

# 复杂网络链路危险度预测模型研究

唐雪飞, 杨陈皓, 牛新征

(电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 610054)

**【摘要】**提出了仅基于链路线形的危险链路预测模型,通过对链路线形数据的计算,得到相应的链路潜在危险程度,对新加入交通网络的链路进行预测,从而在碰撞发生之前进行相应的整治。实验选取自贡市檀木林一自来水厂路段为测试对象,通过分析其链路线形数据,探讨了该链路的危险性;同时,应用物理分析法和当量总碰撞法对结果进行验证比较。验证表明,该模型可以在不需要历史数据的情况下,有效准确地对危险链路进行预测。

**关键词** 信息熵; 复杂网络; 高斯函数; 链路线形

**中图分类号** TP399

**文献标志码** A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.03.024

## Research on Prediction of Complex Networks Link Danger Level

TANG Xue-fei, YANG Chen-hao, and NIU Xin-zheng

(School of Computing Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** Traffic networks consist of flow system, road system, and management system. From the point of complex networks, considering the road in traffic networks as link and the influx of links as node, we have measured the danger level of links. However, the methods mentioned above can only identify road black spots after traffic accidents happened and delay the time of identifying. In this paper, an improved identification model merely based on the structure of link is proposed. Our model can estimate potential danger level of link by computing the link structure data. We select a section of link from Tanmulin to Zilaishuichuang as the research object and analyze its structure and danger level. In addition, we verify the results with equivalent accident method and physics method. As results, the model can identify danger links only by the structure data of link efficiently.

**Key words** comentropy; complex network; gaussian function; link structure

复杂网络是指具有小世界效应和无标度特性的一类网络,对复杂网络的理论研究起源于20世纪60年代Erdos和Renyi两位数学家提出的ER随机图模型。在此之后长达几十年的时间里,科学家一直以ER随机图模型作为复杂网络的基础模型,直到文献[1-2]的发表,科学家才冲破了ER随机图模型对复杂网络研究的束缚,掀起了复杂网络研究的热潮。

目前,对于复杂网络的研究已渗透各个研究领域。如复杂网络的相关特性广泛应用于技术网络中的因特网、电力网、WWW等,社会网络中的朋友关系网、科学引文网、演员网等,交通运输网中的航空网、道路交通网和城市公共交通网等,以及生物网络中的生态网络、神经网络、基因网络、新陈代谢网络等,并获得了很大的成功。其中,在交通运输网中,对网络链路危险度的分析及预测一直是一个极其重要的课题。

本文从复杂网络的角度出发,将交通运输网络中的道路视为链路,链路之间的交汇处视为节点,链路上的车辆视为活动点,活动点之间的事定义为危险碰撞,活动点经常发生危险碰撞的某些链路则定义为危险链路。

传统的危险链路鉴别方法主要有:

1) 碰撞频数法<sup>[3]</sup>:统计某链路一段时间内发生的活动点碰撞数,当其超过某一特定值时,则将该链路视为危险链路。

2) 碰撞率法<sup>[4]</sup>:计算链路碰撞总数与相应的日平均活动流量的比值,若该比值超过某一阈值,则该链路视为危险链路。

3) 当量总碰撞数法<sup>[5]</sup>:通过将伤亡数加以考虑对危险链路进行鉴别。

4) 矩阵法<sup>[6]</sup>:以碰撞频数为横轴,碰撞率为纵轴分析坐标平面内的区域碰撞频数和碰撞率的

收稿日期: 2012-12-31; 修回日期: 2013-03-19

基金项目: 四川省科技厅科技支撑计划(2012GZ0061); 中央高校基本科研业务费(ZYGX2010J075)

作者简介: 唐雪飞(1965-),男,博士,副教授,主要从事网络计算、数据挖掘方面的研究。

特征。

5) 质量控制法<sup>[7]</sup>: 将碰撞数视为随机变量, 通过研究其服从的统计规律对危险链路进行鉴别。

通过上述研究发现, 链路线形设计的不合理是造成危险碰撞的主要原因<sup>[8]</sup>, 本文旨在提出一种仅基于链路线形数据的危险链路预测模型, 通过该模型可以对一段新加入交通网络的链路进行安全性评估及相关链路条件的分析, 进行相应的提前整治和碰撞预防工作。

### 1 模型的建立

危险碰撞的发生通常由链路线形的不合理造成, 所以本文从链路线形出发, 从链路线形数据入手建立模型。

#### 1.1 模型概述

1) 选定某一链路, 将链路分为若干小区段, 对每一段的链路线形采集数据(视链路线形数据为随机变量)。

2) 通过每一段链路的信息熵表征链路潜在的危险程度。

3) 将信息熵过高的链路视为危险链路。

从上述步骤可知, 该预测模型的核心在于对链路潜在危险函数的确定。

#### 1.2 链路潜在危险函数

本文以一维高斯函数作为链路危险函数, 理由如下:

1) 危险链路的危险程度最高, 与之临近的链路随距离的增大, 危险性逐渐降低。

2) 根据中心极限定理, 将一维高斯函数作为链路潜在危险函数是合理的, 严格的数学证明如下:

选取  $m$  个能表征链路危险程度的链路线形指标, 将其视为随机变量, 记为  $X_1, X_2, \dots, X_m$  (如平曲线半径、坡度、弯度等)。

令  $Y_i = T(x_i)$  表示链路指标  $i(i=1, 2, \dots, m)$  的值为  $x_i$  时所对应的平均碰撞发生数, 即函数  $T$  为链路危险转换函数, 记:

$$Y = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_m = \sum_{i=1}^m Y_i$$

表示各链路线形指标影响下某段链路总的碰撞发生数。

根据Lyapunov定理,  $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$  相互独立, 且期望  $E$  和方差  $D$  均存在:

$$E(Y_i) = \mu_i, D(Y_i) = \sigma_i^2 \neq 0 \quad i=1, 2, \dots, m$$

记:

$$B_m^2 = \sum_{i=1}^m \sigma_i^2$$

式中,  $\mu_i$  为期望;  $\sigma_i^2$  为方差;  $B_m$  为一中间变量。

若存在正数  $\delta > 0$ , 使得当  $m \rightarrow +\infty$  时, 有:

$$\frac{1}{B_m^{2+\delta}} \sum_{i=1}^m E\{|Y_i - \mu_i|^{2+\delta}\} \rightarrow 0$$

则随机变量:

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^m Y_i - E\left(\sum_{i=1}^m Y_i\right)}{D\left(\sum_{i=1}^m Y_i\right)} = \frac{\sum_{i=1}^m Y_i - \sum_{i=1}^m \mu_i}{B_m}$$

的分布函数  $F(Y)$  对于任意  $y$  满足:

$$\lim_{m \rightarrow +\infty} F_m(Y) = \lim_{m \rightarrow +\infty} P\left\{\frac{\sum_{i=1}^m Y_i - \sum_{i=1}^m \mu_i}{B_m} \leq y\right\} = \int_{-\infty}^y \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt$$

中心极限定理表明, 当  $m$  很大时, 随机变量:

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^m Y_i - \sum_{i=1}^m \mu_i}{B_m}$$

近似服从正太分布  $N(0,1)$ 。

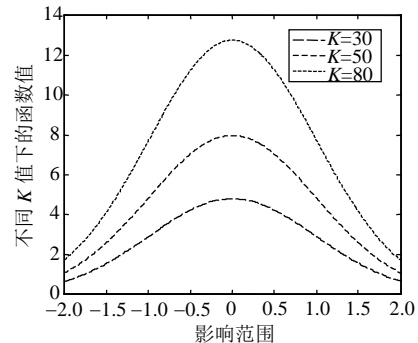


图1 取不同K值时的效果

但是, 如果所有异常点都以标准高斯函数作为链路危险函数, 就无法体现出不同异常链路之间的差异。故令链路危险函数:

$$D(x) = \frac{K}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} \quad -\infty < x < +\infty$$

式中,  $K = \alpha_1 Y_1 + \alpha_2 Y_2 + \dots + \alpha_m Y_m = \sum_{i=1}^m \alpha_i Y_i$ 。  $K$  越大表明异常链路附近的空受其影响越大,  $K$  取不同值时的效果如图1所示。  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$  表征各链路线形因素影响链路潜在危险程度的权重。由于  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$  的确定需要大量的统计数据, 为了简化起见, 认为各链路因素对链路危险度的贡献是相同

的, 即  $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_m = \frac{1}{m}$ 。所以,  $K = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Y_i$ 。

$K$  取30、50、80时的效果如图1所示。

### 1.3 基于信息熵的交通网络链路危险度的计算

信息熵是离散随机事件出现的概率, 用于对事件不确定性的度量, 故可用信息熵表征链路潜在的危险程度。根据Shannon的理论, 信息熵公式为:

$$H = -\sum_{i=1}^m p_i \lg p_i$$

式中,  $p_i$  为随机变量  $x_i$  出现的概率; 共有  $m$  个链路线形指标。

因本文将异常点附近的链路危险度视为连续性随机变量, 故采用连续随机变量时的信息熵为:

$$H = -\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \lg f(x) dx \quad (1)$$

式中,  $f(x)$  为随机变量  $x$  的概率密度。将链路危险

函数  $D(x) = \frac{K}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$  ( $-\infty < x < +\infty$ ) 带入式(1)可得:

$$H = K \lg \sqrt{2\pi e} \quad (2)$$

式(2)表明,  $K$ 和 $H$ 为线性关系, 即 $H$ 随 $K$ 的增加而线性递增。

### 1.4 危险碰撞与链路线形关系

导致危险碰撞发生的根本原因在于链路线形设计的不合理, 本节将从链路的长度、形状等方面分析探讨危险碰撞与链路线形的关系。

1) 长链路: 活动点在链路过长时往往会高速运动, 如果这时有突发情况发生, 活动点就会因为无法及时做出正确的操作, 导致危险碰撞。根据文献[9]得到长链路长度与链路危险程度之间的关系, 如图2所示。

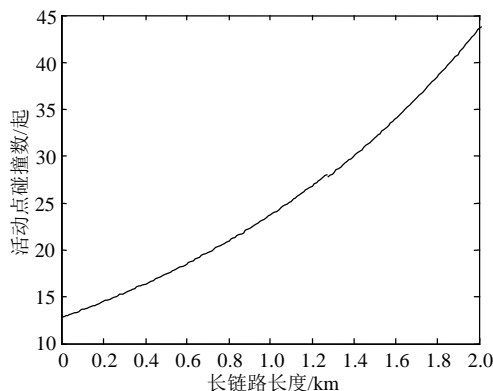


图2 长链路长度与危险碰撞数的关系

进行曲线拟合后的函数为:

$$y = 12.773 \times e^{0.618x} \quad (3)$$

2) 链路弯度: 在弯链路上, 由于活动点转弯时

有向心力的存在, 且当活动点质量和速度一定时, 弯链路半径越小向心力越大, 当向心力大于链路提供的最大静摩擦力时, 活动点就会失控而冲出弯链路, 导致危险碰撞的发生<sup>[9]</sup>, 如图3所示。

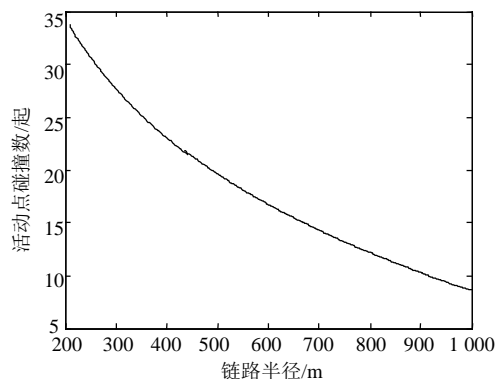


图3 链路半径与危险碰撞数的关系

进行曲线拟合后的函数为:

$$y = -15.876 \ln x + 118.3 \quad (4)$$

3) 链路纵坡度: 若链路纵坡度过大, 会导致活动点下坡速度较大, 尤其对于货车、客车等大型活动点, 因其质量较大, 由  $p = mv$  知动量会非常大, 不利于活动点的及时制动。危险碰撞与纵坡度关系<sup>[9]</sup>如图4所示。

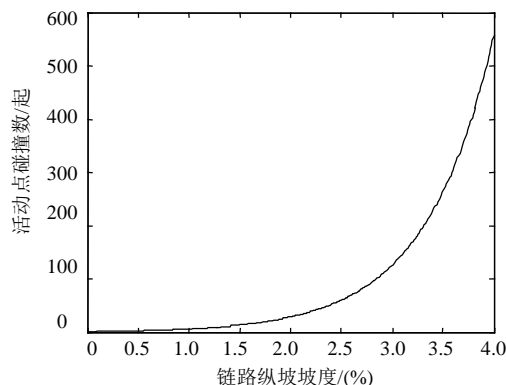


图4 链路纵坡度与危险碰撞数关系

进行曲线拟合后的函数为:

$$y = 1.5401 \times e^{1.4724x} \quad (5)$$

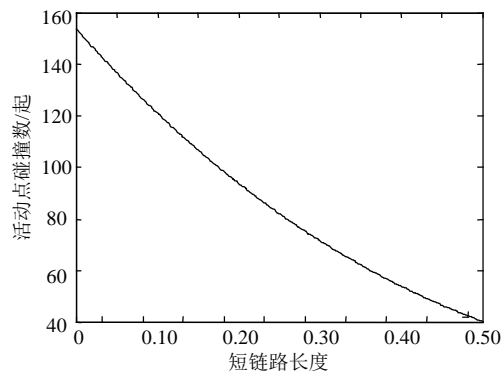


图5 短链路长度与危险碰撞数关系

4) 短链路: 若连接反向弯链路的短链路过短时, 活动点可能因为反应不及时, 没有足够的时间来调整方向, 从而冲出链路弯道, 造成较为严重的危险碰撞<sup>[9]</sup>, 如图5所示。进行曲线拟合后的函数为:

$$y = -79.971 \times x^3 + 299.53 \times x^2 - 356.45 \times x + 153.69 \quad (6)$$

## 2 性能分析

因为交通网络中的活动点危险碰撞对应于实际交通中的交通事故, 故本例验证中采用交通事故进行说明。

选取四川省自贡市檀木林—五星街路段大约 4 km 的交通链路, 据调研统计资料, 2003~2004 年期间发生的交通事故情况见表1所示, 立交桥—滨江路段发生一起特大交通事故。该起交通事故于2004年3月31日下午1点52分发生, 一辆公交车在转弯时掉入釜溪河中, 造成15人当场死亡, 39人受伤, 其中重伤5名的特大交通事故。

根据实地考察, 檀木林—五星街站链路具体构成见表2。

表1 2003~2004年檀木林—自来水厂链路危险碰撞情况

编号	链路名称	危险碰撞							
		一般		重大			特大		
		碰撞	伤	碰撞	伤	死亡	碰撞	伤	死亡
1	檀木林—第28中学	5	9	0	0	0	0	0	0
2	第28中学—四医院	8	10	1	2	2	0	0	0
3	四医院—立交桥	6	11	0	0	0	0	0	0
4	立交桥—滨江路	25	33	2	6	3	1	39	15
5	滨江路—假日酒店	33	27	3	4	3	0	0	0
6	假日酒店—同兴路	9	11	1	1	1	0	0	0
7	同兴路—一医院	6	5	0	0	0	0	0	0
8	一医院—五星街	7	6	1	2	1	0	0	0
9	五星街—自来水厂	3	2	1	0	2	0	0	0

表2 檀木林—自来水厂链路线形

编号	链路名称	链路线形					
		长直线/km	坡度/(%)	平曲线半径/km	坡度/(%)	短直线/km	坡度/(%)
1	檀木林—第28中学	0.7	1.2	—	—	—	—
2	第28中学—四医院	—	—	0.4	1.8	0.32	1.1
3	四医院—立交桥	—	—	—	—	0.26	1.4
4	立交桥—滨江路	1.2	3.2	0.36	2.4	—	—
5	滨江路—假日酒店	—	—	0.3	0	0.23	2.4
6	假日酒店—同兴路	0.8	0	—	—	—	—
7	同兴路—一医院	—	—	0.53	0	0.28	0.8
8	一医院—五星街	1.0	0	0.65	0	—	—
9	五星街—自来水厂	—	—	—	—	0.20	0

### 2.1 基于链路线形的危险碰撞黑点预测模型计算

将表2中数据带入式(2)~式(6)计算, 结果如图6和图7所示。

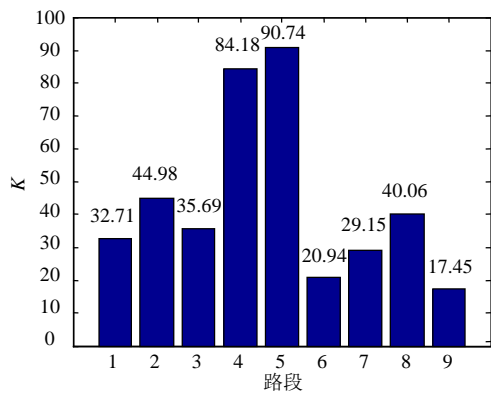


图6 不同路段下的K值

由图6和图7可以看出, 立交桥—滨江路路段和滨江路—假日酒店路段的 K 值与熵值明显高于其他

路段, 具有较高的危险程度, 即为交通网络危险链路, 与表1所示情况非常符合。

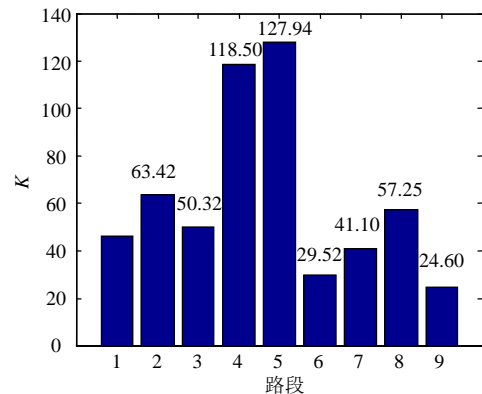


图7 不同路段下的熵值

### 2.2 当量总碰撞法<sup>[10]</sup>对2.1节结果的验证

由当量总碰撞法计算当量总碰撞数为:

$$LOSS = \alpha_1 D + \alpha_2 H + N \quad (7)$$

式中, LOSS 为当量总碰撞次数;  $D$  为碰撞损失人数;  $H$  为碰撞损伤人数;  $N$  为总碰撞次数;  $\alpha_1$  为损失碰撞的权重;  $\alpha_2$  为损伤碰撞的权重。

令  $\alpha_1 = 0.8$ ,  $\alpha_2 = 0.2$ , 将表1中链路碰撞历史数据带入式(7)计算, 结果如图8所示。

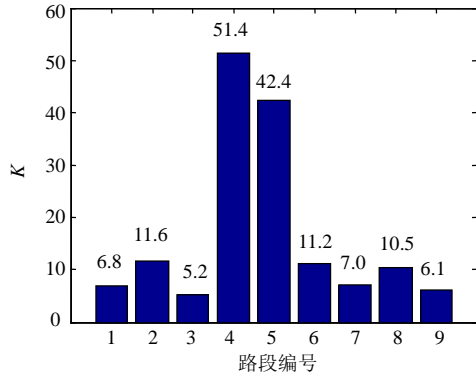


图8 不同路段的当量总碰撞数

图中根据一年的链路历史数据, 立交桥—滨江路路段和滨江路—假日酒店路段的当量总碰撞数远高于其他路段, 应为交通网络危险链路, 充分说明了基于链路线形的危险链路预测模型的有效性和可行性。

### 2.3 物理方法对危险链路的验证

运用基于链路线形的危险链路预测模型和当量总碰撞法均鉴别出立交桥—滨江路路段和滨江路—假日酒店路段为交通网络危险链路, 下面从物理学角度对上述两个危险链路进行验证。

#### 2.3.1 立交桥—滨江路路段

根据表2, 立交桥—滨江路路段由长1.2 km, 坡度3.2%的长链路衔接一段半径0.36 km, 坡度2.4%的弯链路构成, 如图9所示。

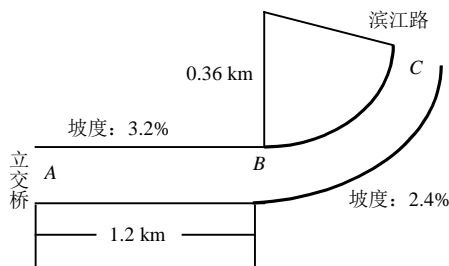


图9 立交桥—滨江路路段线形

图中,  $AB$  为一段长链路下坡路, 活动点从  $A$  点到达  $B$  点时具有较高的速率。由文献[11]知, 城市链路的最高设计时速为80 km, 假设一辆载有50人重达8吨的公交车活动点从  $A$  点到达  $B$  点时速率为60 km/h, 由向心力计算公式:

$$F = m \frac{V^2}{R} \quad (8)$$

将  $m=8\ 000\ \text{kg}$ ,  $R=0.36\ \text{km}$ ,  $V=60\ \text{km/h}$  代入式(8), 可得  $F=642\ 2\ \text{N}$ 。

根据文献[12], 最大静摩擦力为:

$$f = \mu N = \mu mg \quad (9)$$

其中, 潮湿光滑的沥青路面静摩擦系数  $\mu=0.12$ 。将  $\mu=0.12$ ,  $m=8\ 000\ \text{kg}$ ,  $g=9.8\ \text{m/s}^2$  代入式(9)可得  $f=7\ 840\ \text{N}$ 。

由于向心力  $F$  仅比最大静摩擦力  $f$  小1 418 N, 则当出现超速、冰雪等情况时, 由于活动点速率  $V$  的增加或者路面静摩擦系数  $\mu$  的减小, 将导致向心力  $F$  变大或者最大静摩擦力  $f$  变小。当向心力  $F$  大于最大静摩擦力  $f$  时, 车辆等活动点就会被甩出弯道。从上述计算分析可知, 立交桥—滨江路路段链路线形设计不合理, 易造成危险碰撞, 应为交通网络危险链路, 与2.1、2.2节结果吻合。

由式(8)和式(9), 适当增大弯链路半径  $R$ , 控制车辆等活动点速度  $V$  可减小向心力  $F$ ; 同时, 可增大路面静摩擦系数  $\mu$  而增大最大静摩擦力  $f$ 。当向心力  $F$  远小于最大静摩擦力  $f$  时, 就可避免类似危险碰撞。

#### 2.3.2 滨江路—假日酒店路段

根据表2, 滨江路—假日酒店路段由长0.23 km的短链路衔接一半径为0.3 km的反向弯链路构成, 如图10所示。

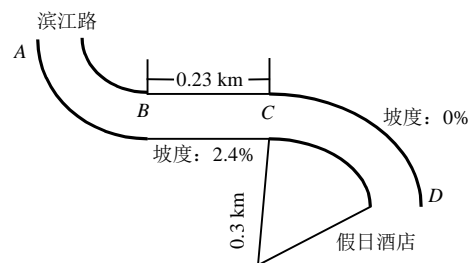


图10 滨江路—假日酒店路段链路线形

图中, 短链路  $BC$  为弯道  $AB$ 、 $CD$  的过渡段, 长约0.23 km。根据文献[13], 反向弯链路的过渡直线链路长度为:

$$L \geq 2V \quad (10)$$

其中  $V$  为行车速率。假设某链路的理论车速  $V=80\ \text{km/h}$ , 则  $L \geq 2V = 2 \times 80 = 160\ \text{m}$ , 即  $BC$  段长度不得低于160 m。图中  $BC=230\ \text{m}$  大于理论值160 m, 从物理学角度来看是安全合理的, 但根据表2, 2003~2004年滨江路—假日酒店路段发生的危险碰撞数明显高于其他路段, 不符合实际情况, 说明从物理学角度分析存在一定缺陷。

## 2.4 分析

通过对比图7和图8, 可以看出立交桥—滨江路路段和滨江路—假日酒店路段的熵值和当量总碰撞数远远高于其他路段, 说明两种方法均鉴别两路段为交通网络危险链路, 与表1所示基本一致。

而物理学方法对檀木林—自来水厂黑点路段的鉴别, 由于存在不恰当的简化分析, 导致滨江路—假日酒店路段视为安全链路, 做出了错误的判断。本文方法考虑了图10中BC段的长度、坡度以及CD段的半径, 更为全面、有效地对滨江路—假日酒店路段进行了鉴别。

## 3 结束语

本文从复杂网络的视角出发, 将道路视为链路, 链路交汇处视为节点, 以链路线形作为基础对危险链路进行分析及预测。相比于传统的危险链路鉴别模型, 由于其数据统计周期过长, 数据量较大, 造成在时间及人力上开销非常大; 并且, 传统方法只能在碰撞发生之后对危险链路进行排查。而本文提出的基于链路线形的危险链路预测模型克服了以上缺陷, 仅从链路构成上对危险链路进行预测及鉴别, 不仅可以在短时间内排查危险链路, 而且可以用于对新建链路合理性的评估及分析, 在碰撞发生之前就对链路进行相应的预防整治。

同时, 相比运用物理分析法排查危险链路, 基于链路线形的危险链路预测模型更全面地、准确地对危险链路进行了鉴别。

## 参 考 文 献

- [1] WATTS D J, STRONG S H. Collective dynamics of small-world networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.
- [2] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [3] 刘玉增, 张殿业. 基于遗传算法的危险碰撞黑点排查方法[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2005, 2(3): 1-7.  
LIU Yu-zeng, ZHANG Dian-ye. Arrangement distinguish method of traffic accident black spots based on the genetic algorithms[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2005, 2(3): 1-7.
- [4] 肖慎, 过秀成, 宋俊敏. 公路交通事故黑点诊断技术研究[J]. *公路交通科技*, 2003, 20(4): 95-97.  
XIAO Shen, GUO Xiu-cheng, SONG Jun-min. Study on road traffic accident black spot identification method[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2003, 20(4): 95-97.
- [5] 刘志强, 官镇, 蔡东. 道路交通事故多发点鉴别[J]. *交通运输工程学报*, 2003, 3(2): 120-123.  
LIU Zhi-qiang, GONG Zhen, CAI Dong. Identification for road accident-prone locations[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2003, 3(2): 120-123.
- [6] 刘谷, 廖志高, 马青娜. 基于单元法的故事多发路段的鉴别分析[J]. *交通科技*, 2010(3): 112-115.  
LIU Gu, LIAO Zhi-gao, MA Qing-na. Element method based discriminant analysis on the accident-prone sections [J]. *Transportation Science & Technology*, 2010(3): 112-115.
- [7] 廖志高, 柳本民, 郭忠印. 基于信息分配的道路黑点鉴别方法[J]. *中国公路学报*, 2007, 4(20): 123-126.  
LIAO Zhi-gao, LIU Ben-min, GUO Zhong-yin. Road black spot identification method based on information assignment [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2007, 4(20): 123-126.
- [8] 裴玉龙. 道路交通事故多发点质量控制鉴别法的改进[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, 1(38): 98-100.  
PEI Yu-long. Improvement in the quality control method to distinguish the black spot of the road[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, 1(38): 98-100.
- [9] 刘玉增. 危险碰撞黑点的智能排查及整治对策的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.  
LIU Yu-zeng. Study on the intelligence batch-check and countermeasures of traffic accidents black-spots[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [10] 方守恩, 郭忠印, 杨軫. 公路交通事故多发位置鉴别新方法[J]. *交通运输工程学报*, 2001, 1(1): 91-98.  
FANG Shou-en, GUO Zhong-yin, YANG Zhen. A new identification method for accident prone location on highway[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2001, 1(1): 91-98.
- [11] 北京市政设计研究院. 城市道路设计规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.  
Beijing Municipal Engineering Design Research Institute. City road design standard[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2006.
- [12] 孙应渝, 吴宗兴. 路面摩擦系数标准问题的研究[J]. *同济大学学报*, 1979(6): 131-139.  
SUN Ying-yu, WU Zong-xin. Study on criteria of skid resistance factors of pavement[J]. *Journal of Tongji University*, 1979(6): 131-139.
- [13] 中交第一公路勘察设计研究院. 公路路线设计规范 (JTGD20-2006)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.  
The First Highway Survey and Design Institute. Specification of the highway route design (JTGD20-2006) [M]. Beijing: China Communications Press, 2006.

编辑 张俊