

# 交通撞车事故影响因素分析

Analysis of Impact Factors of Vehicular Crashes

姚建<sup>1</sup>, 田冬梅<sup>2</sup>, 蒋仲安<sup>2</sup>, 牛伟<sup>2</sup>, 郑斌<sup>3</sup>

(1.华北科技学院安全工程学院,北京 101601;2.北京科技大学土木与环境工程学院,北京 100083;3.四川石油管理局川东钻探公司安全环保质量部,重庆 400021)

YAO Jian<sup>1</sup>, TIAN Dong-mei<sup>2</sup>, JIANG Zhong-an<sup>2</sup>, NIU Wei<sup>2</sup>, ZHENG Bin<sup>3</sup>

(1.Safety Engineering College, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China; 2.Civil and Environment Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Safety & Environment Protection Part in East Sichuan Drilling Crop, Sichuan Oil Management Dept., Chongqing 400021, China)

**摘要:** 深入研究交通事故高发的影响因素,对预防和减少交通事故有重要的现实意义。采用安全系统工程方法,对交通撞车事故进行事故树分析。应用概率论知识,经过求解,得出3个最小径集,说明预防交通事故发生的可能途径。通过分析比较各基本事件的结构重要度、概率重要度和危险重要度,明确了基本事件与顶上事件的逻辑关系。最后,给出了合理、经济、安全的预防措施。

**Abstract:** An in-depth study on impact factors of traffic accidents could be important and realistically conducive in preventing and reducing traffic accidents. Utilizing methodology of safety system engineering, and through a fault-tree analysis of vehicular crashes, this paper develops three sets of minimum paths based on probability theory, resulting in the possible means to prevent traffic accidents from happening. The paper then compares the degrees of significance of the structure, probability, and hazard of basic events, and specifies the logic relationship between the basic and top-tiered events. Finally, the paper presents measures to prevent traffic accidents, which are believed to be reasonable, economic, and safe to implement.

**关键词:** 交通管理; 交通安全; 事故树分析; 预防措施  
**Keywords:** traffic management; traffic safety; fault tree analysis; preventive measures

中图分类号: U491.31 文献标识码: A

收稿日期: 2008-01-01

**作者简介:**北京市教育委员会共建项目建设计划资助(XK100080432);“十一五”国家科技支撑计划重点项目(2006BAK01 01 02)

**作者简介:**姚建(1979—),男,湖南岳阳人,硕士,讲师,主要研究方向:安全系统工程。E-mail:yaojian1998@126.com

随着城市机动车数量的增加,交通事故也越来越多,造成令人震惊的人员伤亡和财产损失。研究引起交通事故的影响因素,对预防和减少交通事故发生有重要的现实意义。本文运用安全系统工程理论知识,引入事故树概念,通过分析交通撞车这一特定事故,层层分析其发生原因,直到事件不能再分解为止。运用逻辑门符号将交通撞车特定事故与各层原因连接起来,得到形象、简洁、全面地表达其逻辑关系的逻辑树形图,即交通事故树图。通过对事故树简化、计算达到定性定量分析评价的目的。

## 1 交通撞车事故树

### 1.1 构造

从安全人机工程角度出发,考虑交通撞车事故系统的3个主要因素——人-机-环<sup>[1-2]</sup>,即人(驾驶员和行人)的不安全行为、物(机动车)的不安全状态和周围的环境因素(道路因素、天气状况、信号灯、标志等)。考虑这几个因素之间的相互关系及与交通撞车事故的逻辑联系,分析通常情况下的撞车事故,绘制交通撞车事故树图,见图1。

### 1.2 基本事件概率

交通撞车事故树包含25个基本事件,图中用字母X加数字表示。各基本事件的概率量化是以每1000个事故中该事件发生的数量作为其概

率。根据实际调研、专家打分, 得到各基本事件的事故概率值。例如, 调查 50 起交通事故中有 4 起因超载导致, 超载这一基本事件发生的概率即为 0.080。25 个基本事件的事故概率见表 1。结合各基本事件发生的概率, 通过量的分析找出有利的预防措施, 突破以往用专家经验分析事故的水平, 同时引入安全系统工程深入分析交通事故的影响因素, 使预防措施更具说服力。

### 2 系统分析

系统分析是从事故树结构出发, 分析各基本事件的发生对顶上事件(交通撞车事故)发生的影响程度<sup>[3]</sup>, 通常有定性和定量两种分析方法。应用安全系统工程理论, 列出逻辑关系式, 求出最

小割集, 找出交通撞车事故发生的可能路径。计算各基本事件的结构重要度, 求出最小径集, 确定预防顶上事件发生的有效措施、顶上事件发生的概率和基本事件的概率重要度与危险重要度, 通过量的分析给出交通撞车事故的安全评价。

#### 2.1 定性分析

##### 2.1.1 求解最小割集

最小割集是能导致顶上事件发生的、最低限度的基本事件集合。结合安全系统工程理论和交通撞车事故树得出交通撞车事故的逻辑表达式:

$$T_0 = M_1 M_2 M_3 = (M_6 + X_1 + X_2)$$

$$(M_4 + M_5)(X_{25} + M_8 + M_{13}). \quad (1)$$

依次将中间事件用基本事件替换, 注意“与门”、“或门”的运算符号, 通过逻辑运算得出

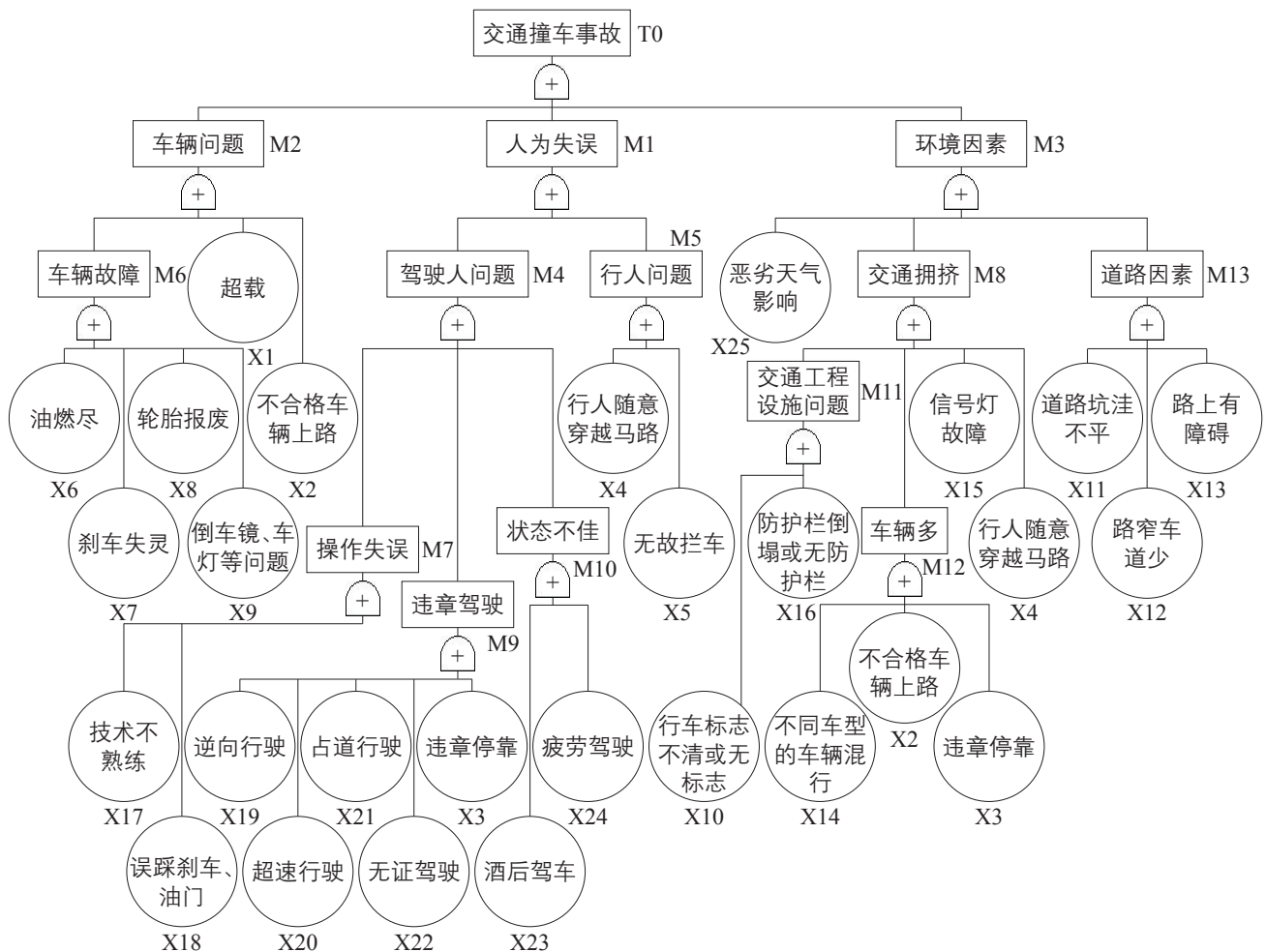


图 1 交通撞车事故树

Fig.1 Fault tree of vehicular crashes

的最小割集有:

{X18 X9 X12}, {X4 X9 X12}, {X22 X1 X12}, {X22 X2 X12}, {X22 X6 X3}, {X22 X6 X25}, {X5 X9 X12}, {X4 X1 X12}, {X4 X2 X12}, {X23 X1 X12}, {X17 X1 X12}, {X19 X1 X3}, {X19 X1 X25}, {X23 X2 X12}, {X17 X2 X12}, {X19 X2 X3}, {X19 X2 X25}, {X24 X9 X15}, {X18 X9 X15}, {X22 X7 X15}, {X22 X8 X15}, {X22 X9 X15}, {X22 X6 X16}, {X22 X6 X15}, {X24 X9 X25}, {X18 X9 X25}, {X22 X7 X25}, {X22 X8 X25}, {X22 X9 X25}, {X5 X1 X25}, {X5 X2 X25}, {X5 X9 X15}, {X5 X9 X25}, {X4 X1 X15}, {X4 X1 X25}, {X4 X2 X15}, {X4 X2 X25}, {X4 X7 X15}, {X4 X8 X15}, {X4 X9 X15}, {X4 X6}, {X4 X7 X25}, {X4 X8 X25}, {X4 X9 X25}, {X24 X1 X25}, {X23 X1 X15}, {X23 X1 X25}, {X18 X1 X25}, {X17 X1 X15}, {X17 X1 X25}, {X21 X1 X15}, {X20 X1 X15}, {X3 X1 X15}, {X22 X1 X15}, {X19 X1 X16}, {X19 X1 X4}, {X19 X1 X15}, {X21 X1 X25}, {X20 X1 X25}, {X3 X1 X25}, {X22 X1 X25}, {X24 X2 X25}, {X23 X2 X15}, {X23 X2 X25}, {X18 X2 X25}, {X17 X2 X15}, {X17 X2 X25}, {X21 X2 X15}, {X20 X2 X15}, {X3 X2 X15}, {X22 X2 X15}, {X19 X2 X16}, {X19 X2 X4}, {X19 X2 X15}, {X21 X2 X25}, {X22 X2 X25}, 共 76 个。由最小割集的定义知, 交通撞车事故发生的可能路径有 76 条, 是极其容易发生的事故。

2.1.2 求解最小径集

最小径集又称最小通集, 是事故树中不能导致顶上事件发生的、最低限度的基本事件集合。求解最小径集, 首先要把事故树转换成与之对应的成功树, 即将事故树中的“与门”换成“或门”, “或门”换成“与门”, 并把所有事件的发生变成不发生, 使之变成原事件的补事件, 在事件上加“'”区别于原事件<sup>[4]</sup>。结构函数为

$$T0' = M1' + M2' + M3' = M6' X1' X2' + M4' M5' + X25' M8' M13', \quad (2)$$

逐一变换计算得出:

$$T0' = X19' X4' X5' X23' X17' X24' X18' X21' X20' X3' X22' + X6' X1' X2' X7' X8' X9' + X14' X25' X10' X4' X15' X13' X11' X16' X12' X2' X3'。 \quad (3)$$

由此可看出该事故树有 3 个最小径集:

$$P1 = \{ X19' X4' X5' X23' X17' X24' X18' X21' X20' X3' X22' \},$$

$$P2 = \{ X6' X1' X2' X7' X8' X9' \},$$

$$P3 = \{ X14' X25' X10' X4' X15' X13' X11' X16' X12' X2' X3' \}。$$

由最小径集的定义知, 要使顶上事件不发生, 有 3 种可能方案, 它表示了系统的安全性。根据最小径集做出交通事故可靠性图<sup>[4]</sup>, 见图 2。

2.1.3 求解结构重要度

结构重要度分析是从事故树结构上分析各基本事件的发生对顶上事件发生的影响程度。结构重要度计算公式为<sup>[4]</sup>

$$I_{\phi(i)} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^k \frac{1}{n_j} (j \in k_j), \quad (4)$$

式中:  $I_{\phi(i)}$  为第  $i$  个基本事件的结构重要度;  $K$  为

表 1 基本事件概率表  
Tab.1 Probability value of basic event

代号	概率	代号	概率	代号	概率	代号	概率	代号	概率
X1	0.085	X6	0.010	X11	0.025	X16	0.015	X21	0.155
X2	0.015	X7	0.050	X12	0.040	X17	0.250	X22	0.025
X3	0.075	X8	0.025	X13	0.065	X18	0.200	X23	0.035
X4	0.028	X9	0.005	X14	0.025	X19	0.015	X24	0.450
X5	0.260	X10	0.110	X15	0.004	X20	0.350	X25	0.330

最小割集总数;  $n_j$  为第  $k_j$  个最小割集的基本事件数;  $k_j$  为第  $j$  个最小割集。经计算, 得出各基本事件的结构重要度, 见表 2。

从计算结果可排出结构重要度的顺序为:

$I(25) > I(1) = I(15) > I(2) > I(4) > I(22) > I(9) > I(12) > I(19) > I(17) = I(3) = I(23) > I(6) > I(18) = I(5) > I(24) = I(7) = I(8) = I(21) > I(16) = I(20)$ 。由此可看出, 基本事件的发生对顶上事件发生的影响程度 X25, X15, X1, X2, X4 最大。

2.1.4 小结

1) 从事故树逻辑符号的数量看, “或门”符号占多数, 说明大多数基本事件发生都可能导致顶上事件发生, 系统运行处于危险状态, 即此类事故属于频发事故, 且引发原因很多, 系统比较复杂, 危险性较大。

2) 最小割集中包含的基本事件越少, 发生事故的可能性越大, 危险性也就越大。从该事故树的最小割集可看出, 只要有 1 组最小割集中的基本事件全部发生, 就必然引起顶上事件的发生。在所有的最小割集中: 有 30 个最小割集存在基本事件 X25; 26 个最小割集存在基本事件 X15, X1, 24 个最小割集存在基本事件 X2; 16 个最小割集存在基本事件 X4。因此, X25, X15, X1,

X2, X4 是 5 个最危险的基本事件, 其次是 X22, X9, X12, …… , 如结构重要度排序。

3) 由结构重要度顺序可看出, 结构重要度越大, 对顶上事件的影响越大。X25, X15, X1 在系统中占首要地位, 说明不论其他事件发生与否, 只要基本事件 X25, X15, X1 发生, 就可能导致交通撞车事故发生, 因此在预防上要加倍重视这 3 个基本事件。

4) 从最小径集可看出, X6', X1', X2', X7', X8', X9' 基本事件不发生, 就不会引发交通撞车事故, 即系统可正常运行。其次, X19', X4', X5', X23', X17', X24', X18', X21', X20', X3', X22' 基本事件不发生, 或 X14', X25', X10', X4', X15', X13', X11', X16', X12', X2', X3' 基本事件不发生, 也能使系统正常运行。由此可知, X25, X15, X1 是 3 个最关键的基本事件, X2, X4 是比较关键的基本事件, X22, X9, X12 是相对关键的基本事件。

由以上 4 点分析结果可看出, 基本事件 X25, X15, X1 与顶上事件的发生存在极为重要的关系, 对交通撞车事故的发生起着举足轻重的作用; 基本事件 X2, X4 与顶上事件存在比较重要的关系, 对交通撞车事故的发生影响较大; 基

表 2 各基本事件的结构重要度  
Tab.2 The degree of significance of the structure of each basic event

代号	计算结果	代号	计算结果	代号	计算结果	代号	计算结果	代号	计算结果
I(1)	0.1140350877	I(6)	0.0241228070	I(11)	可忽略	I(16)	0.0131578947	I(21)	0.0175438596
I(2)	0.1052631578	I(7)	0.0175438596	I(12)	0.0482456140	I(17)	0.0263157894	I(22)	0.0701754385
I(3)	0.0263157894	I(8)	0.0175438596	I(13)	可忽略	I(18)	0.0219298245	I(23)	0.0263157894
I(4)	0.0723684210	I(9)	0.0570175438	I(14)	可忽略	I(19)	0.0438596491	I(24)	0.0175438596
I(5)	0.0219298245	I(10)	可忽略 <sup>①</sup>	I(15)	0.1140350877	I(20)	0.0131578947	I(25)	0.1315789473

① 指计算值  $< 10^{-4}$ , 以下各表同。

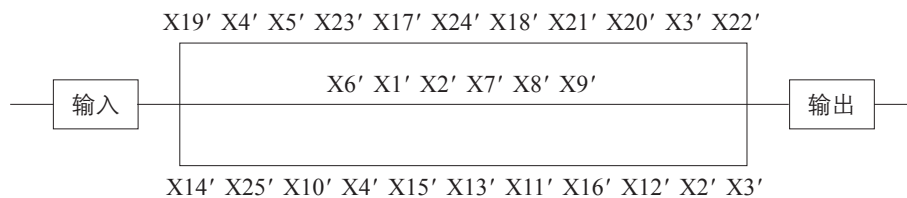


图 2 交通事故可靠性图  
Fig.2 Traffic accidents reliability

本事件 X22, X9, X12 与顶上事件存在相对重要的关系, 对交通撞车事故的发生影响也较大。其余为一般基本事件, 影响相对较小, 这一分析结果可用来制定有效的预防措施。

## 2.2 定量分析

### 2.2.1 顶上事件发生概率

顶上事件发生概率  $P(T)$  是事故树结构函数, 等于所有最小割集发生概率的代数和减去两两最小割集组合的概率积, 再减去三三最小割集组合的概率积, 直到最后计算完毕为止; 或从最小径集着手, 等于 1 减去各最小径集不发生的概率代数和, 加上两两最小径集不发生的概率代数和, 减去三三最小径集不发生的概率代数和, 直到最后计算完毕为止。为了减少计算量, 一般采取最小割集和最小径集中数量少的来计算, 在该事故树中最小割集有 76 个, 最小径集有 3 个, 故采取最小径集的公式计算<sup>[3]</sup>:

$$Q = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Q_i), \quad (5)$$

式中:  $Q$  为顶上事件发生的概率值;  $n$  为最小径集数;  $Q_i$  为基本事件概率值。

通过计算得出顶上事件发生的概率为 0.048。由此可看出, 所求概率的数量级达到了  $10^{-2}$ , 而表 1 给出的一般基本事件的概率数量级也为  $10^{-2}$ , 因此, 交通撞车事故为非常容易发生的事故。

### 2.2.2 基本事件概率重要度

上述得到的结构重要度是从事故树结构上分析各基本事件的重要程度。下面从各基本事件发生概率的变化对顶上事件发生概率的影响着手,

分析基本事件的概率重要度, 其计算公式为<sup>[3]</sup>

$$I_g = \frac{\partial Q}{\partial Q_i}, \quad (6)$$

式中:  $I_g$  为第  $i$  个基本事件概率重要度。计算得出各基本事件的概率重要度如表 3 所示。

由表 3 得到概率重要度顺序为:

$Ig(1) > Ig(2) > Ig(9) > Ig(25) > Ig(15) > Ig(4) > Ig(22) > Ig(19) > Ig(6) > Ig(23) = Ig(17) > Ig(5) = Ig(18) > Ig(24) > Ig(21) > Ig(3) > Ig(20) > Ig(7) = Ig(8) > Ig(12) > Ig(16) > Ig(10) = Ig(13) = Ig(14) = Ig(11)$ 。该结果说明: 减少基本事件 X1, X2 发生的概率, 能使顶上事件发生的概率有效减少; 基本事件 X9, X25, X15, X4, X22, X19 对顶上事件的影响较小; 对顶上事件影响最小的基本事件是 X10, X11, X13, X14。与结构重要度进行比较可以发现: 基本事件 X25, X15 的概率重要度下降了, 而基本事件 X1, X2 的概率重要度有所上升, 这是因为基本事件 X1, X2 所在的最小割集中其他基本事件的概率, 比基本事件 X25, X15 所在的最小割集中其他基本事件的概率大, 因此概率重要度有变化。由此可知, 1 个基本事件的概率重要度如何, 并不取决于它本身概率值的大小, 而是取决于它所在最小割集中其他基本事件概率值的大小。

### 2.2.3 基本事件危险重要度

通过降低基本事件的发生概率, 可减少交通撞车事故的发生, 且控制发生概率大的基本事件要比控制概率小的基本事件相对容易, 但概率重要系数并未从根本上反映基本事件的概率在事故树中的重要程度。因此, 有必要引出能反映这一

表 3 各基本事件的概率重要度

Tab.3 The degree of significance of the probability of each basic event

代号	计算结果	代号	计算结果	代号	计算结果	代号	计算结果	代号	计算结果
Ig(1)	0.3988674527	Ig(6)	0.0382834607	Ig(11)	可忽略	Ig(16)	0.0017493381	Ig(21)	0.0332479883
Ig(2)	0.3031224940	Ig(7)	0.0176220672	Ig(12)	0.0127707728	Ig(17)	0.0371130241	Ig(22)	0.0666343433
Ig(3)	0.0301383493	Ig(8)	0.0176220672	Ig(13)	可忽略	Ig(18)	0.0346693472	Ig(23)	0.0371130241
Ig(4)	0.0736134438	Ig(9)	0.2518563880	Ig(14)	可忽略	Ig(19)	0.0446123185	Ig(24)	0.0344762424
Ig(5)	0.0346693472	Ig(10)	可忽略	Ig(15)	0.0764545655	Ig(20)	0.0284387601	Ig(25)	0.1368583125

特点的危险重要度  $C_g$ , 从基本事件的敏感度和概率重要度 2 个方面衡量了各基本事件的重要程度, 其计算公式为<sup>[3]</sup>

$$C_g = \frac{\partial \ln Q}{\partial \ln q_i} = \frac{q_i}{Q} I_j, \quad (7)$$

式中:  $C_g$  为危险重要度;  $q_i$  为基本事件  $i$  的发生概率。计算结果如表 4 所示。

由表 4 得到各基本事件的危险重要度顺序为:

$C_g(25) > C_g(1) > C_g(24) > C_g(20) > C_g(5) > C_g(21) > C_g(2) > C_g(3) > C_g(4) > C_g(22) > C_g(23) > C_g(9) > C_g(17) > C_g(7) > C_g(18) > C_g(19) > C_g(12) > C_g(8) > C_g(6) > C_g(15) > C_g(16) > C_g(10) = C_g(13) = C_g(14) = C_g(11)$ 。由此可知, 基本事件 X25 的危险性再次上升到首位, 说明恶劣的天气变化是自然的、不确定性的因素, 它不受人控制。因此, 在恶劣天气发生交通撞车事故的危险性增大。与概率重要度相比, 基本事件 X2, X9 的危险重要度下降了, 说明基本事件 X2, X9 的危险性降低, 这与基本事件 X2, X9 的概率值和结构树中的位置有关。基本事件 X24, X20, X5 的危险重要度上升了, 这是因为这些基本事件在现实中极易发生, 因此, 它们的发生概率比较大, 对顶上事件的影响很大, 所以其危险重要度提高。

通过分析系统的结构重要度、概率重要度和危险重要度可知, 基本事件 X10, X11, X13, X14 的重要度都可忽略, 说明这些因素对可能产生的交通拥挤并不能起决定性作用, 即发生交通拥挤与基本事件 X10, X11, X13, X14 的关系不大。

### 3 预防交通撞车事故具体措施

根据对事故树的定性、定量分析结果可知: 结构重要度分析反映了基本事件的重要程度; 概率重要度分析反映了基本事件的概率增减对顶上事件发生概率的敏感度; 危险重要度分析反映了基本事件的敏感度和发生概率大小对顶上事件的影响程度。通过分析 3 个重要度, 找出了对交通撞车事故发生影响较大的几个基本事件, 即 X25, X1, X2, X4, X15, X9, X7, X8, X22, X24, 可以有针对性地采取预防措施来控制这些基本事件, 以保证系统的安全, 从而摆脱传统、盲目的预防方案, 更好地做到“防范于未然”。

1) 控制基本事件 X25 和 X15, 防止或减少事故发生。例如, 严格检查、监督信号灯运行状态, 及时排查出现问题的信号灯; 关注天气状况, 减少机动车在天气恶劣的环境下出行, 必须出行时要提高警惕, 减速慢行; 提高交通管理机制的运行效率, 信号控制交叉口和公交车站要配备一定的交通协管员等。

2) 控制基本事件 X1 和 X2, 防止事故发生。例如, 加强交警监督, 严格监测交通车辆, 对超载、不合格车辆上路、违章停车等现象采取一定的惩罚措施; 普及交通安全教育, 增强交通参与者的安全意识。

3) 控制基本事件 X7, X8 和 X9, 防止事故发生。坚决杜绝故障车辆上路, 对存在故障的车辆, 在发车前要进行详细检查, 以减少行驶途中的突然故障。对驾驶带故障车辆上路的人员, 必要情况下采取罚款、吊销驾照等辅助手段加大治

表 4 各基本事件的危险重要度  
Tab.4 The degree of significance of the hazard of each basic event

代号	计算结果	代号	计算结果	代号	计算结果	代号	计算结果	代号	计算结果
Cg(1)	0.701760455	Cg(6)	0.007924147	Cg(11)	可忽略	Cg(16)	0.000543133	Cg(21)	0.106669052
Cg(2)	0.094113254	Cg(7)	0.018237622	Cg(12)	0.010573494	Cg(17)	0.019204708	Cg(22)	0.034480971
Cg(3)	0.046786665	Cg(8)	0.009118811	Cg(13)	可忽略	Cg(18)	0.014352152	Cg(23)	0.026886591
Cg(4)	0.042663505	Cg(9)	0.026065396	Cg(14)	可忽略	Cg(19)	0.013851200	Cg(24)	0.321124770
Cg(5)	0.186577976	Cg(10)	可忽略	Cg(15)	0.006330015	Cg(20)	0.206025069	Cg(25)	0.934816754

理力度。

4) 控制基本事件 X4, 减少事故发生的可能性。加强对行人的管理, 严格禁止不遵守交通规则随意穿越马路、拦车等影响交通正常运行的行为, 对随意穿越马路的行人, 要进行批评教育, 直到他们知错为止, 并向其宣传道路交通安全的有关法律、法规, 唤醒其交通安全意识。

5) 控制基本事件 X18, X22, X24 等的发生, 减少事故发生的可能性。例如, 加大对驾驶人违章驾驶、酒后驾驶、无证驾驶的检查力度; 控制车速, 避免超速行驶、占道行驶、逆向行驶; 对驾驶人驾驶技术进行严格考核, 禁止技术不熟练、不熟悉交通规则的驾驶人上路。

尽管上述 3 个重要度产生的结果有些许不同, 但给出的措施是结合 3 种分析结果制定的, 相比于只用 1 种重要度的分析, 更具有实际意义, 同时也加强了系统的稳定性。值得说明的是, 在编制安全检查表时, 有危险重要度分析产生的安全检查表, 才能真正反映事故树的本质<sup>[5]</sup>。

#### 4 结语

安全系统工程理论是对各行业的安全生产问题进行专门研究的理论, 是目前安全方面最现代的科学理论。将该理论应用于交通撞车事故系统中, 并对该系统进行评价, 通过分析交通撞车事故树的最小割集、最小径集、结构重要度、概率重要度、危险重要度, 得到了导致交通撞车事故的几个重要影响因素, 包括恶劣天气影响、信号灯故

障、车辆超载等, 并根据其存在的危险程度采取可靠的预防措施。这些措施对控制交通事故发生、保证交通系统安全性、减少交通损失等具有一定意义。

参考文献:

References:

- [1] 何学秋. 安全工程学[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2000.  
HE Xue-qiu. *Safety Engineering*[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2000.
- [2] 王泽申. 安全分析与事故预测[M]. 北京: 北京经济学院出版社, 1990.  
WANG Ze-shen. *Safety Analysis and Accident Forecast*[M]. Beijing: Beijing School of Economics press, 1990.
- [3] 王凯全, 邵辉. 事故理论与分析技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.  
WANG Kai-quan, SHAO Hui. *Accident Theory and Analytic Technology*[M]. Beijing: Chemistry Industry press, 2004.
- [4] 左东红, 贡凯青. 安全系统工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.  
ZUO Dong-hong, GONG Kai-qing. *Safety Systems Engineering*[M]. Beijing: Chemistry Industry press, 2004.
- [5] 朱大奇, 等. 基于故障树最小割集的故障诊断方法研究[J]. 数据采集与处理, 2002, 17(3): 341-344.  
ZHU Da-qi, et al. Diagnosis Approach Based on Minimal Cut Sets of Fault Trees[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2002, 17(3): 341-344.

(上接第 85 页)

- LIU Xi, ZHANG Kan. Quantitative Evaluation of Road Traffic Signs[J] *Chinese Ergonomics*, 2003, 9 (4): 23-26.
- [4] LIU Yung-Ching. Simulated Study on the Effects of Information Volume on Traffic Signs, Viewing Strategies and Sign Familiarity upon Driver's Visual Search Performance[J] *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2005, 35 (12): 1147-1158.

- [5] 傅祖芸. 信息论——基础理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.  
FU Zu-yun. *Basic Theory and Application of Information Theory*[M]. Electronics Industry Press, Beijing China, 2001.
- [6] Charles C Macadam. Understanding and Modeling the Human Driver[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2003, 40(3): 101-134.