

文章编号:1671-1637(2012)03-0120-07

## 交叉口交通冲突严重程度量化方法

刘淼淼, 鲁光泉, 王云鹏, 田大新

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

**摘要:**为提高交通冲突严重程度的判别精度,基于运动单元圆假设与视频检测技术,提出了交叉口两车交通冲突严重程度量化方法。利用视频处理程序与实地采集的视频图像提取运动单元运动学参数,并通过迭代方法进行了冲突检测与冲突时间判定。充分考虑车辆的制动性能,将非完全制动停车距离与瞬时车速的比值作为冲突严重程度判别临界值,以冲突时间与临界值为参数,建立了冲突严重程度量化值,并对其严重程度进行了量化与分级,以北京市某交叉路口为例进行了应用实例分析。分析结果表明:两运动单元驶入交叉口后,二者之间的冲突严重程度量化值由1.32增大为2.45,后又不断减小直至无交通冲突;随着冲突严重程度的增大,驾驶人会采取紧急制动措施使冲突严重程度减小,直至冲突消解。可见该方法可以方便地检测交通冲突,准确量化交叉口两运动单元之间的冲突严重程度。

**关键词:**交通工程;交叉口;交通冲突;圆假设;视频检测;冲突严重程度

**中图分类号:**U491.3

**文献标志码:**A

## Quantitative method of traffic conflict severity at intersection

LIU Miao-miao, LU Guang-quan, WANG Yun-peng, TIAN Da-xin

(School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In order to improve the precision in traffic conflict severity discrimination, a quantitative method for conflict severity at intersection was proposed based on the circle assumption of motor units and video detection technology. The moving parameters of motor units were obtained by using the video processing program and the real-time collected video images. Conflict detection and conflict time were determined by using iterative method. Considering the braking performance of vehicle, the critical value of conflict severity was obtained by the ratio of braking distance to instantaneous speed. The quantization value of conflict severity was established taking conflict time and critical value as parameters, and the severity of traffic conflict was quantified and classified. A certain intersection in Beijing was analyzed. Analysis result shows that the quantization values of conflict severity between two motor units increase from 1.32 to 2.45, and then decrease until no conflict exists. Driver would take emergency braking measures with the increasing of conflict severity, and then the conflict severity decreases until disappears. The quantitative result accords with the practical situation, and the method could be used in conflict detection and the severity quantification of traffic conflict conveniently. 3 tabs, 8 figs, 16 refs.

**Key words:** traffic engineering; intersection; traffic conflict; circle assumption; video detection;

收稿日期:2012-01-23

基金项目:国家自然科学基金项目(50808008);国家863计划项目(2011AA110403);高等学校博士学科点专项科研基金项目(200800061009)

作者简介:刘淼淼(1986-),女,山东潍坊人,北京航空航天大学工学博士研究生,从事道路交通环境与安全研究。

导师简介:鲁光泉(1974-),男,云南弥渡人,北京航空航天大学副教授,工学博士。

conflict severity

**Author resumes:** LIU Miao-miao(1986-), female, doctoral student, +86-10-82316330, liumiao-0605@ae.buaa.edu.cn; LU Guang-quan(1974-), male, associate professor, PhD, +86-10-82316330, lugq@buaa.edu.cn.

## 0 引言

目前,国外对交通冲突技术的研究主要集中在工程应用方面,如利用该技术对交叉口或路段进行地点安全研究<sup>[1]</sup>。交通冲突技术自20世纪80年代引入中国后,得到了快速发展,研究成果主要体现在交通冲突类型的划分、交通冲突在安全评价中的应用<sup>[2-4]</sup>、交通冲突分析技术的标准化<sup>[5]</sup>等。纵观国内外的研究现状,交通冲突技术作为一项应用技术,在交通安全领域的应用较为普遍,但就中国公路平交口这一事故多发点而言,相关基础理论问题尚待解决与完善,如交叉口冲突严重程度界定问题等。

交通冲突严重程度是指交通冲突导致交通事故发生的可能性程度,是交通冲突判别的重要研究内容。研究表明,严重冲突与事故之间有着良好的相关性<sup>[6-7]</sup>,能够很好地表征道路交通安全状况。冲突严重程度可由单位时间事故发生概率的数学期望表示<sup>[3]</sup>,也可以由冲突本身表现出来的特征来界定。袁黎等通过对平面交叉口交通条件及交通冲突数据的分析引入影响系数概念,分析了冲突的严重程度<sup>[8]</sup>;王俊骅等通过界定非交通冲突与交通冲突、轻微冲突与严重冲突减速度的临界值,设定临界距离对比值判定冲突严重程度<sup>[9]</sup>。目前大多数研究中冲突严重程度的判别仍采用定性分析的方法,个人主观判断难免影响最终结果<sup>[10-11]</sup>。

随着视频处理技术在智能交通领域的广泛应用,其在交通冲突技术领域研究也有所进展:Hu等利用3D模型进行车辆轨迹跟踪,并利用神经网络模型识别车辆的行为模式,进而对交通事故进行预测<sup>[12]</sup>;Atev等利用视频系统对交叉口进行实时监控,并预测潜在冲突<sup>[13]</sup>;Saunier等较早提出基于视频的交叉口交通冲突预测方法,根据视频研究交叉路口的车辆运行轨迹及概率分布,进行交通安全自动分析<sup>[14]</sup>;张方方提出基于视频的平面交叉口机动车交通冲突检测技术,将计算机视觉与交通冲突技术结合起来,开创了交通冲突技术研究的新路径<sup>[15]</sup>。以上研究在利用视频技术进行冲突研究方面取得了一些成果,能够快速准确地为交通冲突分析提供交通参与者的轨迹、速度等运动参数信息,因

此,本文也利用视频检测技术进行数据提取。

在交叉口冲突严重程度量化研究中,Lu等人将运动单元简化为质点<sup>[6]</sup>,在很大程度上简化了模型与计算,但与实际情况差距较大,量化结果也存在较大误差。

为贴合实际,减小误差,本文将交叉口运动单元简化为以质心为圆心的圆,通过视频图像处理、冲突位置检测、冲突时间及临界值判定、冲突严重程度量化及分级,建立了交叉口交通冲突严重程度量化方法。与质点假设的不同在于,圆假设能反映车辆外形对冲突严重程度的影响,在进行冲突临界值判定时充分考虑了车辆的制动性能,因此,建立的模型和结果分析都更为准确。

## 1 基于圆假设的冲突检测

### 1.1 圆假设模型

设初始时刻交叉口运动单元*i*质心的运动参数状态向量 $\mathbf{A}_i$ 为

$$\mathbf{A}_i = (x_i, y_i, v_i, v'_i, a_i, a'_i)^T$$

式中: $x_i, y_i$ 为质心坐标; $v_i, v'_i$ 分别为*x*、*y*方向的速度; $a_i, a'_i$ 分别为*x*、*y*方向的加速度。

圆假设冲突检测模型见图1,1~4分别为4个沿不同方向驶入交叉口的运动单元。将运动单元简化为以质心为圆心的圆,且运动单元是以当前检测

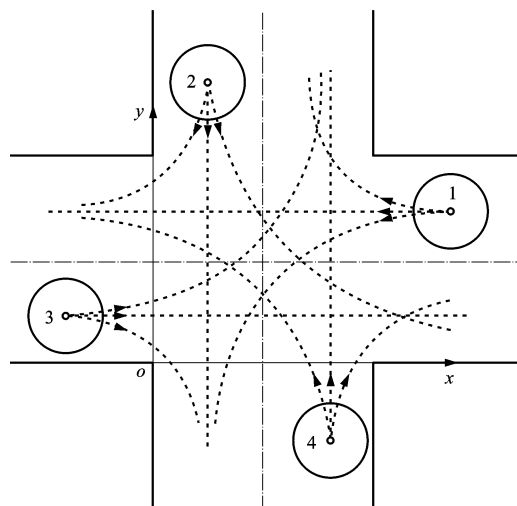


图1 检测模型

Fig. 1 Detection model

到的状态继续行驶,运动单元  $i$  在  $t$  时刻的质心坐标  $(x_u, y_u)$  为

$$\begin{cases} x_u = x_i + v_i t + \frac{1}{2} a_i t^2 \\ y_u = y_i + v'_i t + \frac{1}{2} a'_i t^2 \end{cases} \quad (1)$$

## 1.2 冲突检测

平面交叉口交通冲突是指一定时间间隔内,2条或多条道路使用者相继驶入交叉口,此时如果各使用者均不改变其运动状态就会发生碰撞,若任一使用者通过转换方向、改变速度等措施改变运动状态以避免事故发生,这时就发生了一个交通冲突<sup>[5]</sup>。由此可知:若两运动单元之间存在交通冲突,则两运动单元以当前运动状态继续运行, $t$ 时刻会发生碰撞,即冲突时间  $T$  的值等于  $t$ ,此时,基于圆假设的两运动单元  $i, j$  的质心间距  $d_{ij}$  满足

$$d_{ij} = \sqrt{(x_u - x_j)^2 + (y_u - y_j)^2} \leq r_i + r_j \quad (2)$$

式中: $r_i, r_j$  分别为运动单元  $i, j$  的半径。

## 1.3 冲突时间判定

本文通过迭代的方法判定冲突时间。以检测到的当前状态,选取足够小的时间间隔  $\epsilon$ ,本文  $\epsilon$  取  $0.01 \text{ s}$ ,由式(1)、(2),依次检测  $\{\epsilon, 2\epsilon, 3\epsilon, \dots, n\epsilon\}$  时刻后两运动单元质心的位置和间距  $d_{ij}$ 。 $n$  为正整数,数值根据交叉口的大小选取,交叉口越大,通过路口的时间就越长, $n$  要取较大的值,反之,取较小的值。本文研究对象为小型交叉口, $n$  取 500。若检测得  $\epsilon \sim n\epsilon$  中的某时刻  $k\epsilon$  ( $k$  为正整数,且  $1 \leq k \leq n$ ) 后存在  $d_{ij} \leq r_i + r_j$ ,则冲突时间  $T$  为  $k\epsilon$ ,若在  $\epsilon \sim n\epsilon$  时刻中,始终有  $d_{ij} > r_i + r_j$ ,则  $T > n\epsilon = 5 \text{ s}$ 。冲突时间判定流程见图 2。由于经过  $5 \text{ s}$  车辆大多能驶离小型交叉口,因此,本文认为:若得知  $T > 5 \text{ s}$ ,则无交通冲突。

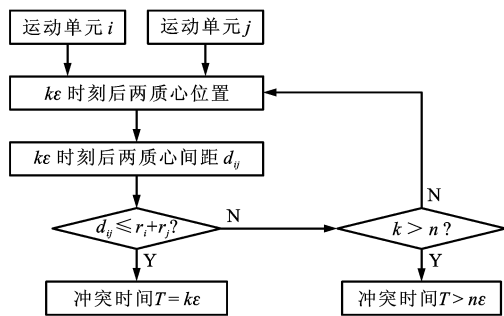


图 2 判定流程

Fig. 2 Determining process

## 2 冲突严重程度量化方法

目前,主要基于冲突距离与冲突速度进行冲突

严重性判别,冲突距离越小或者冲突速度越大,冲突就越严重。但这种判定方法存在一定缺陷,即若两车发生冲突时距离较近而速度较小,或者速度较大而距离较远时,不能视为发生了严重冲突,因此,采用与距离、速度、加速度相关的冲突时间判别冲突严重程度较为合理。如果两车存在冲突,冲突时间  $T$  小于某一临界值为严重冲突,否则为非严重冲突。美国公路研究所提出的冲突严重程度判别临界值为  $1.0 \text{ s}$ ,瑞典的为  $1.5 \text{ s}$ <sup>[13]</sup>。据研究,衡量冲突严重程度的车辆距事故发生的时间,即冲突时间,还与车辆制动性能有密切的关系,制动性能又涉及到车辆的速度、减速度,因此,本文在进行临界值的确定时,充分考虑了车辆的制动性能。

非完全制动停车距离是指从制动生效到停车的距离。两车发生交通冲突时,若车辆的非完全制动距离  $D$  较小,且瞬时速度  $V$  较大,冲突就较严重,因此,取  $P$  为冲突严重程度判别的临界值

$$P = D/V$$

本文以小型车为研究对象,根据中国车辆设计标准(GB 7258—87)和交通运输部公路科学研究院于 1978 年制定的《机动车制定检验规范》,取小型车的最大制动减速度  $J_m$  为  $7.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,制动增长时间  $t_1$  为  $0.24 \text{ s}$ ,非完全制动停车距离  $D$  为

$$D = Vt_1/2 + V^2/2J_m = 0.12V + 0.07V^2 \quad (3)$$

冲突严重程度判别的临界值  $P$  为

$$P = D/V = 0.12 + 0.07V \quad (4)$$

由于  $V$  越大, $P$  越大,即冲突越趋于严重,因此,临界值中的  $V$  取两冲突单元速度较大值。

两运动单元存在冲突,若  $T > P$ ,则为非严重冲突,若  $T \leq P$ ,则为严重冲突。设冲突严重程度的量化值为  $Q$ ,令

$$Q = P/T \quad (5)$$

由以上分析可知

$$\begin{cases} 0 < Q < 1 & \text{非严重冲突} \\ Q \geq 1 & \text{严重冲突} \end{cases} \quad (6)$$

$Q$  值越大,表明冲突越严重。当  $T > 5 \text{ s}$  时,认为无交通冲突,此时可将  $Q$  视为 0。

综上所述,本文将冲突严重程度分为 3 个等级,分别为无冲突、非严重冲突、严重冲突。冲突严重程度的分级标准见表 1。

## 3 计算结果分析

### 3.1 数据获取

视频图像处理是本研究数据获取的基础,因此,

表1 冲突严重程度分级

Tab. 1 Classification of traffic conflict severity

冲突严重程度等级	$T/s$	$Q$
无冲突	$>5$	0
非严重冲突	$\leq 5$	$<1$
严重冲突		$\geq 1$

构建了便携式道路交叉口图像采集系统,见图3。该系统主要设备有激光测距仪、钢卷尺、皮尺、三角架、摄像头、图像采集卡、笔记本电脑等。以北京航空航天大学校园中心交叉口为研究对象,进行视频采集。该交叉口无限速、缓行标志,车辆通过交叉口时速度较快。交叉口东北方向有建筑物与树木,使得驾驶人或行人由北进口、东进口进入该交叉口时,冲突方向的视线被遮挡,如不及时采取避险措施,容易造成交通事故。交叉口与其几何参数分别见图4、5。



图3 图像采集系统

Fig. 3 Image acquisition system

本文利用可视化软件开发工具 VC6.0 与基于柏克利软件分配 (Berkly Software Distribution, BSD) 许可证授权发行的开源跨平台计算机视觉库 OpenCV 处理采集到的视频,通过 OpenCV 内置的算法进行前景提取,完成团块(车辆)检测、团块跟踪、轨迹生成以及轨迹后处理,得到运动单元运动学



图4 测试交叉口

Fig. 4 Tested intersection

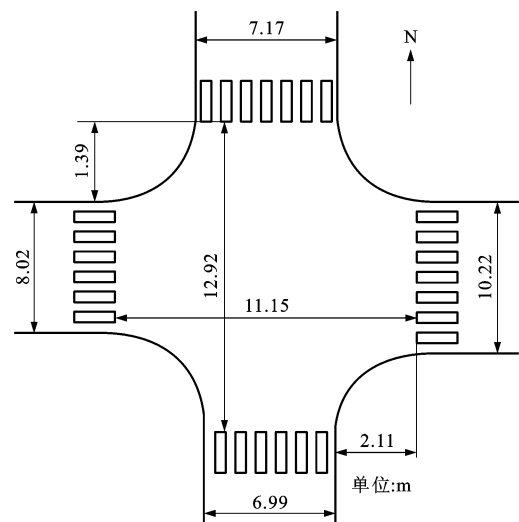


图5 几何参数

Fig. 5 Geometry parameters

参数。为确保数据的准确性与稳定性,本文采用基于扩展后的 Kalman 滤波算法<sup>[10]</sup>处理运动学参数,为冲突严重程度的量化分析提供有效的数据基础。视频处理流程见图6。

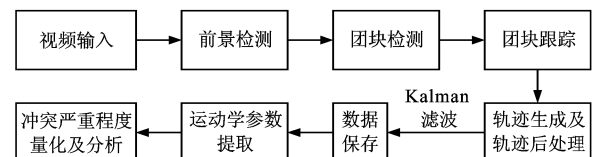


图6 视频处理流程

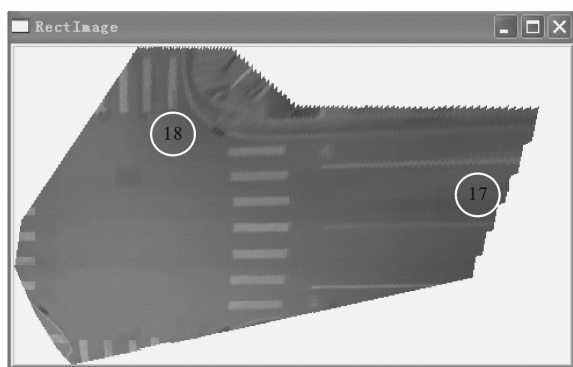
Fig. 6 Video processing flow

### 3.2 结果分析

本文利用上述圆假设的交通冲突严重程度量化模型进行试验。交叉口运动单元标识(运动车辆17、18)及俯视投影见图7。第205帧检测到运动单元17、18,假定两车半径均为1.75 m。其位置、速度与加速度参数分别为 $(x_{17}, y_{17}, v_{17}, v'_{17}, a_{17}, a'_{17})$ 、 $(x_{18},$



(a) 运动单元



(b) 运动单元俯视投影

图 7 运动单元及其俯视投影

Fig. 7 Motor units and their overlook projections

$y_{18}, v_{18}, v'_{18}, a_{18}, a'_{18}$ ), 视频检测帧率为  $25 \text{ 帧} \cdot \text{s}^{-1}$ , 试验共提取第 206~235 帧, 共 30 帧数据。运动单元 17、18 的运动参数分别见表 2、3。

根据上述方法与视频处理获得的数据可计算出:第 206~215 帧冲突时间  $T$ (单位为 s)的序列为  $\{0.60, 0.55, 0.42, 0.36, 0.22, 0.23, 0.25, 0.27, 0.35, 0.37\}$ ;由式(4)及检测到的速度可知,冲突严重程度判别临界值  $P$  的序列为  $\{0.79, 0.69, 0.59, 0.51, 0.54, 0.37, 0.31, 0.27, 0.27, 0.25\}$ ;冲突严重程度量化值  $Q$  的序列为  $\{1.32, 1.25, 1.40, 1.42, 2.45, 1.60, 1.24, 1.00, 0.77, 0.68\}$ 。第 216~235 帧冲突时间均大于 5 s,因此,  $Q$  为 0。 $Q$  与运动单元 17 减速度  $J$  的关系曲线见图 8。

两运动单元间的严重程度量化值  $Q$  由 1.32 增大为 2.45,后又不断减小直至第 215 帧后  $Q$  为 0,可以判断运动单元 17、18 之间的冲突严重程度先变大后变小,再到无交通冲突。

在交叉口处,驾驶人必须选择自己的行车方向与路线,这种选择的存在使交叉口成为一个潜在交通冲突的区域,车辆通过交叉口时可能产生碰撞。但从时间角度看,若能适时调整行驶速度、方向或路

表 2 运动单元 17 的运动参数

Tab. 2 Moving parameters of motor unit 17

帧序	运动参数					
	$x_{17}/$ m	$y_{17}/$ m	$v_{17}/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$v'_{17}/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$a_{17}/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	$a'_{17}/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
206	6.02	6.40	1.08	9.58	1.87	2.16
207	5.96	6.80	0.91	9.81	1.35	2.24
208	5.98	7.29	1.05	10.32	1.25	2.72
209	6.14	7.45	1.65	9.57	1.84	3.28
210	6.12	7.78	1.56	9.51	5.32	3.98
211	6.14	8.16	1.62	9.63	5.07	3.98
212	6.25	8.44	1.98	9.34	5.34	3.31
213	6.22	8.77	1.78	9.29	4.64	3.06
214	6.22	9.21	1.70	9.60	4.21	2.43
215	6.23	9.72	1.64	10.14	3.84	3.15
216	6.22	10.06	1.51	10.03	3.40	2.78
217	6.15	10.45	1.20	10.09	2.71	2.69
218	6.22	10.75	1.38	9.84	2.81	2.16
219	6.29	11.14	1.54	9.92	2.88	2.14
220	6.27	11.52	1.36	9.93	2.45	2.05
221	6.19	11.99	1.02	10.26	1.85	2.39
222	6.27	12.25	1.22	9.84	2.01	1.70
223	6.32	12.52	1.29	9.50	2.00	1.16
224	6.27	12.97	1.03	9.78	1.57	1.46
225	6.28	13.39	0.99	9.94	1.44	1.58
226	6.28	14.01	0.93	10.67	1.30	2.38
227	6.18	14.52	0.56	11.00	0.81	2.66
228	6.11	14.98	0.33	11.16	0.51	2.72
229	6.25	14.89	0.72	9.71	0.92	1.99
230	6.22	15.36	0.59	9.97	0.74	1.23
231	6.15	15.89	0.36	10.40	0.46	2.63
232	6.22	16.10	0.53	9.89	0.62	2.04
233	6.22	16.70	0.48	10.47	0.54	1.37
234	6.14	17.10	0.26	10.49	0.31	1.33
235	6.04	17.67	0.04	10.93	0.02	1.90

线,及时采取合适的避险行为,便可以化险为夷,使冲突与碰撞得以避免<sup>[16]</sup>。通过图 8 的运动单元减速度变化曲线可知,驾驶人在发现冲突严重,可能发生碰撞后,采取紧急制动措施,从而使冲突严重程度由大变直直至冲突解除。分析表明:本文的量化结果与实际情况吻合,具有一定的实用性。利用该方法可以方便地检测交通冲突,并量化交叉口两运动单元之间的冲突严重程度。

表 3 运动单元 18 的运动参数  
Tab. 3 Moving parameters of motor unit 18

帧序	运动参数					
	$x_{18}/$ m	$y_{18}/$ m	$v_{18}/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$v'_{18}/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$a_{18}/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	$a'_{18}/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
206	-2.51	5.91	1.25	0.02	1.92	1.95
207	-2.76	6.10	-1.58	1.70	1.60	1.74
208	-2.81	6.16	-1.24	1.39	1.62	1.76
209	-2.77	6.15	-0.46	0.79	1.80	1.88
210	-2.70	6.15	0.18	0.40	2.00	1.95
211	-2.46	6.01	1.46	0.52	1.72	2.43
212	-2.41	5.98	1.67	0.79	1.67	2.44
213	-2.37	5.97	1.83	0.95	1.55	1.33
214	-2.06	5.81	2.94	1.64	1.65	1.90
215	-2.00	5.84	3.01	1.54	1.31	1.35
216	-1.95	5.85	3.03	1.52	0.89	1.94
217	-1.85	5.84	3.23	1.55	0.77	1.60
218	-1.58	5.70	4.00	2.04	0.59	1.04
219	-1.46	5.66	4.11	2.14	0.27	0.80
220	-1.44	5.66	3.88	2.04	0.40	0.26
221	-1.42	5.67	3.65	1.90	0.60	0.68
222	-1.28	5.62	3.82	1.98	0.51	0.51
223	-1.40	5.71	3.08	1.56	0.99	0.55
224	-1.44	5.76	2.64	1.30	0.07	0.94
225	-1.28	5.70	2.93	1.44	0.32	0.96
226	-1.20	5.73	2.95	1.24	1.15	0.50
227	-1.18	5.78	2.71	1.00	1.64	1.01
228	-1.15	5.80	2.55	0.86	1.27	0.71
229	-1.29	6.00	1.85	0.17	1.19	0.68
230	-1.37	6.13	1.41	0.26	1.56	0.09
231	-1.11	5.98	2.08	0.27	0.38	0.75
232	-1.52	6.20	0.58	0.42	1.55	0.13
233	-1.72	6.31	-0.12	0.71	1.36	0.48
234	-1.03	6.13	1.91	0.12	1.08	0.23
235	-0.73	6.09	2.62	0.04	0.84	0.41

根据表 1 的冲突严重程度分级标准:在第 206~213 帧中  $Q \geq 1$ ,为严重冲突;第 214、215 帧中  $Q < 1$ ,为非严重冲突;在第 216~235 帧中, $Q$  为 0,为无交通冲突。

4 结 语

本文基于运动单元圆假设,利用视频检测技术获取车辆运动学参数,采用迭代方法判定交通冲突与冲突时间,根据制动特性与速度获取冲突严重程

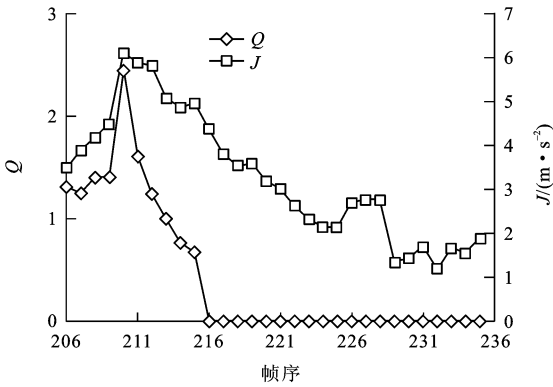


图 8  $Q$  与  $J$  变化曲线

Fig. 8 Changing curves of  $Q$  and  $J$

度判别临界值,进而确定严重程度量化值,实现交叉口交通冲突严重程度的量化与分级。实例应用表明本文方法能方便、准确地量化冲突严重程度,具有一定的实用性。同时,该方法的应用还能为进一步道路交叉口安全评价、事故预测、路口设计等提供依据与参考。本研究目前存在的主要问题是视频检测与运动跟踪的精度有待提高,同时采用圆来近似运动单元,虽然简化了运算,仍存在一定误差,有待进一步对模型进行修正。

参 考 文 献 :

References :

[1] 唐阳山,李 江,田育耕,等.交通冲突量的混沌预测[J]. 吉林大学学报:工学版,2005,35(6):646-648.  
TANG Yang-shan, LI Jiang, TIAN Yu-geng, et al. Chaos forecast for traffic conflict flow[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2005, 35(6): 646-648. (in Chinese)

[2] CHIN H C, QUEK S T. Measurement of traffic conflicts[J]. Safety Science, 1997, 26(3): 169-185.

[3] 张 苏.中国交通冲突技术的研究[D].成都:西南交通大学,1997.  
ZHANG Su. A study of Chinese traffic conflict technique[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1997. (in Chinese)

[4] TIWARI G, MOHAN D, FAZIO J. Conflict analysis for prediction of fatal crash locations in mixed traffic streams[J]. Accident Analysis and Prevention, 1998, 30(2): 207-215.

[5] 周 娇,陈学武.城市道路交叉口机非冲突概率研究[J]. 交通标准化,2011(5):75-78.  
ZHOU Jiao, CHEN Xue-wu. Research on the probability of vehicle and non-vehicle collision at urban road intersection[J]. Transport Standardization, 2011(5): 75-78. (in Chinese)

[6] LU Guang-quan, LIU Miao-miao, WANG Yun-peng, et al. Quantifying the severity of traffic conflict by assuming moving elements as points in intersection[C]//ASCE. The 2011 International Conference of Chinese Transportation Profes-

- sionals. Nanjing: ASCE, 2011: 893-900.
- [7] 李 芳, 吴 芳. 基于交叉口冲突技术的交叉口安全评价[J]. 交通科技与经济, 2011(5): 64-66.  
LI Fang, WU Fang. Evaluation of traffic safety at intersections based on traffic conflict technique[J]. Technology and Economy in Areas of Communications, 2011(5): 64-66. (in Chinese)
- [8] 袁 黎, 王文卿, 项乔君, 等. 公路平面交叉口交通冲突分析模型研究[J]. 公路, 2009(2): 105-110.  
YUAN Li, WANG Wen-qing, XIANG Qiao-jun, et al. A study on analysis model of highway intersections based on traffic conflict techniques[J]. Highway, 2009(2): 105-110. (in Chinese)
- [9] 王俊骅, 张方方, 张兰芳. 基于 OpenCV 和 Halcon 的交通冲突视频自动检测及数据处理[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(2): 238-244.  
WANG Jun-hua, ZHANG Fang-fang, ZHANG Lan-fang. Halcon and OpenCV-based traffic automatic conflicting detecting method and data transaction[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(2): 238-244. (in Chinese)
- [10] 张 鑫. 交通冲突技术相关问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.  
ZHANG Xin. Research on the related problems of traffic conflict technology[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2005. (in Chinese)
- [11] 丛 颖. 公路平面交叉口交通冲突分类及严重性划分[D]. 南京: 东南大学, 2008.  
CONG Ying. Detection and classification of traffic conflict at intersections and distinguishing of conflict severity[D]. Nanjing: Southeast University, 2008. (in Chinese)
- [12] HU Wei-ming, XIAO Xue-juan, XIE Dan, et al. Traffic accident prediction using vehicle tracking and trajectory analysis[C]// IEEE. Proceedings of Intelligent Transportation Systems. Shanghai: IEEE, 2003: 220-225.
- [13] ATEV S, ARUMUGAM H, MASOUD O, et al. A vision-based approach to collision prediction at traffic intersections[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2005, 6(4): 416-423.
- [14] SAUNIER N, SAYED T, LIM C. Probabilistic collision prediction for vision-based automated road safety analysis[C]// IEEE. Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. Seattle: IEEE, 2007: 872-878.
- [15] 张方方. 基于视频的平面交叉口机动车交通冲突检测技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.  
ZHANG Fang-fang. Study on a computer vision system for detecting traffic conflict between vehicles at intersections[D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)
- [16] 胡 佳. 交叉口汽车冲突及避撞方式有效性分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.  
HU Jia. Analysis on vehicles collision and effectiveness of crash avoidance manner at road intersections[D]. Changsha: Hunan University, 2005. (in Chinese)
- (上接第 119 页)
- GENG Yan-bin, YU Lei, WU Xu, et al. Signal-processing-based ITS data compression techniques and applications[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(11): 107-113. (in Chinese)
- [10] CANDES E J, ROMBERG J, TAO T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 489-509.
- [11] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [12] CANDES E J, WAKIN M B. An introduction to compressive sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 21-30.
- [13] 金 坚, 谷源涛, 梅顺良. 压缩采样技术及其应用[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(2): 470-475.  
JIN Jian, GU Yuan-tao, MEI Shun-liang. An introduction to compressive sampling and its applications[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010, 32(2): 470-475. (in Chinese)
- [14] RAUHUT H, SCHNASS K, VAN DERGHEYNST P. Compressed sensing and redundant dictionaries[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(5): 2210-2219.
- [15] CANDES E J, ELDAR Y C, NEEDLELL D, et al. Compressed sensing with coherent and redundant dictionaries[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2011, 31(1): 59-73.
- [16] AHARON M, ELAD M, BRUCKSTEIN A. K-SVD: an algorithm for designing overcomplete dictionaries for sparse representation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(11): 4311-4322.
- [17] 徐 鹏. 信号的稀疏分解及其在脑电信号处理中的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.  
XU Peng. Study on sparse decomposition of signal and its application in EEG processing[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006. (in Chinese)
- [18] TROPP J A, GILBERT A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(12): 4655-4666.