

## 摘 要

随着大城市车辆数量的快速增长，交通拥堵问题日益严重。交通拥堵不仅可能诱发交通事故，还会带来经济损失、环境污染等诸多社会问题，严重地影响了城市居民的生活质量。缓解城市交通拥堵的首要任务是收集和利用城市交通拥堵信息。因此，提出一种灵活且实用的方法来定性地估计大到整个城市，小到路段的交通拥堵状况具有重要意义。利用估计结果可以为车辆和交通管理者提供车辆路线、智能信号灯控制等方面的指导，从而缓解交通拥堵。

针对区域道路网络的交通拥堵估计，本文分别构建了依据平均速度和平均密度这两个参数划分交通拥堵等级的模糊隶属函数，并提出了一种基于车辆到基础设施（V2I）通信和 Dempster-Shafer（D-S）证据理论的两层交通拥堵估计框架。最后，文章利用真实数据集对提出的拥堵估计方法进行了实验验证，结果表明文中提出方法能灵活有效的估计区域交通拥堵等级。本文的主要研究内容如下：

（1）提出了一种基于 V2I 和 D-S 证据理论的两层交通拥堵估计方法，能够估计较大路网区域范围的交通拥堵。在第一层，每个路段使用 D-S 证据理论融合两个基本概率分配（BPA）函数，获得路段交通拥堵等级证据，在第二层，融合区域内所有的路段拥堵证据确定整个区域的交通拥堵等级。

（2）分析了 BPA 生成方法的不足，基于信息熵，提出了一种改进的 BPA 生成方法。此外，本文利用了两个具体的算例展示了所提方法的计算过程，计算结果表明改进的 BPA 生成方法能降低证据间的冲突系数，并得出正确的推断结果。

（3）分析了本文所提方法的三个重要性能指标，即估计的最佳时间间隔，区域交通拥堵的主因素路段以及计算复杂度。以法国克雷泰伊一处包含环形道路的区域为例，详细展示了本文方法的计算过程，同时也验证了该方法的有效性，结果表明所提方法在这些指标上有显著优势。

**关键词：** 交通拥堵，信息融合，D-S 证据理论，车辆与基础设施通信（V2I）

## Abstract

With the rapid growth in number of vehicles in metropolises, the problem of traffic congestion is becoming more and more serious. Traffic congestion may cause not only traffic accidents, but also brings many social problems such as economic losses and environmental pollution. Thus, it greatly affects the quality of life to urban residents. To alleviate urban traffic congestion, the primary way is to collect and utilize the congestion information of urban traffic. Therefore, it is significant to develop a flexible and easy-to-use method for qualitatively estimating the traffic congestion level. It is expected that the estimation space coverage can be as large as a whole city and as small as a road segment. In this way, the estimation results can provide vehicles and traffic managers with guidance for vehicle routing, intelligent signal light control, etc. so as to alleviate traffic congestion.

Aiming at the traffic congestion estimation of a regional road network, two fuzzy membership function for classifying traffic congestion levels are constructed respectively based on two parameters, average speed and average density, and a two-layer traffic congestion estimation framework based on vehicle-to-infrastructure (V2I) communication and Dempster-Shafer (D-S) evidence theory is proposed in this study. Finally, the proposed congestion estimation method is experimentally verified using real data sets, and the results show that the proposed method can flexibly and effectively estimate the level of regional traffic congestion. The main research contents of this work are as follows:

(1) A two-layer traffic congestion estimation method based on V2I and D-S evidence theory is proposed. It can be used to estimate the traffic congestion in a larger road network area. At the lower level, the D-S evidence theory is used to fuse two basic probability assignments (BPAs) to obtain the road congestion evidence. Furthermore, at the upper level, the traffic congestion level of a whole area is determined by fusing all road congestion evidence in the area.

(2) The shortcomings of BPA generation methods are analyzed, and an improved BPA generation method is proposed based on information entropy. In addition, this work uses two specific calculation examples to show the calculation process of the proposed method. The

calculation results show that the improved BPA generation method can reduce the conflict coefficient between evidence and obtain correct inference results.

(3) Three important performance indicators suitable for the proposed method are analyzed and discussed. These indicators are the optimal time interval, the primary factor road section, and the computational complexity. The congestion estimation for an area containing a ring road in Creteil, France is used as an example to show the application of the proposed method in detail and verify its effectiveness. The results show that the proposed method has significant advantage on these indicators.

**Key words:** Traffic congestion, Information fusion, Dempster-Shafer (D-S) evidence theory, Vehicle-to-infrastructure (V2I) communication

# 目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 论文研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 交通拥堵评估的研究现状.....	2
1.2.2 基于车联网环境的交通拥堵评估研究.....	4
1.2.3 D-S 证据理论的研究现状.....	6
1.3 主要研究内容和章节安排.....	7
第二章 问题描述和理论基础.....	9
2.1 问题描述.....	9
2.2 交通拥堵的基本概念.....	11
2.2.1 交通拥堵的定义.....	11
2.2.2 造成交通拥堵的原因.....	12
2.2.3 交通拥堵的分类.....	13
2.2.4 交通参数.....	15
2.3 信息融合的概念及方式.....	16
2.3.1 信息融合的概念.....	16
2.3.2 信息融合方式.....	16
2.4 本章小结.....	18
第三章 基于两层 D-S 证据理论的区域交通拥堵评估方法.....	19
3.1 D-S 证据理论的基本概念.....	19
3.1.1 基本概率分配函数.....	19
3.1.2 D-S 证据理论的合成规则.....	19
3.2 路段交通拥堵等级.....	20
3.2.1 计算路段平均速度、路段平均密度.....	20
3.2.2 划分交通拥堵等级的隶属度函数.....	20
3.2.3 融合得到路段交通拥堵等级证据.....	23
3.3 区域交通拥堵等级.....	24
3.3.1 确定权重系数.....	24

3.3.2 融合决策区域交通拥堵等级.....	25
3.4 本章小结.....	26
<b>第四章 改进的 BPA 生成方法.....</b>	<b>27</b>
4.1 现有的 BPA 生成方法.....	27
4.2 基于信息熵的 BPA 生成方法.....	28
4.2.1 信息熵.....	28
4.2.2 基于信息熵的改进 BPA 生成方法.....	29
4.3 算例分析.....	30
4.3.1 算例一.....	30
4.3.2 算例二.....	32
4.4 本章小结.....	30
<b>第五章 实验与分析.....</b>	<b>34</b>
5.1 计算区域 R2 交通拥堵等级.....	34
5.2 重要性能指标.....	39
5.2.1 最佳时间间隔.....	39
5.2.2 主因素路段.....	41
5.2.3 计算复杂度.....	42
5.3 现有方法和本文方法的对比研究.....	43
5.4 本章小结.....	44
<b>总结与展望.....</b>	<b>45</b>
论文总结.....	45
工作展望.....	46
<b>参考文献.....</b>	<b>47</b>
<b>攻读学位期间取得的研究成果.....</b>	<b>52</b>
<b>致谢.....</b>	<b>52</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 论文研究背景及意义

随着科学技术与汽车工业的发展，汽车在全世界范围内得到了广泛的应用，为人们的生活带来了极大的便利。然而，随着城市交通网络中汽车数量不断上升，交通拥堵现象日益突出，交通拥堵对人类社会生活造成的危害也日益显现。截至 2014 年，全世界范围内共有大约 11 亿辆汽车，产生了约 17.3 亿吨 CO<sub>2</sub>，这一数字预计将在未来几年增长，预测到 2035 年汽车数量将接近 20 亿辆<sup>[1, 2]</sup>。研究表明，大气中局部 CO<sub>2</sub> 浓度过高可能会增加臭氧浓度，增加城市环境污染，威胁人类身体健康。此外，交通拥堵浪费了城市居民大量的出行时间，极易造成交通参与者焦躁不安的心理，从而诱发交通事故，并造成经济损失。总之，交通拥堵已经严重影响城市居民的生活质量，解决交通拥堵问题已经迫在眉睫。

交通拥堵的本质是城市道路的供需矛盾，即有限的道路网络容量不能满足爆炸式增长的车辆数目是造成交通拥堵的根本原因。政府部门为缓解交通拥堵，一方面，通过减少道路需求来实现，在许多大城市，采取了尾号限行和限制外地车辆进入的措施，减少了城市道路上的车辆数目，但是这种方式忽略了个体的出行需求，是一种粗糙的解决方法；另一方面，通过增加道路供给来实现，投入了大量人力和物力资源修建新的道路，这种方式扩大了交通服务能力，但是受到前期城市规划和地域空间条件的限制，交通服务能力增加的速度远不及车辆数目增长的速度，缓解交通拥堵的效果并不显著。

随着智能交通系统（Intelligent Transportation Systems, ITS）的发展，利用大量交通数据分析城市局部区域交通拥堵状态，从而更清晰、更全面地掌握城市全局交通状况，进而精准匹配出行需求与道路供应，为缓解城市交通拥堵开辟了新思路。交通拥堵状态的具体应用包括以下几个方面：

#### （1）依据交通拥堵状态调节智能信号灯

传统的信号灯相位时长固定，无法依据实时交通信息进行自适应调节，对缓解交通拥堵的作用较为有限<sup>[3]</sup>，通过信息化设备监测信号灯周围交通拥堵状态的变化实现交通信号灯调控的实时化、智能化是未来信号灯的发展方向之一。智能信号灯能大幅度减少出行者的等待时间，同时也能更好地利用交通资源，达到缓解交通的目的。

#### （2）根据交通拥堵状态为紧急车辆护航

随着道路上的车辆数增加，发生交通事故的频率也逐年上涨。如何快速发现事故地点并迅速指挥救援是事关人民生命财产安全的问题，也是交通部门不断探索的问题。智能系统依据交通拥堵状态信息优化救援路线、提前疏散沿线拥堵车辆，调整信号灯时长，为急救医疗、消防等紧急车辆护航，使其快速到达现场挽救生命，减少不必要的损失。

### (3) 交通拥堵状态是协调交通的基础信息

交通拥堵状态信息能以多种形式呈现给交通参与者，他们根据信息随时选取或调整出行方案及出行路线。智能交通系统也能利用交通拥堵状态信息分析城市交通组织不合理的地区，协助交通管理者设计可变车道、潮汐车道等交通组织方案。通过这些方式诱导并管理道路上的车辆合理利用交通资源，使交通资源的利用率最大化。

综上所述，提出一种能有效评估城市局部区域交通拥堵状态的方法具有重要意义。大量的实时交通数据是评估交通状态的基础信息，目前，借助于车联网通信技术，道路上的车辆与基础设施之间可实现交通信息的实时采集和交互，因此，本文方法将基于车联网环境，借助于 V2I (Vehicle-to-Infrastructure, 车辆对基础设施) 技术获取实时交通信息。此外，对区域交通拥堵状态的评估过程中充斥着很多不确定性，同一路段的不同时段交通状态是变化的，同一时段不同路段的交通状态也不尽相同，不同的交通状态之间也没有明确的分界。众所周知，Dempster-Shafer (D-S) 证据理论由于其具有有效表达随机不确定性的优势，是信息融合领域的常用方法，所以，在交通拥堵评估方法中融入了 D-S 证据理论是可行的。总之，本文将先进的通信技术和信息融合技术运用于交通拥堵评估领域，提出了一种基于 V2I 和 D-S 证据理论的区域交通拥堵评估方法。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 交通拥堵评估的研究现状

交通拥堵评估是解决交通拥堵问题的第一步，许多交通运输领域的专家、学者已经将交通拥堵评估作为一项重要研究内容。目前，从获取交通信息所依赖的设备进行分类，交通拥堵评估研究可主要分为基于固定式设备的交通拥堵评估和基于移动式设备的交通拥堵评估。

#### (1) 基于固定式设备的交通拥堵评估研究

固定式交通评估研究主要依赖于在路边布设不同种类的探测器、感应线圈、摄像头等设备，这些设备通过监测路段上的交通流量来获取交通参数，利用数学模型研究交通参数与交通状态分类之间的关系。由于这些设备只能在固定位置检测，因此，这类检测

方法也被称为点检测方法。这类方法具有良好的可用性，近年来，很多先进技术与之融合应用于交通拥堵的检测或评估，产生了不错的效果。

针对我国中小型城市数据现状，唐克双基于路中检测器的大量历史数据开发出了一种交通拥堵估计方法，在实际应用中，该算法能够根据路中检测器采集到的数据准确地估计城市交叉口的交通状态，并且随着历史数据的不断积累和数据库的不断更新，相关参数得以优化，进而提高了估计准确率<sup>[4]</sup>。由于检测器检测范围有限，该方法无法估计大城市的交通状态，仅适用于估计中小型城市的交通拥堵。文献<sup>[5]</sup>提出了一种通过同时考虑多个检测器数据来预测交通的时空随机效应模型（Spatio-temporal Random Effects, STRE），与成熟的预测模型相比，STRE 模型的预测结果具有更高的可靠性和一致性。然而，若要预测整个城市的交通量，需要在城市范围内布设充足的检测器，因此，该方法的实验地点选用了安装有 700 多个检测器的贝尔维尤市。

随着图像处理技术的发展，以图像、视频为数据来源的交通状态评估方法吸引了许多学者的关注。文献<sup>[6]</sup>结合先进的车辆检测算法和速度估计算法，设计了一套既能在智能相机上操作，也能在个人计算机上操作的交通拥堵评估方法。然而，该方法需要在相机上进行手动标注才能实现评估的最佳性能。文献<sup>[7, 8]</sup>基于计算机视觉技术，设计了从单目视频中对车辆计数、车速估计、车辆分类和行人计数的模块，并融入了先进的物体检测技术。文献<sup>[9]</sup>提出一种简单、高效、低成本的计算机视觉系统，用于从标准分辨率的视频中对车辆进行检测和计数，为克服视觉遮挡引起的错误率，还使用了数据集成技术。实验表明，所提方法计算高效，是适用于估计现代城市交通状况的方法。

## （2）基于移动式设备的交通拥堵评估研究

移动式交通拥堵评估研究主要依赖于手机、浮动车<sup>[10]</sup>、安装有 GNSS(Global Navigation Satellite System)设备的出租车等可以移动的检测设备收集交通信息，利用人工智能、数据挖掘等技术处理数据信息，实现快速检测大规模城市交通状态。

为了掌握交通路网运行状态并检测交通拥堵，文献<sup>[11]</sup>提出了一种基于大数据挖掘的智能计算交通流指数的方法。首先，按照时间顺序从 GNSS 接收器中记录所有车道的交通数据，然后根据错误数据区分规则对数据进行清洗，最后，利用模糊数据挖掘技术和 BP 神经网络模型计算交通流指数。文献<sup>[12, 13]</sup>从出租车 GNSS 轨迹数据中分析密度、速度、流入量和历史交通状态等交通参数，进而估计城市环境中的拥堵状况。此外，还采用动态确定交通参数权重的方式来确保状态估计的准确性和效率。最后，通过北京和上海真实交通数据测试，验证了该方法优于其他评估方法。



针对传统特征选择技术容易产生有用信息丢失等问题, Li 等人仅使用源自蜂窝数据的特征来估计交通状况, 利用互信息特征选择方法获得更多有用信息, 并且添加了支持向量机对所选特征和交通状态之间的关系进行建模<sup>[14]</sup>。基于数据驱动学习方法, 文献<sup>[15]</sup>利用蜂窝数据评估交通状态。将原始蜂窝数据中提取出的手机数量和手机速度作为学习模型的输入, 并使用三种深度学习模型检验得出该方法具有良好的性能, 但是数据传输过程中容易受到巨大建筑物的影响, 导致信息延迟。

综上所述, 新技术使得依赖于固定式传感设备的评估方法具有更好的效果, 但是, 它们依然只能在固定位置感知周围有限区域内的交通状况, 若要掌握城市全局交通状况, 需要投入大量资金在城市范围内布设充足的传感设备, 并且设备需要常年暴露于户外, 极易遭到恶劣天气的损坏, 安装好后需要定期进行检查和维护, 这些缺点限制了固定式传感设备在交通运输领域的发展。而移动式传感设备借助无线传输技术能实现动态采集交通数据, 并且投入的资金相较于固定式设备较少, 但是数据传输过程中容易受到巨大建筑物的影响, 极易导致信息延迟。另外, 依赖少量安装有定位设备的车辆在移动过程中获取的数据进行评估, 评估结果可靠性和准确性有待提高。

### 1.2.2 基于车联网环境的交通拥堵评估研究

车联网系统是物联网技术在智能交通领域应用的集中体现, 它能实现交通信息的收集、共享、处理、计算和安全发布, 是推进下一代智能交通系统发展的支撑技术。根据物联网的体系架构, 车联网体系架构可以分为感知层、网络层和应用层<sup>[16]</sup>, 如图 1.1 所示。

感知层是车联网系统的“神经末梢”, 其主要功能是利用各种传感器感知并采集信息, 如: 驾驶意图、车辆位置、车速、道路交通、天气状况等信息。此外, 还要利用车载网络技术对各种传感器进行网络化, 为实现数据共享和信息融合做好准备工作。

网络层是车联网系统的神经中枢和大脑, 其主要功能是传输和处理从感知层获得的信息。利用无线通信技术实现节点间的互联互通和与互联网的对接, 完成数据信息的分析处理和远程信息传输。网络层类似于传统的网络路由器, 但有一些传统网络路由器不具备的特性, 例如车联网系统使用的底层协议不同于 TCP/IP 网络协议, 因此需要进行网络协议转换。

应用层主要与其他子系统对接, 根据不同用户的需求提供不同的应用。具体功能包括数据处理、定义用户交互方式和实现人机交互。车联网系统提供的特定服务也在此子

层中定义和实现。如：车辆运行状态监测、道路交通事故快速处理、应急救援和动态诱导交通、城市道路交通拥堵和停车拥堵疏导引导、重点车辆安全押运、危险品运输监控等。

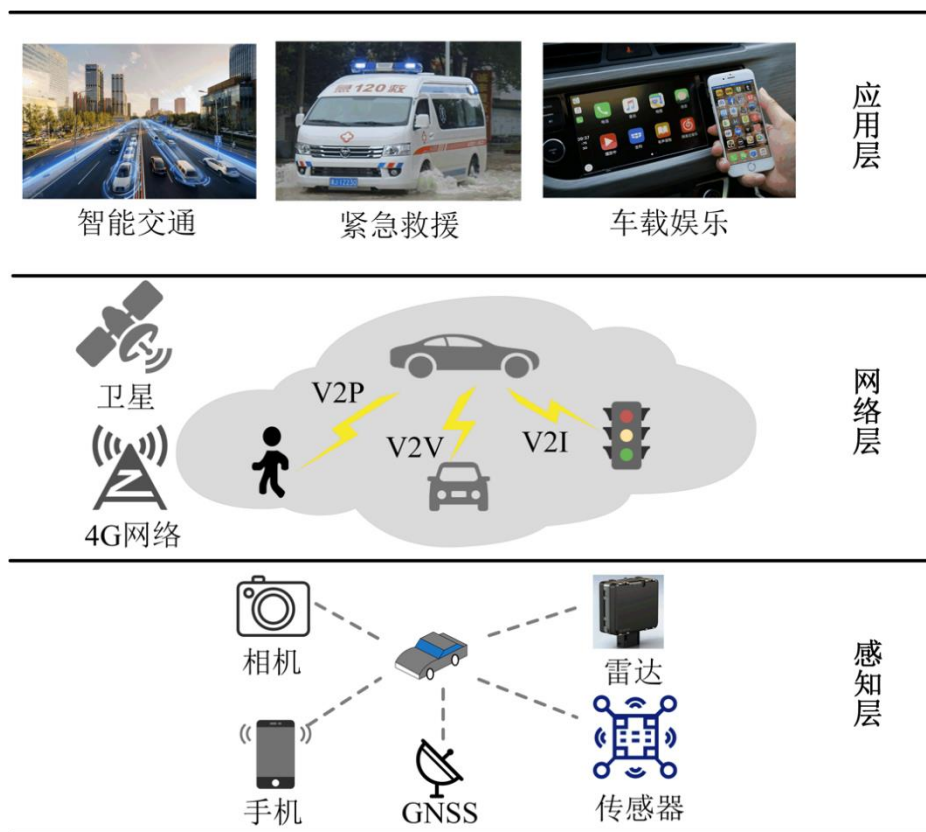


图 1.1 车联网体系结构

车联网是以车内网、车际网、车载移动互联网为基础，融合了传感器、RFID（Radio Frequency Identification）、数据挖掘等技术，利用 V2X（Vehicle to Everything，车辆与万物互联）技术实现车辆通过车载单元（On Board Unit, OBU）向任何可能影响车辆的实体传递信息，反之亦然。具体的通信类型包括 V2V（Vehicle-to-Vehicle，车辆对车辆）、V2I（Vehicle-to-Infrastructure，车辆对基础设施）、V2N（Vehicle-to-Network，车辆对网络）、V2P（Vehicle-to-Pedestrian，车辆对行人）、V2D（Vehicle-to-Device，车辆对设备）和 V2G（Vehicle-to-Grid，车辆对电网）<sup>[17-21]</sup>。在这些通信技术的支持下，信息能以更快的速度、更高的精度传输，从而达到花费较低的经济成本并能实现实时获取、交换、存储海量交通数据的目的。

借助于车联网技术在信息传输方面的优势，国内外的专家学者提出了评估或检测交通状态的方法。文献<sup>[22]</sup>提出了基于 V2V 的分布式协作交通拥堵检测系统，车辆间互相交换和收集信息，根据平均速度确定道路交通拥堵状态。文献<sup>[23]</sup>基于 V2I 方式，将车辆

检测得到的平均速度信息发送给路侧单元 (Road Side Unit, RSU), 然后与标准阈值进行比较, 估计得到道路交通流量。文献<sup>[24]</sup>基于 V2V 提出一种通过融合车辆间距信息来估计车辆密度的方法。这些方法仅考虑一个特征来评估交通拥堵情况, 然后将该特征计算得到的值与标准阈值相比较, 并未考虑将多个特征结合进行检测, 因而得到的检测结果准确性不高。文献<sup>[25]</sup>在车辆网络中引入了交通拥堵警报系统, 利用物联网和模糊逻辑来优化交通流量。文献<sup>[26]</sup>基于 V2V 提出了估计车辆密度的算法, 要求车辆间不停地交换交通密度估计信息, 这极易导致过多冗余信息占据通信信道。文献<sup>[27]</sup>基于 V2I 提出一种在车辆集群中确定其中一辆车负责收集信息并将其发送至交通控制中心的方案, 然后采用模糊综合评价方法确定交通拥堵程度。这种方法减少了车辆间交互行为产生的冗余信息, 但负责信息收集的车辆必将有额外的信道开销。借助实时信息采集系统的高效性和准确性的优势, 李等人提出了基于联网公交车辆实时速度的交通状态估计模型, 解决了传统道路交通状态估计方法准确性低的问题<sup>[28]</sup>。

总之, 车联网的应用能有效克服传统的采集交通数据方式的缺点, 借助于无线通信技术, 实现花费较低的成本完成海量信息实时传输与共享。并且随着第 5 代移动通信 (5G) 的快速发展与普及, 在未来车联网场景中, 实现信息传输与共享将拥有更低的时延和更高的灵活性, 这将为解决交通运输领域的问题提供新颖的思路。

### 1.2.3 D-S 证据理论的研究现状

D-S 证据理论是由 Dempster 和 Shafer 建立的一套数学理论, 它具备组合不同来源信息的能力, 因此被广泛应用于信息融合领域。应用 D-S 证据理论进行信息融合的过程如图 1.2 所示, 主要分为三个阶段: 证据的表示、证据的组合及证据的决策<sup>[29]</sup>。首先, 将从传感器或其他方式获得的信息转换成多条证据, 这里所说的证据可以是定量的数据, 也可以是定性地经验或特征。然后, 利用证据组合规则融合多条证据, 得到一条新的证据。最后, 从融合结果中采用某种决策模型决策出最终的结果。上述过程即利用 D-S 证据理论融合信息的一般步骤。

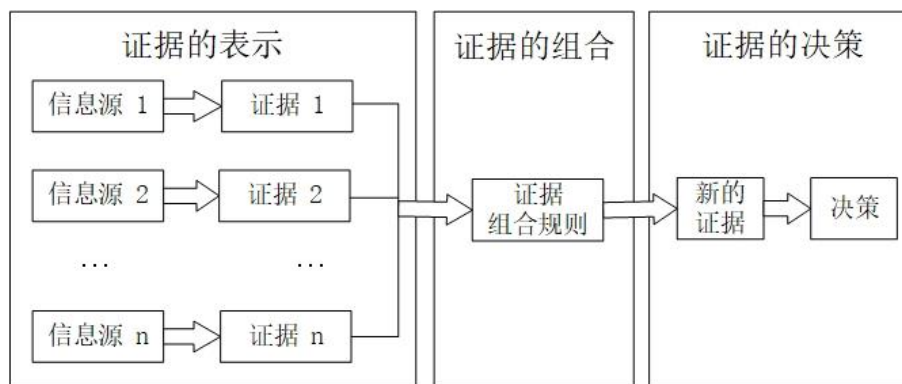


图 1.2 D-S 证据理论信息融合流程

D-S 证据理论简便的推理机制，符合人的决策思维，被广泛应用于专家系统<sup>[30]</sup>、图像融合<sup>[31]</sup>、模式识别<sup>[32]</sup>等领域。此外，与一些包含模糊推理的不确定推理方法或贝叶斯推理方法<sup>[33]</sup>相比，D-S 证据理论的优势在于，在不需要先验知识或条件概率的情况下，就能够有效表达随机不确定性，因此，D-S 证据理论作为一种信息融合技术，许多交通领域学者将其应用于推断异常轨迹、融合交通安全信息等问题。如下列举了部分基于该方法的研究成果。

为推断车辆轨迹是否异常，文献<sup>[34]</sup>定义并提取了五个轨迹特征，然后基于 D-S 证据理论将每个轨迹的不同特征组合为证据，最后推断出轨迹特征与正常轨迹显著不同的异常轨迹。文献<sup>[35]</sup>使用两个交通计数传感器来获取交通数据，基于 D-S 证据理论融合传感器数据实现自动检测和定位交通事故。文献<sup>[36]</sup>采集了不同的灾后交通生命线状态信息，并从中提取特征，采用基于改进 D-S 证据理论的信息融合模型得到了交通生命线状态的决策结果。文献<sup>[37]</sup>提出了一种基于证据理论的交通安全信息融合算法，提高了信息的可靠性并降低了融合算法的复杂度。文献<sup>[38]</sup>利用 D-S 证据理论融合道路饱和程度、车速、道路长度这三个交通参数，得到每条道路的权重，然后根据权重选择最优路径，实验表明该方法能缩短车辆旅行时间。基于证据间差异性的度量，文献<sup>[39]</sup>提出了一种改进的证据组合方法，实验表明该方法用于融合车载网络系统（Vehicular Cyber-Physical Systems, VCPS）中的数据，能使结果有更好的收敛性能。王等人提出了基于区间 D-S 证据理论的干线协调公交信号优先评价模型，该方法能帮助决策者在方案选择上排除不确定性和多属性产生的干扰，使决策变得更合理<sup>[40]</sup>。

### 1.3 主要研究内容和章节安排

对城市区域交通拥堵状态的检测和评估，不应该局限于某一时刻或某一路段的交通

状况，而是应该综合考虑在一个时段、一个区域内不同路段的不同交通状况。由上述基于 D-S 证据理论方法的启发，并针对现有交通拥堵评估方法的不足，本文提出一种基于 V2I 和 D-S 证据理论的区域交通拥堵评估方法，并改进了 BPA 生成方法，使该方法能更适用于评估交通状态。

本文分为六部分，具体内容如下：

第一章，论文的绪论。本章首先阐述了交通拥堵评估的研究背景及意义；其次介绍了交通拥堵评估、基于车联网环境的交通拥堵评估及 D-S 证据理论的研究现状和发展趋势，阐述了论文的基本结构和创新点。

第二章，问题描述和理论基础。本章首先描述了交通拥堵评估方法中的关键问题，并构建了典型车联网应用场景；其次，分别介绍了交通拥堵的基本概念和信息融合的基本概念，为后续研究作了理论准备。

第三章，基于双层 D-S 证据理论的区域拥堵评估方法。本章首先介绍了在 V2I 环境中计算路段平均速度和路段平均密度的计算方法，分别依据这两个交通参数构建了评估路段交通状态的隶属度函数，并生成了两组 BPA 函数；其次，在第一层，各路段采用 D-S 证据理论融合这两组 BPA 函数得到反映路段拥堵状况的等级，在第二层，再次采用 D-S 证据理论融合区域内多条路段的交通拥堵证据，得到反映整个区域交通状态的拥堵等级。

第四章，改进的 BPA 生成方法。根据第三章所描述的 BPA 生成方法，得到的关于速度和密度的 BPA 可能差异很大，若不对其进行处理而直接融合，极易导致推断结果不合理的情况，针对这一问题，本章提出了一种基于信息熵的 BPA 生成方法。

第五章，交通状态评估方法的测试评价。本章以法国克雷泰伊一处包含环形道路的区域为例，详细展示了该方法的计算过程，同时也验证了该方法的有效性；其次针对该方法提出并分析了三个重要性能指标，即检测的最佳时间间隔，区域交通拥堵的主因素路段以及计算复杂度。

第六章，总结与展望。本章首先对内容进行总结，针对文中存在的不足进行阐述，提出未来的研究方向和计划。

## 第二章 问题描述和理论基础

### 2.1 问题描述

为了全面地掌握城市范围内的交通状况，本文利用区域划分的方法，将范围较广的城市路网按照城市功能区域划分为若干个范围较小的路网区域，通过求得这些区域的交通拥堵状况，进而对全场景的交通状况有更清晰的了解。本文路网特指去掉分支路，只留下主干路的路网。路网由路段组成，路段特指两交叉口之间的道路。为构建 V2I 通信环境，还需设置若干 RSU，并且要保证 RSU 的通信范围能覆盖整个路段。

利用区域内 RSU 获取的交通参数评估区域交通拥堵状况是关键问题。事实上，不同的交通拥堵状况之间没有明确的分界，在确定路段交通拥堵状况时，为克服依据单种交通信息评估路段交通拥堵状况的不确定性和局限性，本文采用 D-S 证据理论融合由路段平均速度和路段平均密度两个指标得到的两条证据，并将融合后的结果定义为路段交通拥堵等级证据。本方法实际上是一种基于 D-S 的两层的交通拥堵评估方法。在第一层，根据平均速度和平均密度得到每个路段的 BPA，并将它们融合形成每个路段的交通拥堵等级证据。在第二层，融合若干个路段的拥堵证据确定区域交通拥堵等级。上述流程如图 2.1 所示，本文中使用的的基本符号如表 2.1 所示。

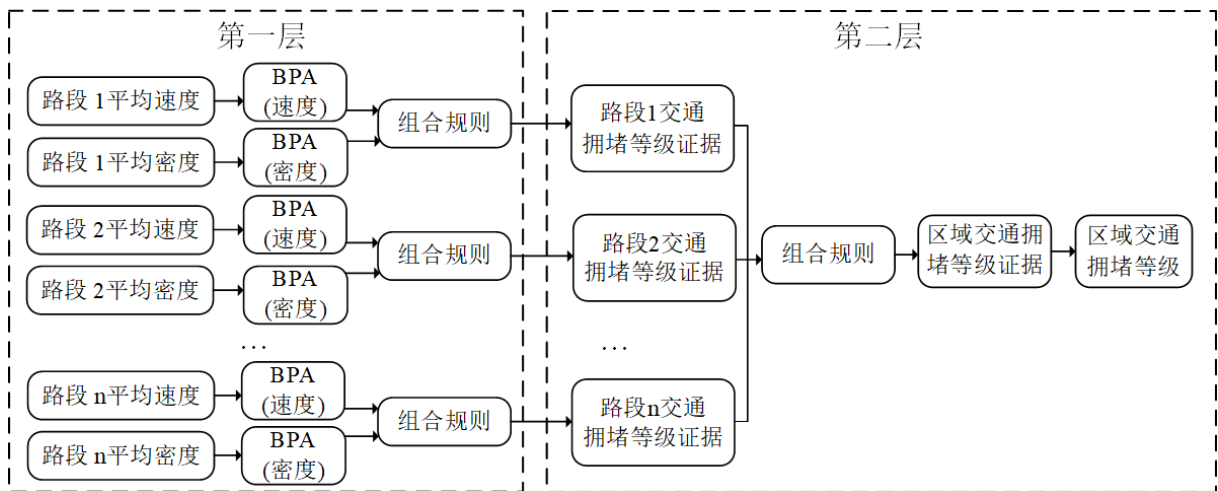


图 2.1 基于双层 D-S 的交通拥堵评估方法流程图

交通拥堵评估的主要方法确定后，我们还面临如何划分路网区域以及车辆信息传输的问题。在本文中，一个 RSU 计算所得该路段交通拥堵等级被视为一条证据，任意被两个或两个以上 RSU 检测范围所覆盖的区域都可被划分为一个区域。依据城市路网特点，该划分方式可灵活的将城市路网划分为直线型、井字型和三角型等不同的区域。

表 2.1 符号表

符号	意义
$v_i^j(z)$	在第 $j$ 秒, 第 $i$ 条路段上第 $z$ 辆车的瞬时速度
$\bar{v}_i^j$	在第 $j$ 秒, 第 $i$ 条路段的平均瞬时速度
$v_i$	第 $i$ 条路段的平均速度
$\rho_i$	第 $i$ 条路段的平均密度
$N_j$	在第 $j$ 秒, 某路段上的车辆数
$X$	收集交通信息的时间间隔
$l$	某路段长度
$M_{1i}$	依据平均速度划分的模糊隶属度函数
$M_{2i}$	依据平均密度划分的模糊隶属度函数
$m_i$	第 $i$ 条路段的交通拥堵证据
$HW$	基于信息熵计算得到的权重系数
$r(m_i, m_j)$	证据 $m_i$ 和证据 $m_j$ 之间的证据关联系数
$c(m_i, m_j)$	证据 $m_i$ 和 $m_j$ 之间的关联程度
$W_i$	证据 $m_i$ 被其余路段拥堵证据所支持的程度, 证据 $m_i$ 的权重
$RMSE_{region}$	区域拥堵等级在五种不同时间间隔下的均方根误差
$RMSE_{road}$	当时间间隔为 300 秒, 每个路段的交通拥堵等级的均方根误差
$n$	待求拥堵等级的区域范围

本文提出的方法包含两个信息传输阶段, 第一个阶段是 RSU 检测覆盖范围内的车辆作为分布式节点, RSU 负责对驶入其检测范围的车辆进行信息收集、存储和计算。车辆信息包括车辆 ID、时刻、瞬时速度和位置信息。第二个阶段是区域内的 RSU 作为分布式节点, 并确定其中一个 RSU 为数据融合中心, 其余 RSU 的信息汇集于此数据融合中心。以井字型区域为例, 如图 2.2 所示为其信息传输示意图。



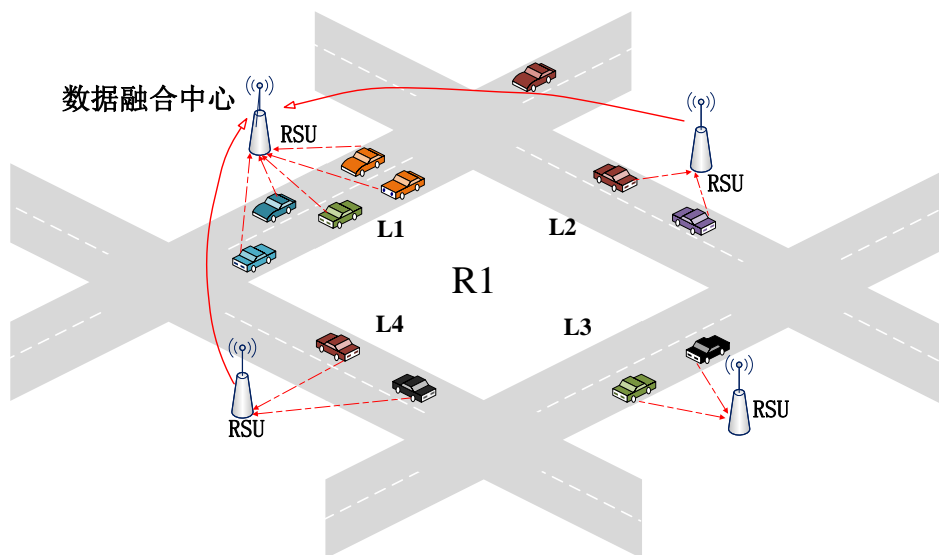


图 2.2 井字型区域车辆信息传输示意图

## 2.2 交通拥堵的基本概念

### 2.2.1 交通拥堵的定义

目前，交通拥堵已经成为一种常见城市道路网络中常见的交通状态，这种交通状态下的车辆过多，并且车辆具有速度较慢、行程时间较长和排队长度较长等特点。自 20 世纪 50 年代以来，全球机动车数量快速增长，导致城市道路网络中交通拥堵现象愈加频繁。当交通需求足够大，以至于车辆之间的相互作用减慢了交通流的速度，交通拥堵现象便会产生。因此，交通拥堵是由于交通需求大于道路容量而导致的一种交通状态。

发达国家通过定量分析车速、车道占有率等交通参数量化定义交通拥堵。日本道路公团将频繁停车或车速低于 40km/h、连续启动路程超过 1 公里，并且持续时间超过 15 分钟的交通状态定义为交通拥堵。美国芝加哥运输部将车道占有率大于等于 30% 且持续时间超过 5 分钟的交通状态定义为交通拥堵<sup>[41]</sup>。

在交通运输领域中，饱和度（Degree of Saturation, DoS）描述了交叉口允许的最大交通量，计算饱和度的公式为：

$$\text{饱和度} = (\text{交通需求} \times \text{循环时间}) / (\text{饱和流量} \times \text{有效绿灯时间}) \quad (2.1)$$

其中，饱和流量是指连续车流能够通过恒定绿灯信号的速率，通常以每小时车辆数或每小时单位数表示。当饱和度值介于 85%-90% 时，通常表示交通堵塞，车队开始形成。当饱和度值为 100% 时，意味着交通需求和道路容量相等，不能允许更多的车辆通过此道路。



### 2.2.2 造成交通拥堵的原因

要想提出针对性的意见和方法以缓解交通拥堵，就必须仔细分析造成交通拥堵的原因，从而“对症下药”，从根本上解决交通拥堵问题。已有研究总结出了造成拥堵的七个根本原因，并统计了造成拥堵的来源，图 2.3 所示的饼状图直观地展示了各种交通来源的占比情况。

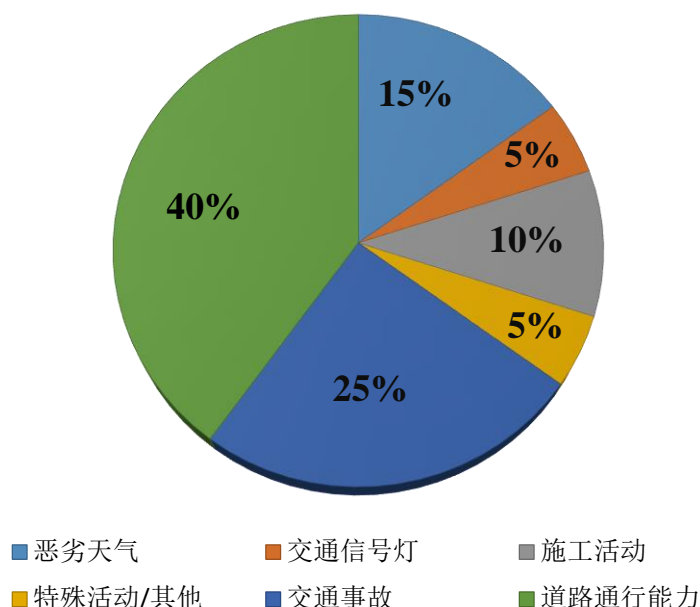


图 2.3 拥堵来源饼状图

(1)物理瓶颈(“通行能力”)——通行能力是指给定路段能够处理的最大交通量。通行能力由以下三个因素决定：车道数量和路面宽度、是否位于道路交汇区域、道路形状。

(2)交通事故——通常是指由行车道上的物理阻碍干扰正常交通流的事件。比如常见的物理阻碍有相撞的车辆、出故障的机动车、行车道上的碎片等。

(3)施工活动——道路上的施工活动会导致道路环境发生一些变化。这些变化可能包括减少行车道的数量或宽度、车道“转移”、车道改道，甚至临时关闭道路等。

(4)天气——气候条件可能会导致驾驶员行为发生变化，从而影响交通流。比如在雨、雪、雾等恶劣天气环境下，受路面湿滑，能见度低等因素影响，驾驶员会刻意降低车速以确保生命财产安全。

(5)交通控制设备——交通信号灯对交通流的间歇性中断也会导致拥堵和行程时间的变化。

(6) 特殊活动——是导致交通需求波动的特例，特殊活动附近的交通流与日常情况下的交通流变化趋势截然不同，特殊活动偶尔会造成交通需求的“激增”，导致整个交通系统无法承受。

(7) 正常的交通量波动——日复一日的交通需求变化导致某些时候的交通量高于其它时候。

从图 2.3 中可以看出，道路通行能力是造成交通拥堵的主要原因，其次，交通事故和恶劣天气对交通拥堵有较大影响。事实上，拥堵是由这些因素中的一个或多个造成的，它们往往会相互影响、相互作用，比如恶劣天气极易导致交通事故的发生，再比如车祸会导致交通混乱和驾驶员注意力分散，进而导致其他车祸的发生。

### 2.2.3 交通拥堵的分类

交通拥堵的本质是交通需求超过道路通行能力，超过通行能力的那部分车辆引起的交通滞留现象<sup>[2]</sup>。根据造成城市交通拥堵的原因分类，城市交通拥堵可分为常发性交通拥堵和偶发性交通拥堵。常发性交通拥堵是由于道路中某些固定位置的正常通行能力较低或某些固定时间的交通需求过大而引起的交通滞留现象。这些固定位置通常是指存在道路横截面窄、视线不良、设计不合理或不符合标准等缺点的道路交叉口，固定时间一般是指出行高峰时段，如城市的早晚上下班时段。常发性交通拥堵具有固定的时空特征，并且会周期性反复发生，因此，可通过观察分析历史交通数据来掌握此类交通拥堵发生的规律，从而提前准备预案管理措施来缓解交通需求和供给之间的矛盾。偶发性交通拥堵是由于交通突发事件导致道路通行能力临时降低的交通现象，突发交通事件包括交通事故、恶劣天气（雨、雪、冰、雾等）、车辆抛锚等，显然，突发交通事件发生的时间和地点随机，不可预测。

美国交通研究委员会出版的高速公路运输能力手册(Highway Capacity Manual, HCM)中对道路服务水平(Level Of Service, LOS)进行了分级，总共分为六个等级，分别用字母 A、B、C、D、E、F 来表示，A 表示拥堵程度最低的等级，F 表示拥堵程度最高的等级。这六个等级的具体含义和划分它们的依据如下：

A:自由流。道路上的车辆达到或超过道路标示的车速限制，驾驶人员在道路上畅通无阻；车辆之间的平均间距约为 550 英尺(167 米)，大约为 27 辆车的长度；驾驶人员在身体和心理上都有很高的舒适度；事故或故障点的影响很容易被吸收；等级 A 所代表的交通拥堵状况通常发生在城市深夜和农村地区。

B:一般自由流。道路上的车辆具有和等级 A 差不多的速度，但交通流的机动性略有限制；车辆之间的平均间距约为 330 英尺(100 米)，大约为 16 辆车的长度；驾车人员在身体和心理上仍有较高的舒适度。

C:稳定车流，或接近自由流。驾驶人员操纵车辆通过车道的能力明显受到限制，变换车道要求驾驶员耗费更多的注意力；车辆之间的平均间距约为 220 英尺(67 米)，大约为 11 辆车的长度；大多数经验丰富的驾驶人员仍保持较高的身心舒适度，并能保持标示车速继续行驶；轻微的交通事故可能会发生但不会影响道路安全，事故会造成一定的交通拥堵；这是一些城市和大多数农村公路的目标等级。

D:接近不稳定车流。由于交通量略有增加，道路上的车辆速度略有减小；交通流的机动性受到了更多的限制，驾驶人员的舒适度也降低了；车辆之间的平均间距约为 160 英尺(50 米)，大约为 8 辆车的长度；可能会发生一些小事故造成交通拥堵；等级 D 的交通状态类似于工作日内的繁忙的购物走廊，或者上下班时间的城市高速公路；这是城市街道在交通拥堵高峰时间段的目标等级，因为达到等级 C 需要高昂的成本。

E:不稳定车流，接近道路通行能力运行。道路上的车辆速度变化很快，但速度很少达到标示的限制；车辆之间的平均间距约为 6 辆车的长度，但速度仍在 50 km/h 以上；任何对交通流的干扰都会对上游的交通造成较大的影响，例如合并的匝道交通或车道变化；任何事故都会造成严重的交通拥堵；驾驶人员的身心舒适度降低了；等级 E 经常发生在大城市地区，是大城市常见的交通状态。

F:故障车流。道路上的每辆车都与前面的车辆步调一致，需要经常减速；旅行时间是无法预测的，通常交通需求大于道路容量；等级 F 的交通状态类似于经常堵车的道路状态。

文献<sup>[42]</sup>中将交通拥堵评价标准分为四个等级，由交通拥堵等级构成的集合  $\Theta = \{I, II, III, IV\}$ 。当道路平均速度大于或等于 35 km/h 时，拥堵程度被评价为等级 I，表示该路段为自由流；当平均速度介于 25 km/h 和 30 km/h 之间时，拥堵程度被评价为等级 II，表示该路段轻度拥堵；当平均速度介于 15 km/h 和 20 km/h 之间时，拥堵程度被评价为拥堵等级 III，表示该路段中度拥堵；最后，当平均速度小于或等于 10 km/h 时，拥堵程度被评价为拥堵等级 IV，表示该路段重度拥堵。同样的，将道路车流密度小于或等于 25 veh/km·lane 的交通状态评价为自由流；将车流密度介于 30 veh/km·lane 和 35 veh/km·lane 之间的交通状态评价为轻度拥堵；将车流密度介于 40 veh/km·lane 和 45 veh/km·lane 之间的交通状态评价为中度拥堵；最后，将车流密度大于或等于 50

veh/km·lane 的交通状态分类为重度拥堵。评价的标准如表 2.2 所示。

表 2.2 道路交通拥堵的评价标准

拥堵水平	I	II	III	IV
v(km/h)	≥35	25-30	15-20	≤10
ρ(veh/km·lane)	≤25	30-35	40-45	≥50

#### 2.2.4 交通参数

车流速度的定义为单位时间内车辆经过的距离。在实际道路中，车辆数庞大且速度实时变化，无法跟踪每辆车的速度。因此，解决交通问题时常用的交通参数是平均速度，它是通过对一段时间内给定区域内的车辆进行采样测量得到。平均速度一般可以从时间和空间两个角度来计算，分别定义为“时间平均速度”和“空间平均速度”。其中“时间平均速度”是车辆在一段时间内通过道路上的参考点的数据进行测量得到的，在实际道路中，它可以通过 RSU 来测量，当车辆位于 RSU 检测范围时，可以通过式 (2.2) 测量并跟踪每辆车的速度。

$$v^t = (1/a) \sum_{z=1}^a v(z) \quad (2.2)$$

上式中 a 代表通过参考点的车辆数量，v(z) 表示在 t 时刻第 z 辆车的瞬时速度。

而“空间平均速度”是通过整个道路段来进行测量。通过取自卫星图片、道路摄像头的连续图片或视频的空间数据来跟踪测量单个车辆的速度，然后用式 (2.3) 来计算出平均速度。

$$v^s = \left( (1/a) \sum_{z=1}^a (1/v(z)) \right)^{-1} \quad (2.3)$$

上式中 a 代表通过参考点的车辆数量，v(z) 表示在 t 时刻第 z 辆车的瞬时速度。

车流密度 (ρ) 定义为每单位道路长度的车辆数量。在交通流中，两个最重要的密度是临界密度和拥堵密度。临界密度为在自由流动下可达到的最大密度，而堵塞密度是拥堵状态下可达到的最大密度<sup>[43]</sup>。

## 2.3 信息融合的概念及方式

### 2.3.1 信息融合的概念

信息融合也称为数据融合，是一种从多方位组合不同来源数据和信息的过程，通过不断完善关于真实世界事件的假设或推论，不断将可用数据和信息转换为更丰富的信息，以实现单个对象的精确估计，并对当前和未来的潜在形势和威胁进行全面、及时的评估。事实上，这种思维模式来源于人类和动物的进化能力。自然界中的动物通过综合评估来自多种感官的信息以提高自身的生存能力，比如，动物通过衡量从视觉、触觉、嗅觉和味觉等感官获取的感知信息判断一种物质是否可以食用。

多源信息融合技术最早应用于军事领域，主要融合从红外设备或雷达等传感器获取的数据，以定位敌军所在位置。随着信息融合技术的不断发展，越来越多的学者发现该技术是一种实用且重要的工具，并尝试将其应用于不同的研究领域，如图像处理、目标跟踪、故障诊断、医疗诊断、遥感、工程测量等领域。此外，学者们还从不同方面定义了信息融合，比较经典的定义如：信息融合是一个整合来自多个来源信息的过程，以产生关于实体或事件的最具体、最全面的估计；数据融合是一种将不同来源的数据和知识结合起来的过程，其目的是最大限度地增加有用的信息内容，提高可靠性或鉴别能力，同时最大限度地减少最终保留的数据量；数据融合过程的目标是最大限度地利用异构源获取的有用信息，从而推断与观测环境相关的情况和事件<sup>[44]</sup>。

### 2.3.2 信息融合方式

信息融合能根据某种准则或方法，综合多源数据在时间或空间上的冗余性和互补性，获得对客观事物或事件一致的推断与评估。根据待融合信息被抽象或处理的程度，一般可将信息融合分为数据级融合、特征级融合和决策级融合。

数据级融合也称为像素级融合，是最低层次的融合。它的融合过程是将收集到的原始数据直接进行融合，而不经任何手段或方法对其进行抽象和处理，最后从融合结果中提取特征并决策出融合结果，如图 2.4 所示。一方面，由于原始数据中损失的数据量少，数据级融合尽可能的保留了许多细微信息，因而融合结果的精度也较高。另一方面，原始数据的数据量庞大，需要投入较多的时间或资金用于数据传输或数据处理，代价较高，且融合过程中需要设计纠正错误信息的方法以弥补原始数据不完整、不稳定的缺点。主要方法有代数法、主成分变换法等。

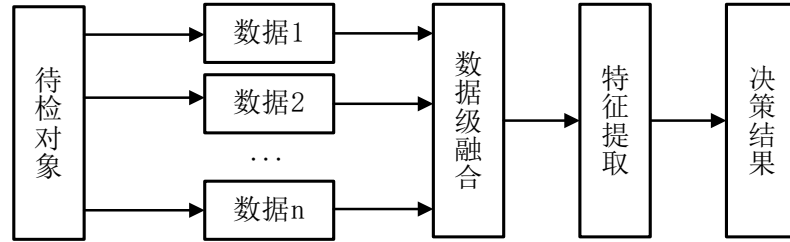


图 2.4 数据级融合

特征级融合是相较于数据级融合更高的融合，融合过程大致如图 2.5 所示。在融合之前需要提取出原始数据的特征矢量，基于特征矢量进行融合并做出决策。特征级融合的优点是能压缩数据，去除了部分冗余信息，同时，尽可能的保留了所需信息，相较于数据级融合有较高的实时性，但融合精度有所下降。典型的研究方法有熵法、神经网络法等。

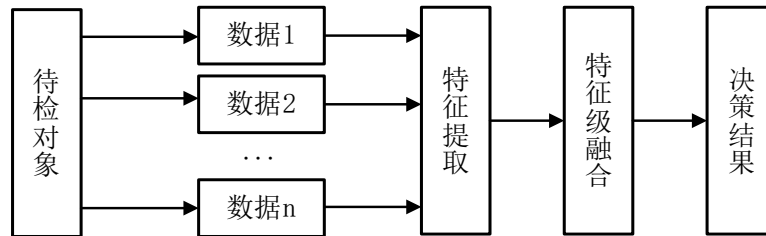


图 2.5 特征级融合

决策级融合是最高层次的融合，融合过程一般如图 2.6 所示。它先对原始数据进行特征提取，然后做出局部决策，最后基于这些局部决策进行融合决策。决策级融合的缺陷是损失的原始数据较多，因而精度较低，但它具有对通信带宽要求较低，能满足实时传输需求以及抗干扰能力较强的优点。主要的研究方法有 D-S 证据理论、贝叶斯推理法、模糊逻辑法等。

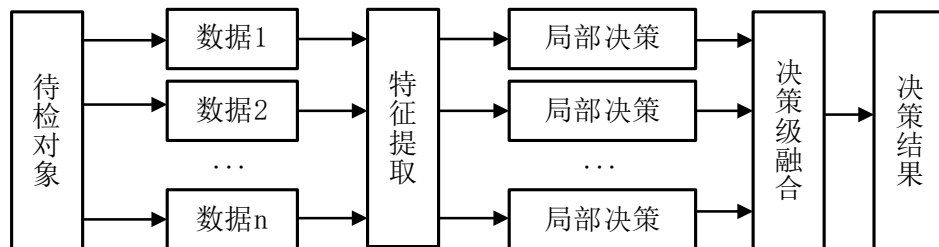


图 2.6 决策级融合

定性地评估交通拥堵状况对数据的精度要求不高，但是需要保证交通信息能实时传输并具有一定的抗干扰能力，因此，本文提出的两层交通拥堵估计框架先后两次运用了决策级融合的思想。在第一层，从车辆原始数据提取两个重要交通参数作为特征，即路段平均速度和平均密度，利用这两个参数分别评估路段交通拥堵状况，然后通过决策级融合的方式实现综合考虑这些评估结果，得到评估路段交通拥堵状况的结果。

在第二层，综合考虑各路段由第一层融合方式得到的交通拥堵评估结果，再次利用决策级融合的思想得到区域交通拥堵的评估结果。

## 2.4 本章小结

本章描述了交通拥堵评估方法中的关键问题，构建了以井字型区域为例的典型应用场景，说明了本研究中涉及的主要符号及其含义，介绍了不同的交通拥堵等级评价标准，此外，还介绍了交通拥堵和信息融合的一些基本概念，为后续研究奠定了理论基础。

### 第三章 基于两层 D-S 证据理论的区域交通拥堵评估方法

基于双层 D-S 交通拥堵评估方法是研究交通拥堵检测和估计的一项重要工作。在第一层获取路段交通拥堵证据的基础上，第二层决定区域路网的交通拥堵等级。显然，这种方法提供了一种简洁实用的方法来实现这一目标，此外，它能灵活地选择构成区域道路网络的路段。在本节中，我们将详细地介绍 RSU 在确定的时间间隔内如何计算并确定区域交通拥堵等级的详细技术。在计算路段交通拥堵等级时，我们选择平均速度和平均密度这两个实用性较好的参数作为评价交通拥堵状况的指标，并且分别构建了依据这两个参数划分交通拥堵等级的模糊隶属函数。

#### 3.1 D-S 证据理论的基本概念

##### 3.1.1 基本概率分配函数

若辨识框架  $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N\}$  是由  $N$  个互斥元素组成的有限完备集合。 $\Theta$  的幂集  $2^\Theta$  所构成的  $2^N$  个元素的集合为

$$2^\Theta = \{\emptyset, \{\theta_1\}, \dots, \{\theta_N\}, \{\theta_1, \theta_2\}, \dots, \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i\}, \dots, \Theta\} \quad (3.1)$$

若函数  $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$  满足  $m(\emptyset) = 0$  和  $\sum_{A \in 2^\Theta} m(A) = 1$ ，则称  $m$  为基本概率分配函数 (Basic Probability Assignment, BPA)， $m(A)$  的数值表示的含义是准确分配给  $A$  的信度。假设辨识框架  $\Theta$  的任意一个子集记为  $A$ ，且  $m(A) > 0$ ，则称  $A$  为  $\Theta$  上的基本概率指派  $m$  的命题。

##### 3.1.2 D-S 证据理论的合成规则

符号  $\oplus$  可以表示 D-S 证据理论合成规则。假设有两组 BPA，分别被记为  $m_1$  和  $m_2$ ，他们包含的命题分别为  $A_1, A_2, \dots, A_s$  和  $B_1, B_2, \dots, B_r$ ，用  $m$  表示  $m_1$  和  $m_2$  组合后的新证据<sup>[45]</sup>。则 Dempster 组合规则表示如下：

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ m(A) = \frac{1}{1-k} \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) \times m_2(B_j) \end{cases} \quad (3.2)$$

其中， $k = \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i) \times m_2(B_j)$ ，称为冲突系数，用于衡量不同证据间的冲突程度，

$k$  的数值越大，则意味着证据间的冲突就越大。



## 3.2 路段交通拥堵等级

### 3.2.1 计算路段平均速度、路段平均密度

假设区域交通拥堵的检测时间周期为  $X$  秒，区域内的车辆每秒向 RSU 上传车辆状态信息。以图 2.2 所示井字型区域 R1 为例，L1、L2、L3、L4 路段上的 RSU 分别负责收集本路段上的车辆信息，当完成  $X$  组数据收集后，各 RSU 将车辆信息进行融合得到本路段交通拥堵等级证据，再将这四条路段交通拥堵等级证据信息上传至数据融合中心，数据融合中心融合这四条信息得到目标区域 R1 的区域交通拥堵等级，不考虑传输延迟和计算耗时，则数据融合中心每  $X$  秒得到一个区域交通拥堵等级。

在 RSU 计算路段交通拥堵等级证据时，首先要将  $X$  秒内的瞬时速度和瞬时密度信息分别处理为路段平均速度和路段平均密度。以井字型区域内路段 L1 为例，设路段 L1 长为  $l$  米，则计算其路段平均速度  $v_{L1}$  和平均密度  $\rho_{L1}$  的计算公式如下：

(1) 计算路段 L1 的路段平均速度  $v_{L1}$ 。设路段 L1 在第 1 秒有  $N_1$  辆车，且此刻它们的瞬时速度分别为  $v_{L1}^1, v_{L1}^2, v_{L1}^3 \dots v_{L1}^{N_1}$ ，则第 1 秒的平均瞬时速度  $v_{L1}^1$  表示为式 (3.3)：

$$v_{L1}^1 = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} v_{L1}^i}{N_1} \quad (3.3)$$

第 2, 3, ...,  $X$  秒的平均瞬时速度也按照公式 (3.3) 的方法进行计算，依次计算得到  $v_{L1}^2, v_{L1}^3, \dots, v_{L1}^X$ ，则路段 L1 的路段平均速度  $v_{L1}$  表示为式 (3.4)：

$$v_{L1} = \frac{\sum_{i=1}^X v_{L1}^i}{X} \quad (3.4)$$

(2) 计算路段 L1 的路段平均密度  $\rho_{L1}$  的公式如式 (3.5)：

$$\rho_{L1} = \frac{\sum_{i=1}^X N_i}{X/l} \quad (3.5)$$

### 3.2.2 划分交通拥堵等级的隶属度函数

在分别依据路段平均速度、路段平均密度定量地评价路段交通拥堵等级时，容易受主观因素和客观环境的影响，具有一定的不确定性。证据理论中的 BPA 函数在不确定信息建模方面有很大的优势，并且 BPA 的生成是否合理直接影响了后面证据融合和决策结果是否准确。利用隶属度函数来生成 BPA 是一种常用方法，因此，根据交通流的特

特点和评价标准，本文构建了分别依据速度和密度两个指标划分交通拥堵等级的隶属度函数。

(1) 根据已有经验，道路拥堵程度可以分为自由流、轻度拥堵、中度拥堵和重度拥堵四个等级。当平均速度大于等于 35 km/h 时，道路拥堵程度为自由流；当平均速度介于 25-30 km/h 时，道路拥堵程度为轻度拥堵；当平均速度介于 15-20 km/h 时，道路拥堵程度为中度拥堵；当平均速度小于等于 10 km/h 时，道路拥堵程度为重度拥堵。在车辆行驶过程中，道路交通拥堵状况之间没有明显的分界。同一平均速度实际上可能处于几种不同的交通拥堵状态中，只是依据该平均速度判断处于何种交通拥堵状态的概率有所不同。因此，本文在已有经验的基础上做了适当修改，确定了如图 3.1 所示的依据路段平均速度划分路段交通拥堵等级的隶属度函数，式 (3.6) - (3.9) 是对应的函数表达式。

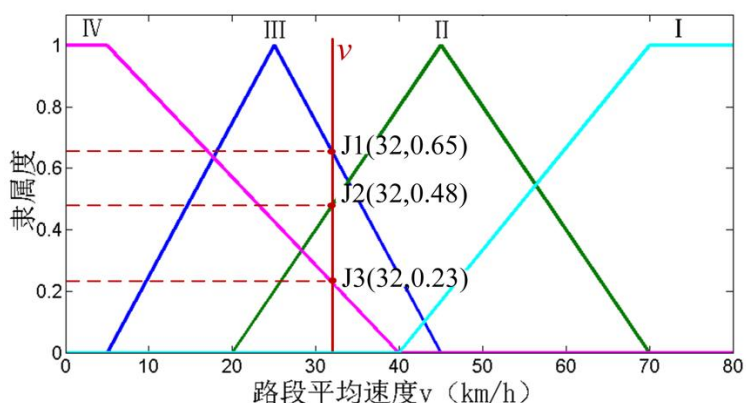


图 3.1 依据路段平均速度划分交通拥堵等级的隶属度函数

$$M_{11} = \begin{cases} 0, & v \leq 40 \\ \frac{v-40}{30}, & 40 < v \leq 70 \\ 1, & v > 70 \end{cases} \quad (3.6)$$

$$M_{12} = \begin{cases} 0, & v \leq 20 \\ \frac{v-20}{25}, & 20 < v \leq 45 \\ \frac{70-v}{25}, & 45 < v \leq 70 \\ 0, & v > 70 \end{cases} \quad (3.7)$$

$$M_{13} = \begin{cases} 0, & v \leq 5 \\ \frac{v-5}{20}, & 5 < v \leq 25 \\ \frac{45-v}{20}, & 25 < v \leq 45 \\ 0, & v > 45 \end{cases} \quad (3.8)$$

$$M_{14} = \begin{cases} 1, & v \leq 5 \\ \frac{40-v}{35}, & 5 < v \leq 40 \\ 0, & v > 40 \end{cases} \quad (3.9)$$

(2) 同样的，依据道路密度划分交通拥堵等级的方法，一般将道路密度小于等于

25 veh/km·lane 的状态划分为自由流；将道路密度介于 30-35 veh/km·lane 的状态划分为轻度拥堵；将道路密度介于 40-45 veh/km·lane 的状态划分为中度拥堵；将道路密度大于等于 50 veh/km·lane 的状态划分为重度拥堵。类似的，本文做了适当修改使之更适用于实际情况。图3.2给出了依据路段平均密度划分路段交通拥堵等级的隶属度函数，式(3.10) - (3.13) 是对应的函数表达式。

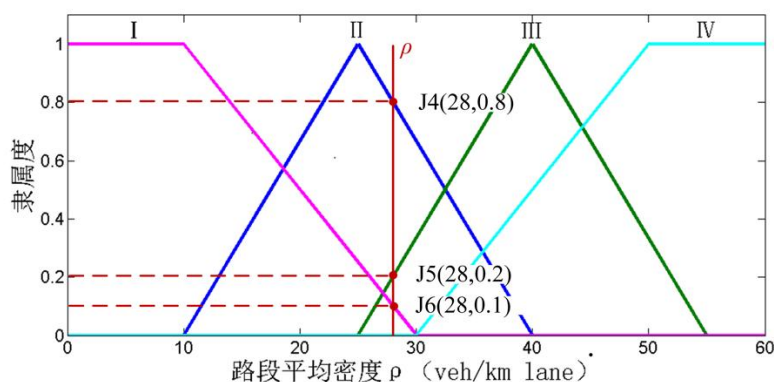


图 3.2 依据路段平均密度划分交通拥堵等级的隶属度函数

$$M_{21} = \begin{cases} 1, & \rho \leq 10 \\ \frac{30-\rho}{20}, & 10 < \rho \leq 30 \\ 0, & \rho > 30 \end{cases} \quad (3.10) \quad M_{22} = \begin{cases} 0, & \rho \leq 10 \\ \frac{\rho-10}{15}, & 10 < \rho \leq 25 \\ \frac{40-\rho}{15}, & 25 < \rho \leq 40 \\ 0, & \rho > 40 \end{cases} \quad (3.11)$$

$$M_{23} = \begin{cases} 0, & \rho \leq 25 \\ \frac{\rho-25}{15}, & 25 < \rho \leq 40 \\ \frac{55-\rho}{15}, & 40 < \rho \leq 55 \\ 0, & \rho > 55 \end{cases} \quad (3.12) \quad M_{22} = \begin{cases} 0, & \rho \leq 30 \\ \frac{\rho-30}{20}, & 30 < \rho \leq 50 \\ 1, & \rho > 50 \end{cases} \quad (3.13)$$

在图 3.1 和 3.2 中 I、II、III 和 IV 四个区域之间有重叠，利用给定的速度和密度，我们可以在两个图中画一条垂直线，垂线可能与多个区域的边界线相交。在图 3.1 和 3.2 中，分别绘制了两条垂直线  $v = 32 \text{ km/h}$  和  $\rho = 28 \text{ veh/km}\cdot\text{lane}$ ，这两条线与不同区域边界线产生两组交点  $\{J1, J2, J3\}$  和  $\{J4, J5, J6\}$ ，如图 3.1 和图 3.2 所示。这意味着利用给定的速度和密度确定交通拥堵等级时存在不确定性，需要提出一种方法来解决这个问题。

为了解决这个问题，利用上面给定的模糊隶属函数，我们定义模糊隶属函数与任意给定的平均速度  $v$  或平均密度  $\rho$  的交集作为匹配关系。经过匹配操作，生成了关于速度

和密度这两个交通参数的两组 BPA，分别记为 $m_v$ 、 $m_\rho$ 。已知由交通拥堵等级构成的辨识框架为 $\Theta=\{I, II, III, IV\}$ ，假设  $G$  是在辨识框架下，由单种交通拥堵等级或多种交通拥堵等级构成的集合，换句话说， $G$  可能是 $\Theta$ 的任意子集<sup>[46]</sup>。当集合  $G$  中只包含一个元素时， $m(G)$ 表示路段交通拥堵状况为  $G$  中元素代表拥堵等级的信任度，此时，我们定义  $G$  为单子集命题；当集合  $G$  中包含不止一个元素时， $m(G)$ 表示不确定路段交通拥堵状况为  $G$  中何种元素代表拥堵等级的信任度，此时，我们定义  $G$  为多子集命题。那么  $m_v$ 、 $m_\rho$ 实际上是分别包含对 $2^4$ 个命题  $G$  信任度 $m(G)$ 的两组数据。

以 $m_v$ 的生成过程为例，路段平均速度 $v$ 匹配隶属度函数 $M$ 产生的交点纵坐标值为 $M(v)$ ， $M(v)$ 的数值大小表示路段平均速度 $v$ 与隶属度函数 $M$ 的匹配程度。我们根据交点个数（不包括 $M(v)=0$ 的交点）分为如下两种情况来说明匹配过程：

第一种情况：当只有一个交点时，则  $G$  为单子集命题， $M_G(v)$ 代表路段平均速度 $v$ 与  $G$  中唯一元素代表的单种交通拥堵等级的匹配程度，即反映了对单子集命题  $G$  的匹配程度；

第二种情况：当有不止一个交点时， $M_G(v)$ 有多个不同的值，其中数值最大的 $M_G(v)$ 反映对单子集命题  $G$  的匹配程度，除此之外的 $M_G(v)$ 数值由大到小依次反映对多子集命题  $G$  的匹配程度。

本文将匹配程度视为信任程度，即 $m(G)=M_G(v)$ ，若所有命题的信任度之和大于 1，则对其进行归一化处理。 $m_\rho$ 的生成过程与 $m_v$ 的生成过程类似，图 3.3 所示是由  $v = 32$  km/h 和  $\rho = 28$  veh/km·lane 生成的两条 BPA。

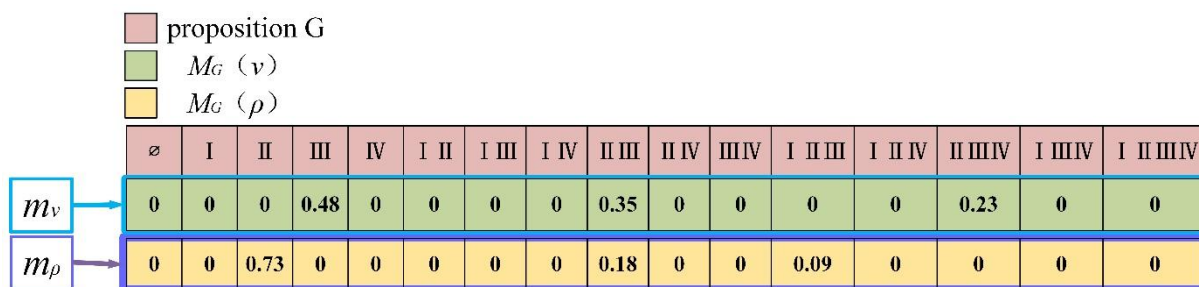


图 3.3 生成的两条 BPA

### 3.2.3 融合得到路段交通拥堵等级证据

令 $m(C)$ 为融合速度和密度 BPA 后生成的路段交通拥堵等级证据，集合  $C$  表示融合后产生的新命题。集合  $A$  表示由路段平均速度 $v$ 生成的命题，集合  $B$  表示由路段平均密

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/025213141131011104>