

Collision Avoidance Control Strategy and Security Benefit Analysis in Different Overlap

Yeting LIN, Xichan ZHU, Lin LI, Zhixiong MA

Tongji University, Shanghai, China, 201804

Email: lytcoconut@foxmail.com

Abstract: This paper studies the effects of different overlapping rates, vehicle speeds and road conditions and other factors on critical safety distance and security benefits. First, establishing criticality safety prediction model for different collision avoidance strategies, and then using MATLAB software to calculate the critical conditions of braking and steering strategies. Finally, analyzing the collision risk, the security benefit and choosing the strategy according to the vehicle collision relative speed and overlap rate to provide theoretical basis and basis for related ADAS development.

Keywords: overlap; collision avoidance; control strategy; security benefit

不同重叠率车辆碰撞危险回避控制策略及安全收益分析

林椰厅, 朱西产, 李霖, 马志雄

同济大学, 上海, 中国, 201804

Email: lytcoconut@foxmail.com

摘 要: 本文研究了不同重叠率、车速及路面状况等因素对临界安全距离与安全收益的影响。首先针对不同规避碰撞策略推导临界安全距离预测模型公式; 然后运用 MATLAB 重点针对制动方式和转向方式计算碰撞临界条件; 最后根据车辆碰撞相对速度与重叠率对碰撞损伤风险定量分析, 从而进行安全收益评估与策略选择, 为相关 ADAS 开发提供理论基础和依据。

关键词: 重叠率; 碰撞; 回避策略; 安全收益

1 引言

根据中国高速公路事故统计及死亡事故的统计调查^[1], 各类汽车交通事故中追尾碰撞是发生可能性最高的事故类型, 对乘员有较大的安全威胁。

目前绝大多数的两车碰撞规避策略是采用危险报警和主动制动的方式。实际上, 对大量司机驾驶习惯的统计研究表明, 转向策略也是紧急情况下驾驶员经常采取的避撞方式^[2]。

国内外文献对不同车速以及不同重叠率等单一因素的对碰撞伤害的影响进行了分析。由 Richards 等人所做的研究可知, 车速低于 5mph 时, 几乎全为轻伤; 车速为 25mph 时, 重伤率达到了 50%, 但死亡率较低; 而碰撞速度达到 50mph 以上时, 死亡率超过了 50%^[3]。

由 Gabauer 等人提出的碰撞相对速度与 MAIS3+损伤概率曲线可知^[4], 碰撞速度在 0~10m/s 之间, 伤害概率增长较慢, 而此后伤害率增长将迅速增大, 当速度达到 25m/s (90km/h) 左右时趋于稳定, 趋于 100%的概率发生 MAIS3+伤害。

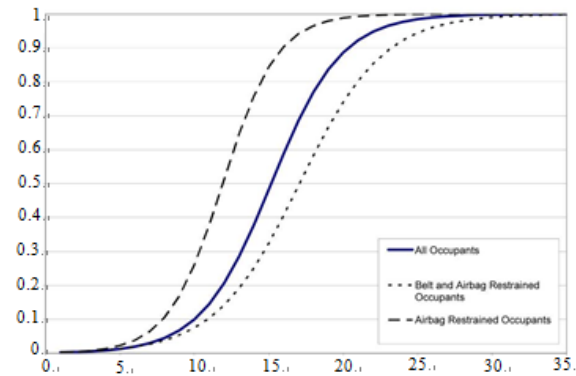


Figure 1. Curve: relationship between collision relative velocity and MAIS 3+ damage probability

图 1. 碰撞相对速度与 MAIS3+伤害概率曲线, m/s (Gabauer)

根据苏靖等人所提出的不同重叠率碰撞事故分布可知,在 1~40%重叠率范围内,重伤率呈递增趋势。而重叠率为 40~60%时,重伤率较为相近,60%~90%范围内重伤率也基本相同^[5]。

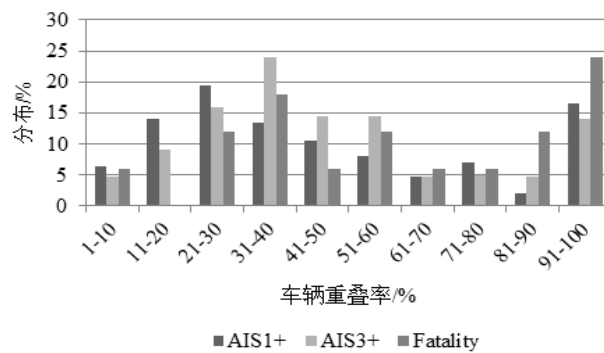


Figure 2. Damage distribution with different overlap

图 2.不同重叠率损伤分布

Dagmar 等人对产生前排乘员 MAIS2+与 MAIS3+损伤的事故进行了深入的分析,提出了等效障碍速度 (Equivalent Barrier Speed, EBS) 的概念^[6]。通过对 EBS 相近的事故损伤进行分析,得到更为准确的重叠率与伤害的影响。

本文重点考察主动车辆在碰撞过程中车速、重叠率、路面状况等多重因素共同作用对乘员伤害程度的影响,并对比不同条件下制动避撞策略与转向避撞策略的临界条件与安全收益。本文设定主动车辆与被撞车辆。对于主动车辆而言,追尾事故碰撞部位位于车辆前端。

此外,目前针对制动与转向规避过程的研究主要采用的是质点模型或者是两轮模型,采用质点模型的分析方法无法考虑到由车辆本身尺寸形状对避撞空间的需求。同时,研究大多忽略驾驶员紧急操作过程,由于紧急避撞全过程通常在 2 秒以内甚至更短,若忽略驾驶员转动方向盘的时间,将导致结果不准确。本文针对该紧急操作过程进行了详细的探讨。

本文建立数学模型提出临界条件,推导制动、转向方式避免追尾事故的安全距离公式。同时,利用 MATLAB 软件编程计算不同策略的安全距离以及碰撞相对速度和重叠率并提出损伤风险计算公式。根据车辆碰撞相对速度与重叠率对碰撞损伤风险进行定量分析与安全收益评估,以此作为策略选择的依据。

2 碰撞规避策略模型建立

2.1 碰撞规避策略描述

驾驶员在避让时通常会采用制动回避、转向回避以及制动加转向回避三种策略，本文主要讨论前两者。

本文设定主动车辆为 A，被动车辆为 B。由于 B 车驾驶员行为难以预测，在相对行驶过程中无法确定 A 车的碰撞临界条件，故本文仅讨论两车追尾情形，如图 3 所示。



Figure 3.Schematic: two vehicles driving in same direction

图 3.两车同向行驶示意图

2.2 制动避撞模型建立

制动规避过程分为三个阶段：驾驶员反应过程，驾驶员或主动安全系统开始紧急制动到制动力达到最大的紧急制动过程以及制动力保持最大状态的持续制动过程^[7]。

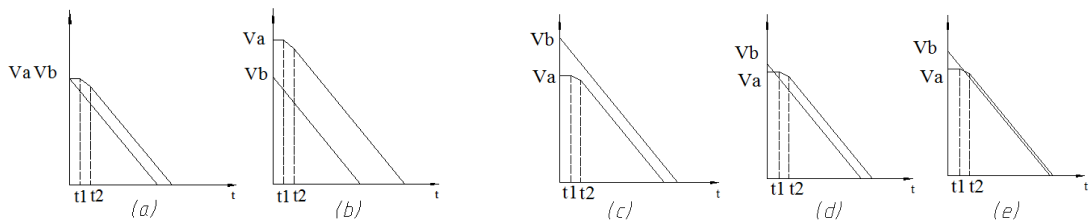


Figure 4.Schematic: braking process analysis

图 4.制动过程分析 ($a_{Amax} = a_B, V_A > V_B$)

Figure 5.Schematic: braking process analysis

图 5.两车同向行驶示意图 ($a_{Amax} = a_B, V_A < V_B$)

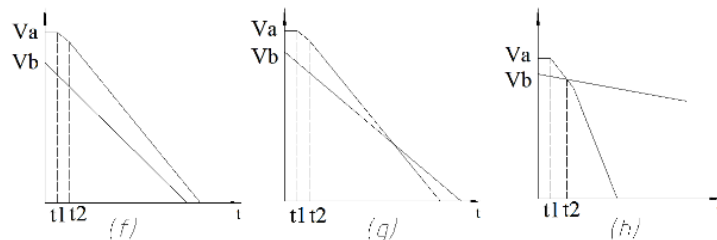


Figure 6.Schematic: braking process analysis

图 6.两车同向行驶示意图 ($a_{Amax} > a_B, V_A > V_B$)

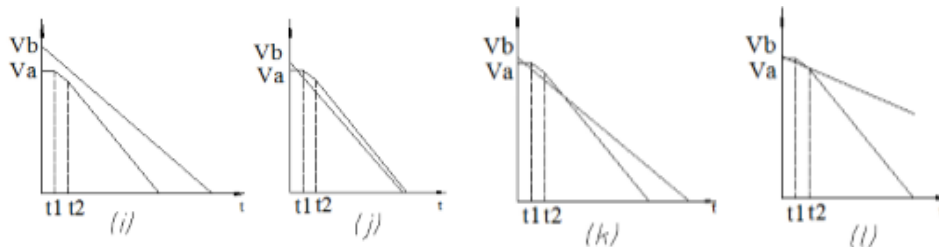


Figure 7.Schematic: braking process analysis

图 7.两车同向行驶示意图 ($a_{Amax} > a_B, V_A < V_B$)

紧急制动情况下通常后车（A 车）加速度大于前车（B 车）。A 车能够规避追尾 B 车的临界情形分两种情

况:

①在 A 车刹停前, A 车车速始终大于 B 车车速, 则 A、B 车都刹停时, A 车车头与 B 车车尾刚好接触;

②在 A 车刹停前, A 车车速减到等于 B 车车速, 此时 A 车车头与 B 车车尾刚好接触。

因此共有如图 4-7 所示的 12 种情形。其中 V_A 和 V_B 分别指 A 车和 B 车车速, a_{Amax} 和 a_B 分别指的是 A 车最大加速度和 B 车加速度。

其中(a) (b) (d) (e) (f) (j)属于临界情况①, (g) (h) (k) (l)属于临界情况②, 而(c) (i)是不可能发生碰撞的情况。

针对临界情况①进行求解, 此时安全距离为[2]:

$$D = V_A t_1 + V_A t_2 - \frac{1}{6} a_{Amax} t_2^2 + \frac{V_{A2}^2}{2a_{Amax}} - \frac{V_B^2}{2a_B} \quad (1)$$

其中 t_1, t_2, t_3 分别为前文所述的三个过程的持续时间。

针对临界情况②进行讨论, (h) (l)相交于 $t_1 \sim t_2$ 区间, (g) (k)则相交于 $t_2 \sim t_3$ 区间。针对(h) (l)情形, 假定交点至 t_1 的时间为 t_{2o} , 则推导(h) (l)情形安全距离为:

$$D = V_A t_1 + V_A t_{2o} - \frac{1}{6} a_{Amax} \frac{t_{2o}^3}{t_2} - V_B (t_1 + t_{2o}) + \frac{1}{2} a_B (t_1 + t_{2o})^2 \quad (2)$$

不要使用空格、制表符设置段落缩进, 不要通过连续的回车符(换行符)调整段间距。求解(g) (k)情形, t_2 至交点的时间为 t_3 则其安全距离公式为:

$$D = V_A t_1 + V_A t_2 - \frac{1}{6} a_{Amax} t_2^2 + V_{A2} t_3 - \frac{1}{2} a_{Amax} t_3^2 - \left(V_B t - \frac{1}{2} a_B t^2 \right) \quad (3)$$

其中 $t = t_1 + t_2 + t_3$, 至此得到全部情形下制动安全距离。

制动规避策略安全车距与 A 车的车速、最大制动加速度、驾驶员或主动安全系统反应时间、踩下制动踏板的速度、B 车的车速、B 车的制动加速度相关。

2.3 转向避撞模型建立

转向策略主要分为三个过程: 驾驶员反应过程、紧急转向过程(紧急转向至方向盘最大转角或车轮侧向附着力达到极限)以及方向盘保持在极限状态的转向持续过程。

为方便建模, 将汽车简化为一个长方体。主动车辆相关参数如表 1 所示。

Table 1. Steering parameters
表 1. 转向计算相关参数

参数	符号	参数	符号
长	L	宽	W
轴距	L_{WB}	轮距	B
前悬	L_f	后悬	L_r
最小转弯半径	R_{min}	最大侧向加速度	a_{ymax}

同制动避撞策略，A 车为主动车辆，B 车为被动车辆， V_A 和 V_B 分别指 A 车和 B 车车速。两车重叠率为 $p = S/W$ ，其中 W 为 A 车的宽度。为简化计算，本文假设 A、B 两车宽度相等。图 8 所示是采用转向方式规避追尾碰撞的临界情形，即 A 车以其最大的转向能力，迅速转向，避免与 B 车碰撞，A、B 车交会时，临界状态为 A 车左前端与 B 车车尾刚好接触。

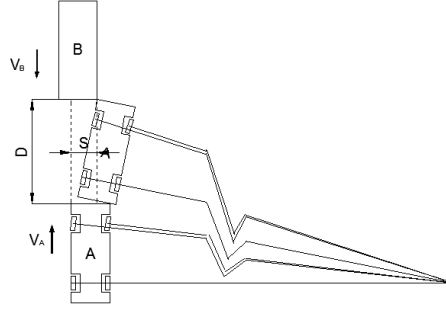


Figure 8. Schematic: critical situation of steering method to avoid rear-end collision

图 8. 采用转向方式规避追尾碰撞的临界情形

设 A 车最大侧向加速度为 $a_{y\max}$ ，该数值与路面附着系数、轮胎特性、载荷转移等有关，本文不作推导，仅认为是常数 $a_{y\max} = \mu g$ 。 μ 为整车加速度系数。

(1) 求解操作持续过程的转弯半径 R^* 及临界速度 V^*

根据运动学公式

$$a_{y\max} = \frac{V_A^2}{R} \quad (4)$$

式中， R —A 车达到最大侧向加速度时的转弯半径（质心处）。

当 $R \leq R_{\min}^*$ 时，

$$R^* = R_{\min}^* \quad (5)$$

当 $R > R_{\min}^*$ 时，

$$R^* = \frac{V_A^2}{a_{y\max}} \quad (6)$$

(2) 求解紧急操作过程时间 t_2

假设驾驶员或者主动安全系统以最大角速度 ω 转动方向盘，外侧车轮转角与方向盘转角的传动比为 i （假设传动比为常数）。

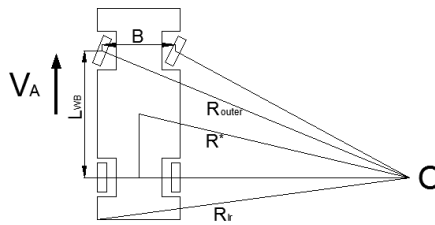


Figure 9.Schematic: Ackermann steering

图 9.阿克曼转向几何关系

假设整车质心在前后轴中间，前后轮距相等。如图 9 所示，由阿克曼转向几何关系及勾股定理可得外侧轮转弯半径与质心处转弯半径的关系。

求得紧急操作时间为：

$$t_2 = \frac{\theta}{\omega} = \frac{i}{\omega} \arctan \left(\frac{L_{WB}}{\sqrt{R^{*2} - \frac{L_{WB}^2}{4} + \frac{B}{2}}} \right) \quad (7)$$

θ 为方向盘转角：

$$\theta = i \arctan \left(\frac{L_{WB}}{\sqrt{R^{*2} - \frac{L_{WB}^2}{4} + \frac{B}{2}}} \right) \quad (8)$$

(3) 求解紧急操作过程 A 车行驶状态

假设 A 汽车是中性转向，即转向时，车身纵轴线与质心速度方向相同，质心侧偏角为零。

在紧急操作过程中，汽车做变半径匀速圆周运动（螺旋运动）。计算该过程汽车轨迹和航向角可使用微积分思想。将该过程按时间均匀分成 n 等份，每段时间为 Δt 。

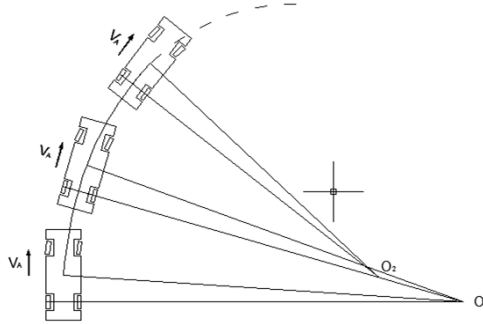


Figure 10.Schematic: emergency steering process

图 10.紧急转向过程分段示意图

如图 10 所示是该过程的分段示意图。将每一小段看做方向盘转角不变的等半径圆周运动，方向盘转角按照中间时刻的转角计算。方向盘转角的改变发生在每一小段初始时刻的瞬间。

以第一小段为例，A 车横摆角（即航向角变化，以 rad 为单位）为：

$$\alpha_1 = \frac{S_1}{R_1^*} \quad (9)$$

转角角度

$$\delta_1 = \arcsin \left(\frac{L_{WB}}{2R_1^*} \right) \quad (10)$$

以第 1 小段圆周运动的圆心为坐标原点 O_1 ，以初始时刻车速方向为 y 轴，以垂直 y 轴向右为 y 轴，建立坐标系，称为第 1 坐标系。则第 1 小段初始时刻质心位置坐标为 $(x_0, y_0) = (-R_1^* \cos \delta_1, R_1^* \sin \delta_1)$ ，第 1 小段结束时刻质心位置坐标为：

$$(x_1, y_1) = (-R_1^* \cos(\alpha_1 + \delta_1), R_1^* \sin(\alpha_1 + \delta_1))$$

重复以上步骤，迭代 n 次，可求得在第 1 坐标系中，第 n 小段结束时刻（即紧急转向阶段结束时刻）质心位置坐标为

$$\begin{aligned} (x'_n, y'_n) = & (-R_n^* \cos\left(\sum_1^n \alpha_n + \delta_n\right) - \sum_2^n \left(L_{on-1-on} \cos\left(\sum_2^n \alpha_{n-1}\right)\right), \\ & R_n^* \sin\left(\sum_1^n \alpha_n + \delta_n\right) + \sum_2^n \left(L_{on-1-on} \sin\left(\sum_2^n \alpha_{n-1}\right)\right) \end{aligned}$$

其中， $L_{on-1-on}$ 为相邻两个坐标原点的距离。

最终求得转向避让第二阶段的 A 车纵向位移为：

$$X_2 = y'_n - \frac{L_{WB}}{2} \quad (11)$$

A 车侧向位移为：

$$Y_2 = x'_n + \sqrt{R_{outer1}^2 - L_{WB}^2} - \frac{B}{2} \quad (12)$$

(3) 求转向持续过程 A 车行驶状态

A 车纵向位移为：

$$X_3 = R^* \left(\sin\left(\sum_1^n \alpha_n + \alpha_e\right) - \sin \sum_1^n \alpha_n \right) \quad (13)$$

A 车侧向位移为：

$$Y_3 = R^* \left(\cos \sum_1^n \alpha_n - \cos\left(\sum_1^n \alpha_n + \alpha_e\right) \right) \quad (14)$$

航向角为

$$\alpha = \sum_1^n \alpha_n + \alpha_e = \sum_1^n \frac{S_n}{R_n^*} + \frac{S_{n+1}}{R^*} \quad (15)$$

(5) 计算转向规避碰撞方式全过程行驶状态
在反应过程阶段，A 车向前匀速直线行驶距离：

$$X_1 = V_A t_1 \quad (16)$$

全过程，A 车向纵向行驶距离：

$$X = X_1 + X_2 + X_3 \quad (17)$$

A 车向侧向运动距离：

$$Y = Y_1 + Y_2 + Y_3 \quad (18)$$

(6) 计算转向规避碰撞临界情形

最终求得 A 车采用转向方式能规避碰撞的与 B 车最短距离（两车车头间距）为：

$$D = X - L_f - \frac{L_{WB}}{2} + \sqrt{\frac{W^2}{4} + \left(\frac{L_{WB}}{2} + L_f\right)^2} \cos(\varepsilon - \alpha) - X_B \quad (19)$$

在 A 车速较低或重叠率较小时，可能没有转向持续过程。可这样判断当满足下述条件时则没有转向持续过程，在紧急转向过程，A 车已经规避了碰撞事故。

$$Y_2 \geq \left(S - \frac{W}{2}\right) + \sqrt{\frac{W^2}{4} + \left(\frac{L_{WB}}{2} + L_f\right)^2} \sin(\varepsilon - \alpha) \quad (20)$$

其中，

$$\varepsilon = \arctan\left(\frac{W}{L_{WB} + 2L_f}\right) \quad (21)$$

至此完全转向避让模型建立过程。

3 避撞距离计算与分析

3.1 计算参数描述

本章以某款 A 级车为例，探讨不同因素对碰撞规避方式的影响，本章主要对制动回避与转向回避方式进行分析，并对比两种碰撞规避方式的适用情况。

某款 A 级车的部分参数如下表所示。

Table 2. Vehicle parameters
表 2. 某款 A 级车部分参数

参数	值	参数	值
长	4600mm	宽	1800mm
高	1470mm	轴距	2600mm
轮距	1500mm	前悬	1000mm
后悬	1000mm	最小转弯半径	6000mm
方向盘最大转角	720°	转向传动比	28
最大制动加速度	μg	最大侧向加速度	μg

Table 3. Other parameters
表 3. 其它参数取值表

参数	值	参数	值
驾驶员反应过程时间	0.5s	紧急制动时间	0.15s
方向盘最大转动角速度	5 rad/s	B 车车速	0 或 40km/h
A 车加速度(干燥/湿滑)	8m/s ² 或 3m/s ²	A 车速度范围	20 ~120km/h

B 车加速度(干燥/湿滑)	5m/s ² 或 2m/s ²	重叠率	30%,50%,100%
---------------	--	-----	--------------

其中 μ 为整车加速度系数,与路面、轮胎相关,假定纵向和侧向整车加速度系数相等。本算例中取 $g = 10m/s^2$ 。其它参数取值如表 3 所示。

驾驶员反应时间通常为 0.4~1.0s,制动器起作用时间通常为 0.15s~0.3s^[7],通过对多位驾驶员进行测试,在紧急情况下快速打方向盘的平均速度约为 5rad/s,由此选定算例计算参数。

3.2 完全规避事故的临界安全距离

运用 MATLAB 软件编程并绘制不同重叠率制动与转向策略图线,如图 11 所示。点 A,B,C 分别为制动图线与重叠率为 30%,50%以及 100%转向曲线的交点。

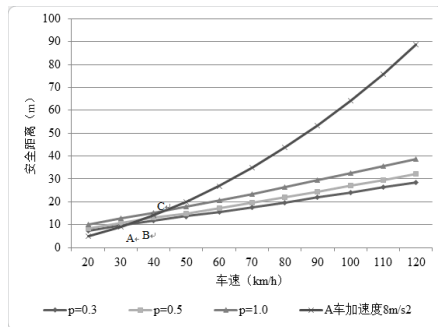


Figure 11.Comparison of braking& steering safety distance

图 11. 制动转向安全距离对比 (B 车静止, A 车加速度 8m/s²)

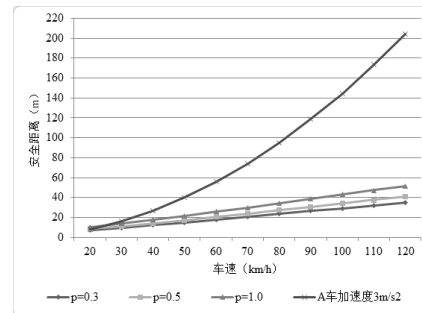


Figure 12.Comparison of braking& steering safety distance

图 12. 制动转向安全距离对比 (B 车静止, A 车加速度 3m/s²)

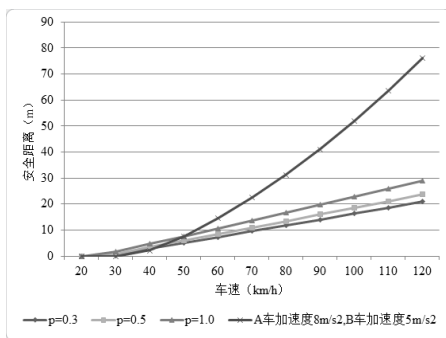


Figure 13.Comparison of braking& steering safety distance

图 13. 制动转向安全距离对比 ($V_b=40km/h$, A 车加速度 8m/s², B 车加速度 5m/s²)

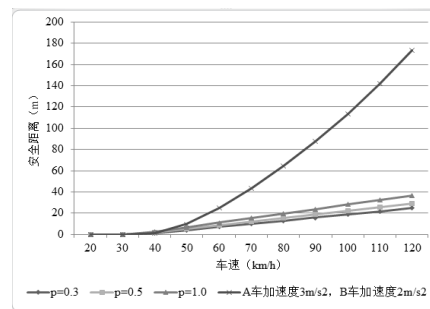


Figure 14.Comparison of braking& steering safety distance

图 14. 制动转向安全距离对比 ($V_b=40km/h$, A 车加速度 3m/s², B 车加速度 2m/s²)

当前后两车重叠率为 30%且车速低于 A 点所示车速时,采用制动方式需要的安全距离小于转向方式。当前后两车重叠率为 50%且车速低于 B 点所示车速时,制动需要的安全距离更小。当两车处于全宽重叠状态时,速度值则变为了 C 点所代表的车速值。

由图线可得到如下结论:在低速区域,制动方式更具有优越性,而高速区域,转向方式的所需要的安全距离远小于制动避让方式。图 12-14 等一系列图线也表现出同样的趋势。

3.3 无法完全避让过程分析

根据章节 3.2 中的阐述,能够得到不同速度、不同加速度以及不同重叠率下的安全距离需求。当两车车距满足安全距离需求时,选择制动或者转向即可完全规避碰撞,此时伤害风险为零。然而在现实条件中,紧急避

撞的车距条件往往不能够满足制动或者转向的安全距离需求，当两车实际车距同时小于制动与转向所需的安全距离，此时选择任意一种规避方式都会产生碰撞。故选择的避让方式能够最大程度降低乘员的碰撞伤害是至关重要的。

考虑到当车辆处于大重叠率碰撞时，前端碰撞缓冲结构能够充分发挥作用，故当车辆处于无法避让状态时，考虑采用调整重叠率的策略，使碰撞从较小重叠率碰撞转变为正面全宽碰撞，增大吸能区域从而降低对乘员的伤害^[8]。

因此，当车辆无法单纯采用转向或制动方法规避碰撞时，对比分析碰撞瞬间两车的相对速度 ΔV 与碰撞时刻重叠率 p ，考量转向驶离、制动以及调整增大碰撞重叠率三种策略对损伤风险的影响。由于调整重叠率使车辆处于较大重叠率碰撞的公式推导方法与转向策略相近，故不再单独进行数学推导。

特别的，当车辆处于全宽碰撞时，增大重叠率的方法不适用。故在所有 $p=1$ 的图线中，均不存在转向调整重叠率的曲线。

(1) 由于存在有驾驶员反应时间，在两车相对距离 d 较小的情况下，制动与转向方式的碰撞速度与重叠率图线存在有重合。

(2) 由于转向过程较短，其对纵向速度的减小较小。甚至在 B 车减速阶段，由于其纵向速度几乎没有改变造成相对碰撞速度增大。而制动过程对纵向速度有明显的减小作用，但其几乎没有重叠率变化。转向增大重叠率过程虽然纵向速度几乎不变，但其增大了吸能区域面积，一定程度上减小伤害。

(3) 三种方法都在重叠率或相对碰撞速度方面一定程度上减小了碰撞风险，但具体程度仍然需要结合多方面因素分析。

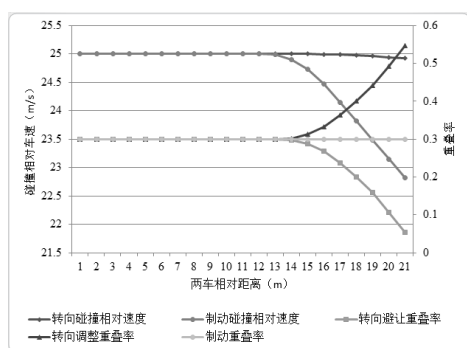


Figure 15.Comparison of brake& steer safety distance& overlap
图 15. 制动转向碰撞相对速度与重叠率图线

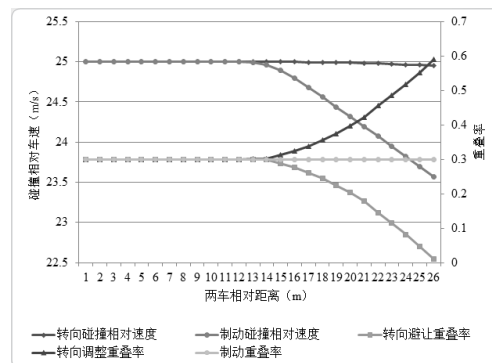


Figure 16.Comparison of brake & steer safety distance & overlap
图 16. 制动转向碰撞相对速度与重叠率图线 ($V_b=0, \mu=0.3, p=0.3$)

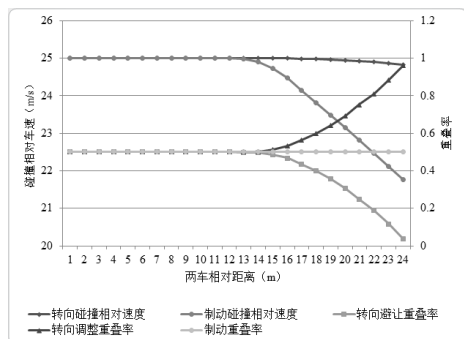


Figure 17.Comparison of brake& steer safety distance & overlap
图 17.制动转向碰撞相对速度与重叠率图线 ($V_b=0, \mu=0.8, p=0.5$)

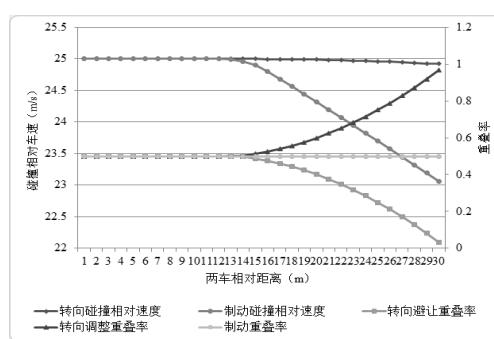


Figure 18.Comparison of brake & steer safety distance & overlap
图 18. 制动转向碰撞相对速度与重叠率图线 ($V_b=0, \mu=0.3, p=0.5$)

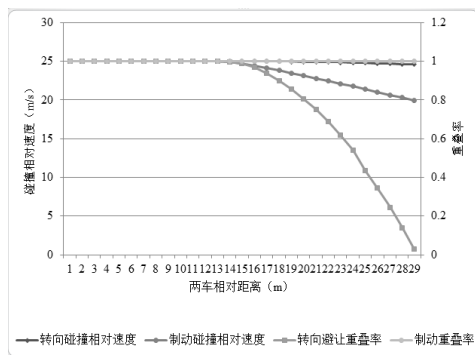


Figure 19. Comparison of brake & steer safety distance & overlap
图 19. 制动转向碰撞相对速度与重叠率图线 ($V_b=0, \mu=0.8, p=1$)

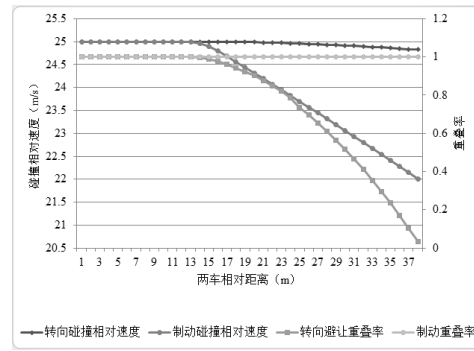


Figure 20. Comparison of brake & steer safety distance & overlap
图 20. 制动转向碰撞相对速度与重叠率图线 ($V_b=0, \mu=0.3, p=1$)

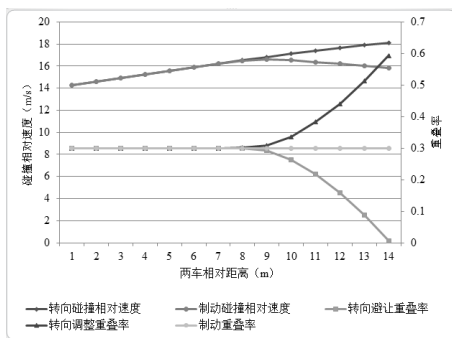


Figure 21. Comparison of brake & steer safety distance & overlap
图 21. 制动转向碰撞相对速度与重叠率图线 ($V_b=40\text{km/h}, \mu=0.8, p=0.3, B$ 车加速度 5m/s^2)

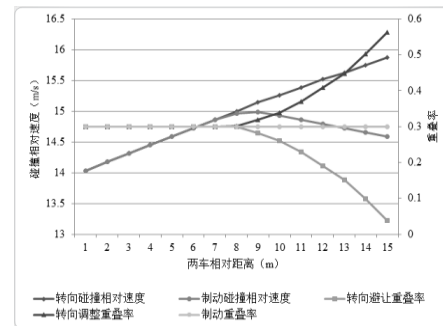


Figure 22. Comparison of brake & steer safety distance & overlap
图 22. 制动转向碰撞相对速度与重叠率图线 ($V_b=40\text{km/h}, \mu=0.3, p=0.3, B$ 车加速度 2m/s^2)

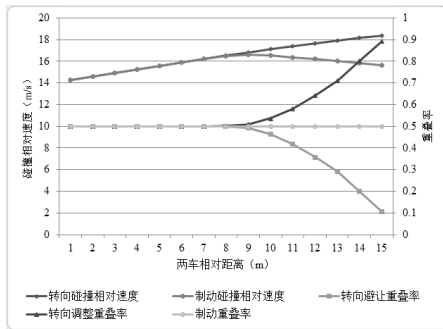


Figure 23. Comparison of brake & steer safety distance & overlap
图 23. 制动转向碰撞相对速度与重叠率图线 ($V_b=40\text{km/h}, \mu=0.8, p=0.5, B$ 车加速度 5m/s^2)

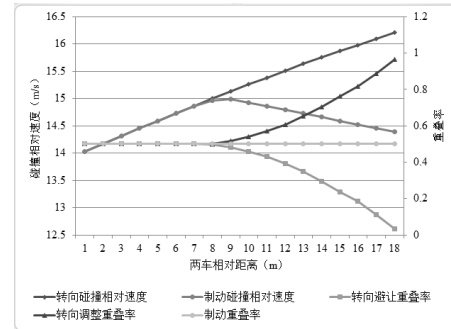


Figure 24. Comparison of brake & steer safety distance & overlap
图 24. 制动转向碰撞相对速度与重叠率图线 ($V_b=40\text{km/h}, \mu=0.3, p=0.5, B$ 车加速度 2m/s^2)

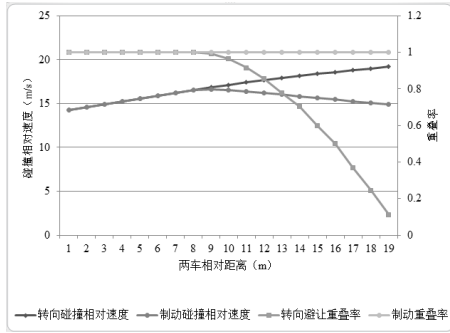


Figure 25.Comparison of brake & steer safety distance & overlap

图 25. 制动转向碰撞相对速度与重叠率图线 ($V_b=40\text{km/h}$, $\mu=0.8$, $p=1$, B 车加速度 5m/s^2)

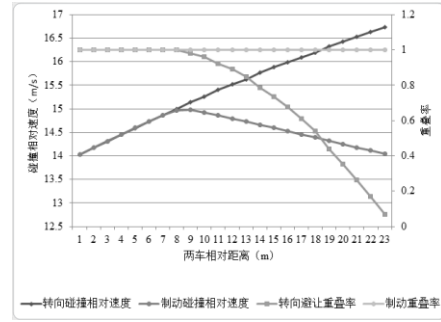


Figure 26.Comparison of brake & steer safety distance & overlap

图 26. 制动转向碰撞相对速度与重叠率图线 ($V_b=40\text{km/h}$, $\mu=0.3$, $p=1$, B 车加速度 2m/s^2)

4 安全收益分析

4.1 安全收益计算公式

参考前文中不同重叠率与车速对伤害的影响，对所选策略进行安全分析。

碰撞风险主要源于两方面：碰撞相对速度与碰撞重叠率。同时，由于 MAIS 不同时，不同重叠率损伤风险之间比例并不相同，故应当考虑到 MAIS 值在其中的影响。根据 ISS 分值计算方式可知，ISS 分值与 AIS 值的平方相关，故提出以下安全收益计算公式：

$$R = MAIS^2 \times R_v \times R_p \quad (22)$$

其中 R 为总损伤风险， $MAIS$ 为损伤最大值处等级， R_v 为车速损伤风险， R_p 为重叠率损伤风险。

以 MAIS3+ 损伤情况为例，根据图 1 拟合曲线，可得车速在 $0\sim 35\text{m/s}$ ，即 $0\sim 125\text{km/h}$ 范围内碰撞相对速度与重伤概率曲线，其重伤概率范围为 $0\sim 1$ 。根据 Dagmar^[6]等人研究的不同重叠率碰撞 MAIS3+ 伤害风险数据，假定全宽碰撞过程 $EBS>20\text{mph}$ 时，其风险系数为 1，推算小重叠率碰撞时风险系数为 3.2，中等重叠率碰撞风险系数为 1.5，故损伤风险值 R 的范围为 $0\sim 3.2$ 。 R 值越大则安全收益越低，反之乘员受到的安全威胁较小。同时，结合苏靖等人的研究^[7]，得到重叠率与重叠率损伤风险的对应关系如表 4 所示。

Table 4. Relationship between overlap and overlap injury risk
表 4. 重叠率损伤风险系数与重叠率对照表

重叠率	重叠率损伤风险	重叠率	重叠率损伤风险
0~10%	0.8	51~60%	1.5
11~20%	1.6	61~70%	1.2
21~30%	2.4	71~80%	1
31~40%	3.2	81~90%	1
41~50%	1.5	91~100%	1

4.2 安全收益计算结果

安全收益计算得到的 12 组图线如图 27-38 所示：

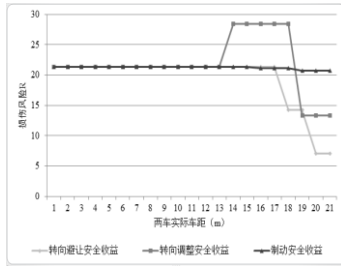


Figure 27.Risk analysis of different methods of avoidance
图 27. 不同规避方式损伤风险分析 ($V_b=0, \mu=0.8, p=0.3$)

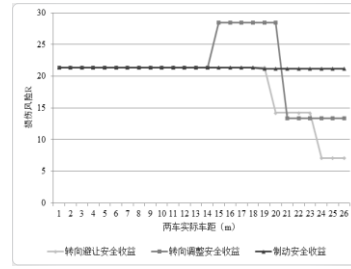


Figure 28.Risk analysis of different methods of avoidance
图 28. 不同规避方式损伤风险分析 ($V_b=0, \mu=0.3, p=0.3$)

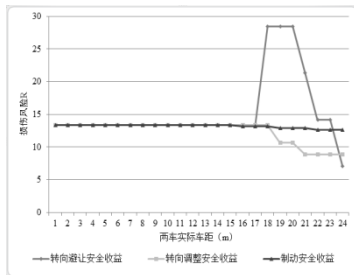


Figure 29.Risk analysis of different methods of avoidance
图 29. 不同规避方式损伤风险分析 ($V_b=0, \mu=0.8, p=0.5$)

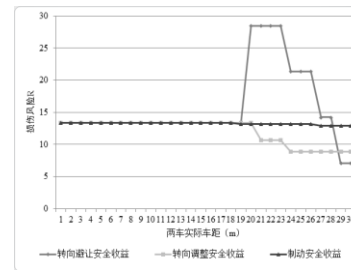


Figure 30.Risk analysis of different methods of avoidance
图 30. 不同规避方式损伤风险分析 ($V_b=0, \mu=0.8, p=0.5$)

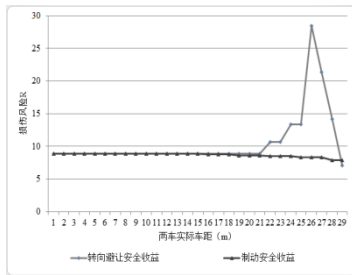


Figure 31.Risk analysis of different methods of avoidance
图 31. 不同规避方式损伤风险分析 ($V_b=0, \mu=0.8, p=1$)

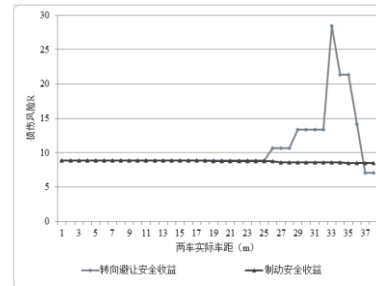


Figure 32.Risk analysis of different methods of avoidance
图 32. 不同规避方式损伤风险分析 ($V_b=0, \mu=0.3, p=1$)

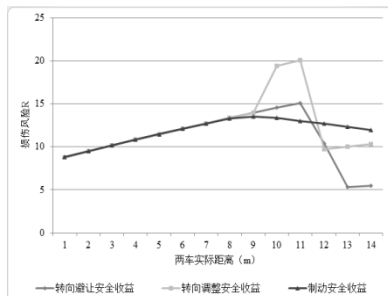


Figure 33.Risk analysis of different methods of avoidance
图 33. 不同规避方式损伤风险分析 ($V_b=40\text{km/h}, \mu=0.8, p=0.3, B$ 车加速度 5m/s^2)

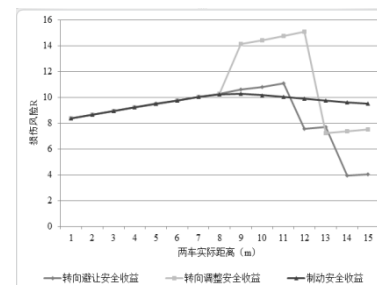


Figure 34.Risk analysis of different methods of avoidance
图 34. 不同规避方式损伤风险分析 ($V_b=40\text{km/h}, \mu=0.5, p=0.3, B$ 车加速度 2m/s^2)

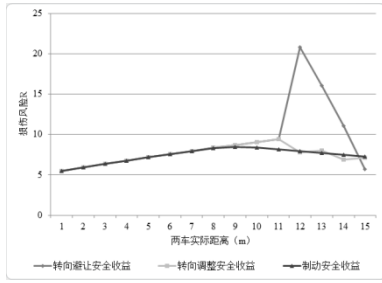


Figure 35.Risk analysis of different methods of avoidance

图 35. 不同规避方式损伤风险分析 ($V_b=40\text{km/h}$, $\mu=0.8$, $p=0.5$, B 车加速度 5m/s^2)

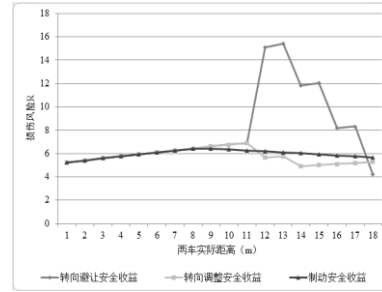


Figure 36.Risk analysis of different methods of avoidance

图 36. 不同规避方式损伤风险分析 ($V_b=40\text{km/h}$, $\mu=0.3$, $p=0.5$, B 车加速度 2m/s^2)

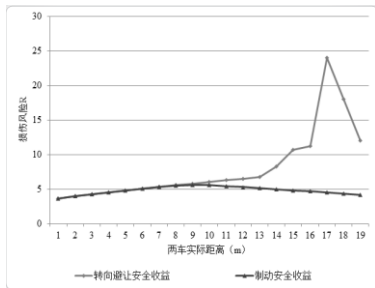


Figure 37.Risk analysis of different methods of avoidance

图 37. 不同规避方式损伤风险分析

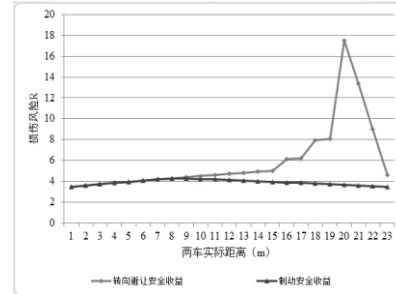


Figure 38.Risk analysis of different methods of avoidance

图 38 不同规避方式损伤风险分析

对比图线可以得到以下结论：

(1) 当两车重叠率为 30%~100%时，选择转向规避方式可能会造成碰撞发生在 30%~40%重叠率损伤高风险区域，且此时车辆速度并未大幅度降低，这是我们所不希望看到的情形。同样，当重叠率为 0~30%区域时，采用增大重叠率方式来减小碰撞伤害时，也可能是使碰撞发生在该区域，造成更大的风险。一旦重叠率进入 30~40% 区间，其损伤风险将出现峰值。转向方式损伤风险的主导因素是重叠率。

(2) 制动方式不改变两车重叠率，且由于上述图线中两车实际车距都处于较小的范围内，故制动作用的效果并不是非常明显。其损伤风险较为恒定，且与其碰撞相对速度趋势相同。

(3) 在反应时间内，不同回避策略的损伤风险相同。

(4) 相对而言，当碰撞不可避免地要发生时，当重叠率处于 0~30%区间时，转向避让的方式更优。调整重叠率的方式存在有产生 30~40%重叠率碰撞的可能性，如果碰撞避开了这一区间，其安全收益也较优。

(5) 当重叠率处于 0~50%区间时，采用调整重叠率的方式更优，能够产生一个超过 50%重叠率的较大重叠范围，有利于吸能区域产生作用。制动方式在两车实际车距较小时与调整重叠率方式安全收益相近，部分时候甚至能够超过。但在车辆转向产生较大重叠率差值后，制动的安全收益将低于调整重叠率的转向方式。而转向避让方式极易产生危险碰撞。

(6) 当两车为全宽碰撞时，并不存在转向调整的方式，此时制动安全收益明显高于转向方式。这是由于转向方式极易使碰撞发生在小重叠率区域。

5 结论

本文通过对不同重叠率伤害程度的统计与调查，结合制动与转向过程碰撞过程的建模与分析，提出不同重叠率下损伤风险程度的评定方法，进行策略与安全收益分析。

从速度的角度而言，制动方式能够较大程度地减小纵向速度，而转向方式却几乎无法改变车辆纵向速度，

故一旦出现碰撞，转向方式可能会出现更严重的后果。

从安全距离的角度而言，制动在车辆车速较小的情况下有较小的安全距离，而转向方式则在高速区域有更好的表现。

从重叠率角度而言，制动方式并不能改变重叠率，但在纵向对车速有明显的减小，故在大重叠率碰撞的情况下对比转向规避的方式更有优势。而转向回避策略在转向过程中不断减小重叠率直至车辆完全避撞，但如果两车相对距离过小，可能会出现 30~40%重叠率的碰撞造成较大的损伤风险。转向调整重叠率碰撞能够一定程度上增大重叠率，当处于小重叠率碰撞时能够规避 30~40%碰撞区域，对于减小乘员损伤有一定的作用。但其也可能造成碰撞发生在 30~40%重叠率区域。

安全收益受到多方面因素的影响，例如道路情况、车内乘员分布以及技术水平限制等，需要对具体的情况进行分析得到相应分值进行判断。

致谢(Acknowledgement)

本文的工作得到了朱西产教授、马志雄老师以及李霖博士的指导和支持。在此向老师和前辈的精心教导与付出表示诚挚的感谢！

参考文献(References)

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [2] Alexey Gurov1, Abhinav Sengupta1, Mats Jonasson1,2, et al. Collision Avoidance Driver Assistance System Using[C]// 12th International Symposium on Advanced Vehicle Control. Japan: Society of Automotive Engineers of Japan, 2014:438-443.
- [3] Richards D C. Relationship between speed and risk of fatal injury: pedestrians and car occupants[J]. Highway Safety, 2010.
- [4] Gabauer D J. Comparison of Delta-V and Occupant Impact Velocity Crash Severity Metrics Using Event Data Recorders[J]. Annual Proceedings, 2006, 50.
- [5] 苏靖. 车辆主动安全中碰撞临界安全车距算法研究[D]. 湖南大学, 2011.
- [6] Buzeman Dagmar G, Viano David C and Lövsund Per. Injury Probability And Risk In Frontal Crashes: Effects of Sorting Techniques on Priorities for Offset Testing [J]. Elsevier Science, 1998,30(5): 583-595.
- [7] 余志生. 汽车理论[M]. 上海: 机械工业出版社, 2009: 108-120.
- [8] Farmer C.M. 2005. Relationships of frontal offset crash test results to real-world driver fatality rates. Traffic Injury Prevention 6:31-37.