

# 基于云网格集成调度的防拥堵车辆路径规划算法

薛明 许德刚

(河南工业大学信息科学与工程学院 郑州 450001)

**摘要** 在道路交通路网中,车辆拥堵问题是流量与路网结构之间相互作用的一个复杂动态过程,通过车辆路径规划,实现对路网网格集成调度,从而提高路网通行吞吐量。传统方法采用并行微观交通动态负载平衡预测算法实现车辆拥堵调度和车辆路径规划,不能准确判断路面上的车辆密度,路径规划效益不好。提出一种基于云网格集成调度的防拥堵车辆路径规划算法,即构建基于 Small-World 模型的云网格路网模型,采用 RFID 标签信息进行路况信息采集,实现交通网络拥堵评估信息特征的提取,采用固有模态函数加权平均求得各车道的车辆拥塞状态函数,对所有车道内车辆密度取统计平均可获得簇内的车辆密度。设计交通路网拥堵检测算法来对当前个体道路信息进行一维邻域搜索,从而实现车辆路径规划控制目标函数最佳寻优。通过动态博弈的方式求得车辆防拥堵路径的近似最优轨迹,实现路径规划算法的改进。仿真结果表明,该算法能准确规划车辆路径,实现最优路径控制,从而提高严重拥堵路段的车流速度和路网吞吐性能,性能优越。

**关键词** 云网格,路网模型,吞吐量,路径规划

**中图分类号** TP391.9 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.7.063

## Anti Congestion Vehicle Path Planning Algorithm Based on Cloud Grid Integrated Scheduling

XUE Ming XU De-gang

(School of Information Science & Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract** In the road traffic network, traffic congestion problem is a complicated dynamic process of interaction between flow and the structure of the network. Through the vehicle path planning, the integration of the road network grid scheduling is realized, and traffic throughput can be improved. The traditional method adopts parallel microscopic traffic dynamic prediction algorithm to realize the vehicle congestion scheduling and vehicle routing planning, but the algorithm can not accurately judge the density of vehicles, and the performance is not good. An improved anti congestion vehicle path planning algorithm was proposed based on cloud grid integrated scheduling. The cloud road network model is constructed based on Small-World model, and RFID label is used to collect the traffic information. The intrinsic mode function weighted average is used to calculate the vehicle congestion state function of each lane, and the density of vehicles in all lanes is obtained from the statistical average available vehicle density cluster. The traffic road network congestion detection algorithm was designed, searching for the current road information of individual one-dimensional neighbor, then the vehicle path planning and best objective function optimization are realized. The dynamic game way is used to get the approximate optimal trajectory to improve the path planning algorithm. The simulation results show that the algorithm can accurately achieve the optimal vehicle path planning and control, and traffic speed and network throughput performance are improved in severe congestion state. It has better performance than traditional method.

**Keywords** Cloud grid, Road network model, Throughput, Path planning

## 1 引言

随着城市化进程的不断推进,汽车保有量迅速增加,交通拥堵问题是目前交通系统发展面临的严峻挑战,直接影响着社会经济的发展。随着车流量的不断增大,城市变得越来越拥堵,在拥堵路段,车辆通行能力降低,在道路交通路网中,拥堵问题是流量与路网结构之间相互作用的一个复杂动态过

程。基于复杂网络理论和路段阻抗模型,可以构建一个负责的交通路网网络和防拥堵模型,模拟交通拥堵在复杂路网中的动态演进过程,进行路网防拥堵车辆路径规划,为交通流量管理决策和交通路网优化提供分析实验支持。因此,为准确检测交通的拥堵程度并解决交通拥堵,需要一种有效的车辆路径规划算法,实现对路网网络的进程管理和集成调度,从而提高路网系统的通行能力及吞吐量。分析评估路网结构和进

到稿日期:2014-10-13 返修日期:2014-11-13 本文受国家自然科学基金资助项目(61202099),河南省科技厅科技攻关项目(122102110107)资助。

薛明(1979—),男,硕士,讲师,主要研究方向为系统工程理论与优化、智能计算;许德刚(1978—),男,博士,教授,主要研究方向为系统工程理论与优化。

行车辆路径规划算法设计,成为交通工程领域和计算机网络领域面临的主要问题。

为了完成道路交通路网结构设计和防拥堵车辆路径规划算法设计,必须要对路网结构与拥堵流量之间的相互影响关系进行深入细致的分析,基于已有测量数据,进行算法模拟和计算仿真,实现车辆路径优化规划设计<sup>[1]</sup>。传统方法中,对基于交通路径网络结构的车辆路径规划算法建立在智能仿生群算法和非线性预测算法等基础上<sup>[2]</sup>。其中,文献[3]提出一种蚁迹跳变的转移因子动态更新的 TSP 仿真技术,该方法虽然对道路路网模型进行动态仿真,实现了车辆路径优化规划,但算法在能量消耗上分布不均,整个网络的生命周期较短,效益不高;文献[4]中,陈秀锋等人提出一种并行微观交通动态负载平衡预测方法用于仿真,算法适用于较大规模的交通网络微观仿真,速度效益及可扩展性较好,但面对忽然增加的车辆负载调度任务时,道路拥堵状况不能得到有效预测<sup>[5]</sup>;文献[6]根据车辆的行驶速度判断交通状态,构建车辆自组织网络模型,使用 GPS 系统获取当前车辆的位置和速度,通过与速度门限对比来估计交通状态,实现对车辆路径的规划设计,然而,该算法不能准确判断路面上的车辆密度,以行驶时间为依据判断道路拥堵状态的方法,实时性上不能满足应用需求<sup>[7]</sup>。

针对上述问题,为了弥补当前的道路交通路网车辆路径规划算法存在的缺陷,本文提出一种基于云网格集成调度的防拥堵车辆路径规划算法,设计基于 Small-World 模型的路网云网格结构,进行交通网络拥堵评估信息特征提取,结合拥堵级别,通过动态博弈的方式求得车辆防拥堵路径的近似最优轨迹,实现对路径规划算法的改进。仿真实验验证了本文算法的可行性和优越性。

## 2 基于云网格的路网拥堵评估模型构建

### 2.1 云网格路网结构模型

首先构建云网格的路网拥堵评估模型,模拟一个车辆遍历交通网络的最短时间和最大范围来评估路网的交通拥堵情况,实现对车辆路径的规划优化设计。关于云网格下的道路交通网络模型的模拟设计,D. Watts 等人最早提出了 Small-World 模型介于规则模型和完全随机模型的一种拓扑结构<sup>[8,9]</sup>,如图 1 所示。图中,左侧为规则模型,右侧为完全随机模型,拓扑结构中任意两点之间最短距离的平均值被称为拓扑结构的特征路径。智能交通场景中,采集的交通信息种类多且原始数据量大,需要对 Small-World 路网模型进行云网格调度。路网模型采用一个 5 元组表示一个路段,即有向图中的一条边,如式(1)所示:

$$Edge = \{StartID, EndID, c_a, x_a, t_a\} \quad (1)$$

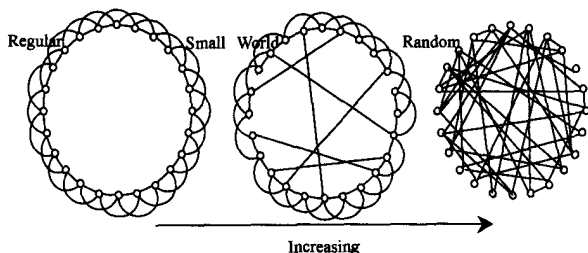


图 1 基于 Small-World 模型的路网云网格结构

其中, $c_a$  表示道路的设计特性, $x_a$  表示道路的动态特性, $Edge$

表示一条有向边, $StartID$  表示该边的起始结点的 ID, $EndID$  表示有向边的终止结点的 ID。根据路网的整体状态信息,动态地更新  $x_a$ 。流量  $x_a$  通过路段阻抗  $t_a$ ,变换成路段的实际通行能力。

一个具体的交通网络由两部分组成,即节点和边。城市道路、车行通道等设置为边,节点的集合表示为:

$$V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_N\} \quad (2)$$

$N$  为节点的个数。边的集合为:

$$E = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_M\} \quad (3)$$

$M$  为边的个数。对于边集  $E$  中的每个元素边,均有  $V$  中的两个点与之对应。进行网络系统拓扑路径寻优,得到最佳寻优路径为:

$$t_a = t_a^0 [1 + J(x_a / (c_a - x_a))] \quad (4)$$

其中, $J$  为路段的实际通行能力, $t_a^0$  为修正自适应系数, $c_a$  为道路交通通行能力拥挤系数。分析上述云网格模型可知,当路段上的交通流量达到路段的实际通行能力,即  $x_a = c_a$  时,路段的阻抗趋近无穷大,路段彻底阻断,等同于改变了路网的结构,由此实现了云网格路网结构模型构建。本文还考虑了不同限速车道的权重,综合车辆密度信息和定位信息等特征,进行车辆路径规划设计,准确、实时地检测道路上的交通态势,为驾驶员提供了实时、可靠的交通信息。

### 2.2 交通网络拥堵评估信息特征提取

基于上述云网格路网模型,为了有效实现对路网交通的车辆路径优化防拥堵规划算法的设计,交通拥堵检测模型和拥堵评估信息特征提取是重要的一步。根据路网云网格集成调度理论,一个网络模型的畅通性可以用特征路径来衡量。首先进行拥堵评估信息采集,信息采集本质是一个信息特征提取的过程,本文采用装有 RFID 阅读器的车辆读出标签内部存储的信息;然后车载定位系统根据标签编码或者根据大地绝对坐标结合 GIS 以及电子地图确定车辆的当前位置,实现对拥车防拥堵特征信息的采集和定位。信息特征提取的系统结构示意图如图 2 所示。

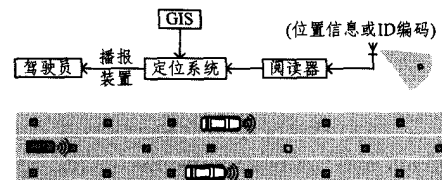


图 2 交通网络拥堵评估信息特征提取系统结构

图 2 中,采用 RFID 标签信息进行信息采集,标签中包含与实际对应的道路、路段位置和车道信息的编码或者大地绝对位置坐标信息。特征提取中,提取制约交通拥堵的关键信息:车辆密度、不同车道内的车辆加权平均速度等信息特征,结合拥堵级别,为实现对车辆路径的规划提供准确的数据基础。每条车道上的车辆密度为:

$$\rho_{plane-i} = \frac{N_i}{2R} \quad (5)$$

其中, $i$  表示第  $i$  条车道, $N_i$  为第  $i$  条车道内的车辆数目, $R$  表示沿车道方向的簇半径。对车流密度进行信号模型重构,采用固有模态函数加权平均算子求各车道的车辆拥塞状态函数,为:

$$Z^k = \bar{w}^k A^T = \sum_{j=1}^m \bar{w}_j^k \cdot a_{ij}, i=1, \dots, m \quad (6)$$

其中,  $A=(a_{ij})_{m \times n}$  为稀疏拥堵状态下的路面速度指标值矩阵。由  $Z^k$  即可得各车道  $a_i$  的第  $k$  次排序向量。考虑车辆在行驶过程中的变道情况, 对所有车道内车辆密度取统计平均可获得簇内的车辆密度:

$$\rho_{cluster} = \frac{\sum_{i=1}^L \rho_{lane-i}}{L} \quad (7)$$

在同一条道路上, 不同车道的道路限速值不同, 结合 Monte Carlo 法确定的车辆聚簇的偏好权重, 将权重修正为:

$$w_j = \frac{\lambda_j \bar{v}_j}{\sum_{j=1}^n \lambda_j \bar{v}_j} \quad (8)$$

其中,  $\lambda_j$  为熵权确定的客观权重, 通过加权平均方法计算获得簇内路面上的空时加权平均速度为:

$$v_{\text{簇}} = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^{N_i} \frac{\eta_i v_{ij}}{N_i} \quad (9)$$

其中,  $v_{ij}$  为簇内第  $i$  条车道上第  $j$  辆车的瞬时速度,  $w_i$  为第  $i$  车道上的速度所占的权重, 且  $\sum \eta_i = 1$ 。通过结合复杂网络模型和路段阻抗模型, 构造出交通网络拥堵模型, 利用节点模型进行区别评价, 对网络中不同的节点, 根据其与其与市中心所处的相对地理位置关系进行变权重加权, 由此有效、准确地提取交通网络拥堵评估信息特征。

### 3 防拥堵车辆路径规划算法的改进实现

#### 3.1 交通路网拥堵检测算法的设计

以上述方法提取到的交通网络拥堵评估信息特征为基础, 进行交通拥堵检测设计。考虑车辆在行驶过程中的变道情况, 对所有车道内车辆密度取统计平均, 用  $E=(E_1, E_2, \dots, E_i, E_m)$  来表示整个交通网络模型中有  $m$  维过载边。在云网格中, 车辆聚簇后, 簇成员把自身的位置、速度信息发给簇头, 得到交通网络系统随机产生一条过载边后的后代过载边的概率密度函数, 采用云格集成策略, 构建云网格路网模型, 网格节点  $A_i$  (车辆或路边设施) 向簇头发送响应特征  $REP_i$ , 其消息模型形式化描述如下:

$$m_i = \text{MSG\_REP} \parallel D_i \parallel \text{SN}_{A_i} \parallel \text{data} \parallel \text{Pos} \parallel \text{sensid} \parallel \text{Token} \quad (10)$$

假设交通网格坐标  $(x, y)$  描述消息源节点所在的地理位置, 所有感知数据从采集位置或通过中间节点转发传输到簇头节点。用于车流拥堵调度的节点失效过载比的表达式为:

$$e_{ij} = p_1(i) \cdot p_2(j+1) \cdot p_3(ij) \quad (11)$$

式中,  $p_1(i)$  为  $E_i$  类型的过载边的概率密度函数,  $p_2(j+1)$  为后代节点剩余度向量规则下的节点分布概率。在智能交通环境中, 路网系统云网格中数据包的前导码区域值  $D_i$  代替实际数据进行数据融合, 实现对交通路网的拥堵检测, 为提高车辆路径防拥堵规划奠定基础。

#### 3.2 防拥堵车辆路径规划算法的实现

最后, 根据构建的交通路网的云网格集成调度模型, 结合提取的交通网络拥堵评估信息特征, 在路网拥堵检测算法的基础上, 引入粗糙集理论, 对当前个体道路信息进行一维邻域搜索, 实现车辆路径规划控制目标函数最佳寻优。云网格控制系统中的车辆数负载为:

$$[\nabla F(x)]_j = \frac{\partial F(x)}{\partial x_j} = 2 \sum_{i=1}^N v_i(x) \frac{\partial v_i(x)}{\partial x_j} \quad (12)$$

式中,  $F(x)$  表示拥堵预测控制目标函数,  $v_i(x)$  为沿车道方向的簇半径。利用粗糙集相似度求解, 通过动态博弈的方式求得车辆防拥堵路径的近似最优轨迹, 得到:

$$\begin{aligned} [\nabla^2 F(x)]_{kj} &= 2 \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial v_i(x)}{\partial x_k} \cdot \frac{\partial v_i(x)}{\partial x_j} + v_i(x) \frac{\partial^2 v_i(x)}{\partial x_k \partial x_j} \right] \\ &= 2J^T(x)J(x) + 2S(x) \end{aligned} \quad (13)$$

进一步, 对车辆更新、交叉口及路段状态进行车辆的路网拥堵评估建模, 可以相对简单地对路网的拥堵状况进行动态更新。通过云网格集成调度和轨迹求解, 得到路网模型中车辆路径规划的实现方案, 描述为: 从任意一点开始, 生成一个测试车辆, 对该结点出发的每一个有向边信息, 终端结点收到该测试车辆后, 对所有的云网格节点进行遍历。交通网络系统正常运行中得到的总负载为:

$$l(v_u) = l(av) + l(cv) + l(bv) \quad (14)$$

城市交通网络模型中, 相邻节点  $v_a, v_b$  和  $v_c$  的负载容量表示为:

$$l(v_u) = l(ba) + l(ca) \quad (15)$$

$$l(v_b) = l(ab) + l(cb) \quad (16)$$

$$l(v_c) = l(ac) + l(bc) \quad (17)$$

采用上述公式计算路网节点的负载容量, 把拥堵路段分割成相互不连通的多个区域。遍历用时越少, 表示路网越畅通。随着交通网络信息的变化, 车流量的增长造成拥堵, 当阻抗无穷大时, 传送成功的概率为 0, 该边完全被堵死, 此时道路路网拥堵, 车辆无法通行, 需要将该边从拓扑结构中去除。结合车辆密度、速度与拥塞程度的关系, 实现了防拥堵车辆路径规划算法的改进。

### 4 仿真实验与结果分析

为了测试本文算法在实现交通路网云网格集成调度和防拥堵车辆路径规划中的性能, 进行仿真实验。用 Netlogo 建立仿真场景, 仿真系统界面如图 3 所示。仿真系统在 16 台节点机局域网上模拟交通实体节点, 在道路交通路网结构中, 对交通路口、重要枢纽、车站码头进行无向图规划, 交通路网采用双向四车道形式设计, 交通交叉路口节点数目分别设置为 170, 265, 270 和 320。中心节点和融合节点为固定位置, 其余节点随机分布。每个节点的通信半径为 10m, 节点间传输速率为 0.5Mbps。中心节点和融合节点则为 10J, 数据包的最大值为 256B, 每次仿真持续时间为 600s。

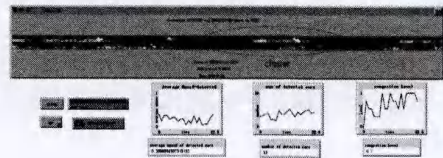


图3 仿真场景主交互界面

在进行车辆路径规划和数值仿真前分析路面速度、车辆密度与拥塞程度的关系。根据《城市道路交通拥堵评价指标体系》, 得到基于车辆密度、速度的拥塞程度划分等级, 见表 1。

表1 基于车辆密度、速度的拥塞程度划分

拥塞级别	车辆密度	车辆速度
畅通	低于 30 辆/千米/车道	70km/h 以上
轻度	[30~40] 辆/千米/车道	50~80km/h
中度	[40~50] 辆/千米/车道	20~60km/h
严重	50 辆/千米/车道以上	低于 40km/h

根据上述模型和算法设计,进行路网云网格集成调度防拥堵车辆路径规划算法仿真,每次路网交通通行时间为45min,预测时间步长为0.5s,经过100次仿真后求得交通网络拥堵评估信息特征,得到车辆密度、速度和拥堵程度等信息特征提取结果,如图4所示。以图4给出的信息特征提取结果为基础,结合拥堵级别,为实现对车辆路径的规划提供准确的数据基础。

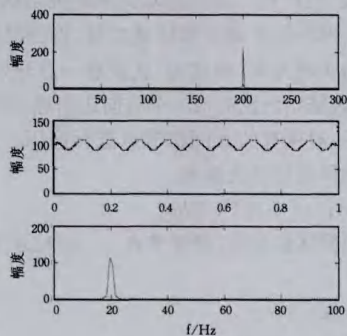


图4 路网拥堵状态信息特征提取结果

采用本文设计的路网拥堵检测算法进行交通路网拥堵检测,对当前个体道路信息进行一维邻域搜索,实现车辆路径规划控制目标函数的最佳寻优,通过动态博弈的方式求得车辆防拥堵路径的近似最优轨迹,得到的防拥堵车辆路径规划结果如图5所示。

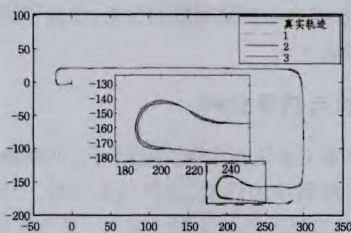
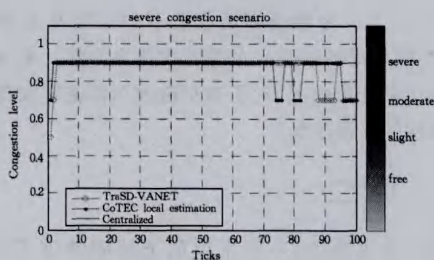


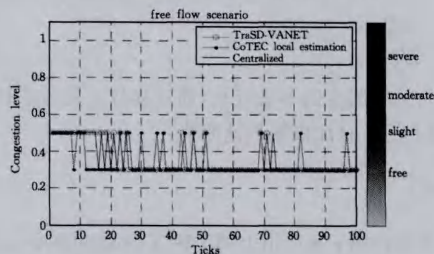
图5 车辆路径规划仿真结果

分析图5可见,随着车辆流量的增大,路网通行能力降低,通过本文路径规划,通行能力降低幅度较小;车辆的自主加减速行为带来交通流的扰动,导致局部交通状态多变,通过车辆路径规划,抑制了交通状态的多变性。本文算法系统输出能有效跟踪真实参考轨线,负载调度和控制效果较好,控制鲁棒性较高,实现了最优路径规划。为了定量分析算法性能,设定了3种不同拥堵程度的场景,分别采用本文算法和传统算法进行道路交通路网云网格集成调度和路径规划,以道路车辆吞吐流量为指标进行仿真实验对比,得到的仿真结果如图6所示。

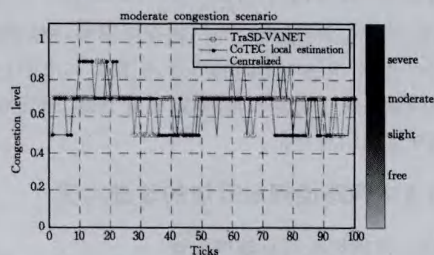
分析图6的仿真结果可知,车辆在自由流场景下,没有造成拥堵,运行通畅,如图6(a)所示,采用各种路径规划算法在自由流场景下的车辆吞吐性能相当,这是符合实际的。而随着车流量的增大,在中度和重度拥堵场景下,采用不同的路径规划算法,车流速度变化和密度变化出现较大起伏,特别是在重度拥堵场景下,不同的防拥堵车辆路径规划算法将带来不同的收益,采用本文算法能有效提高车流速度和路网吞吐性能。其中以重度拥堵场景为例,在路网吞吐性能上,采用本文算法比传统的路径规划算法提高了25.6%,展示了其优越的性能。



(a)自由流场景(40辆车)下的检测结果



(b)中度拥堵场景(70辆车)下的检测结果



(c)重度拥堵场景(80辆车)下的检测结果

图6 不同拥堵场景下的车辆路径规划吞吐性能对比

**结束语** 城市交通拥堵问题日益严重,解决交通拥堵问题成了世界各国面临的重要任务。需要一种有效的车辆路径规划算法来实现对路网网格的进程管理和集成调度,从而提高路网系统的通行能力及吞吐量。本文提出一种基于云网格集成调度的防拥堵车辆路径规划算法,设计基于 Small-World 模型的路网云网格结构,提取车辆密度、速度、定位等制约交通拥堵的关键信息特征,结合拥堵级别,通过动态博弈的方式求得车辆防拥堵路径的近似最优轨迹,实现路径规划算法的改进。分析研究和实验结果得出,通过车辆路径规划,抑制了交通状态的多变性,使得车辆调度和路径控制效果较好,鲁棒性较高,实现了最优路径规划。本文算法能有效提高车流速度和路网吞吐性能,综合性能优于传统算法,应用价值较高。

## 参考文献

- [1] Dornbush S, Joshi A. StreetSmart traffic: discovering and disseminating automobile congestion using VANET's[C]// Vehicular Technology Conference(VTC2007). Dublin, 2007; 11-15
- [2] Marfia G, Rocchetti M. Vehicular congestion detection and short-term forecasting: a new model with results[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(7): 2936-2948
- [3] Mandal K, Sen A, Chakraborty A, et al. Road traffic congestion monitoring and measurement using active RFID and GSM technology[C]// Int. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems (ITSC). Washington DC, 2011; 1375-1379
- [4] 陈秀峰, 许洪国, 倪安宁. 并行微观交通动态负载均衡预测方法仿真[J]. 计算机仿真, 2013, 30(8): 164-168

Chen Xiu-feng, Xu Hong-guo, Ni An-ning. Dynamic Load Balancing Mechanism and Algorithms in Parallel Microscopic Traffic Simulation[J]. Computer Simulation, 2013, 30(8): 164-168

- [5] Leontiadis I, Marfia G, Mack D, et al. On the effectiveness of an opportunistic traffic management system for vehicular networks [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(4): 1537-1548
- [6] Shen Wei, Wynter L. A New One-level Convex Optimization Approach for Estimating Origin-destination Demand [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012, 46(10): 1535-1555
- [7] Sun Hui-jun, Zhang Hui, Wu Jian-jun. Correlated scale-free network with community: modeling and transportation dynamics [J]. Nonlinear Dynamics, 2012, 69(4): 2097-2104
- [8] 王光浩, 吴越. 一种车载自组织网络路况信息的数据信任模型 [J]. 计算机科学, 2014, 41(6): 89-93
- Wang Guang-hao, Wu Yue. Data Trust Model for Road Information in Vehicular Ad hoc Network[J]. Computer Science, 2014,

41(6): 89-93

- [9] 张子龙, 薛静, 乔鸿海, 等. 基于改进 SURF 算法的交通视频车辆检索方法研究 [J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(2): 297-301
- Zhang Zi-long, Xue Jing, Qiao Hong-hai, et al. The Vehicle Retrieval Methods of Traffic Video Based on Improved SURF Algorithm[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2014, 32(2): 297-301
- [10] 高颀悦. 一种基于随机网格简化的 Web 可靠性分析方法研究 [J]. 科技通报, 2013, 4(29): 67-69
- Gao Jin-yue. A Web reliability analysis method based on random mesh simplification research [J]. Bulletin of Science and Technology, 2013, 4(29): 67-69
- [11] 韩国卫, 彭伟, 唐晋韬. 基于路标的最短路径长度快速估计算法 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2013, 27(7): 96-102, 118
- Han Wei-guo, Peng Wei, Tang Jin-tao. A Landmark-Based Fast Shortest-Path Length Estimation Algorithm [J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2013, 27(7): 96-102, 118

(上接第 264 页)

的准确率,同时也反映出能够挖掘出的残基对在序列上的分布。

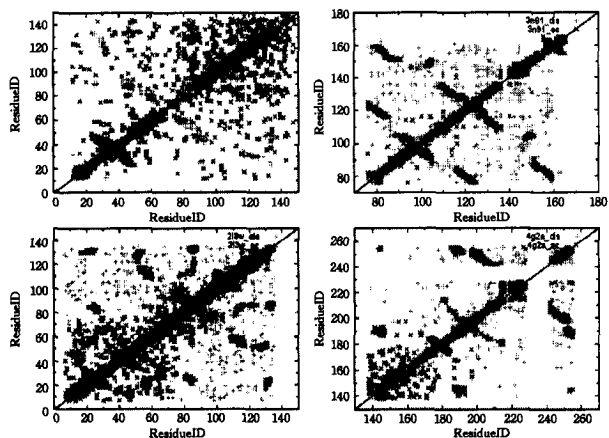


图 3 3KLU、3N91、2L3W 和 4G2A 4 个案例的结果图,其中灰色点为准确的残基对,黑色为挖掘出的进化配对,黑色能够覆盖灰色的部分表示挖掘准确。

**结束语** 本文以从蛋白质残基配对关系中挖掘出的距离约束为目标,将一种定性的生化信息转化为量化的距离约束,使之成为计算机更容易理解的约束项。本文训练属性更多的是来自蛋白质氨基酸序列,避免了复杂属性的不准确性,简化了计算,提高了运算效率。实验表明,EC 的准确性影响到蛋白质三维结构预测的准确性,将 EC 充分运用到预测中将对后面的实验产生积极的影响。因此,尝试找到更有代表性的特征属性来提高预测的准确性是工作的难点,另外如何将挖掘出的距离约束运用到结构预测中是下一步工作的重点。

### 参考文献

- [1] Marks D S, Colwell L J, Sheridan R, et al. Protein 3D structure computed from evolutionary sequence variation[J]. PloS one, 2011, 6(12): e28766
- [2] Hopf T A, Colwell L J, Sheridan R, et al. Three-dimensional structures of membrane proteins from genomic sequencing[J].

Cell, 2012, 149(7): 1607-1621

- [3] Wang Zhi-yong, Xu Jin-bo. Predicting protein contact map using evolutionary and physical constraints by integer programming [J]. Bioinformatics, 2013, 29(13): i266-i273
- [4] Ma Jian-zhu, Wang Sheng, Xu Jin-bo. Joint Multi-family Evolutionary Coupling Analysis for Protein Contact Prediction[J]. arXiv preprint arXiv:1312.2988, 2013
- [5] Wu Si-tao, Zhang Yang. MUSTER: improving protein sequence profile-profile alignments by using multiple sources of structure information[J]. Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics, 2008, 72(2): 547-556
- [6] Lazaridis T, Karplus M. Effective energy functions for protein structure prediction[J]. Current opinion in structural biology, 2000, 10(2): 139-145
- [7] Jones D T, Buchan D W A, Cozzetto D, et al. PSICOV: precise structural contact prediction using sparse inverse covariance estimation on large multiple sequence alignments[J]. Bioinformatics, 2012, 28(2): 184-190
- [8] Kryshchak A, Monastyrskyy B, Fidelis K. CASP Prediction Center infrastructure and evaluation measures in CASP10 and CASP ROLL[J]. Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics, 2014, 82(S2): 7-13
- [9] Ezkurdia I, Grana O, Izarzugaza J M G, et al. Assessment of domain boundary predictions and the prediction of intramolecular contacts in CASP8[J]. Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics, 2009, 77(S9): 196-209
- [10] 郭海娟, 吕强, 吴宏杰, 等. 一个识别蛋白质折叠模式的 SVM 分类器 [J]. 生物信息学, 2010(4): 287-290
- Guo Hai-juan, Lv Qiang, Wu Hong-jie, et al. A svm classifier for protein fold recognition [J]. China Journal of Bioinformatics, 2010(4): 287-290
- [11] Altschul S F, Koonin E V. Iterated profile searches with PSI-BLAST—a tool for discovery in protein databases[J]. Trends in biochemical sciences, 1998, 23(11): 444-447
- [12] Cheng Jian-lin, Baldi P. Improved residue contact prediction using support vector machines and a large feature set[J]. BMC bioinformatics, 2007, 8(113): 1-9