 为权重敏感因子,满足 $0 < \sigma < 1$,一般 θ 的值越大,则 σ 的值也越大。

假设 2 假设系统管理方、数据提供方和数据需求方都是有限理性的决策方。“强监管”和“弱监管”是系统管理方的可选策略,“认真”和“敷衍”是数据提供方的可选策略,“信任”或“怀疑”是数据需求方的可选策略。

假设 3 三方之间的信息是不对称的,各方都希望自己的利益最大化。对于系统管理方,当采取“强监管”策略时,则需要付出一定的监管成本 C_1 ,但同时也会获得 G_1 的收益。当采取“弱监管”策略时,系统管理方付出的监管成本为 C_2 ,将获得收益 G_2 。但当数据需求方怀疑数据的真实性和可靠性时,会给系统管理组带来感知损失 L_1 。

假设 4 对于数据提供方,当采取“认真”策略时,其所付出的总成本为 C_3 ,且当系统管理方采取“强监管”时,数据提供

方将获得 G_3 的收益;当采取“敷衍”策略时,数据提供方所付出的总成本为 C_4 ,且当系统管理方采取“弱监管”时,将获得 G_4 的收益。同时,当数据需求方采取“怀疑”策略,双方的信任关系将遭到破坏,会给数据提供方带来信誉损失 L_2 。此外,数据需求方因“怀疑”进而提起上诉,则会对数据提供方造成感知损失 L_3 。

假设5 对于数据需求方,当采取“信任”策略时产生的购买成本为 C_5 ,当采取“怀疑”策略时则产生成本 C_6 ,其中

$C_5 < C_6$ 。为了促进医疗数据共享,当发生破坏数据共享信任行为时,数据需求方可以选择积极上诉,监督数据共享过程中的违规现象,并会获得一定的报酬 W 。

假设6 系统管理方选择“强监管”的概率是 x ,选择“弱监管”的概率 $1-x$;数据提供方选择“认真”策略的概率是 y ,选择“敷衍”策略的概率是 $1-y$;数据需求方选择“信任”的概率为 z ,选择“怀疑”的概率为 $1-z$ 。 $x, y, z \in (0, 1)$ 。表1列出了模型中的详细参数及其说明。

表1 参数符号及含义

Table 1 Parameters and descriptions

参数	参数说明
C_1	系统管理方“强监管”时产生的监管成本
C_2	系统管理方“弱监管”时产生的监管成本
C_3	数据提供方采取“认真”策略时产生的成本
C_4	数据提供方采取“敷衍”策略时产生的成本
C_5	数据需求方采取“信任”策略时付出的成本
C_6	数据需求方采取“怀疑”策略时付出的成本
G_1	系统管理方“强监管”时的收益
G_2	系统管理方“弱监管”时的收益
G_3	系统管理方“强监管”时,数据提供方获得的收益
G_4	系统管理方“弱监管”时,数据提供方获得的收益
W	数据需求方因怀疑而选择上诉后获得的补偿
L_1	数据需求方采取“怀疑”给系统管理方带来的损失
L_2	数据需求方采取“怀疑”策略,将使得双方信任关系遭到破坏,给数据提供方带来额外感知损失
L_3	数据提供方采取“敷衍”策略,导致数据需求方对共享数据不再信任,数据提供方遭受感知损失
x	系统管理方选择“强监管”的概率
y	数据提供方选择“认真”策略的概率
z	数据需求方选择“信任”策略的概率
t	演化博弈的时间长度

3.2 收益矩阵的构建

由前景理论可知,三方主体付出的成本和获得的收益是确定的。只有当三方主体各自的行为破坏了医疗数据共享信任过程的建立时,才会产生感知惩罚和损失。因此, $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, G_1, G_2, G_3, G_4, W, L_1$ 没有感知偏差,而 L_2, L_3 具有感知特征。

(弱监管,敷衍,怀疑),此时数据提供方的可信度 $w_0 = 0$,则有:

$$L_2 = w_0 v(L_2) + (1 - w_0) v(L_2) = v(L_2) \quad (4)$$

同理,有 $L_3 = v(L_3)$,可通过式(5)求得:

$$L_3 = w_0 v(L_3) + (1 - w_0) v(L_3) = v(L_3) \quad (5)$$

基于上述假设,由系统管理方、数据提供方和数据需求方构成的三方演化博弈模型的收益矩阵如表2所列。

当系统管理方、数据提供方和数据需求方的策略组合为

表2 收益矩阵

Table 2 Benefit matrixes

系统管理方	数据提供方	数据需求方	
		信任 z	怀疑 $1-z$
强监管 x	认真策略 y	$(G_1 - C_1, G_3 - C_3, 0)$	$(G_1 - C_1, G_3 - C_3, 0)$
	敷衍策略 $1-y$	$(G_1 - C_1, G_3 - C_4 - L_3, 0)$	$(G_1 - C_1, C_3 - C_4 - L_2, 0)$
弱监管 $1-x$	认真策略 y	$(G_2 - C_2, G_4 - C_3, 0)$	$(G_2 - C_2 - L_1, G_4 - C_3, 0)$
	敷衍策略 $1-y$	$(G_2 - C_2, G_4 - C_4 - L_3, -C_5)$	$(G_2 - C_2 - L_1, G_4 - C_4 - L_2, W - C_6)$

4 模型稳定性分析

4.1 系统管理方的复制动态方程

假设系统管理方选择“强监管”的期望收益为 E_{11} ,选择“弱监管”的期望收益为 E_{12} ,则平均期望收益为 E_1 ,故有:

$$E_{11} = yz(G_1 - C_1) + y(1-z)(G_1 - C_1) + (1-y)z(G_1 - C_1) + (1-y)(1-z)(G_1 - C_1) \\ = G_1 - C_1 \quad (6)$$

$$E_{12} = yz(G_2 - C_2) + y(1-z)(G_2 - C_2 - L_1) + (1-y)z(G_2 - C_2) + (1-y)(1-z)(G_2 - C_2 - L_1) \\ = L_1 * z + G_2 - C_2 - L_1 \quad (7)$$

$$E_1 = x E_{11} + (1-x) E_{12} \\ = x(R_3 - C_1) + (1-x)(L_1 * z + G_2 - C_2 - L_1) \quad (8)$$

则系统管理方的复制动态方程为:

$$F(x) = x * (1-x) * (E_{11} - E_{12}) \\ = x * (1-x) * (-L_1 * z + G_1 - G_2 - C_1 + C_2 + L_1) \quad (9)$$

对 $F(x)$ 求导:

$$\frac{dF(x)}{dx} = (1-2x)(-L_1 * z + G_1 - G_2 - C_1 + C_2 + L_1) \quad (10)$$

设 $F(x) = 0$,可以得到 $x = 0, x = 1, z =$

$\frac{G_1 - G_2 - C_1 + C_2 + L_1}{L_1}$ 。根据微分方程的稳定性定理,如果系统管理方选择“强监管”的概率处于稳定状态,则必须满足 $F(x) = 0$ 和 $\frac{dF(x)}{dx} < 0$ 的条件。当 $z = \frac{G_1 - G_2 - C_1 + C_2 + L_1}{L_1}$ 时,可以得到 $F(x) = 0$,且 x 的任意值都是系统管理方的进化稳定策略,其策略不随时间变化。当 $z \neq \frac{G_1 - G_2 - C_1 + C_2 + L_1}{L_1}$ 时,会出现两种情况:

(1) 当 $y > \frac{G_1 - G_2 - C_1 + C_2 + L_1}{L_1}$ 时,可以得到 $\frac{dF(x)}{dx} |_{x=1} > 0$,

$\frac{dF(x)}{dx} |_{x=0} < 0$ 。因此,当 $x = 0$ 时为稳定状态,系统管理方会选择“弱监管”。

(2) 当 $y < \frac{G_1 - G_2 - C_1 + C_2 + L_1}{L_1}$ 时,可以得到

$\frac{dF(x)}{dx} |_{x=1} < 0$, $\frac{dF(x)}{dx} |_{x=0} > 0$ 。因此,当 $x = 1$ 时为稳定状态,系统管理方会选择“强监管”。

4.2 数据提供方的复制动态方程

假设数据提供方选择“认真”策略时的期望收益为 E_{21} ,选择“敷衍”策略时的期望收益为 E_{22} ,平均期望收益为 E_2 ,则有:

$$E_{21} = xz(G_3 - C_3) + x(1-z)(G_3 - C_3) + (1-x)z(G_4 - C_3) + (1-x)(1-z)(G_4 - C_3) = (G_3 - G_4) * x + G_4 - C_3 \quad (11)$$

$$E_{22} = xz(G_3 - C_4 - L_3) + x(1-z)(G_3 - C_4 - L_2) + (1-x)z(G_4 - C_4 - L_3) + (1-x)(1-z)(G_4 - C_4 - L_2) = (G_3 - G_4) * x + (L_2 - L_3) * z + G_4 - C_4 - L_2 \quad (12)$$

$$E_2 = yE_{21} + (1-y)E_{22} = y((G_3 - G_4) * x + G_4 - C_3) + (1-y)((G_3 - G_4) * x + (L_2 - L_3) * z + G_4 - C_4 - L_2) \quad (13)$$

则数据提供方的复制动态方程为:

$$F(y) = y * (1-y) * (E_{21} - E_{22}) = y * (1-y) * ((L_3 - L_2) * z + C_4 + L_2 - C_3) \quad (14)$$

对 $F(y)$ 求导:

$$\frac{dF(y)}{dy} = (1-2y)((L_3 - L_2) * z + C_4 + L_2 - C_3) \quad (15)$$

设 $F(y) = 0$,可以得到 $y = 0, y = 1, z = \frac{C_3 - L_2 - C_4}{L_3 - L_2}$,当 $z = \frac{C_3 - L_2 - C_4}{L_3 - L_2}$ 时,可以得到 $F(y) = 0$ 。 y 的任意值都是数据提供方的进化稳定策略,数据提供方的策略不随时间变化。

当 $z \neq \frac{C_3 - L_2 - C_4}{L_3 - L_2}$ 时,会出现两种情况:

(1) 当 $x > \frac{C_3 - L_2 - C_4}{L_3 - L_2}$ 时,可以得到 $\frac{dF(y)}{dy} |_{y=1} > 0$,

$\frac{dF(y)}{dy} |_{y=0} < 0$ 。此时, $y = 0$ 时是稳定状态,数据提供方将选择“敷衍”策略。

$$\begin{bmatrix} (2x-1) * (C_1 - C_2 - G_1 + G_2 - L_1 + L_1 * z) & 0 & L_1 * x * (x-1) \\ 0 & (2y-1) * (C_3 - C_4 - L_2 + z * (L_2 - L_3)) & y * (L_2 - L_3) * (y-1) \\ -z * (y-1) * (z-1) * (C_5 + C_6 - W) & -z * (x-1) * (z-1) * (C_5 + C_6 - W) & -(x-1) * (y-1) * (2z-1) * (C_5 + C_6 - W) \end{bmatrix}$$

令 $F(X) = 0, F(y) = 0, F(z) = 0$,即系统策略选择的变化率为零,可得到动态系统的 14 个平衡点,分别是 $E_1(0,0,0), E_2(0,1,0), E_3(0,0,1), E_4(1,0,0), E_5(0,1,1), E_6(1,1,0),$

(2) 当 $x < \frac{C_3 - L_2 - C_4}{L_3 - L_2}$ 时,可以得到 $\frac{dF(y)}{dy} |_{y=1} < 0$,

$\frac{dF(y)}{dy} |_{y=0} > 0$ 。此时, $y = 1$ 时是稳定状态,数据提供方将选择“认真”策略。

4.3 数据需求方的复制动态方程

假设数据需求方选择“信任”策略的期望收益为 E_{31} ,选择“怀疑”策略的期望收益为 E_{32} ,平均期望收益为 E_3 ,则有:

$$E_{31} = xy * 0 + x(1-y) * 0 + (1-x)y * 0 + (1-x)(1-y)(-C_5) = -(1-x)(1-y) * C_5 \quad (16)$$

$$E_{32} = xy * 0 + x(1-y) * 0 + (1-x)y * 0 + (1-x)(1-y)(W - C_6) = (1-x)(1-y)(W - C_6) \quad (17)$$

$$E_3 = zE_{31} + (1-z)E_{32} = z(-(1-x)(1-y) * C_5) + (1-z)((1-x)(1-y)(W - C_6)) \quad (18)$$

则数据需求方的复制动态方程为:

$$F(z) = z * (1-z) * (E_{31} - E_{32}) = z * (1-z) * (1-x) * (1-y) * (C_5 - W + C_6) \quad (19)$$

对 $F(z)$ 求导:

$$\frac{dF(z)}{dz} = (1-2z)((1-x) * (1-y) * (C_5 - W + C_6)) \quad (20)$$

当 $x < 1$ 和 $y < 1$ 时,会产生两种情况:

(1) 当 $C_5 + C_6 > W$ 时,可以得到 $\frac{dF(z)}{dz} |_{z=1} > 0$,

$\frac{dF(z)}{dz} |_{z=0} < 0$ 。此时, $z = 0$ 时是稳定状态,数据需求方将选择“怀疑”策略。

(2) 当 $C_5 + C_6 < W$ 时,可以得到 $\frac{dF(z)}{dz} |_{z=1} < 0$,

$\frac{dF(z)}{dz} |_{z=0} > 0$ 。此时, $z = 1$ 时是稳定状态,数据需求方将选择“信任”策略。

4.4 三方演化博弈的稳定性分析

通过求解复制动力系统的雅可比矩阵的局部稳定性,可以找到复制动力系统的演化稳定平衡解。系统管理方、数据提供方、数据需求方的复制动态方程如式(21)所示:

$$\begin{cases} F(x) = x * (1-x) * (-L_1 * z + G_1 - G_2 - C_1 + C_2 + L_1) \\ F(y) = y * (1-y) * ((L_3 - L_2) * z + C_4 + L_2 - C_3) \\ F(z) = z * (1-z) * ((1-x) * (1-y) * (C_5 - W + C_6)) \end{cases} \quad (21)$$

分别计算 $F(x), F(y)$ 和 $F(z)$ 关于 x, y 和 z 的偏导数,则医疗数据共享的雅可比矩阵如下所示:

$$\begin{bmatrix} E_7(1,0,1), E_8(1,1,1), E_9(0,1, \frac{C_2 - C_1 + G_1 - G_2 + L_1}{L_1}), E_{10}(1,0, \frac{C_4 - C_3 + L_2}{L_2 - L_3}), E_{11}(1,0, \frac{C_2 - C_1 + G_1 - G_2 + L_1}{L_1}) \end{bmatrix}$$

$E_{12} \left(1, 1, \frac{C_2 - C_1 + G_1 - G_2 + L_1}{L_1} \right), E_{13} \left(0, 1, \frac{C_4 - C_3 + L_2}{L_2 - L_3} \right)$ 和 $E_{14} \left(1, 1, \frac{C_4 - C_3 + L_2}{L_2 - L_3} \right)$, 结果与上述分析一致。 $E_1 - E_8$ 构成演化博弈 $E = (x, y, z | 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq z \leq 1)$ 的边界,

边界所包围的区域被称为三方演化博弈的平衡解区域, $E_9 - E_{14}$ 是非渐进稳定状态, 因此不做讨论。

将 $E_1 - E_8$ 代入雅可比矩阵, 可得到雅可比矩阵的特征值, 假设 $C_1 > C_2, C_3 > C_4$, 得到不同平衡点对应的特征值, 并分析其稳定性。各特征值及稳定性如表 3 所列。

表 3 平衡点稳定性

Table 3 Equilibrium stability

平衡点	λ_1	λ_2	λ_3	稳定性
$E_1(0,0,0)$	$C_1 - C_2 - G_1 + G_2 - L_1$	$C_4 - C_3 + L_2$	$C_5 + C_6 - W$	不稳定
$E_2(1,0,0)$	$C_1 - C_2 - G_1 + G_2 - L_1$	$C_4 - C_3 + L_2$	0	不稳定
$E_3(0,1,0)$	$C_2 - C_1 + G_1 - G_2 + L_1$	$C_3 - C_4 - L_2$	0	不稳定
$E_4(0,0,1)$	$C_2 - C_1 + G_1 - G_2$	$C_4 - C_3 + L_3$	$W - C_6 - C_5$	不稳定
$E_5(1,1,0)$	$C_1 - C_2 - G_1 + G_2 - L_1$	$C_3 - C_4 - L_2$	0	不稳定
$E_6(1,0,1)$	$C_1 - C_2 - G_1 + G_2$	$C_4 - C_3 + L_3$	0	不稳定
$E_7(0,1,1)$	$C_2 - C_1 + G_1 - G_2$	$C_3 - C_4 - L_3$	0	不稳定
$E_8(1,1,1)$	$C_1 - C_2 - G_1 + G_2$	$C_3 - C_4 - L_3$	0	鞍点

5 数值仿真与分析

为了验证本文提出的三方演化博弈模型的合理性, 积极推动医疗数据共享, 本文设计了 3 组模拟实验。第一组实验探究医疗数据共享三方博弈行为的演化路径; 第二组探究初始参数选择对博弈策略稳定性的影响; 第三组探究不同因素对各方策略选择的影响。

本文采用 Matlab2020b 来模拟演化过程, 并设定初始参数 $C_1 = 0.5, C_2 = 0.2, C_3 = 0.7, C_4 = 0.6, C_5 = 0.3, C_6 = 0.8, G_1 = 0.6, G_2 = 0.4, G_3 = 0.9, G_4 = 0.7, W = 0.3, L_1 = 0.4, L_2 = 0.5, L_3 = 0.05$ 。各组实验均在初始值基础上, 通过改变相关参数的大小, 来观察该参数对模型的影响。

5.1 三方博弈行为的演化路径

图 2 给出了在初始参数设置下, 各利益相关方策略选择的趋势, 曲线越密集, 代表选择该策略的概率越大。而初始值和相关参数的变化会导致动态系统收敛到不同均衡点, 因此, 可以得出如下结论:

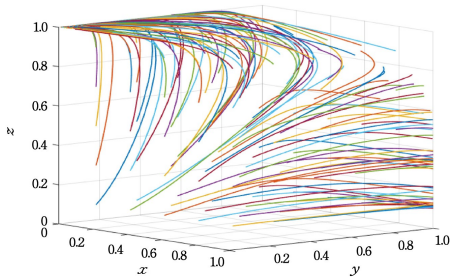


图 2 初始参数设置下的演化路径

Fig. 2 Evolution path under initial parameter settings

动态系统中, 一方的策略变化会对另外两方的策略选择产生影响。为了分析三方的策略选择对博弈结果的影响, 在初始参数保持不变的情况下, 设置 4 组概率组合: $x=0.5, y=0.3, z=0.6; x=0.7, y=0.3, z=0.6; x=0.5, y=0.6, z=0.7; x=0.5, y=0.4, z=0.7$, 观察概率组合策略对结果的影响。仿真结果如图 3 所示。

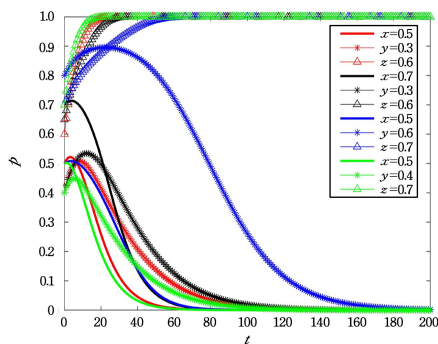


图 3 不同概率组合下的策略选择

Fig. 3 Strategy selection under different probability combinations

由图 3 可知, 随着系统管理方选择“强监管”策略的概率增大, 数据提供方和数据需求方的收敛速度降低。另外, 数据提供方选择“认真”策略的概率增大, 数据需求方的演化速度放缓。而随着数据需求方选择“信任”的概率增大, 系统管理方和数据提供方的收敛速度几乎不受影响。值得注意的是, 三方策略选择的初始概率组合对进化路径有显著影响, 但进化稳定点最终都趋于系统管理方选择“弱监管”, 数据提供方选择“敷衍”, 数据需求方选择“信任”。

5.3 不同因素对利益相关方策略选择的影响

5.3.1 G_1 对系统利益方的决策影响

系统管理方选择“强监管”策略获取收益的多少将直接影响系统的最终结果。在 $C_1 > C_2$ 的条件下设置 G_1 的值, 图 4 给出了 $G_1 = 0.2, G_1 = 0.4, G_1 = 0.6, G_1 = 0.8, G_1 = 1.0$ 时的演化结果。

随着系统管理方“强监管”时收益的增加, G_1 和 G_2 之间的差异增大, 即系统管理方的演化结果由被动状态转为主动状态。对于系统管理方而言, 其选择“强监管”的收益增加时, 使得 $G_1 - C_1 > G_2 - C_2$, 即系统管理方选择“强监管”的收益大于“弱监管”时的收益, 最终稳定策略为(强监管, 认真, 信任)。

(1) 根据条件 $x < \frac{C_3 - L_2 - C_4}{L_3 - L_2}$, 为增大数据提供方选择“认真”策略的概率, 应适当提高 C_3, C_4 , 或降低 L_2, L_3 。因此可以通过提高数据提供方花费的成本、降低损失的方式来增大数据提供方选择“认真”策略的概率。

(2) 根据条件 $C_5 + C_6 < W$, 为增大数据需求方选择“信任”策略的概率, 应适当降低 C_5, C_6 , 即降低数据需求方使用数据的成本, 则更有利于信任关系的建立。

5.2 初始策略选择对博弈策略稳定性的影响

由于系统管理方、数据提供方和数据需求方处于同一个

如图 4(a)所示,当 $G_1 > 0.6$ 时,系统管理方选择“强监管”的收益远大于成本,选择“强监管”的概率向 1 演化。而图 4(b)和

图 4(c)的仿真结果表明, G_1 大小的变动对数据提供方和需求方的策略选择没有显著影响。

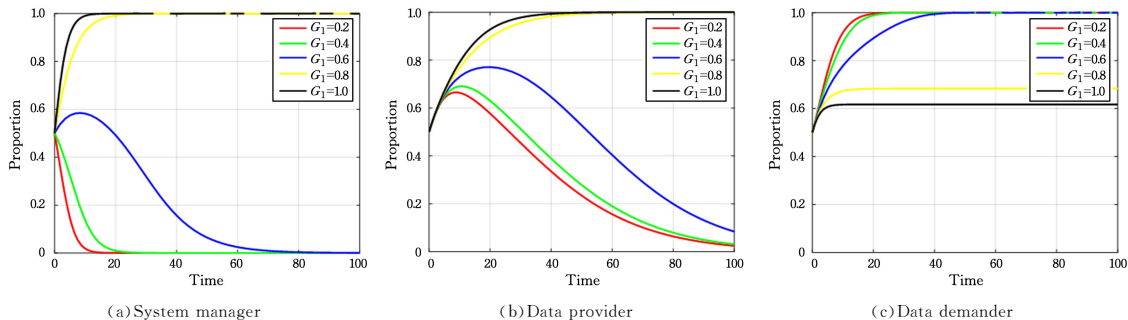


图 4 G_1 对系统利益方的决策影响

Fig. 4 G_1 's impact on decision-making of system stakeholders

5.3.2 L_2 对演化主体的决策影响

从稳定性条件分析过程可以看出,因信任关系遭到破坏而对数据提供方造成的感知损失 L_2 也是影响其演变的关键因素。 L_2 的大小会影响数据提供方选择“敷衍”策略时的收益,进而影响系统管理方和数据需求方的决策选择。因此,设置 L_2 的值为 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 假设 $C_3 < C_4, L_2 > L_3$,其对仿真结果的影响如图 5 所示。当数据需求方和数据提供方之间的信任关系遭到破坏,会给数据提供方带来额外的感知

损失。随着感知损失的增加,数据提供方的净收益将减小,并促使其采取“认真”策略来降低损失,以获得更大的收益。同时,当感知损失 L_2 的值增大时,进化到均衡的速度也越快。由于数据提供方具有有限理性的特征,当双方的信任度较低而导致数据提供方的感知损失增大时,将会采取“认真”策略追求更大的收益。如图 5(b)和图 5(c)所示,当 $L_2 \geq 0.7$ 时,数据提供方将会选择“认真”策略,当 $L_2 = 0.9$ 时,系统管理方的策略也由“弱监管”转变为“强监管”。

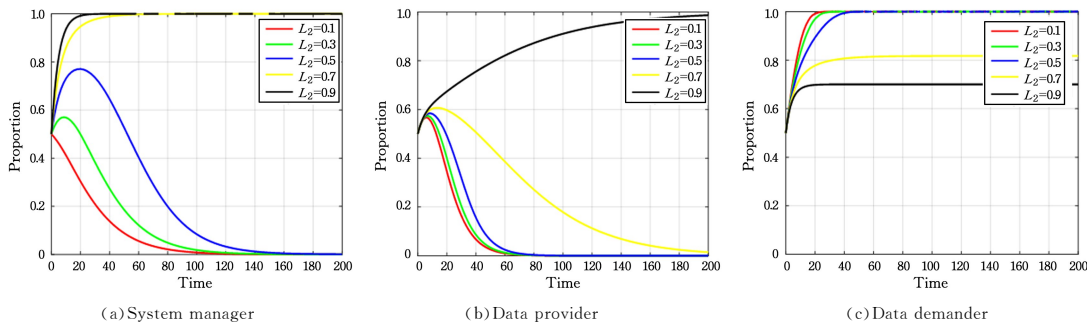


图 5 L_2 对系统利益方的决策影响

Fig. 5 L_2 's impact on decision-making of system stakeholders

5.3.3 W 对系统利益方的决策影响

数据需求方因上诉获得的补偿也会影响系统管理方和数据提供方的决策。为构建一个受信任的数据共享环境,数据

需求方举报破坏信任的举动,对系统管理方和数据提供方的行为起监督作用。因此,在实验中将 W 分别设置为 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 得到三方决策的影响如图 6 所示。

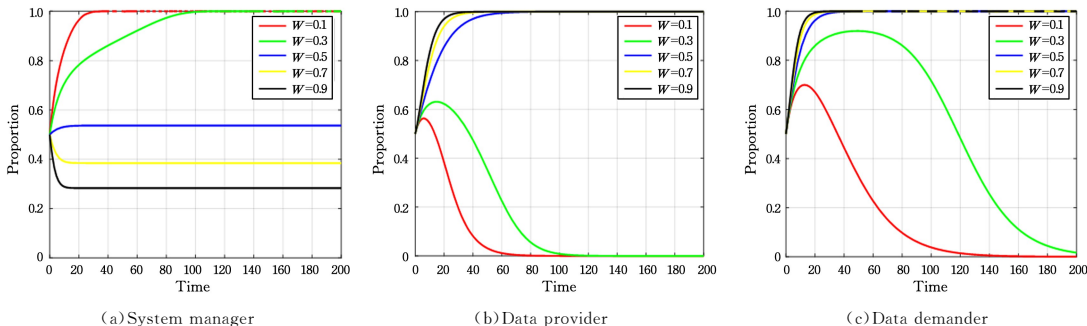


图 6 W 对系统利益方的策略影响

Fig. 6 W 's impact on decision-making of system stakeholders

上诉所获得报酬的增加会进一步激发数据需求方的监督热情。当 $W \geq 0.5$ 时,系统的稳定策略趋于(强监管,认真,信任),说明给与数据需求方一定的报酬有利于促进稳定点由(0, 0, 1)向(1, 1, 1)演进,从而更好地推动医疗数据共享进程。

6 结论与建议

6.1 结论

本文在区块链的架构下建立了系统管理方、数据提供方和数据需求方的三方演化博弈模型,并将前景理论引入模型

以更好地描述有限理性下各参与方的偏好和心理因素,忽略周围环境变化的不足。通过模拟仿真实验的结果可以得出以下结论:

(1)系统管理方的收益、数据提供方的感知损失和数据需求方获得的补偿是影响相关参与方策略选择的重要因素。因此参与主体应合理规划相应成本,防止因不合理分配而造成资源浪费。

(2)数据需求方的上诉行为会协助监管,且在三方博弈中发挥着重要作用。一方面可以协助系统管理方采取积极管理措施,另一方面间接引导数据提供方采取认真策略,以提供真实可靠的数据资源,进而促进医疗数据共享中信任关系的形成。

(3)不同初始状态会影响博弈演化过程中系统管理方、数据提供方和数据需求方的策略选择。

6.2 建议

基于上述结论,在对医疗数据共享的深入研究基础上提出以下建议,旨在增强各方参与医疗数据共享的信任关系,进而推动数据共享的发展。

(1)参与数据共享的各方实体之间可以通过区块链网络平台建立相关的医疗数据共享机制。各参与方之间的沟通和交流是各项交易活动得以顺利进行的基础和保障,不仅可以提高医疗数据共享过程中各方的积极性,也能有效地促进各种资源的有效流通和共享。通过建立高效的利益共享机制,秉承“多劳多得”的共享理念,为“健康中国”的大数据战略实现贡献力量。

(2)系统管理方应充分发挥引导作用,敦促落实国家政策,规范运作,增大数据提供方选择“认真”策略、数据需求方选择“信任”策略的概率。

(3)为了防止投机主义行为的出现,保障参与主体的利益,数据提供方要提供合规的医疗数据,确保数据的真实性,遵守市场规则,促进与数据需求方的信任关系。

(4)数据需求方应与系统管理方形成一种良好的监督关系,发现系统管理方消极监管、数据提供方敷衍投机等行为应及时提出上诉意见,这样不仅可以获得适当的补偿,而且有利于数据共享的真实性和安全性,保护数据需求方的自身权益,杜绝欺骗行为,从而获得长远利益。

参 考 文 献

- [1] CARVALHO J V, ROCHA Á, VASCONCELOS J, et al. A health data analytics maturity model for hospitals information systems[J]. *International Journal of Information Management*, 2019, 46: 278-285.
- [2] HUANG H, ZHU P, XIAO F, et al. A blockchain-based scheme for privacy-preserving and secure sharing of medical data[J]. *Computers & Security*, 2020, 99: 102010.
- [3] CHEN Z, XU W, WANG B, et al. A blockchain-based preserving and sharing system for medical data privacy[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2021, 124: 338-350.
- [4] SHEN Y, GUO B, SHEN Y, et al. Personal big data pricing method based on differential privacy[J]. *Computers & Security*, 2022, 113: 102529.
- [5] MIYACHI K, MACKAY T K. hOCBS: A privacy-preserving blockchain framework for healthcare data leveraging an on-chain

and off-chain system design[J]. *Information Processing & Management*, 2021, 58(3): 102535.

- [6] YANG J, WEN J, JIANG B, et al. Blockchain-Based Sharing and Tamper-Proof Framework of Big Data Networking[J]. *IEEE Network*, 2020, 34, 4: 62-67.
- [7] WEN Y L, CHEN M J. Medical data sharing scheme combined with federal learning and blockchain[J]. *Computer Engineering*, 2022, 48(5): 145-153, 161.
- [8] XIA Q, SIFAH E B, ASAMOAH K O, et al. MeDShare: Trust-Less Medical Data Sharing Among Cloud Service Providers via Blockchain[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 14757-14767.
- [9] KUMAR S, BHARTI A K, AMIN R. Decentralized secure storage of medical records using Blockchain and IPFS: A comparative analysis with future directions[J]. *Security and Privacy*, 2021, 4(5): e162.
- [10] LIU S, TANG H. A Consortium Medical Blockchain Data Storage and Sharing Model Based on IPFS[C]// 2021 The 4th International Conference on Computers in Management and Business (ICMB 2021), 2021.
- [11] WEI R, QIAN B, LAN X, et al. Research on Safe Sharing of Regional Medical Data Based on Blockchain Technology [J]. *Chinese Journal of Health Informatics and Management*, 2020, 17(2): 6.
- [12] HUANG J, QI Y W, ASGHAR M R, et al. Sharing medical data using a blockchain-based secure EHR system for New Zealand [J]. *IET Blockchain*, 2022, 2(1): 13-28.
- [13] YANG J, XING C. Personal data market optimization pricing model based on privacy level[J]. *Information*, 2019, 10(4): 123.
- [14] HAO H, YANG J, WANG J. A Tripartite Evolutionary Game Analysis of Participant Decision-Making Behavior in Mobile Crowdsourcing[J]. *Mathematics*, 2023, 11(5): 1269.
- [15] WU B, CHENG J, QI Y. Tripartite evolutionary game analysis for “Deceive acquaintances” behavior of e-commerce platforms in cooperative supervision[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2020, 550: 123892.
- [16] YU D, GAO J, WANG T. Betting market equilibrium with heterogeneous beliefs: A prospect theory-based model[J]. *European Journal of Operational Research*, 2022, 298(1): 137-151.
- [17] YANG J, YAN X, YANG W. A Tripartite Evolutionary Game Analysis of Online Knowledge Sharing Community [J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022, 2022: 4460034.
- [18] SHAO Q, YUAN J. Study on the disposal strategy of civil aviation passenger collective events based on evolutionary game theory[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2022, 598: 127341.



YANG Jian, born in 1987, Ph.D, lecturer, is a member of China Computer Federation. His main research interests include data management, data sharing/trading.



WANG Kaixuan, born in 1974, Ph.D, assistant professor. His main research interests include big data and algorithmic game theory.