

# 车联网运动模型的复杂网络解析方法

于冲, 赵海, 司帅宗, 彭海霞

(东北大学计算机科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819)

**摘要:** 车联网快速移动的特点导致其结构具有强烈的复杂性, 传统的网络研究方法无法对这种复杂性进行分析. 针对此问题将复杂网络解析方法运用于车联网的研究之中, 依据车联网组网过程建立车联网运动模型, 通过复杂网络研究手段与运动模型相结合的方式对车联网的度分布、鲁棒性以及网络连接变化率进行分析与仿真实验. 结果表明, 所构建的运动模型能够反应车联网组网过程, 复杂网络解析方法在车联网性质分析方面十分有效.

**关键词:** 车联网; 运动模型; 度分布; 鲁棒性; 连接变化率

**中图分类号:** TP393      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2017)06-1449-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.06.024

## Complex Networks Analysis Method of VANET Mobility Model

YU Chong, ZHAO Hai, SI Shuai-zong, PENG Hai-xia

(School of Computer Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

**Abstract:** The fast-moving characteristic of VANET (Vehicle Ad-hoc Network) leads to a high complexity of network structure that the conventional methodology of network cannot figure out. The solution proposed was based on the complex networks theory since its applicability is straightforward for this high complexity of VANET. And a mobility model was also proposed based on the process of network construction of VANET. The combination of the complex networks theory and the mobility model can be used to analyze the degree distribution, robustness, and the rate of connection change of VANET. Meanwhile, the method be simulated and validated. The results show that the proposed mobility model can represent the process of network construction of VANET, and the complex networks theory is very effective in its property analysis.

**Key words:** VANET; mobility model; degree distribution; robustness; link change rate

## 1 引言

车载自组织网络 (VANET) 是指在交通环境下乘客与车辆之间、车辆之间、车辆与基础设施之间组建的移动互联网络, 是移动自组织网络在道路上的应用, 具有自治性、无固定结构、支持多跳路由和可扩展性好等特点, 能提供预警交通事故、规划行车路线、查询道路信息、智能交通管理、移动办公等服务<sup>[1,2]</sup>. 车联网可用于实现车辆之间的无基础设施通信, 从而达到改善交通拥堵状况、提升行车安全、共享媒体信息的目的<sup>[3]</sup>. 目前, 对车联网的研究逐渐成为一项热门课题.

车联网作为一种特殊的 ad hoc wireless network, 车辆是其研究的主体. 由于车辆在公路上的行驶路线、运行速度、终点等驾驶行为的差异, 使得车辆间的相对位置在不断的发生改变, 导致基于这种相对位置的拓扑

结构发生动态变化, 车辆间的通信受到影响, 从而使车联网的网络产生难以预料的复杂性. 本文将依据车联网组网过程建立车联网运动模型, 通过复杂网络研究手段与运动模型相结合的方式对车联网的度分布、鲁棒性以及网络连接变化率等性能指标进行全面的分析与研究.

## 2 度分布

在车联网中, 车辆  $i$  能够直接通信的车辆数  $k_i$  称为该车辆  $i$  的度, 许多现实网络中节点度值的分布符合一定规律, 规定网络中度值为  $k$  的车辆个数占车辆总数的比例为度分布, 用  $p(k)$  表示<sup>[4]</sup>. 分析网络的度分布有利于加深我们对车联网性质的理解, 因此在本节中我们分别建立车联网运动解析模型与车联网运动仿真模型对车联网度分布规律进行探索.

## 2.1 车载网运动解析模型

车载网运动解析模型的演化过程包括 3 个阶段:

(1) 线性增长: 起始状态道路中包含  $m_0$  台车 ( $m_0$  非常小), 从 0 时刻起, 按照固定时间间隔向道路中加入车辆.

(2) 局域择优连接: 新加入到车道中的车辆在其通信范围内选择  $m$  台车辆与之相连, 连接概率与该时刻已存在车辆的度值大小  $k(t_i, t)$  成正比.

$$\prod \propto k(t_i, t) \quad (1)$$

(3) 断边重连: 由于车辆间相对运动导致的车辆连接断开的平均概率为  $d$ , 断开的车辆按照阶段(2)重新进行连接.

假定初始状态下, 道路中有  $m_0$  台车, 经过  $t$  步之后, 网络中的节点数为

$$N(t) = m_0 + t \quad (2)$$

相较于道路中的车辆总数,  $m_0$  显得微不足道, 可以忽略不计初始条件下网络中的连边数, 时间步  $t$  时网络中总连边数为

$$E(t) = mt \quad (3)$$

因为每时间步新增  $m$  条连边, 所以度值总数新增量为  $2m$ , 由此第  $t$  步的总度值为

$$\sum_{j \in N(t)} k_j = 2mt \quad (4)$$

受车辆通信范围所限, 道路中的所有车辆只能和存在于它通信范围内的车辆产生连接. 因此当一辆新车驶入道路的时候, 只有在其通信范围内的车辆能够被选做可连接的候选车辆, 候选车辆被连接的概率与其自身度值大小正相关:

$$\prod_i = \frac{M_n}{N(t)} \frac{k(t_i, t)}{\sum_{j \in M_n} k_j} \quad (5)$$

新增加车辆其通信范围内度值总数  $\sum_{j \in M_n} k_j$  与网络度值总数  $\sum_{j \in N(t)} k_j$  关系为

$$\sum_{j \in M_n} k_j = \frac{M_n}{N(t)} \sum_{j \in N(t)} k_j \quad (6)$$

同时, 由于道路中的车辆是不断移动的, 彼此之间时刻发生着相对运动, 导致车辆之间连接断开的情况频繁发生, 设定网络中连边断开的平均概率为  $d$ ,  $d$  的大小取决于车辆的通信范围以及相对行驶车速, 与通信范围负相关, 与相对行驶车速正相关. 如果两台车辆间的距离超出限定的通信范围, 它们间的连接将断开, 并依照上述规则建立新的连接.

基于连续场的理论, 假定车辆的度值是连续的, 可推导出

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = m \frac{M_n}{N(t)} \frac{k_i}{\sum_{j \in M_n} k_j} - dk_i$$

$$+ d \left( \sum_{j \in N(t)} k_j - k_i \right) \frac{M_n}{N(t)} \frac{k_i}{\sum_{j \in M_n} k_j} \quad (7)$$

带入已知条件求解式(7)得

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = \frac{k_i}{2t} - d \frac{k_i^2}{2mt} \quad (8)$$

对于任意一辆车来说, 其进入车道的起始状态是  $k_i(t_i) = m$ , 代入式(8)解得

$$k_i(t) = \frac{1}{\alpha + \left( \frac{1}{m} - \alpha \right) \left( \frac{t_i}{t} \right)^\beta} \quad (9)$$

其中  $\beta = \frac{1}{2}$ ,  $\alpha = \frac{d}{2m}\beta$ .

由式(9)能够推导出, 车辆度值  $k_i(t)$  小于常量  $k$  的概率是

$$p(k_i(t) < k) = p \left( t_i > t \left( \frac{\frac{1}{k} - \alpha}{\frac{1}{m} - \alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right) = 1 - \frac{t}{m_0 + t} \left( \frac{\frac{1}{k} - \alpha}{\frac{1}{m} - \alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (10)$$

因此  $p(k)$  为

$$p(k) = \frac{t \left( \frac{1}{k} - \alpha \right)^{\frac{1}{\beta} - 1} k^{-2}}{m_0 + t \left( \frac{1}{m} - \alpha \right)^{\frac{1}{\beta}} \beta} \quad (11)$$

当  $t \rightarrow \infty$  时

$$p(k) = \frac{\left( \frac{1}{k} - \alpha \right)^{\frac{1}{\beta} - 1} k^{-2}}{\left( \frac{1}{m} - \alpha \right)^{\frac{1}{\beta}} \beta} \quad (12)$$

分析初始状态可知  $p(k) = \frac{2}{m+2}$ , ( $k = m$ ), 因此车载网度分布如下:

$$p(k) = \begin{cases} \frac{\left( \frac{1}{k} - \alpha \right)^{\frac{1}{\beta} - 1} k^{-2}}{\left( \frac{1}{m} - \alpha \right)^{\frac{1}{\beta}} \beta}, & \max\{M_n\} \geq k > m \\ \frac{2}{m+2}, & k = m \end{cases} \quad (13)$$

## 2.2 车载网运动仿真模型

车载网仿真由交通仿真和网络仿真两部分共同组成, 当前普遍公认的交通仿真工具有 Vissim、TransModeler、Traffic Simulator<sup>[5]</sup>, 网络仿真工具有 OPNET、OMNeT++、NS2 等<sup>[6]</sup>, 这两类工具相互独立、互不兼容, 这一情况不利于我们全面了解车载网各个层次间的相互作用, 为了解决车载网交通与网络仿真相

分离的情况,本文设计并实现车联网运动仿真模型,通过处理交通反馈信息及网络反馈信息实现二者的即时交互,以反映车联网的动态特性.

表 1 交通仿真参数

Parameter	Definition
$i$	车辆编号
$v_i$	车辆速度
$d_s$	安全车距
$r$	车道
$l$	车道长度

### 2.2.1 交通仿真

交通仿真主要用于模拟真实的道路场景和车辆行驶状态,为网络仿真提供车辆拓扑,是车联网仿真中不可或缺的部分.为避免基础设施对通信产生干扰,本文将对无基础设施场景下的交通状况进行仿真.仿真场景中定义的变量与其意义如表 1 所示.

双向车道中相向行驶的车辆相对速度非常大,它们之间的网络结构很难维持,无法快速有效地获取网络结构,所以本文采用单向双排车道,其中右边为正常行车道,左边则为超车道.在模拟过程中所有车辆依照泊松分布规律进入车道,车辆沿着同一方向直线行驶,车速随机分布在 $[v_{\min}, v_{\max}]$ 区间之内.如果车辆 $i$ 从超车道超越车辆 $i-1$ ,驾驶一段距离之后,若行车道内无阻碍,可再次返回行车道,不然则继续留在超车道,直到行车道无障碍时方可驶回;当出现 $v_i > v_{i-1}$ 但超车道被占用无法实现超车情况时,车辆 $i$ 减速到 $v_{i-1}$ ,并与车辆 $i-1$ 保持一段距离继续行驶.

### 2.2.2 网络仿真

网络仿真包含链路层仿真与网络层仿真两个部分,链路层仿真主要实现 802.11p 协议规定的车辆节点与周围邻居节点间的信道访问及其控制,该协议允许在通信范围内高速行驶的车辆之间以及车辆与路边基础设施之间可以在车联网专用频率上进行通信并为之提供可靠性保障<sup>[7]</sup>.在这里,我们只限定通信范围 $R$ 的大小,因为该协议支持的最大通信范围为 1000 英尺,所以 $R \leq 1000$  英尺.

车联网的网络结构通常被划分成平面式和层次式两类.平面式结构具有扩充性差的特点,导致其无法有效地适应节点快速运动的车联网.因此,我们在网络层中使用分簇算法,选取部分节点充当簇首,利用其综合协调簇内、簇间通信,以提高网络性能.层次式结构的优势在于其具有良好的可扩充性,拓扑结构相对稳定,网络维护开销小,能够提供较好的 QoS 服务<sup>[8,9]</sup>.我们以最大连接度分簇算法为例,对车联网构建过程进行详细介绍.分簇算法由两部分组成,第 1 部分为簇的构建,

第 2 部分为簇的更新与维护.

簇的构建阶段主要任务是划分群组,最初时刻道路中的车辆均为孤立节点,车辆状态标识为 Isolated,逐一比较孤立节点的度值 $k$ ,度值最高的节点将被选为簇首,并将它的状态标识为 Head,所有在 Head 通信范围内的车辆均成为它的成员节点,成员节点的状态标识为 Member,重复此过程直至网络中不存在任何孤立节点.

因为网络中车辆时刻发生着相对运动,簇的破裂与重组也随之进行,所以需要不断的对簇进行更新和维护,当成员节点离开簇首的连接范围时,该车辆将再次成为孤立节点,同时向其周围的簇首节点发送加入请求,并选择加入最先做出回应的簇首所在簇群,如若未接收到任何同意加入请求信息,则该车辆将成为簇首,组建一个新的簇单元,如算法 1 所示.

算法 1 最大连接度分簇算法

```

max = 1
for all  $i \in \text{Isolated}$  do
  if  $k_i > k_{\max}$ 
    max =  $i$ 
  end if
end for
max become Head
all  $i \in R(\text{Head})$  become Member
After a time
if  $i \notin R(\text{Head})$ 
  sent message to all Head and join the Head first reply
  receive no reply  $i$  become Head
end if

```

### 2.3 比对分析

从式(13)可以看出车联网度分布的解析解是幂律指数为 $-2$ 幂律函数,设定参数 $m_0 = 2, m = 1, d = 0.2, t = 1000$ ,绘制公式(13)图像,如图 1 所示.

使用 2.2 节实现的车联网运动仿真平台进行仿真实验,统计网络度分布,设定仿真参数 $l = 20\text{km}, R = 300\text{m}$ ,重复实验 150 次,获取车联网度分布统计结果如图 2 所示.

通过观察图 2 发现,重复实验得到的度分布统计规律大体一致,度值越小的点,其度分布概率越大,而度值越大的点,其度分布概率越小.网络的度值大致分布范围为 $[0, 20]$ ,由于车辆之间存在安全车距,并且车辆的通信距离有限,通信范围内含有的车辆数目有限,所以节点可能达到的最高度值等于其通信范围内含有的最大车辆数.对比图 1、图 2 发现两种度分布曲线非常类似,因此我们提出假设,车联网度分布的数值解同样符合幂律函数.

存在幂律函数 $y = bx^a$ ,对其进行取双对数处理,得到 $\ln y = a \ln x + \ln b$ ,该方程表示斜率是 $a$ 、在 $Y$ 轴截距

是  $\ln b$  的直线. 为了证明车载网度分布数值解同样符合幂律分布, 我们对重复实验所得的度值及其分布概率

数据均取对数, 结果如图 3 所示.

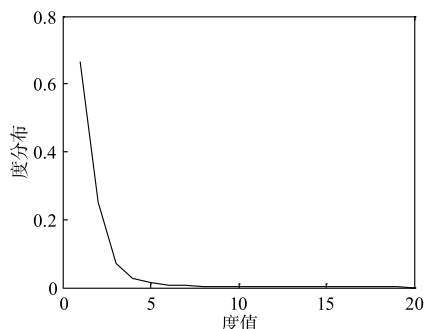


图1 车载网度分布解析解

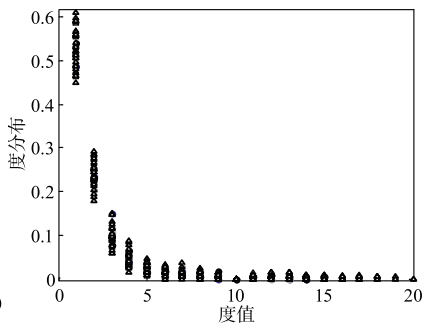


图2 车载网度分布数值解

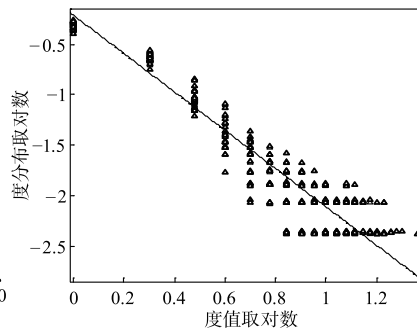


图3 取对数的车载网度分布数值解

通过观察图 3 能够发现, 点大致均匀的散布在一条直线附近, 因此我们使用方程  $y = ax + b$  对散点图进行拟合, 得到拟合方程为  $y = -1.9x - 0.17$ , 拟合度达到 0.9 以上, 从而说明了车载网度分布统计结果同样满足幂律分布, 幂律指数为  $-1.9$ .

经过比对分析, 我们从解析解和数值解两个方面验证了车载网度分布满足幂律分布, 进而证明了车载网具有无标度网络性质. 解析解与数值解之间存在可接受范围内的细微误差, 这是因为重复仿真实验存在随机误差, 但这并不影响结论的准确性.

### 3 鲁棒性与脆弱性

在现实生活中, 雨雪天气、汽车故障、道路施工等状况都会对车载网性质产生影响. 车载网的鲁棒性(通常指当发生故障或者交通事故导致网络拓扑突然发生变化时, 维持车载网结构稳定性的能力)是度量在遭遇上述情况时网络性能的首要参数. 深入分析鲁棒性对我们充分了解车载网性质大有裨益.

#### 3.1 车载网鲁棒性与脆弱性理论分析

通过建立运动解析模型, 进而推导网络度分布的解析解, 由此我们得到车载网中小部分关键车辆拥有相对较大的度值, 而大部分普通车辆则拥有相对较小的度值. 当车载网发生随机节点故障时, 度值较大的关键车辆发生故障的机率很小, 度值较小的普通车辆发生故障的机率很大, 此时个别连接断开, 但网络结构基本保持完整、性能相对稳定; 当车载网发生关键节点故障时, 度值较高的节点功能完全失效, 导致经由该节点的通信线路全部瘫痪, 网络结构受到严重破坏. 网络度分布的极端非均匀性导致车载网在面对随机节点故障时, 体现出较好的鲁棒性; 在面对关键节点故障时, 则表现出其自身的脆弱性.

#### 3.2 车载网鲁棒性与脆弱性仿真实验

从车载网仿真模型中提取网络结构, 使用 MATLAB 仿真工具模拟两组故障实验. 一是随机节点故障

实验, 即任意去除网络中的一些节点; 二是关键节点故障实验, 即有意识的去除网络中度值较高的节点. 选用最大连通图的相对大小  $S$  和平均路径长度  $L$  与去除节点比例  $F$  的关系来衡量网络的鲁棒性与脆弱性<sup>[10]</sup>, 实验结果如图 4 和图 5 所示.

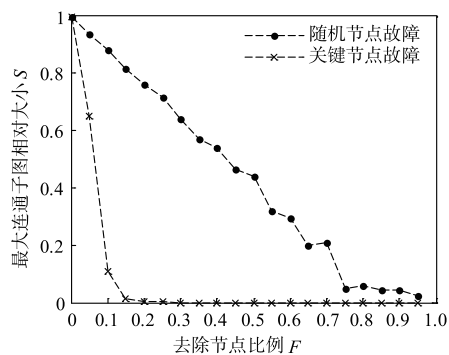


图4 车载网鲁棒性— $S$

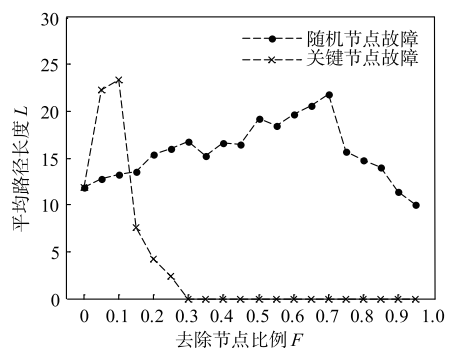


图5 车载网鲁棒性— $L$

通过观察图 4 可发现, 在发生随机节点故障时,  $S$  随  $F$  的增长缓慢降低, 而在面对关键节点故障时,  $S$  随  $F$  的增长迅速降低, 当  $F \geq 0.15$  时,  $S \approx 0$ ; 观察图 5 可发现, 在发生随机节点故障时,  $L$  随  $F$  的增长变化较为平缓, 基本维持在相对稳定范围内, 而在面对关键节点故障时,  $L$  随  $F$  的增长变化剧烈, 当  $F \geq 0.3$  时,  $L \approx 0$ . 阐明车载网面对随机节点故障体现出良好的鲁棒性, 在面

关键节点故障时具有脆弱性. 基于这点在设计各类车载网通信协议时, 可以有针对性的加强对高度值节点的保护机制, 优化网络资源的分配, 进而提高整个网络的安全性与可靠性.

#### 4 网络连接变化率

以不同方式不断高速移动的节点使得节点之间的无线连接随时都在变化, 从而致使车载自组织网的内部拓扑结构随之发生改变, 在此过程中网络中各节点间的相邻关系不断变化, 这也使得车载网的路由结构反复更新. 车载自组织网络的主要目的是实现车辆间的无线通信, 而这种无线通信的可靠进行必须建立在链路稳定的基础之上, 车载网的快速移动、拓扑变化频繁的特性, 无疑给可靠链路的建立带来了挑战, 网络连接变化率是衡量网络结构是否稳固的一项重要指标, 通过分析网络连接变化率来探究车联网移动性对网络结构的影响是研究车联网性质的重要手段之一. 因此, 我们利用车联网运动仿真模型进行仿真实验, 对比分析链路层与网络层的连接变化率, 分别探讨分簇算法、通信半径、行驶速度等因素对网络连接变化率的影响.

**累积连接变化率:** 当前时刻相较于起始时刻网络中所有节点之间的连接变化量, 定义为累积连接变化率, 用于定量地权衡网络拓扑结构的长期变化状况. 公式为:

$$\bar{l}(t) = \frac{1}{t - t_0} \int_{t_0}^t \sum_{s=1}^N \sum_{d=1}^N C(s, d) \tau \, d\tau \quad (14)$$

**马尔可夫连接变化率:** 网络运行过程中后一时刻相较于前一时刻所有节点之间的连接变化量, 定义为马尔可夫连接变化率, 用于权衡网络拓扑结构的瞬时变化状况. 公式为:

$$\bar{l}(t) = \frac{1}{t_k - t_{k-1}} \sum_{s=1}^N \sum_{d=1}^N C(s, d) \tau_{t_{k-1}}^{t_k} \quad (15)$$

##### 4.1 链路层与网络层的连接变化率的比较

运用车联网运动仿真模型, 设定仿真参数道路长度  $l = 30\text{km}$ , 车辆依照分布函数  $P(X = k) = e^{-\lambda} \lambda^k / k!$ ,  $\lambda = 10$  进入车道, 行驶速度在  $[60\text{km/h}, 100\text{km/h}]$  间均匀分布, 链路层采用 802.11p 协议, 通信范围 300m, 网络层采用最大连接度分簇算法, 在此环境下进行仿真实验并分别统计整个过程中链路层与网络层的连接变化率, 实验结果如图 6、7 所示.

从图 6、7 中可以看出: 对于同一网络, 无论是从网络运行的长期效果, 还是网络运行的瞬时状态来看, 链路层连接变化率要明显高于网络层连接变化率, 表明网络层结构相对稳定, 而链路层结构相对不稳定. 同时, 我们也发现网络层连接变化率的波动幅度要远远高于链路层连接变化率的波动幅度. 这说明了尽管相较于链路层, 网络层的连接变化有所降低, 但是其变化

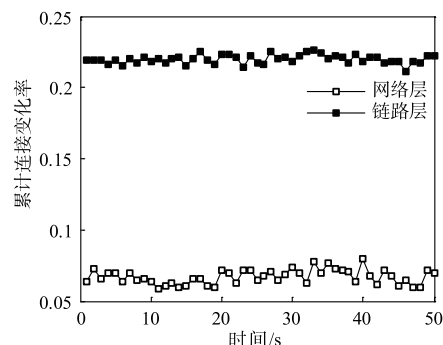


图6 链路层与网络层累积连接变化率

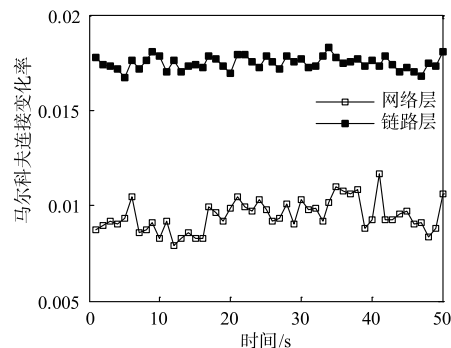


图7 链路层与网络层马尔可夫连接变化率

幅度也随之加剧.

通过分析实验结果可以得出: 在车联网组网过程中使用分层的组网方式, 使网络结构变得更加牢固, 提高了链路可靠性, 降低了部署开销, 为车辆间的有效通信提供了平台.

##### 4.2 分簇算法对连接变化率的影响

运用车联网运动仿真模型, 设定仿真参数道路长度  $l = 30\text{km}$ , 车辆依照分布函数  $P(X = k) = e^{-\lambda} \lambda^k / k!$ ,  $\lambda = 10$  进入车道, 行驶速度在  $[60\text{km/h}, 100\text{km/h}]$  间均匀分布, 链路层采用 802.11p 协议, 通信范围 300m, 在网络层分别采用最小 ID 分簇算法、最大连接度分簇算法以及基于速度的最小 ID 分簇算法三种分簇方式的环境下进行仿真实验并分别统计累积接变化率和马尔可夫网络连接变化率, 实验结果如图 8、9 所示.

从图 8、9 可以看出三种方式中采用最小 ID 分簇算法时网络连接变化率最大, 采用最大连接度分簇算法与基于速度的最小 ID 分簇算法时网络连接变化率相对较小. 相较于最小 ID 分簇算法, 基于速度的最小 ID 分簇算法将速度影响考虑在内, 降低了网络拓扑的变化幅度, 使得车联网中簇结构的维持时间得到延长, 增强了网络的稳定性. 充分说明了, 网络连接变化率受到分簇算法的影响, 设计更加合理有效的分簇算法, 有利于提高车联网稳定性.

##### 4.3 通信半径对连接变化率的影响

运用车联网运动仿真模型, 设定仿真参数道路长度  $l$

=30km, 车辆依照分布函数  $P(X = k) = e^{-\lambda} \lambda^k / k!$ ,  $\lambda = 10$  进入车道, 行驶速度在 [60km/h, 100km/h] 间均匀分布, 网络层采用最大连接度分簇算法, 链路层采用 802. 11p 协议, 通信范围分别为 100 m、200 m、300 m, 在此环境下进行仿真实验并分别统计累积网络连接变化率和马尔可夫网络连接变化率, 实验结果如图 10、11 所示。

通过观察图 10、11 能够发现, 随着通信范围的依次增大, 累积网络连接变化率和马尔可夫网络连接变化率均逐步递减, 这说明车辆的通信范围越广, 网络中连接变化越低, 车辆通信范围越窄, 网络中连接变化越高。由此我们可以推断, 网络连接变化率受到车辆通信范围的影响, 范围越广网络结构稳定性越强, 范围越窄网络结构稳定性越弱。当前广泛用于为车载网通信提供支持的 802. 11p 协议, 其最大通信范围为 1000 英尺, 扩大协议支持的通信范围, 有利于降低网络的连接变化率, 以提升网络的稳定性。

#### 4.4 行驶速度对连接变化率的影响

运用车载网运动仿真模型, 设定仿真参数道路长度  $l = 30\text{km}$ , 车辆依照分布函数  $P(X = k) = e^{-\lambda} \lambda^k / k!$ ,  $\lambda = 10$  进入车道, 链路层采用 802. 11p 协议, 通信范围 300 m, 网络层采用最大连接度分簇算法, 行驶速度分别在 [40km/h, 80km/h]、[60km/h, 100km/h]、[80km/h, 120km/h] 间均匀分布, 在此环境下进行仿真实验并分别统计不同平均行驶速度下累积网络连接变化率和

马尔可夫网络连接变化率, 实验结果如图 12、13 所示。

通过观察图 12、13 能够发现, 随着车辆平均行驶速度逐渐增加, 网络的累积连接变化率和马尔可夫连接变化率均呈现逐步递增趋势, 反映了当车辆行驶速度较大时, 网络结构变化剧烈, 当车辆行驶速度较小时, 网络结构变化较平缓。以上说明: 网络连接变化与车辆行驶速率有着密切联系, 行驶速率越高连接变化越剧烈, 网络拓扑变化越频繁; 相反, 行驶速率越低连接变化越平缓, 网络拓扑变化越稳定。从而也证明了, 在车辆快速移动的车载网中, 路由协议的收敛速率直接影响了车载网的通信性能, 假若路由协议的收敛速率与网络结构的改变不同步, 那么该协议将无法及时提供正确的路由信息, 必然导致路由无效, 最终造成网络通信瘫痪。

通过对链路层与网络层的连接变化率进行对比分析, 发现分层协议在车载网中的应用, 使网络结构变得更加牢固, 提高了链路可靠性, 降低了部署开销, 为车辆间的有效通信提供了平台。同时对不同分簇算法、通信半径、行驶速度下的网络连接变化率进行了研究。仿真实验显示, 采用分簇算法能够有效降低网络连接变化率。通信半径越大、行驶速度越慢时, 网络连接变化率越低, 网络结构越稳定。这为日后设计或改进网络协议以降低车载网连接变化率提供了方向。

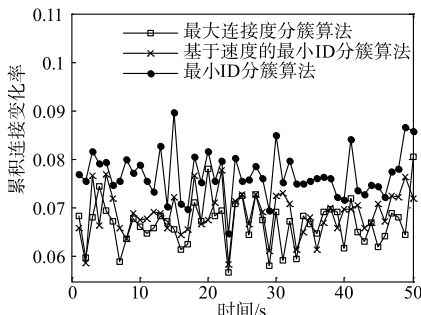


图8 不同分簇算法下的累积连接变化率

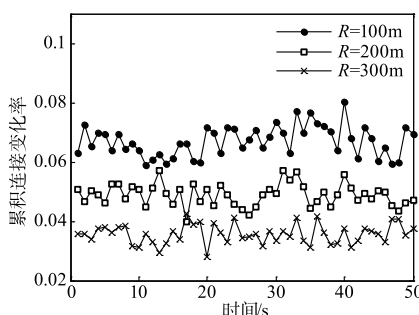


图10 不同通信范围下的累积连接变化率

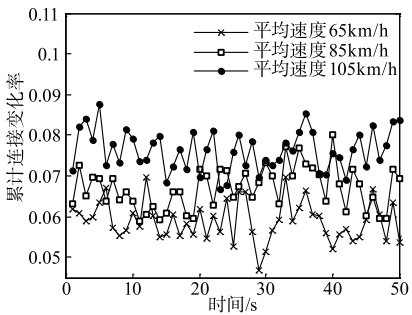


图12 不同平均行驶速度下的累积连接变化率

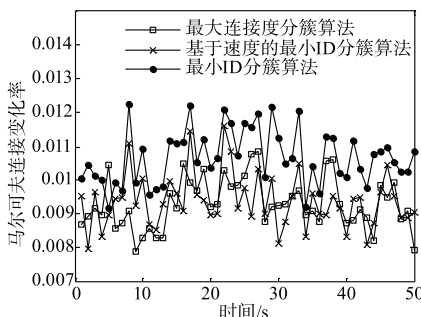


图9 不同分簇算法下的马尔可夫连接变化率

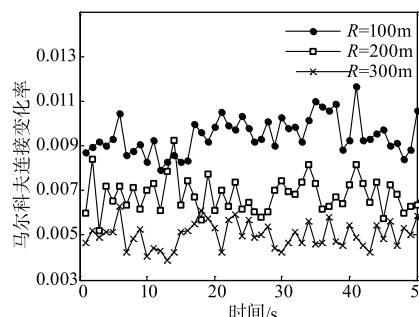


图11 不同通信范围下的马尔可夫连接变化率

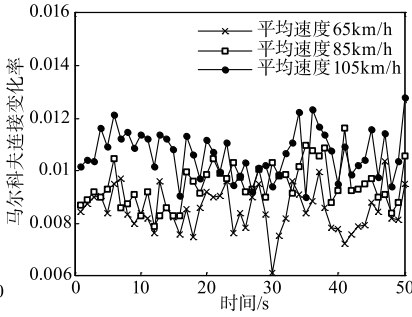


图13 不同平均行驶速度下的马尔可夫连接变化率

## 5 结论

本文针对车载网结构复杂性问题,首次将复杂网络的研究方法应用于车载网,在拓展了车载网的研究手段的同时,也扩大了复杂网络理论的应用范围.提出了车载网运动解析模型,设计并实现交通与网络仿真实时交互的车载网运动仿真模型.运用复杂网络解析方法从运动模型角度入手对车载网性质加以研究.对车载网度分布的解析解与数值解进行比照分析,发现车载网度分布符合幂律分布,证明车载网具有无标度网络性质.通过理论分析与仿真实验分别验证了车载网在面对随机节点故障时具备良好的鲁棒性,而在面对关键节点故障时则展现出脆弱性.最后,探讨了分簇算法、通信半径、行驶速度等因素对网络连接变化率的影响.结果证实,本文所提出的运动模型能够很好地描述车载网演化过程,而复杂网络解析方法的应用在车载网复杂性研究方面具有良好的效果.

### 参考文献

- [1] Toor Y, Muhlethaler P, Laouiti A. Vehicle ad hoc networks: applications and related technical issues[J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2008, 10(3): 74-88.
- [2] Lin X, Lu R, Zhang C, et al. Security in vehicular ad hoc networks[J]. Communications Magazine, IEEE, 2008, 46(4): 88-95.
- [3] Zeadally S, Hunt R, Chen Y S, et al. Vehicular ad hoc networks (VANETS): status, results, and challenges[J]. Telecommunication Systems, 2012, 50(4): 217-241.
- [4] 张德干, 戴文博, 牛庆肖. 基于局域世界的 WSN 拓扑加权演化模型[J]. 电子学报, 2012, 40(5): 1000-1004. Zhang Degan, Dai Wenbo, Niu Qingxiao. Local-world weighted topology evolving model for wireless sensor networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(5): 1000-1004. (in Chinese)
- [5] Otković I I, Tollazzi T, Šraml M. Calibration of microsimulation traffic model using neural network approach[J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(15): 5965-5974.
- [6] Siraj S, Gupta A, Badgajar R. Network simulation tools survey[J]. International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, 2012, 1(4): 199-206.
- [7] Wu Z, Yang Y, Guo X, et al. Analysis of collision probability in IEEE 802.11 based VANETs[J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 19(1): 187-190.
- [8] Daeinabi A, Rahbar A G P, Khademzadeh A. VWCA: An efficient clustering algorithm in vehicular ad hoc networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2011, 34(1): 207-222.
- [9] Su H, Zhang X. Clustering-based multichannel MAC protocols for QoS provisionings over vehicular ad hoc networks[J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2007, 56(6): 3309-3323.
- [10] Albert R, Jeong H, Barabási A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. Nature, 2000, 406(6794): 378-382.

### 作者简介



于 冲 女, 1991 年出生于辽宁省丹东市, 现为东北大学嵌入式技术省教育厅重点实验室硕士研究生. 主要研究方向为复杂网络、车载网.  
E-mail: 1179710249@qq.com



赵 海 男, 1959 年出生于辽宁省沈阳市, 现为东北大学教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机网络、复杂网络、车载网、体域网、医学图像处理.  
E-mail: zhaoh@mail.neu.edu.cn



司帅宗 男, 1987 年出生于河南省长垣县, 现为东北大学嵌入式技术省教育厅重点实验室博士研究生. 主要研究方向为无线传感器网络、复杂网络、车联网.  
E-mail: sishuaizong@neuera.com



彭海霞 女, 1988 年出生于湖南省郴州市, 现为东北大学嵌入式技术省教育厅重点实验室博士研究生, 加拿大滑铁卢大学博士研究生. 主要研究方向为无线传感器网络、复杂网络、车联网.  
E-mail: penghaixiauw@gmail.com