

基于行驶车速的车辆防撞时间预警算法

刘庆华^{1,2}, 邱修林¹, 谢礼猛¹, 王骏骅², 方守恩^{2*}

(1. 江苏科技大学计算机科学与工程学院, 镇江 212013; 2. 同济大学交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要: 针对一般车辆碰撞时间 (time to collision, TTC) 算法预警阈值固定造成车辆低速行驶中出现预警过早及高速行驶出现预警不及时的问题, 该文提出一种基于行驶车速的车辆防撞时间预警方法。行驶车辆通过车载设备实时获取自车与他车的状态信息, 根据车辆状态信息建立高斯平面坐标系获取车辆位置坐标, 对车辆可能发生的碰撞进行分类处理, 依据车辆行驶速度设定相应的安全防撞时间, 然后将车辆发生碰撞需要的时间与安全防撞时间进行比较, 存在碰撞危险则通过预警显示提醒驾驶员。试验结果表明: 该方法预警准确率达 88.89%, 而一般 TTC 固定阈值方法则预警过早率达 81.48%, 预警过晚率达 70.37%, 故该方法对进行车辆危险预警更有效, 更符合实际车辆防撞情形, 提高了车辆行驶的安全性, 可为车辆的及时预警提供参考。

关键词: 车辆; 交通; 安全; 防撞预警; 碰撞时间 (TTC)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.013

中图分类号: U467.14

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-12-0099-08

刘庆华, 邱修林, 谢礼猛, 王骏骅, 方守恩. 基于行驶车速的车辆防撞时间预警算法[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 99-106. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.013 http://www.tcsae.org

Liu Qinghua, Qiu Xiulin, Xie Limeng, Wang Junhua, Fang Shouen. Anti-collision warning time algorithm based on driving speed of vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(12): 99-106. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.013 http://www.tcsae.org

0 引言

随着汽车数量的剧增, 导致交通拥堵、交通事故频发及交通环境恶化等问题, 威胁着人的生命安全和财产损失。每年中国有超过 10 万人因交通事故致死, 造成的损失达数百亿元, 车辆间碰撞事故占到我国道路交通事故总量的 2/3 以上^[1]。如何减少交通死亡人数和造成的经济损失成了重要的课题, 关于车辆防撞预警系统的研究就应运而生。预警系统集成通信及信息处理等先进技术, 通过车载设备间的互联可实时获取道路和车辆状态信息, 进行车辆防撞预警算法处理, 出现危险及时提醒驾驶员采取措施, 对于保障交通安全行驶及改善交通环境有着深远的影响。

车辆防撞系统对其预警算法有很高要求, 算法的准确性与实时性是研究的重点^[2]。近年来国内外对车辆防撞预警算法的研究取得了一些成果, 主要分为安全时间算法和安全距离算法。安全时间算法主要以距离碰撞时间为研究对象, 如日本东京农工大学的 TTC 模型^[3]。安全距离算法主要是基于车辆的运动学关系确定安全车距, 如 Mazda 制动模型及 Honda 模型等^[4-6]。Benamar 等提出

基于预定的 TTC (time to collision) 阈值确定所需的安全距离模型^[7]。于广鹏等提出基于纵向避撞时间的纵向碰撞预警/避撞算法^[4]。裴晓飞等通过对避撞时间倒数 (TTC⁻¹) 的研究建立危险系数 ϵ 的分级预警与主动制动安全距离模型^[8]。王建强等通过真实道路试验数据, 提出适应驾驶员特性的避撞时间 TTC 的报警算法^[9]。早期预警系统算法为车辆提供预警框架, 并设定默认距离碰撞时间 (TTC) 的预警阈值, 当预测的碰撞时间达到设定的阈值时, 则给驾驶员和车辆提供安全警报信息^[10]。实中车辆运行状态及道路环境各不相同, 若始终以默认的 TTC 预警阈值来衡量是否安全, 预警结果将可能不准确。例如, 若两车低速行驶, 即使距离较近也不存在碰撞危险, 不需要过早预警; 若两车高速行驶, 如果阈值设定不合适容易造成预警不及时, 从而发生碰撞。

针对 TTC 预警阈值固定这个缺点, 本文提出一种基于车辆行驶速度的安全防撞时间预警方法。该算法依据车辆不同的行驶速度设定不同的安全防撞时间, 通过与车辆发生碰撞需要的时间比较进行危险预警。

1 车辆防撞算法模型

图 1 为车辆防撞预警处理过程, 首先车辆通过车载设备实时获取自车与他车的经纬度、车速及航向角信息, 根据经纬度转化的高斯平面坐标系获取车辆位置坐标, 依据车辆坐标及航向角对可能发生的碰撞进行分类, 对分类后的直线碰撞和侧面碰撞分别进行算法处理。根据车辆的行驶速度确定不同的安全防撞时间, 然后安全防撞时间与车辆发生碰撞需要的时间进行比较, 存在碰撞危险则进行预警显示。

收稿日期: 2016-12-28 修订日期: 2017-05-31

基金项目: 国家 863 计划项目 (2013AA12A206)

作者简介: 刘庆华, 男, 同济大学博士后, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为智能交通与道路安全。镇江 江苏科技大学计算机科学与工程学院, 212013. Email: giant_liu@163.com

*通信作者: 方守恩, 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为道路交通安全、道路规划与计算机辅助设计等。上海 同济大学交通运输工程学院, 201804. Email: fangsek@tongji.edu.cn

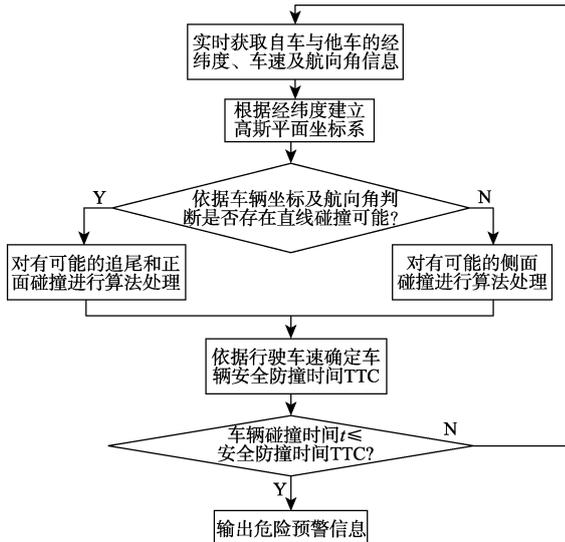


图1 车辆防撞预警处理流程图

Fig.1 Process flowchart of vehicle anti-collision warning

1.1 建立高斯平面坐标系

车载设备通常接收的位置信息是 WGS-84 坐标 (经纬度形式), 进行车辆之间相对距离计算及建立车辆模型非常不方便处理, 需要进行坐标系转化。一般 WGS-84 坐标通过高斯-吕克投影转化为高斯平面坐标。高斯平面坐标系以中央子午线的投影为 x 轴, 北向为正, 赤道的投影为 y 轴, 东向为正^[11-12]。中国位于北半球, 投影后 x 轴坐标都为正, y 轴坐标有正有负, 为避免出现负的横坐标, 规定横坐标加 500 km^[13]。通过坐标转化公式, 可将经纬度坐标 (B, L) 转化高斯平面坐标 (x, y) 。WGS-84 坐标转化高斯平面坐标关系为

$$x = X_0 + Nl^2 \cos^2 B \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{24} l^4 (5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4) \cos^2 B + \frac{1}{720} l^4 (61 - 58t^2 + t^4) \cos^4 B \right] \quad (1)$$

$$y = Nl \cos B \left[1 + \frac{1}{6} l^2 (1 - t^2 + \eta^2) \cos^2 B + \frac{1}{120} l^4 (5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - 58\eta^2 t^2) \cos^4 B \right] + 500\,000 \quad (2)$$

式中 X_0 为赤道至纬度为 B 的平行圈的子午线弧长, m ; l 为投影点经度 L 与该点所处经度带轴子午线经度 L_0 的差, ($^\circ$); $l = L - L_0$, $L_0 = 6n - 3$, $n = \text{round}[(L + 3)/6]$; $t = \tan B$; $\eta = e' \cos B$; N 为卯酉圈曲率半径, m ; x 和 y 为高斯坐标系的横纵轴, m 。 X_0 的公式为

$$X_0 = a(1 - e^2)(A_0 B + A_2 \sin 2B + A_4 \sin 4B + A_6 \sin 6B + A_8 \sin 8B) \quad (3)$$

式中参数 A_0 、 A_2 、 A_4 、 A_6 、 A_8 、 N 的公式为

$$A_0 = 1 + \frac{3}{4} e^2 + \frac{45}{64} e^4 + \frac{350}{512} e^6 + \frac{11\,025}{16\,384} e^8 \quad (4)$$

$$A_2 = -\frac{1}{2} \left(\frac{3}{4} e^2 + \frac{60}{64} e^4 + \frac{525}{512} e^6 + \frac{17\,640}{16\,384} e^8 \right) \quad (5)$$

$$A_4 = \frac{1}{4} \left(\frac{15}{64} e^4 + \frac{210}{512} e^6 + \frac{8\,820}{16\,384} e^8 \right) \quad (6)$$

$$A_6 = -\frac{1}{6} \left(\frac{35}{64} e^6 + \frac{2\,520}{16\,384} e^8 \right) \quad (7)$$

$$A_8 = \frac{1}{8} \left(\frac{315}{16\,384} e^8 \right) \quad (8)$$

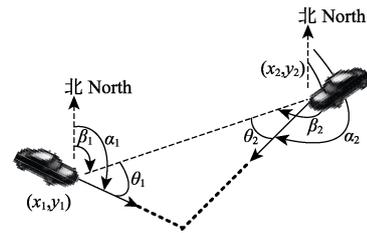
$$N = \frac{m}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}} \quad (9)$$

其中 $m = 0.003\,352\,8$; $e = 0.0\,818\,191\,9$; $e' = 0.08\,209\,443\,8$ 。

可得 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 分别为自车和他车在高斯平面坐标系下的位置坐标。将定位天线放置在每辆车的中心位置, 得到车辆的中心坐标, 方便进行车辆安全防撞预警。

1.2 车辆碰撞分类

车辆在实际行驶中无需对所有的车都进行碰撞预警处理, 通过对可能发生碰撞的车辆进行分类, 可以减少对无危险车辆的处理, 同时便于对不同类型的碰撞使用不同的预警算法处理^[14]。高斯平面坐标系下可以获取自车与他车的坐标信息及航向角, 通过建立数学模型对可能发生的碰撞进行分类: 直线碰撞和侧面碰撞。直线碰撞包括正面碰撞和追尾碰撞。车辆的行驶方向、速度及间距是车辆安全驾驶的关键, 本文根据车辆行驶方向建立碰撞分类模型, 两车关系见图 2 所示。



注: 航向角 α_1 、 α_2 为真北方向与汽车行驶方向顺时针夹角, 范围 $[0, 360^\circ)$; β_1 、 β_2 为真北方向与两车中心连线的顺时针夹角, 范围 $[0, 360^\circ)$; (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 为两车中心点的高斯平面坐标; θ_1 、 θ_2 为相对航向角, $\theta_i = \alpha_i - \beta_i (i = 1, 2)$ 。
Note: Heading angle α_1 and α_2 are the clockwise angle between the North direction and the vehicle travel direction, $[0, 360^\circ)$; β_1 and β_2 are the clockwise angle between the North direction and the center line of the two cars, $[0, 360^\circ)$; (x_1, y_1) and (x_2, y_2) are the gaussian plane coordinate of the center point of the two cars; θ_1 and θ_2 are relative heading angles, $\theta_i = \alpha_i - \beta_i (i = 1, 2)$ 。

图2 自车与他车关系

Fig.2 Relationship between vehicle and adjacent vehicle

图2中 θ_i 是两车中心坐标的连线与车辆行驶方向的夹角, θ_i 的范围 $[-180^\circ, 180^\circ)$, 规定当 $\theta_i \geq 180^\circ$ 时, $\theta_i = \theta_i - 360^\circ$; 当 $\theta_i < -180^\circ$ 时, $\theta_i = \theta_i + 360^\circ$ 。设 θ_i 为正表示车辆行驶方向在两车中心坐标连线的右侧, 反之则为负则表示车辆行驶方向在两车中心坐标连线的左侧。

依据 θ_1 和 θ_2 的关系将碰撞类型分类:

- 1) $|\theta_1 - \theta_2| = 0^\circ$ 表示两车为平行且相向行驶, 可能存在正面碰撞。
- 2) $|\theta_1 - \theta_2| = 180^\circ$ 表示两车为平行且同向行驶, 可能存在追尾碰撞。
- 3) 若 $0^\circ < |\theta_1 - \theta_2| < 180^\circ$ 且 θ_1 与 θ_2 为异号, 表示两车为同侧且相向行驶, 可能存在侧面碰撞。
- 4) 对于其他情况, 车辆不存在危险。

车辆在实际行驶过程中很难实现完全平行，通过设置 δ 为 5° 来满足实际行驶。那么对于正面碰撞的判断条件为 $|\theta_1 - \theta_2| \leq \delta$ ；追尾碰撞的条件为 $|\theta_1 - \theta_2| \in [180^\circ - \delta, 180^\circ + \delta]$ ；侧面碰撞的条件为 $\delta < |\theta_1 - \theta_2| < 180^\circ - \delta$ 且 θ_1 和 θ_2 异号。

α_i 由车载设备可直接获取， β_i 通过高斯平面坐标系下的车辆坐标求得

$$\tan \beta_i = \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i} \quad (10)$$

通过表 1 可求 β_i 值。此处若 $i=1$ ，则 $j=2$ ；若 $i=2$ ，则 $j=1$ ，通过 $\theta_i = \alpha_i - \beta_i$ 可得 θ_i 的值。

表 1 $\tan \beta_i$ 与车辆坐标关系

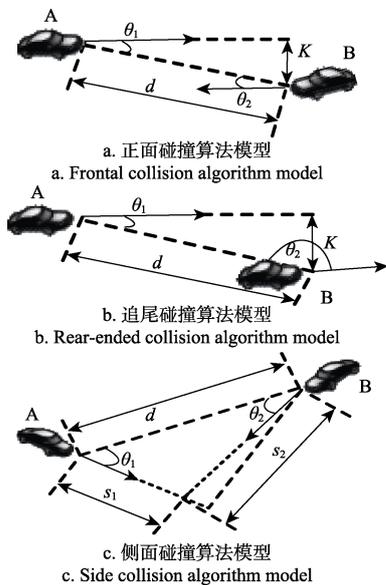
Table 1 Relationship between $\tan \beta_i$ and vehicle coordinate

坐标关系 Coordinate relation	$\tan \beta_i \geq 0$	$\tan \beta_i < 0$
$x_j - x_i > 0 \quad y_j - y_i \geq 0$	$\beta_i \in [0, 90^\circ)$	
$x_j - x_i \leq 0 \quad y_j - y_i > 0$		$\beta_i \in [90^\circ, 180^\circ)$
$x_j - x_i < 0 \quad y_j - y_i \leq 0$	$\beta_i \in [180^\circ, 270^\circ)$	
$x_j - x_i \geq 0 \quad y_j - y_i < 0$		$\beta_i \in [270^\circ, 360^\circ)$

注： $i, j=1, 2$ ，且 $i \neq j$ 。
Note: $i, j=1, 2$, and $i \neq j$.

1.3 车辆碰撞类型及算法

算法依赖于相对运动关系，需要准确获知车辆位置信息，同时要考虑驾驶员反应时间及制动时间。车辆碰撞分类完成后对不同的情况进行不同的处理。各碰撞算法参数如图 3 所示。



注：A 为自车，B 为他车； d 为两车中心位置连线的距离，m； K 为两车横向距离，m； s_1 、 s_2 分别为自车与他车到碰撞点的距离，m。
Note: A represents own car, B represents adjacent car; d is the line distance between the two cars' centers, m; K is lateral distance between two vehicle, m; s_1 and s_2 are the distances from own car and the adjacent car to the collision point, m.

图 3 各种碰撞算法模型示意图

Fig.3 Various collision algorithm model diagram

1.3.1 对于直线碰撞

存在碰撞的前提条件是两车的横向距离小于一个车

身的宽度 k (m)，即 $k \geq |d \sin \theta_1|$ ，如图 3 所示。一般车辆的长度为 3.6~4.6 m，宽度 1.5~1.8 m，故这里 k 取 2 m。当检测到 $k \geq |d \sin \theta_1|$ 的时候，将车辆发生直线碰撞需要的时间与安全防撞时间进行比较，判断是否存在碰撞危险存在。

两车中心位置连线的距离 d 通过车辆坐标计算可得 $d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$ m。自车速度为 v_1 (km/h)，他车速度为 v_2 (km/h)。

1) 对于直线碰撞里的正面碰撞，如图 3a 所示，当满足 $|\theta_1| < 90^\circ$ 且 $|\theta_2| < 90^\circ$ 时，则进行碰撞时间的计算 $t = 3.6 \times (d \times |\cos \theta_1| - 5) / (v_1 + v_2)$ ， θ_1 和 θ_2 不满足上述情况则不进行算法处理。

2) 对于直线碰撞里的追尾碰撞，如图 3b 所示，当自车是主动追尾时，若 $v_1 > v_2$ 且 $|\theta_1| < |\theta_2|$ ，发生追尾碰撞需要的时间为

$$t = 3.6 \times (d \times |\cos \theta_1| - 5) / |v_1 - v_2| \quad (11)$$

不满足上述速度与角度条件则不进行处理。当自车是被动追尾时，若 $v_1 < v_2$ 且 $|\theta_1| > |\theta_2|$ ，那么他车追尾需要的时间

$$t = 3.6 \times (d \times |\cos \theta_2| - 5) / |v_2 - v_1| \quad (12)$$

不满足上述速度与角度条件则不处理。

1.3.2 对于侧面碰撞

在两车维持当前车速及行驶方向不变情况下，依据当前运动状态预测车辆未来运行轨迹，确定碰撞点及车辆碰撞时间，计算两车距离碰撞点的时间差进行判断是否存在碰撞危险。发生侧面碰撞的前提条件：两车距离碰撞点的时间差 $\Delta t \geq |t_a - t_b|$ ，自车到达碰撞点的时间为 t_a ，他车到达碰撞点所需的时间为 t_b ，这里 Δt 取 2 s。当满足 $\Delta t \geq |t_a - t_b|$ 条件时，将自车与他车到达碰撞点的时间与各自车辆的安全防撞时间进行比较，判断是否需要预警显示。

对于图 3c 所示的侧面碰撞模型来说，分 3 种情况：

1) 当 $|\theta_1| + |\theta_2| < 90^\circ$ 时，自车与碰撞点的距离： $s_1 = d \cdot \cos |\theta_1| - d \cdot \sin |\theta_1| / \tan(|\theta_1| + |\theta_2|)$ ；他车与碰撞点的距离：

$$s_2 = d \cdot \sin |\theta_1| / \sin(|\theta_1| + |\theta_2|) .$$

2) 当 $|\theta_1| + |\theta_2| = 90^\circ$ 时，自车与碰撞点的距离： $s_1 = d \cdot \cos |\theta_1|$ ；他车与碰撞点的距离： $s_2 = d \cdot \cos |\theta_2|$ 。

3) 当 $|\theta_1| + |\theta_2| > 90^\circ$ 时，自车与碰撞点的距离： $s_1 = d \cdot \cos |\theta_1| + d \cdot \sin |\theta_1| / \tan(180^\circ - |\theta_1| - |\theta_2|)$ ；他车与碰撞点的距离： $s_2 = d \cdot \sin |\theta_1| / \sin(180^\circ - |\theta_1| - |\theta_2|)$ 。

自车到达碰撞点的时间 $t_a = 3.6 \cdot (s_1 - 2.5) / v_1$ ，他车到达碰撞点所需的时间 $t_b = 3.6 \cdot (s_2 - 2.5) / v_2$ 。

1.4 安全防撞时间

安全防撞时间是驾驶员采取措施恰好避免危险所需的最短时间，包括驾驶员反应时间及控制车辆（转向、

制动)所需时间^[15]。通过确定这些参数可以确定车辆的安全防撞时间。

驾驶员反应时间是接到预警信号到做出反应的时间 t_1 ,一般为0.4~1.0 s。反应好的驾驶员一般反映时间0.4~0.6 s,受到危机惊吓时反应时间才会大于1 s^[16]。基于实际安全考虑,本文驾驶员反应时间 t_1 假设为1.5 s。

制动系统响应时间包括制动器协调时间、制动力增长时间及持续制动时间^[4-5]。对于制动器协调时间,即制动踏板开始踩下到制动生效的时间,一般液压制动器需要的时间 t_2 为0.2 s;对于制动力增长时间 t_3 ,即制动生效到液压器产生制动的的时间,一般为0.15~0.3 s,本文的 t_3 取0.2 s,且汽车制动减速度线性增长;持续制动时间 t_4 计算公式如下

$$t_4 = \frac{v}{3.6 \cdot g \cdot \mu} - \frac{t_3}{2} \quad (13)$$

其中 v 为车辆的行驶速度, km/h; g 为重力加速度,取9.8 m/s²; μ 为轮胎-路面附着系数,干燥路面取0.75,雨天路面取0.5,积雪路面取0.3,结冰路面取0.1^[17]。持续制动时间随车速变化而变化, $g \cdot \mu$ 为制动最大减速度,不同路面附着系数制动效果不同。

行驶车辆发出碰撞危险预警,从驾驶员反应到采取制动措施致使车辆停止需要的安全防撞时间TTC计算公式如下

$$TTC = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = t_1 + t_2 + \frac{t_3}{2} + \frac{v}{3.6 \cdot g \cdot \mu} \quad (14)$$

由式(12)得,安全防撞时间与车辆的行驶速度有关,不同行驶速度下的安全防撞时间见图4a所示。依据不同的车速确定不同的安全防撞时间,同时通过检测车速的变化,及时改变车辆的安全防撞时间。系统通过车载设备实时且连续接收车辆状态信息,当满足直线碰撞和侧面碰撞的前提条件时,实时计算车辆发生碰撞需要的时间与安全防撞时间进行比较,存在碰撞危险则在应用设备上上进行预警语言提醒。如果他车行驶速度过快,是造成碰撞危险的主因,应用设备可发送语言消息给他车提醒减速行驶。

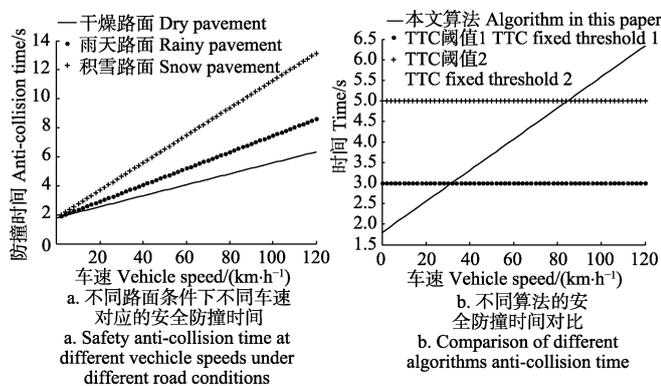


图4 安全防撞时间对比

Fig.4 Safety anti-collision time contrast

对于一般的TTC算法,通过建立固定阈值来进行预

警。通常设定 $TTC \leq 3$ s,危险警告; $3 < TTC \leq 5$ s,危险提示; $TTC > 5$ s,无危险^[16]。图4b为一般的预警算法TTC与本文的安全防撞时间TTC的预警时间比较。从图4b可得,当车速低于31.752 km/h时,本方法与一般的TTC算法都可以有效进行预警,而一般的TTC算法提前至少2 s进行危险提示,容易造成驾驶员不重视预警提示;当车速在31.752~84.672 km/h时,本文方法已经预警的情况下,一般的TTC进行了危险提示,没有达到危险警告阶段;当车速大于84.672 km/h时,本方法已经预警的情况下,一般的TTC无危险显示,会造成碰撞危险。

2 车载通信系统

图5所示的车载通信系统包括应用层、车内局域网和车载设备。应用层包括防撞算法模型和预警信息显示;局域网具备上网能力;车载设备具备高精度定位模块、DSRC通信模块及网络接口。高精度定位模块用于获取自身车辆的位置,DSRC通信模块通过DSRC实现与附近车辆的实时通信,网络接口通过车内局域网实现与应用层的连接。相互通信的车载设备间通过定位模块获取自身经纬度和地面航向角信息,通过速度传感器获取自身速度。

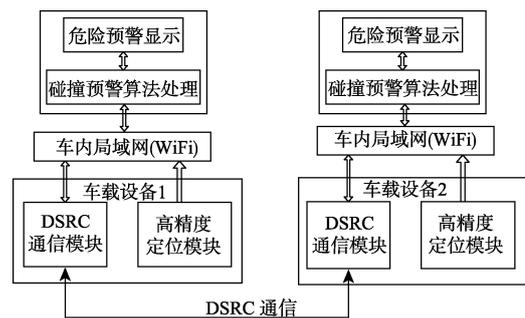


图5 车载通信系统

Fig.5 Vehicle communication system

2.1 定位模块

车辆防撞预警要求车辆定位精度高,以及车辆信息获取连续可靠。定位精度受多径效应、天线中心相位偏差和公共卫星数目等因素影响^[17-18]。在城市密集区,卫星信号容易被高层建筑和立体式交通遮挡,造成信号较弱或无信号,从而定位不精确^[17]。本文的车载设备采用NOVATEL和司南的板卡,配合使用协同定位及卡尔曼滤波算法,使得定位误差减少到cm级别。对于协作定位,车载设备采用实时载波相位差分技术(real-time kinematic, RTK)定位,车辆定位可达cm级别^[19-21]。车辆高速移动导致定位误差增加,可通过卡尔曼滤波对车辆位置偏差进行修正。本文高精度定位的实现条件:在空旷地带、保持四颗以上的卫星信号及加入外网。本文利用卫星导航系统和惯性导航系统的互补特性,将北斗/GPS定位和惯性导航通过信息融合方法有机结合起来,形成组合定位系统^[22-23]。

2.2 DSRC模块

DSRC是高效的无线通信技术,可实现短距离内对高

速移动的目标的识别和双向通信，将车辆和道路有机连接，成为 ITS (Intelligent Transport System) 的重要通信平台^[24-27]。DSRC 系统提供高速的数据传输，保证传输过程低延时及低干扰，可在智能交通体系中快速的传播大量的实时信息^[27-29]。DSRC 目前还没形成统一的国际标准，本文车载系统采用美国 IEEE802.11 协议，可以适应高速移动的车载环境，通信距离可达 1 000 m，满足车载通信的需求。

2.3 应用层模块

应用设备通过局域网获取车载设备 IP，然后使用 socket 通过 TCP 协议与定位端口和 DSRC 端口建立连接可实时获取数据，通过解析得到当前车辆的状态信息。车辆信息可在应用设备上进行处理，这样安全防撞模型的开发可以不受车载设备的限制。应用设备通过建立车辆安全防撞模型，利用获取的车辆状态信息进行分析处理，存在危险则通过预警显示提醒驾驶员，实现辅助驾驶的功能。

3 仿真与实车试验及结果分析

3.1 仿真试验

试验使用交通仿真软件 VISSIM 6.0，VISSIM 里面有路网、车辆和信号灯等组件^[30-32]。仿真试验选择十字路口为中心的路段，首先使用 VISSIM 构建路网，然后在路网上添加车辆、信号灯等元素。试验路面选择为干燥路面，设定行驶车辆的低速为 10~30 km/h，中速为 30~60 km/h，高速为 60~90 km/h。试验通过外部驾驶员模型

控制车辆的运动及行驶速度，通过调用 COM 接口里面封装好的函数获取车辆的位置坐标和航向角信息进行防撞预警算法处理，存在危险预警及时通过外部驾驶员模型控制车辆制动。仿真运行后将车辆运行轨迹输入仿真冲突分析软件 SSAM 进行车辆碰撞事故的统计^[33]。

仿真试验分 6 组，6 组车辆分别对应如表 2 中自车与邻车的中、低、高速度，其中低速是 10~30 km/h，中速是 30~50 km/h，高速是 50~70 km/h，每组情况统计 100 次，每次要求车辆在规定的速度档内正常行驶，试验路段以十字交叉路口为中心设定车辆间行驶存在直线碰撞和侧面碰撞的可能，统计不同方法在预警显示及采取制动措施的情况下车辆是否发生碰撞，以及车辆未存在预警显示时候是否发生碰撞。仿真预警试验的算法比较是关于一般 TTC 固定阈值方法与本文提出的基于车速确定安全防撞时间之间的性能比较。本文方法只要出现预警就控制车辆刹车；一般的 TTC 存在二级预警，通过外部驾驶员模型控制车辆在 3~5 s 之间进行刹车，模拟现实情况下驾驶员面对两级预警出现的状况。

由表 2 可以看出，对于本文方法在预警显示情况下可以很好的实现车辆防撞预警工作，有效减少交通事故的发生，仅存在个别碰撞漏报的情况。当两车都为高速行驶时候，存在少量误警，是因为过快的车速使得本文的安全防撞时间误差变大，从而出现预警有些晚的情况，同时导致碰撞漏报的情况发生。但是，在实际车辆行驶过程，一般道路上限速 70 km/h，这样本文提出的方法可以有效进行一般道路上实车的防撞预警功能。

表 2 本文方法与 TTC 固定预警阈值算法仿真结果

Table 2 Simulation results of proposed algorithm in this paper and TTC fixed warning threshold algorithm

自车 Own car	邻车 Adjacent car	本文算法 Proposed algorithm in this paper				TTC 固定预警阈值算法 TTC fixed warning threshold algorithm			
		预警显示 Warning display		无预警显示 No display		预警显示 Warning display		无预警显示 No display	
		无碰 No collision	碰撞 Collision	无碰 No collision	碰撞 Collision	无碰 No collision	碰撞 Collision	无碰 No collision	碰撞 Collision
低速 Low speed	低速 Low speed	8	0	92	0	51	0	49	0
低速 Low speed	中速 Medium speed	15	0	85	0	43	5	52	0
低速 Low speed	高速 High speed	33	0	67	0	28	14	53	5
中速 Medium speed	中速 Medium speed	19	0	81	0	45	9	46	0
中速 Medium speed	高速 High speed	33	4	63	0	14	18	58	10
高速 High speed	高速 High speed	43	11	46	4	2	23	58	17
误报率 False alarm rates/%		9.04				27.38			
漏报率 Missing alarm rates/%		0.9				9.20			

由表 2 可看出，对于 TTC 预警阈值固定的算法在预警显示情况下，两车都为低速行驶，可以有效进行车辆避撞。其他行驶情况在预警及制动后出现部分碰撞情况，而且车速越高，误警次数就越多。原因是 TTC 固定阈值算法为提示与警告两级预警，危险提示区间是 3~5 s，3 s 以下的警告为最晚制动时机，仿真试验设定制动在 3~5 s 之间会出现制动不及时的情况。对于无预警显示存在碰撞漏报情况，原因是车辆在 84~90 km/h 区间内行驶无预警提示从而发生碰撞。

由表 2 对比可以看出，当车辆低速行驶时，本文算

法的预警显示次数比 TTC 预警阈值固定算法要少很多；当车速较高时候，本文算法预警显示次数比 TTC 预警阈值固定算法又多一些，但是预警效果明显本文方法性能更好。由此可以看出，本文算法减少了车辆低速时候的无谓预警，同时又增加了车辆高速时候的有效预警。根据表 2 统计的数据对两种算法的性能进行比较。

误报率公式为

$$f_1 = \frac{\psi_1}{\xi_1} \times 100\% \quad (15)$$

式中 ψ_1 为预警情况下发生碰撞次数； ξ_1 为预警显示次数。

漏报率公式为

$$f_2 = \frac{\psi_2}{\xi_2} \times 100\% \quad (16)$$

式中 ψ_2 为无预警显示情况下碰撞次数; ξ_2 为无预警显示次数。

对比一般 TTC 预警阈值固定方法, 本文方法误报率降低至 9.04%, 误报率降了 18.34 个百分点; 漏报率降 8.3 个百分点, 故本文方法可以更好地进行车辆防撞预警, 算法准确率更高。

3.2 实车试验

实车试验选择上海某车辆少且空旷的十字交叉路口为中心的路段, 两车分别放置车载设备, 进行安装和配置, 可获取车辆的状态信息。依据现实条件, 试验路面为干燥沥青路, 可满足车辆在一般道路上的行驶速度要求。试验应用设备为安卓设备, 通过在应用上对采集的车辆状态信息进行安全防撞算法处理, 若存在危险则通

过语言提示驾驶员。

由于现实条件无法实现车辆相撞, 故本文实车试验采用的试验方法重点在于通过统计预警的准确率测试防撞预警算法性能的好坏。实车试验分 6 组, 每组两辆车分别为自车和他车, 分别以低、中、高速规定的速度区间内正常行驶, 每组速度下重复 9 次。为保证试验安全, 本次实车试验的主要观测内容为: 在驾驶员自我观察存在危险并采取制动措施的情况下, 判断本文预警信息显示是发生在此制动之前还是之后。驾驶员制动时刻的前后 1 s 内显示的预警为制动中的预警, 其他时刻则分为制动前与制动后的预警。预警系统服务于驾驶员, 所以预警时机是驾驶员进行判断的, 预警性能的好坏也由驾驶员判定。

每组试验包含直线碰撞和侧面碰撞的情形, 统计不同方法下的驾驶员行驶车辆时预警显示处于采取制动措施的时间点位置。不同算法在相同条件下进行实车试验观测预警时机结果如表 3 所示。

表 3 本文方法与 TTC 固定阈值算法的预警时机实车试验结果

Table 3 Warning time results of vehicles test of proposed algorithm in this paper and TTC fixed warning threshold algorithm

自车 Own car	邻车 Adjacent car	不同算法 Different algorithms								
		本文算法 Proposed algorithm in this paper			TTC ₂ =5 s			TTC ₁ =3 s		
		制动前 Before braking	制动中 In braking	制动后 After braking	制动前 Before braking	制动中 In braking	制动后 After braking	制动前 Before braking	制动中 In braking	制动后 After braking
低速 Low speed	低速 Low speed	0	9	0	9	0	0	4	5	0
低速 Low speed	中速 Medium speed	0	9	0	9	0	0	0	4	5
低速 Low speed	高速 High speed	0	8	1	6	3	0	0	0	9
中速 Medium speed	中速 Medium speed	0	9	0	9	0	0	0	3	6
中速 Medium speed	高速 High speed	0	7	2	6	3	0	0	0	9
高速 High speed	高速 High speed	0	6	3	5	4	0	0	0	9
预警过早 Premature warning rate/%		0			81.48			7.41		
预警适宜 Appropriate warning rate/%		88.89			18.52			22.22		
预警过晚 Late warning rate/%		11.11			0			70.37		

表 3 为各预警算法的预警情况统计, 本文预警方法, 两车行驶车速为中速以下时, 基本上满足驾驶员碰撞危险预警需求; 其中至少一辆车高速行驶时, 出现少量的预警过晚的情形, 原因可能是过快的车速致使驾驶员保守的过早采取制动措施。

TTC 固定阈值算法, 当两车低速行驶, 危险提示预警过早, 危险警告也存在过早情形; 对于一车低速和另一车中速或者两车都为中速行驶, 危险提示过早, 出现危险警告预警过晚情形; 其中至少一辆车高速行驶时, 危险警告预警过晚, 危险提示存在过早的情形。一般的 TTC 算法是两级固定阈值预警, 如果驾驶员根据此方法进行采取避险措施, 低速行驶容易对危险提示失去信任, 高速行驶易对危险警告失去信任。统计不同方法在驾驶员采取制动时预警时机的性能比较。可以看出 TTC 阈值固定算法预警, 危险提示预警过早达 81.48%, 危险警告预警过晚达 70.37%, 而本文方法预警时机适宜高达 88.89%, 更符合实际车辆防撞预警。

4 结 论

本文算法依据车辆的不同行驶速度设定相应的安全防撞时间, 通过车辆发生碰撞需要的时间与安全防撞时间进行比较, 存在碰撞危险则通过应用设备语言提示驾驶员。本文在 TTC (time to collision) 的基础上提出了基于车速的安全预警时间阈值, 并进行仿真验证算法效果。算法包括高斯平面坐标系建立、车辆碰撞分类、车辆防撞算法处理以及安全预警时间阈值的选择。最后通过搭建仿真平台, 验证本文提出的方法提升了预警效率和准确度。试验结果表明, 本文提出的基于车速确定安全防撞时间方法与一般固定阈值的 TTC 相比, 本文方法的误报率降了 18.34 个百分点, 预警时机适宜率达 88.89%, 故本文方法可以更好的进行车辆防撞预警, 算法准确率更高。

[参 考 文 献]

- [1] 杜吉祥. 汽车碰撞事故的计算机模拟再现技术的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2002.

- Du Jixiang. Research on Computer Simulation Ttechnology of Aautomobile Collision Aaccidents [D]. Hefei: HeFei University of Technology, 2002. (in Chinese with English abstract)
- [2] 于广鹏, 谭德荣, 马福霞. 汽车防撞预警/碰撞算法研究现状及分析[J]. 山东理工大学学报: 自然科学版, 2014(6): 1-5.
Yu Guangpeng, Tan Derong, Ma Fuxia. Analysis and research of issues related to automotive anti-collision system warning/collision algorithm[J]. Journal of Shandong University of Technology: Natural Science Edition, 2014(6): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [3] Yoshida H, Awano S, Nagai M, et al. Target following brake control for collision avoidance assist of active interface vehicle[C]//International Joint International on Sice-Icase, 2006: 4436-4439.
- [4] 于广鹏, 谭德荣, 田厚杰, 等. 基于纵向避撞时间的预警/制动算法[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2015(2): 30-34.
Yu Guangpeng, Tan Derong, Tian Houjie, et al. The warning/braking algorithm based on longitudinal collision avoidance time[J]. Journal of Henan University of Science & Technology: Natural Science, 2015(2): 30-34. (in Chinese with English abstract)
- [5] 商强, 谭德荣, 高松, 等. 基于驾驶倾向性辨识的避撞-报警算法[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(13): 282-285.
Shang Qiang, Tan Derong, Gao Song, et al. Collision avoidance-warning algorithm based on identification of driving tendency[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(13): 282-285. (in Chinese with English abstract)
- [6] Lee K, Peng H. Evaluation of automotive forward collision warning and collision avoidance algorithms[J]. Vehicle System Dynamics, 2005, 43(10): 735-751.
- [7] Benamar F Z, Fkihi S E, Demonceaux C, et al. Estimation of time card of collision (TTC) based on the optical flot in para-cadioptric vision[J]. Traitement Du Signal, 2014, 31(1/2): 197-219.
- [8] 裴晓飞, 刘昭度, 马国成, 等. 汽车主动避撞系统的安全距离模型和目标检测算法[J]. 汽车安全与节能学报, 2012, 3(1): 26-33.
Pei Xiaofei, Liu Zhaodu, Ma Guocheng, et al. Safe distance model and obstacle detection algorithms for a collision warning and collision avoidance system[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2012, 3(1): 26-33. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王建强, 迟瑞娟, 张磊, 等. 适应驾驶员特性的汽车追尾报警-避撞算法研究[J]. 公路交通科技, 2009(增刊 1): 7-12.
Wang Jianqiang, Chi Ruijuan, Zhang Lei, et al. Study on forward collision warning-avoidance algorithm based on driver characteristics adaptation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009(Supp.1): 7-12. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张瑞锋. 基于自然驾驶数据及主被动试验方法的人车安全行为研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
Zhang Ruifeng. Research of Human-Vehicle Safety Behavior Based on Naturalistic Driving Data and Active-Passive Test[D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [11] 姚建卫, 李冰, 马国元. 浅谈独立坐标系的建立[J]. 科技创新与生产力, 2010(3): 94-95.
Yao Jianwei, Li Bing, Ma Guoyuan. The establish-ment of independent coordinate system[J]. Sci-tech Innovation and Productivity, 2010(3): 94-95. (in Chinese with English abstract)
- [12] 姜楠. 坐标转换算法研究与软件实现[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
Jiang Nan. Research of Coordinate Transformation Algorithm and Software Implementation[D]. Huainan: AnHui University of Science and Technology. 2013. (in Chinese with English abstract)
- [13] 兰琛. 车联网专用短程通信和定位技术的研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
Lan Chen. Research and Application of Dedicated Short Range Communication and Positioning Technology in Internet of Vehicles[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王晓东. 基于场景建模的辅助驾驶模糊控制方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
Wang Xiaodong. Research of Fuzzy Control for Driving Assistant System Based on Scence Modeling[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [15] 袁朝春, 李道宇, 吴飞, 等. 汽车纵向主动避撞 DRV 安全距离模型建模研究[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2015, 29(10): 29-33.
Yuan Chaochun, Li Daoyu, Wu Fei, et al. Analysis on safety distance model and modeling DRV safety distance model[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology: Natural Science, 2015, 29(10): 29-33. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王畅, 付锐, 张琼, 等. 换道预警系统中参数 TTC 特性研究[J]. 中国公路学报, 2015 (8): 91-100,108.
Wang Chang, Fu Rui, Zhang Qiong, et al. Research on parameter TTC characteristics of lane change waring system[J]. Chinese Journal of Highway Engineering, 2015,(8): 91-100, 108. (in Chinese with English abstract)
- [17] 陈瑜, 张铁民, 孙道宗, 等. 基于无线传感器网络的设施农业车辆定位系统设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2015,(10):190-197.
Chen Yu, Zhang Tiemin, Sun Daozong, et al. Design and experiment of locating system for facilities agricultural vehicle based on wireless sensor network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2015,(10):190-197. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王雪. GPS 与北斗卫星导航系统异同分析[J]. 科技创新导报, 2013(9): 136
Wang Xue. Analysis of similarities and differences between GPS and Beidou satellite navigation system[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013(9): 136. (in Chinese with English abstract)
- [19] 赵汝祺, 赵祚喜, 赵汝准. 基于多项式卡尔曼滤波器的车辆定位试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 49-56.
Zhao Ruqi, Zhao Zuoxi, Zhao Ruzhun. Experiment of vehicle localization based on polynomial Kalman filter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2012, 28(18): 49-56. (in Chinese with English abstract)
- [20] 杜利, 彭涛. 我国北斗产业链发展现状与趋势[J]. 中国工业评论, 2015(11): 70-76.
- [21] 王秋敏, 熊启生. GPS RTK 测量技术与误差特性[J]. 民营科技, 2013(6): 70-70.
Wang Qiumin, Xiong Qisheng. GPS RTK closed loop measurement technology and error characteristics of [J]. private science and technology, 2013(6): 70-70. (in Chinese with English abstract)
- [22] Mahler S P, Reece J L. Global postioning systems, inertial navigation, and integration[M]. Wiley, 2007, 34(5): 365-370.
- [23] 张建阳. 基于嵌入式 LINUX 的 GPS/SINS 车载组合导航系统研究与实现[D]. 西安: 长安大学, 2013.
Zhang Jianyang. Research and Implementation of GPS/SINS Based on Vehicle Integrated Navigation System Based on Embedded[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese with English abstract)

- [24] 周卢. 专用短程通信(DSRC)协议研究及应用[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2013.
Zhou Lu. Research and Application of Dedicated Short Range Communication (DSRC) Protocol[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [25] Yin X, Ma X, K S. Trivedi. MAC and application level performance evaluation of beacon message dissemination in DSRC safety communication[J]. Performance Evaluation, 2014, 71(1): 1–24.
- [26] Nwizege K S, Bottero M, Mmeh S, et al. Vehicles-to-infrastructure communication safety messaging in DSRC[J]. Procedia Computer Science, 2014, 34: 559–564.
- [27] 张书侨. DSRC 无线通信模式的原理及应用[J]. 数字通信世界, 2014(9): 43–45.
Zhang Shuqiao. The principle and application of DSRC wireless communication mode[J]. Digital communication World, 2014(9): 43–45. (in Chinese with English abstract)
- [28] 钱立军, 邱利宏, 林如宁, 等. 基于 V2X 的混合动力汽车分层能量管理及优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 74–81.
Qian Lijun, Qiu Lihong, Lin Runing, Xin Fulong. Hierarchical energy management and optimization of hybrid electric vehicles based on V2X[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2016, 32(19): 74–81. (in Chinese with English abstract)
- [29] Chena L, Tsengb Y, Syue K. Surveillance on-the-road: Vehicular tracking and reporting by V2V communications[J]. Computer Networks, 2014, 67(10): 154–163.
- [30] Zou Y. Research on optimization of signal phase at intersection based on VISSIM simulation software[C]// International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference, 2015.
- [31] 李飞燕, 车广侠, 于慧玲. 基于 Vissim 的交叉口左转待转区设置仿真研究[J]. 黑龙江交通科技, 2016, 39(3): 142–143.
Li Feiyan, Che Guangxia, Yu Huiling. Simulation study on left turn waiting area of intersection based on [J]. Heilongjiang Traffic Science and Technology, 2016, 39(3): 142–143. (in Chinese with English abstract)
- [32] 李苗苗, 王玉娜, 孙叶. 基于 Vissim 仿真的城市交叉口信号配时优化分析[J]. 洛阳理工学院学报: 自然科学版, 2016, 26(4): 22–26.
Li Miaomiao, Wang Yuna, Sun Ye. Analysis of signal timing optimization in urban intersection based on vissim simulation [J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 26(4): 22–26. (in Chinese with English abstract)
- [33] 周嗣恩, 李克平, 孙剑, 等. 道路交叉口冲突仿真分析[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(5): 32–37.
Zhou Sien, Li Keping, Sun Jian, et al. Simulation and analysis of road intersection conflict[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2009, 19(5): 32–37. (in Chinese with English abstract)

Anti-collision warning time algorithm based on driving speed of vehicle

Liu Qinghua^{1,2}, Qiu Xiulin¹, Xie Limeng¹, Wang Junhua², Fang Shouen^{2*}

(1. College of Computer Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212013, China;

2. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to solve the problem that the warning threshold fixation of time-to-collision (TTC) algorithm causes prematurely warning at low speed and warning with a delay at high speed, this paper presents a safety time warning method of anti-collision based on vehicle driving speed. Firstly, vehicles can get the driving status information of themselves and others timely by on-board equipment. On-board equipment can get the information about latitude, longitude, speed and heading angle of the vehicle in real time. Then, according to the driving status information, vehicle coordinates information can be obtained by Gauss plane rectangular coordinate system established. After that, the possible collisions can be classified and processed. In reality, all vehicles are not required to carry out vehicle collision warning, so it can reduce vehicle collision processing and optimize the performance of the algorithm by classifying the possible collisions of vehicles, and it also can facilitate the use of different collision warning algorithms for different types. Mathematical model can be used to classify the possible collisions. Collision is divided into linear collision and side impact, and linear collision includes frontal and rear collision. For linear collision, the precondition of collision is that the lateral distance of the 2 vehicles is less than the width of vehicle. For the side impact, vehicles maintain current speed and direction, and according to the current state of vehicles, it can predict future vehicle running track, determine vehicle collision point and calculate vehicle collision time difference, and the collision time difference is used to determine the initial conditions of side impact. Next, the initial condition of vehicle collision is met, vehicle anti-collision safety time can be set based on vehicle driving speed, and then it will be compared with the time required for vehicle collision occurring for each vehicle. If the risk of collision exists, the application equipment displays warnings to remind drivers. The safety anti-collision time is the shortest time for drivers to take measures to avoid the danger. Response time of the driver is the time when the alarm signal is received, and response time of the braking system includes the reaction time of the braking system, the braking coordination time and the continuous braking time. Based on this, it is possible to get early warning of collision risk from the driver's reaction to braking reaction. Through the different vehicle speed, it can determine the different safety collision time, and through detecting vehicle speed changes, it can timely change vehicle anti-collision safety time threshold. Entire system can receive the vehicle status information through the on-board equipment in real time and continuously. When the precondition of linear collision and side collision is satisfied, the time needed for vehicle collision is calculated in real time, and then compared with the time threshold of safety warning. If there is a risk of collision, it will warn on the application device. Finally, experiments are carried out to verify the performance of the proposed method. In the simulation experiment, compared with the general TTC fixed threshold method, this method reduces the false alarm rate by up to 9.04%, and decreases the missing alarm rate by 8.3%. In real vehicle test, experimental results show that the suitable early warning rate of this proposed method is 88.89%, and premature warning rate of general TTC fixed threshold method reached 81.48%, and late warning rate reached 70.37%. It can be concluded that the proposed method in this paper is more effective for vehicle hazard warning, more in line with the actual situation of the vehicle anti-collision, and improves the safety of vehicle driving.

Keywords: vehicles; traffic; safety; collision warning; time to collision