

物联网双层耦合动力学信息传播模型研究

张月霞^{*①②} 常凤德^①

^①(北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室 北京 100020)

^②(高动态导航北京市实验室 北京 100020)

摘要: 信息传播模型的研究是物联网领域的重要组成部分,它有助于提高物联网系统的性能和效率,促进物联网技术的进一步发展。针对物联网通信中影响信息传播的因素复杂且不稳定的问题,该文提出一种双层耦合信息传播模型SIVR-UAD,通过分析物联网中不同状态的设备和用户对信息传播的影响,建立了6种耦合状态,并利用马尔科夫方法分析耦合节点的状态变化过程,找到信息传播平衡点,最后通过理论分析证明了模型的平衡点的唯一性以及稳定性。仿真结果表明,在3组不同的初始耦合节点数下,SIVR-UAD模型中的6种耦合节点数量变化始终趋向同一稳定水平,证明了该模型的平衡点和稳定性。

关键词: 物联网通信; SIVR-UAD; 双层耦合信息传播模型; 稳定性证明

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)08-3165-09

DOI: 10.11999/JEIT231291

Research on the Double Layer Coupling Dynamic Information Propagation Model of the Internet of Things

ZHANG Yuexia^{①②} CHANG Fengde^①

^①(Key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Beijing University of Information Technology, Beijing, 100020, China)

^②(High Dynamic Navigation Beijing Laboratory, Beijing, 100020, China)

Abstract: The study of information dissemination models is an important component of the Internet of Things field, which helps to improve the performance and efficiency of IoT systems, promote the further development of IoT technology. In response to the complex and unstable factors that affect information dissemination in IoT communication, a double-layer coupled information dissemination model SIVR-UAD (Susceptible, Infection, Variant, Recovered-Unknown, Aware, Disinterest) is proposed, which analyzes the impact of devices and users in different states on information dissemination in the Internet of Things. Six coupling states were established, and the Markov method was used to analyze the state change process of the coupling nodes, finding the information dissemination equilibrium point. Finally, the uniqueness and stability of the equilibrium point of the model were proved through theoretical analysis. The simulation results show that under three different initial coupling node numbers, the number of six coupling nodes in the SIVR-UAD model always tends to the same stable level, proving the equilibrium point and stability of the model.

Key words: IoT communication; Susceptible, Infection, Variant, Recovered-Unknown, Aware, Disinterest (SIVR-UAD); A double layer coupled information propagation model; Proof of stability

1 引言

随着无线通信技术的快速发展,物联网在人们的生活中发挥越来越重要的作用^[1-4]。物联网是通过各种传感器实时采集各种数据,并通过网络实现物与物、物与人的泛在连接,实现任何时间、任何地点,人、机、物的互联互通^[5-8]。物联网通过对

互联网、无线网络的融合,将物体的信息实时、准确地传送,以便信息交流、分享^[9-12]。但是物联网通信的随机性和开放性使得信息在物联网通信中会有不确定性,因此,如何保证用户信息传播的稳定性是物联网通信技术的重要研究内容之一。

目前,国内外学者对于物联网信息传播的准确性基于动力学传播模型进行了一定的研究^[13-16]。许云霞等人^[17]研究了具有logistic增长的时滞SIRS (Susceptible, Infection, Recovered, Susceptible)传

染病模型并利用基本再生数判定其平衡点和稳定性。张倩^[18]建立SEI²R(Susceptible, Exposed, Infection1, Infection2, Recovered)信息传播模型,利用李雅普诺夫平衡分析方法验证了模型的稳定性。崔雪莲等人^[19]以SIR(Susceptible, Infection, Recovered)传染病模型为基础,构建了基于信任关系的连续时间马尔科夫在线口碑传播模型,分析了不同网络结构下信任关系对在线口碑传播的影响。沈庆磊等人^[20]将微商信息传播与SEIR(Susceptible, Exposed, Infectious, Removed)模型结合,建立无知—潜伏—传播—免疫(IHSR)模型,并利用交互式马尔科夫链得到了微商信息传播的平均场方程,从而分析了非均质网络中信息传播的动态特性。上述文献主要基于单层网络研究了不同设备对信息传播产生的影响及其稳定性,但是其仅仅考虑了设备对信息传播的影响,往往忽略了用户状态和设备状态的耦合关系,多层网络信息传播模型更能准确描述信息传播过程。

在多层网络信息传播模型方面,文献^[21,22]研究了双层耦合网络上信息传播特性,并对不同的信息传播特性找出了对应的信息传播控制策略。文献^[23-25]建立了受用户意识影响的加权网络信息传播模型SIR-UAA*(Susceptible, Infected, Recovered-Unaware, Aware, Additionally aware),分析了有认知能力的社会用户意识和网络同质性能够影响物联网通信中信息的传播。Zhang等人^[26]结合用户意识和用户间社会联系影响建立物联网通信环境下信息扩散的数学模型,加快物联网通信中有益信息的传播,遏制恶意信息的传播,但所建立的模型仍然相对简单,缺乏对实际数据的支持。Sang等人^[27]根据用户意识水平识别信息的能力,建立SEIRD(Susceptible, Exposed, Infectious, Removed, Deceased)模型,分析了用户意识对信息传播的影响。杨云鹏等人^[28]提出了上层为虚拟网络传播层、下层为现实社会传播层的UAU-SIS(Unaware, Aware, Unaware-Susceptible, Infected, Susceptible)传播模型,利用平均场方法分析该模型的演化过程和传播阈值,从而达到对恶意信息的控制作用。罗章凯等人^[29]基于SIR模型建立双层均质耦合模型,进一步讨论在双层网络中影响信息传播的因素,以及层间连边对信息传播的促进作用。朱恒民等人^[30,31]利用信息线下线上双渠道传播特性,建立SIR-2O(Susceptible, Infection, Recovered-Online, Offline)模型,研究发现线上线下交互影响了信息传播的速度和广度。甘臣权等人^[32]建立了一种信息与用户意识耦合传播动力学模型,不仅扩大

了信息传播规模,而且能更准确刻画信息传播过程。张欣欣等人^[33]针对移动社会网络中信息传播的突发性、多元性以及偏差性等因素对于网络环境的影响,提出了实体的竞争性独立级联模型(Multi-Competitive Independent Cascade, MCIC),并定义了控制信息流模体(Controlled Information Flow Model, CIFM),设计了高效可控传播算法,最终实验证明了该算法在最大和平均感染时间上的优势。Li等人^[34,35]根据聚集性活动导致的传播现象提出一种高阶网络,该网络是一种能够简单描述流行病传播和信息传播的共同进化的数学框架,能够丰富相图,显示不连续相变、磁滞回线区域、双跃迁区域。上述文献提出了一些双层网络信息传播模型,并且研究了用户意识对信息传播的影响,然而他们只是研究了模型中信息传播的模式及其稳定性,没有对于一些无效的信息传播进行控制。

本文的主要贡献总结如下:

(1)本文考虑在物联网通信中,用户对信息的不了解程度会对信息的传播产生影响,从而建立了双层信息传播模型SIVR-UAD(Susceptible, Infection, Variant, Recovered-Unknown, Aware, Disinterest),将设备持有信息的状态和用户对信息知晓的状态进行耦合,得到6种不同的耦合状态,能够更准确的分析信息在物联网通信中的传播情况;

(2)本文利用动态马尔科夫方法来研究SIVR-UAD模型中6种耦合状态随时间变化的所有可能性以及最终达到的平衡点,并用李雅普诺夫方法,定义雅克比矩阵,证明了平衡点的稳定性;

(3)最后用控制变量法,通过控制相同系统参数下设置不同的初始耦合节点数和相同数量的初始耦合节点下设置不同的系统参数来仿真证明了双层耦合模型SIVR-UAD存在平衡点,并且该平衡点具有稳定性。

2 系统模型

2.1 SIVR-UAD双层动力学传播

本文提出的物联网双层耦合信息传播模型SIVR-UAD,如图1所示,其由设备层和用户层组成。

图1中,左边第1层为设备层,包含 S, I, V 和 R 等4种状态的设备,其中 S 为未接收到任何信息的设备, I 为接收到有用信息并传播该信息的设备, V 为接收并传播该无效信息的设备, R 为不再传播接收到的有效或无效的信息的设备。 β_1 为单位时间设备 S 接收到有用信息的概率, β_2 为单位时间设备 S 接收无效信息的概率, μ_1 为单位时间设备 I 不再传播有效信息的概率, μ_2 为单位时间设备 V 不再传播无

效信息的概率， φ 为设备 R 退出当前系统，不再占用该层物联网资源的概率。箭头表示设备和用户的转换关系，虚线连线表示不同设备和用户之间存在双向联系，实线连线表示用户层里用户之间的交流。具体转化如图2所示

设备的传播动力学转换方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -(\beta_1 + \beta_2)S \\ \frac{dI}{dt} &= \beta_1 S - \mu_1 I \\ \frac{dV}{dt} &= \beta_2 S - \mu_2 V \\ \frac{dR}{dt} &= \mu_1 I + \mu_2 V - \varphi R \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

第2层为用户层，转化情况如图3所示， U 为不了解信息情况的用户， A 为查看过信息且了解情况的用户， D 为停止传播无效信息的用户， λ 为单位时间用户查看过信息并了解情况的概率， δ 为单位时间用户不再传播无效信息的概率。

用户的传播动力学转换方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dU}{dt} &= -\lambda U \\ \frac{dA}{dt} &= \lambda U - \delta A \\ \frac{dD}{dt} &= \delta A \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

为了便于后续讨论与推导，表1给出了文中使用符号的定义与说明。

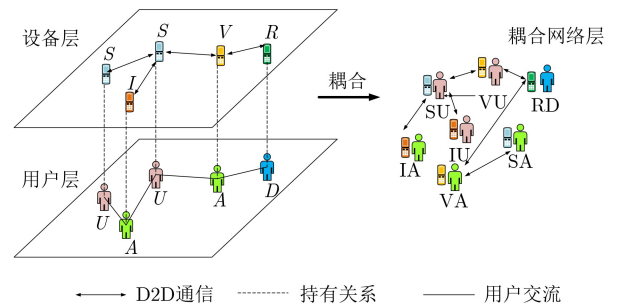


图 1 SIVR-UAD双层耦合信息传播模型

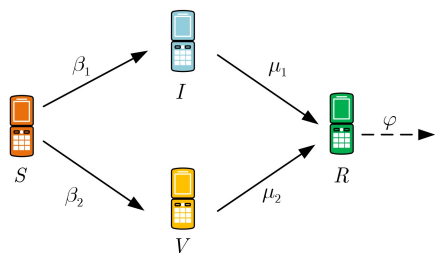


图 2 不同状态的设备转换关系

2.2 SIVR-UAD耦合信息传播

将SIVR-UAD模型中不同状态的设备和用户进行耦合，如图1右侧所示，其中SU表示设备未收到信息且用户不知道该信息，IU表示设备已接收到有效信息但用户还未查看到信息，IA表示设备已接收到正确信息且用户知道准确的信息内容，VA表示设备已接收到无效信息但用户从其他途径已经知道准确的信息内容，VU表示设备已接收到无效信息且用户不知道信息，RD表示用户停止用设备继续传播信息。其中SU和IA是两种初始状态的耦合节点，由他们开始传播信息。考虑到实际的情况，不存在设备未收到信息但用户已查看到信息并开始传播的耦合节点SA，和设备未收到信息用户却不再传播信息的耦合节点SD，也不存在用户已经对信息不感兴趣并不再传播，但是所持设备还在继续传播信息的ID和VD状态，RU为设备退出信息传播，但用户并不知道该信息，RA为设备退出信息传播，但用户刚知晓信息并开始传播，所以这两个状态并不符合逻辑，也不存在于模型中。

耦合节点的状态转换的概率为

(1)SU→IU

$P(IU) = P(I)P(U) = \beta_1 P(S)P(U) = \beta_1 P(SU)$ (3)

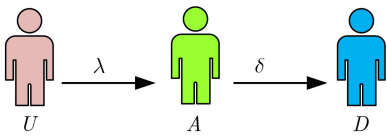


图 3 不同状态的用户转换关系

表 1 模型参数

参数	定义
S	未携带信息的设备
I	携带有效信息的设备
V	携带无效信息的设备
R	不再接收和传播信息的设备
U	不了解信息情况的用户
A	查看过信息且了解情况的用户
D	停止传播无效信息的用户
β_1	单位时间设备 S 接收到有效信息的概率
β_2	单位时间设备 S 接收到无效信息的概率
μ_1	单位时间设备 I 不再传播有效信息的概率
μ_2	单位时间设备 V 不再传播无效信息的概率
λ	单位时间用户知道信息的概率
δ	单位时间用户不再传播无效信息的概率
φ	单位时间设备 R 不再占用资源的概率

(2) $SU \rightarrow VU$

$$P(VU) = P(V)P(U) = \beta_2 P(S)P(U) = \beta_2 P(SU) \quad (4)$$

(3) $IA \rightarrow RD$

$$P(RD) = P(R)P(D) = \mu_1 P(I)\delta P(A) = \mu_1 \delta P(IA) \quad (5)$$

(4) $IU \rightarrow IA$

$$P(IA) = P(I)P(A) = P(I)\lambda P(U) = \lambda P(IU) \quad (6)$$

(5) $VU \rightarrow VA$

$$P(VA) = P(V)P(A) = P(V)\lambda P(U) = \lambda P(VU) \quad (7)$$

(6) $VA \rightarrow RD$

$$P(RD) = P(R)P(D) = \mu_2 P(V)\delta P(A) = \mu_2 \delta P(VA) \quad (8)$$

综上得到式(9)

$$\left. \begin{aligned} \frac{dSU}{dt} &= \Gamma - (\beta_1 + \beta_2)SU \\ \frac{dIU}{dt} &= \beta_1 SU - \lambda IU \\ \frac{dVU}{dt} &= \beta_2 SU - \lambda VU \\ \frac{dIA}{dt} &= \lambda IU - \mu_1 \delta IA \\ \frac{dVA}{dt} &= \lambda VU - \mu_2 \delta VA \\ \frac{dRD}{dt} &= \mu_1 \delta IA + \mu_2 \delta VA - \varphi RD \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式(9)为系统模型中设备和用户耦合后的6种状态在信息传播系统中的转换方程, 其中 Γ 为物联网系统中RD节点退出后的空闲资源, 待有设备连入后转为SU状态的节点。

马尔科夫链模型可以用来描述信息在社交网络中的传播路径和传播速度。马尔科夫链的无记忆性质使得它可以准确地模拟信息传播过程中各节点间的转移概率, 从而帮助我们理解和预测信息传播的动态过程。图4表示模型中每个耦合节点在时间 $t+1$ 时刻的所有可能的状态变换。由于设备用户耦合状态的变换只与上一时刻有关, 所以遵循马尔科夫变换规律。初始状态SU以 $1 - \beta_1 - \beta_2$ 的概率保持状态SU, 以 β_1 的概率转变为状态IU, 以 β_2 的概率转变为状态VU。状态IU虽然设备接收到信息, 但用户还未从设备上查看信息, 以 $1 - \lambda$ 的概率保持状态IU, 以 λ 的概率转变为状态IA, 状态IA以 $1 - \mu_1 \delta$ 的概率保持状态IA, 以 $\mu_1 \delta$ 的概率转变为状态RD, 转变为RD后则退出信息传递, 停止状态的转变。状态VU为设备接收到无效信息, 用户并没有查看设备得到信息, 并以 $1 - \lambda$ 的概率保持状态

VU, 以 λ 的概率转变为状态VA, 状态VA以 $1 - \mu_2 \delta$ 的概率保持状态VA, 以 $\mu_2 \delta$ 的概率转变为状态RD。初始状态IA以 $1 - \mu_1 \delta$ 的概率保持状态IA, 以 $\mu_1 \delta$ 的概率转变为状态RD。

3 平衡点与稳定性分析

3.1 平衡点

当时间 $t \rightarrow \infty$ 时, 若系统模型达到平衡, 则系统中的所有状态节点数量不再发生变化, 令式(9)的右侧等于0, 如式所示

$$\left. \begin{aligned} \frac{dSU}{dt} &= \Gamma - (\beta_1 + \beta_2)SU = 0 \\ \frac{dIU}{dt} &= \beta_1 SU - \lambda IU = 0 \\ \frac{dVU}{dt} &= \beta_2 SU - \lambda VU = 0 \\ \frac{dIA}{dt} &= \lambda IU - \mu_1 \delta IA = 0 \\ \frac{dVA}{dt} &= \lambda VU - \mu_2 \delta VA = 0 \\ \frac{dRD}{dt} &= \mu_1 \delta IA + \mu_2 \delta VA - \varphi RD = 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

解式(10)得

$$\left. \begin{aligned} SU^* &= \frac{\Gamma}{\beta_1 + \beta_2} \\ IU^* &= \frac{\beta_1 \Gamma}{\lambda(\beta_1 + \beta_2)} \\ VU^* &= \frac{\beta_2 \Gamma}{\lambda(\beta_1 + \beta_2)} \\ IA^* &= \frac{\beta_1 \Gamma}{\mu_1 \delta(\beta_1 + \beta_2)} \\ VA^* &= \frac{\beta_2 \Gamma}{\mu_2 \delta(\beta_1 + \beta_2)} \\ RD^* &= \frac{\Gamma}{\varphi} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

当系统模型达到平衡时, 系统模型中6个耦合状态节点达到平衡点 $E^* = (SU^*, IU^*, VU^*, IA^*, VA^*, RD^*)$

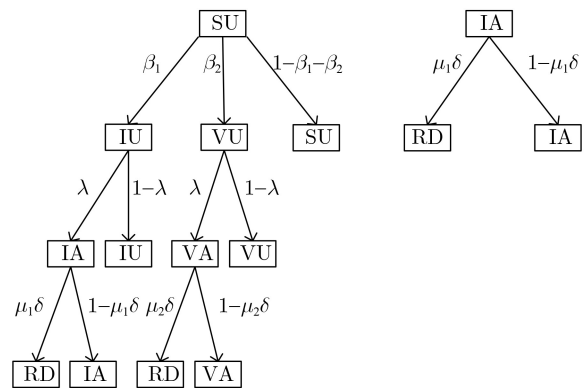


图4 设备用户耦合状态变换过程

3.2 稳定性分析

在找到平衡点 E^* 后, 利用雅克比矩阵来评估

该平衡点的局部稳定性。建立式(11)的雅克比矩阵 J 为

$$J = \begin{pmatrix} -(\beta_1 + \beta_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_2 & -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & -\mu_1\delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda & 0 & -\mu_2\delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu_1\delta & \mu_2\delta & -\varphi \end{pmatrix} \quad (12)$$

为了评估平衡点的稳定性, 需要计算雅克比矩阵 J 的特征值, 矩阵 J 对应的特征方程为

$$\begin{aligned} \det(\rho I_{6 \times 6} - J) &= \begin{vmatrix} \rho + (\beta_1 + \beta_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\beta_2 & \rho + \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho + \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda & 0 & \rho + \mu_1\delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda & 0 & \rho + \mu_2\delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\mu_1\delta & -\mu_2\delta & \rho + \varphi \end{vmatrix} \\ &= [\rho + (\beta_1 + \beta_2)] \cdot (\rho + \lambda)^2 \cdot (\rho + \mu_1\delta) \cdot (\rho + \mu_2\delta) \cdot (\rho + \varphi) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

其中 ρ 为特征值, $I_{6 \times 6}$ 为6阶单位矩阵, 可以解得特征值分别为

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 &= -(\beta_1 + \beta_2) < 0 \\ \rho_2 &= \rho_3 = -\lambda < 0 \\ \rho_4 &= -\mu_1\delta < 0 \\ \rho_5 &= -\mu_2\delta < 0 \\ \rho_6 &= -\varphi < 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

由于特征方程的6个根均为负数, 根据李雅普诺夫的稳定定理, 可得平衡点 $E^* = (SU^*, IU^*, VU^*, IA^*, VA^*, RD^*)$ 局部渐进稳定。

4 仿真结果与分析

为了进一步分析物联网通信中SIVR-UAD耦合模型的传播规律以及验证所得理论结果, 本文将采用Matlab软件进行实验。

本文在耦合节点数为500个, 总时长为160(h)的场景下, 分别通过在相同系统参数下设置不同的初始耦合节点数和在相同数量的初始耦合节点下设置不同的系统参数来验证SIVR-UAD模型的稳定性。

(1) 设置不同的初始耦合状态节点数

在系统参数为 $\beta_1 = 0.09$, $\beta_2 = 0.01$, $\lambda = 0.07$, $\mu_1 = 0.05$, $\mu_2 = 0.02$, $\delta = 0.01$, $\varphi = 0.01$ 下, 给定以下3种初始耦合节点数:

(a) $SU(0) = 450$, $IA(0) = 30$, $IU(0) = 0$, $VA(0) = 20$, $VU(0) = 0$, $RD(0) = 0$;

(b) $SU(0) = 450$, $IA(0) = 20$, $IU(0) = 5$, $VA(0) = 20$, $VU(0) = 5$, $RD(0) = 0$;

(c) $SU(0) = 400$, $IA(0) = 50$, $IU(0) = 15$, $VA(0) = 25$, $VU(0) = 10$, $RD(0) = 0$;

图5中, 横轴表示时间, 纵轴表示耦合节点

数, SU, IU, VU, IA, VA和RD分别用绿色、黑色、粉色、黄色、红色、蓝色曲线表示, 图5分别描述了SIVR-UAD模型在不同的初始耦合节点数下的演化过程。在最开始SU接收到信息后迅速转变为IU和VU, 随着用户了解信息并开始转发后, IA和VA也开始增加, 在最开始的一段时间消息传播的速度最快, IU和IA很快到达最大值, 随后慢慢下降到达平衡, 而VU和VA随着时间变化, 退出传播无效信息, 之后IA和VA退出传播后都变为RD, 最后让出资源给新连接的设备在 $t=40$ 时可以看出有新设备连入变为SU状态节点。可以看出虽然是不同的初始条件, 但是这3种情况到达平衡时, 六种耦合节点数量变化曲线会趋于同一稳定水平, 即 $t \rightarrow \infty$ 时, $U=34$, $IU=43$, $VU=5$, $IA=61$, $VA=18$, $RD=339$, 这表示系统演化不受初始耦合节点数不同的影响, 从而可以预测信息传播的长期行为。因此理论和实验结果都证明了模型的平衡点是稳定的。

(2) 设置不同的系统参数

在初始耦合节点数为 $SU(0)=450$, $IA(0)=30$, $IU(0)=0$, $VA(0)=20$, $VU(0)=0$, $RD(0)=0$ 下, 给定系统参数:

(a) $\beta_1 = 0.09$, $\beta_2 = 0.01$, $\lambda = 0.07$, $\mu_1 = 0.05$, $\mu_2 = 0.02$, $\delta = 0.01$, $\varphi = 0.01$;

(b) $\beta_1 = 0.08$, $\beta_2 = 0.02$, $\lambda = 0.05$, $\mu_1 = 0.08$, $\mu_2 = 0.06$, $\delta = 0.02$, $\varphi = 0.02$;

(c) $\beta_1 = 0.07$, $\beta_2 = 0.03$, $\lambda = 0.02$, $\mu_1 = 0.03$, $\mu_2 = 0.02$, $\delta = 0.03$, $\varphi = 0.03$;

图6描述了SIVR-UAD模型在不同系统参数下的演化过程。可以看出系统参数的调整直接影响系

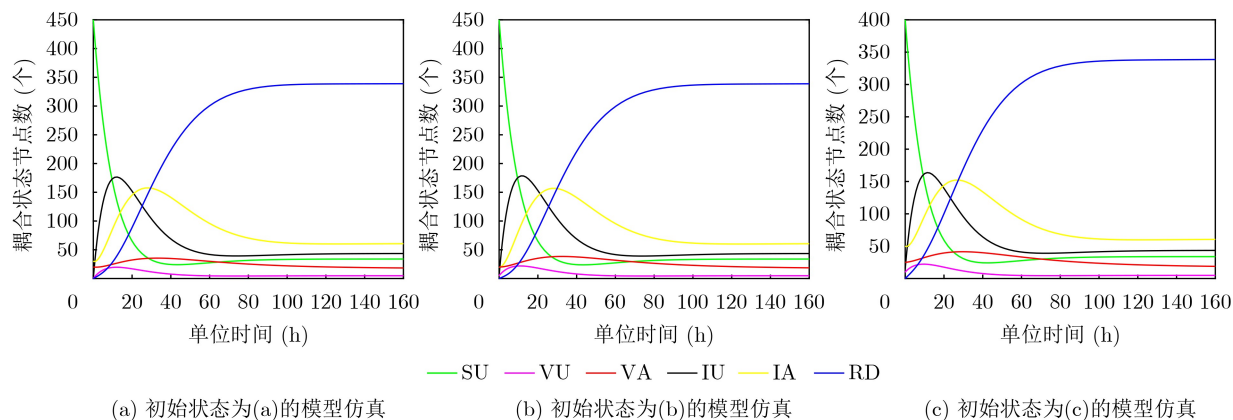


图5 不同初始状态下SIVR-UAD模型演化

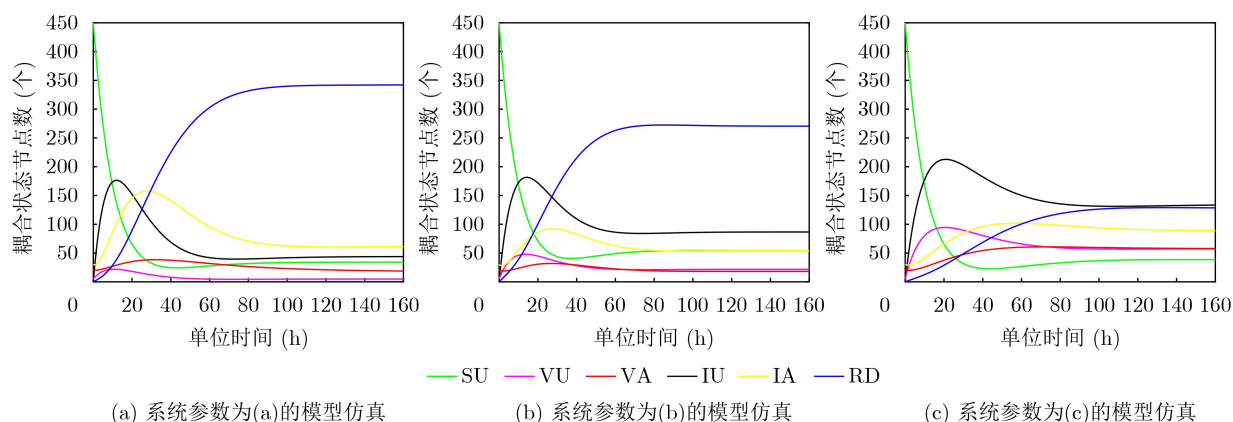


图6 不同系统参数下SIVR-UAD模型演化

统的演化过程以及最终达到的平衡点的数值。达到平衡后图6(a)中 $VU=5$, $VA=19$, 占系统节点总数的2.8%; 图6(b)中 $VU=22$, $VA=18$, 占系统节点总数的8%; 图6(c)中 $VU=57$, $VA=58$, 占系统节点总数的23%。说明可以通过改变和调整系统参数来达到控制系统中无效信息的传播, 同时也说明了进行参数分析对无效信息传播的控制是可行的以及必要的。

5 结论

本文提出一种设备和用户双层的传播模型SIVR-UAD来研究信息传播的准确性, 通过马尔科夫分析网络层中6种耦合节点状态的变化情况, 根据系统最终到达的平衡点, 分析物联网通信网络中影响信息传播的因素, 最后通过实验证明了该系统模型存在平衡点, 且平衡点只和系统参数有关, 并具有稳定性。通过实验分析表明, 在用户和设备同时决定的物联网信息传播系统中, 可以通过调整系统参数来降低无效信息的传播, 所提模型不仅能直观的看出影响物联网通信中信息传播的因素, 还能准确的模拟物联网通信中的信息传播过程。

本文提出的模型只考虑了用户与设备之间的耦合关系对于物联网通信的影响, 可能会有部分局限性, 之后也会从多层网络耦合方面来完善模型。

未来, 物联网中的信息传播模型将更加注重个性化和差异化的设计, 基于人工智能和区块链等技术的信息传播模型将成为研究的重要方向。同时, 随着物联网技术的不断发展和应用场景的不断扩大, 信息传播模型也将不断改进和完善, 为物联网的全面发展提供更加有力的支持。

参考文献

- [1] 徐瑶, 王玢. 物联网环境中的5G关键技术及产业化应用[J]. 数字通信世界, 2021(7): 53-54. doi: 10.3969/J.ISSN.1672-7274.2021.07.025.
XU Yao and WANG Fen. 5G key technologies and industrialization application in internet of things environment[J]. Digital Communication World, 2021(7): 53-54. doi: 10.3969/J.ISSN.1672-7274.2021.07.025.
- [2] 宋晓虹. 物联网技术在智慧农业中的应用及发展模式创新探索[J]. 南方农机, 2022, 53(23): 163-165. doi: 10.3969/j.issn.1672-3872.2022.23.049.
SONG Xiaohong. Exploration of the application and

- development model innovation of internet of things technology in smart agriculture[J]. *Southern Agricultural Machinery*, 2022, 53(23): 163–165. doi: [10.3969/j.issn.1672-3872.2022.23.049](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-3872.2022.23.049).
- [3] 王文斌. 城市综合管廊基于物联网融合通信系统应用分析[J]. 新型工业化, 2022, 12(9): 260–263. doi: [10.19335/j.cnki.2095-6649.2022.9.064](https://doi.org/10.19335/j.cnki.2095-6649.2022.9.064).
- WANG Wenbin. Analysis of the application of integrated communication systems based on the internet of things in urban comprehensive pipe corridors[J]. *The Journal of New Industrialization*, 2022, 12(9): 260–263. doi: [10.19335/j.cnki.2095-6649.2022.9.064](https://doi.org/10.19335/j.cnki.2095-6649.2022.9.064).
- [4] 陈章余. 物联网技术在电子通信领域的应用及其研究[J]. 信息与电脑, 2022, 34(12): 197–199. doi: [10.3969/j.issn.1003-9767.2022.12.062](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-9767.2022.12.062).
- CHEN Zhangyu. Application and research of internet of things technology in electronic communication[J]. *Information & Computer*, 2022, 34(12): 197–199. doi: [10.3969/j.issn.1003-9767.2022.12.062](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-9767.2022.12.062).
- [5] 闫思洁. 在物联网通信中应用计算机硬件及网络技术的实践途径[J]. 网络安全技术与应用, 2022(6): 31–33. doi: [10.3969/j.issn.1009-6833.2022.06.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-6833.2022.06.018).
- YAN Sijie. Practical approaches to applying computer hardware and network technology in IoT communication[J]. *Network Security Technology & Application*, 2022(6): 31–33. doi: [10.3969/j.issn.1009-6833.2022.06.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-6833.2022.06.018).
- [6] 杨青丰, 刘思雨, 唐丽萍. 5G网络下的物联网通信技术探讨[J]. 中国管理信息化, 2022, 25(9): 163–165.
- YANG Qingfeng, LIU Siyu, and TANG Liping. Exploration of IoT communication technology under 5G network[J]. *China Management Informationization*, 2022, 25(9): 163–165.
- [7] 贺英. 物联网通信服务平台保障系统的设计与实现研究[J]. 中国新通信, 2022, 24(17): 19–21.
- HE Ying. Research on the design and implementation of the internet of things communication service platform guarantee system[J]. *China New Telecommunications*, 2022, 24(17): 19–21.
- [8] 史国剑. 物联网技术在智慧交通中的应用分析[J]. 时代汽车, 2022(21): 193–195.
- SHI Guojian. Application analysis of internet of things technology in intelligent transportation[J]. *Auto Time*, 2022(21): 193–195.
- [9] 许晶晶. 人工智能与物联网在智慧城市中的应用研究[J]. 中国设备工程, 2023(4): 42–44. doi: [10.3969/j.issn.1671-0711.2023.04.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-0711.2023.04.019).
- XU Jingjing. Research on the application of artificial intelligence and the internet of things in smart cities[J]. *China Plant Engineering*, 2023(4): 42–44. doi: [10.3969/j.issn.1671-0711.2023.04.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-0711.2023.04.019).
- [10] 赵炬, 吴佩利, 孟然. 物联网在煤矿中的应用现状及展望[J]. 陕西煤炭, 2023, 42(1): 139–144. doi: [10.3969/j.issn.1671-749X.2023.01.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-749X.2023.01.030).
- ZHAO Ju, WU Peili, and MENG Ran. Application status and prospect of internet of things in coal mines[J]. *Shaanxi Coal*, 2023, 42(1): 139–144. doi: [10.3969/j.issn.1671-749X.2023.01.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-749X.2023.01.030).
- [11] 刘文孝, 李冰, 刘凯. 物联网技术在现代化农业发展中的应用[J]. 种子科技, 2023, 41(2): 123–125. doi: [10.19904/j.cnki.cn14-1160/s.2023.02.041](https://doi.org/10.19904/j.cnki.cn14-1160/s.2023.02.041).
- LIU Wenxiao, LI Bing, and LIU Kai. The application of internet of things technology in the development of modern agriculture[J]. *Seed Science & Technology*, 2023, 41(2): 123–125. doi: [10.19904/j.cnki.cn14-1160/s.2023.02.041](https://doi.org/10.19904/j.cnki.cn14-1160/s.2023.02.041).
- [12] 黄兴, 张文杰, 李曦, 等. 一种面向电力物联网的认知D2D网络能效资源分配算法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2): 97–103. doi: [10.19753/j.issn1001-1390.2023.02.014](https://doi.org/10.19753/j.issn1001-1390.2023.02.014).
- HUANG Xing, ZHANG Wenjie, LI Xi, et al. Energy-efficient resource allocation algorithm for cognitive D2D networks for power IoT[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(2): 97–103. doi: [10.19753/j.issn1001-1390.2023.02.014](https://doi.org/10.19753/j.issn1001-1390.2023.02.014).
- [13] 徐涵, 张庆. 复杂网络上传播动力学模型研究综述[J]. 情报科学, 2020, 38(10): 159–167. doi: [10.13833/j.issn.1007-7634.2020.10.024](https://doi.org/10.13833/j.issn.1007-7634.2020.10.024).
- XU Han and ZHANG Qing. A review of epidemic dynamics on complex networks[J]. *Information Science*, 2020, 38(10): 159–167. doi: [10.13833/j.issn.1007-7634.2020.10.024](https://doi.org/10.13833/j.issn.1007-7634.2020.10.024).
- [14] 王彦本. 传播动力学研究综述[J]. 通讯世界, 2015(3): 24. doi: [10.3969/j.issn.1006-4222.2015.03.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4222.2015.03.017).
- WANG Yanben. Overview of communication dynamics research[J]. *Telecom World*, 2015(3): 24. doi: [10.3969/j.issn.1006-4222.2015.03.017](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4222.2015.03.017).
- [15] 张鹏, 赵动员, 梅蕾. 移动社交网络信息传播研究述评与展望[J]. 情报科学, 2020, 38(2): 170–176. doi: [10.13833/j.issn.1007-7634.2020.02.025](https://doi.org/10.13833/j.issn.1007-7634.2020.02.025).
- ZHANG Peng, ZHAO Dongyuan, and MEI Lei. Review and prospect of information dissemination research on mobile social network[J]. *Information Science*, 2020, 38(2): 170–176. doi: [10.13833/j.issn.1007-7634.2020.02.025](https://doi.org/10.13833/j.issn.1007-7634.2020.02.025).
- [16] 汪意. 基于SEIR模型的复杂网络上的疾病传播动力学与隔离措施研究[D]. [硕士学位论文], 杭州师范大学, 2021. doi: [10.27076/d.cnki.ghzsc.2021.000728](https://doi.org/10.27076/d.cnki.ghzsc.2021.000728).
- WANG Yi. Research on dynamics of disease spreading and isolation measures in complex networks based on SEIR model[D]. [Master dissertation], Hangzhou Normal University, 2021. doi: [10.27076/d.cnki.ghzsc.2021.000728](https://doi.org/10.27076/d.cnki.ghzsc.2021.000728).
- [17] 许云霞, 雷学红. 具有Logistic增长的SIRS传染病模型的稳定

- 性及最优控制分析[J]. 湖北民族大学学报: 自然科学版, 2020, 38(2): 200–205. doi: [10.13501/j.cnki.42-1908/n.2020.06.017](https://doi.org/10.13501/j.cnki.42-1908/n.2020.06.017).
- XU Yunxia and LEI Xuehong. Dynamic analysis and optimal control of an SIRS epidemic model with logistic growth[J]. *Journal of Hubei Minzu University: Natural Science Edition*, 2020, 38(2): 200–205. doi: [10.13501/j.cnki.42-1908/n.2020.06.017](https://doi.org/10.13501/j.cnki.42-1908/n.2020.06.017).
- [18] 张倩. 基于帕累托原理和节点地位的社交网络信息传播模型与控制方法[D]. [硕士论文], 西华大学, 2021. doi: [10.27411/d.cnki.gscgc.2021.000323](https://doi.org/10.27411/d.cnki.gscgc.2021.000323).
- ZHANG Qian. Social network information dissemination models and control methods based on Pareto principle and node status[D]. [Master dissertation], Xihua University, 2021. doi: [10.27411/d.cnki.gscgc.2021.000323](https://doi.org/10.27411/d.cnki.gscgc.2021.000323).
- [19] 崔雪莲, 那日萨. 基于消费者信任关系的在线口碑信息传播模型[J]. 系统管理学报, 2020, 29(3): 1090–1100. doi: [10.3969/j.issn1005-2542.2020.06.007](https://doi.org/10.3969/j.issn1005-2542.2020.06.007).
- CUI Xuelian and Narisa. Modeling of online word-of-mouth information diffusion based on consumer trust relationship[J]. *Journal of Systems & Management*, 2020, 29(3): 1090–1100. doi: [10.3969/j.issn1005-2542.2020.06.007](https://doi.org/10.3969/j.issn1005-2542.2020.06.007).
- [20] 沈庆磊, 邓月. 基于复杂网络的微商信息传播模型研究[J]. 模糊系统与数学, 2022, 36(2): 145–154.
- SHEN Qinglei and DENG Yue. Research on wechat information transmission model based on complex network[J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2022, 36(2): 145–154.
- [21] 王志双. 双层耦合网络上的传播行为与扩散动力学研究[D]. [博士论文], 天津理工大学, 2021. doi: [10.27360/d.cnki.gtlgy.2021.000825](https://doi.org/10.27360/d.cnki.gtlgy.2021.000825).
- WANG Zhishuang. Propagation behavior and diffusion dynamics in two-layered coupling networks[D]. [Ph. D. dissertation], Tianjin University of Technology, 2021. doi: [10.27360/d.cnki.gtlgy.2021.000825](https://doi.org/10.27360/d.cnki.gtlgy.2021.000825).
- [22] 王欢. 双层网络上的传播动力学建模及分析[D]. [硕士论文], 安徽大学, 2020. doi: [10.26917/d.cnki.ganhu.2020.001180](https://doi.org/10.26917/d.cnki.ganhu.2020.001180).
- WANG Huan. Modeling and analysis of the spreading dynamics in two-layer multiplex networks[D]. [Master dissertation], Anhui University, 2020. doi: [10.26917/d.cnki.ganhu.2020.001180](https://doi.org/10.26917/d.cnki.ganhu.2020.001180).
- [23] SCATÀ M, DI STEFANO A, LA CORTE A, *et al.* A multiplex social contagion dynamics model to shape and discriminate D2D content dissemination[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2021, 7(2): 581–593. doi: [10.1109/TCCN.2020.3027697](https://doi.org/10.1109/TCCN.2020.3027697).
- [24] SCATÀ M, DI STEFANO A, LA CORTE A, *et al.* Quantifying the propagation of distress and mental disorders in social networks[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 5005. doi: [10.1038/s41598-018-23260-2](https://doi.org/10.1038/s41598-018-23260-2).
- [25] RAHMEDE C, IACOVACCI J, ARENAS A, *et al.* Centralities of nodes and influences of layers in large multiplex networks[J]. *Journal of Complex Networks*, 2018, 6(5): 733–752. doi: [10.1093/comnet/cnx050](https://doi.org/10.1093/comnet/cnx050).
- [26] ZHANG Zufan, LIU Anqi, YI Yinxue, *et al.* Exploring the dynamical behavior of information diffusion in D2D communication environment[J]. *Security and Communication Networks*, 2020, 2020: 8848576. doi: [10.1155/2020/8848576](https://doi.org/10.1155/2020/8848576).
- [27] SANG Chunyan and LIAO Shigen. Modeling and simulation of information dissemination model considering user's awareness behavior in mobile social networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2020, 537: 122639. doi: [10.1016/j.physa.2019.122639](https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.122639).
- [28] 杨云鹏, 樊重俊, 杨坚争, 等. 基于官方信息控制的多层网络谣言传播模型[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(5): 1294–1297, 1314. doi: [10.3969/j.issn.1001-3695.2018.05.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3695.2018.05.003).
- YANG Yunpeng, FAN Chongjun, YANG Jianzheng, *et al.* Rumor propagation model on multilayered interconnected complex networks based on official information driven[J]. *Application Research of Computers*, 2018, 35(5): 1294–1297, 1314. doi: [10.3969/j.issn.1001-3695.2018.05.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3695.2018.05.003).
- [29] 罗章凯, 裴忠民, 熊伟, 等. 双层均质耦合网络信息传播动力学研究[J]. 计算机仿真, 2023, 40(1): 43–47. doi: [10.3969/j.issn.1006-9348.2023.01.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9348.2023.01.009).
- LUO Zhangkai, PEI Zhongmin, XIONG Wei, *et al.* Research on dynamics of information spreading on double-layer coupled networks[J]. *Computer Simulation*, 2023, 40(1): 43–47. doi: [10.3969/j.issn.1006-9348.2023.01.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9348.2023.01.009).
- [30] 朱恒民, 杨柳, 马静, 等. 基于耦合网络的线上线下互动舆情传播模型研究[J]. 情报杂志, 2016, 35(2): 139–144, 150. doi: [10.3969/j.issn.1002-1965.2016.02.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-1965.2016.02.025).
- ZHU Hengmin, YANG Liu, MA Jing, *et al.* Study on public opinion propagation model based on coupled networks under onlineto offline interaction[J]. *Journal of Intelligence*, 2016, 35(2): 139–144, 150. doi: [10.3969/j.issn.1002-1965.2016.02.025](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-1965.2016.02.025).
- [31] 魏静, 黄阳江豪, 朱恒民. 基于耦合网络的社交网络舆情传播模型研究[J]. 现代情报, 2019, 39(10): 110–118. doi: [10.3969/j.issn.1008-0821.2019.10.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-0821.2019.10.013).
- WEI Jing, HUANG Yangjianghao, and ZHU Hengmin. Research on public opinion communication model of social network based on coupling network[J]. *Journal of Modern Information*, 2019, 39(10): 110–118. doi: [10.3969/j.issn.1008-0821.2019.10.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-0821.2019.10.013).
- [32] 甘臣权, 刘安棋, 张祖凡, 等. D2D通信中用户意识与信息耦合传播建模分析[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(8): 2767–2776. doi: [10.11999/JEIT210535](https://doi.org/10.11999/JEIT210535).

- GAN Chenquan, LIU Anqi, ZHANG Zufan, *et al.* Modeling and analysis of user awareness and information coupling propagation in D2D communications[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(8): 2767–2776. doi: [10.11999/JEIT210535](https://doi.org/10.11999/JEIT210535).
- [33] 张欣欣, 许力, 徐振宇. 基于网络模体的移动社会网络信息可控传播方法[J]. 电子与信息学报, 2023, 45(2): 635–643. doi: [10.11999/JEIT211429](https://doi.org/10.11999/JEIT211429).
- ZHANG Xinxin, XU Li, and XU Zhenyu. Information propagation control method in mobile social networks based on network motifs[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(2): 635–643. doi: [10.11999/JEIT211429](https://doi.org/10.11999/JEIT211429).
- [34] LI Wenyao, CAI Meng, ZHONG Xiaoni, *et al.* Coevolution of epidemic and infodemic on higher-order networks[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2023, 168: 113102. doi: [10.1016/J.CHAOS.2023.113102](https://doi.org/10.1016/J.CHAOS.2023.113102).
- [35] NIE Yanyi, LI Wenyao, PAN Liming, *et al.* Markovian approach to tackle competing pathogens in simplicial complex[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2022, 417: 126773. doi: [10.1016/j.amc.2021.126773](https://doi.org/10.1016/j.amc.2021.126773).
- 张月霞：女，教授，研究方向为无线协作通信技术等。
常凤德：男，硕士生，研究方向为复杂网络信息传播动力学模型。
- 责任编辑：马秀强