

山区长大下坡路段货车行车风险因素识别

胡立伟^{1,2}, 李林育¹, 古含焱³, 蒋鑫³, 李学伟⁴, 胡澄宇²

(1. 昆明理工大学 交通工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省交通规划设计研究院 陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室, 云南 昆明 650200; 3. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 4. 攀枝花学院 土木与建筑工程学院, 四川 攀枝花 617000)

摘要:为了探明山区长大下坡路段货车各行车风险因素间内在关联、层次结构,并明确各风险因素的重要度,找出关键风险致因,从交通安全和系统工程观点出发,同时结合文献萃取法和 Delphi 法构建出山区长大下坡路段货车行车风险因素集,基于决策试验与评价实验室(DEMATEL)和解释结构模型(ISM)存在的一定共性,吸取 IMS 法和 DEMATEL 法的优点,运用集成 DEMATEL-ISM 方法将复杂的行车风险因素关系转化为直观的具有良好层次结构关系的山区长大下坡路段货车行车风险因素识别模型,从而计算各行车风险因素的中心度与原因度,根据中心度确定行车风险因素的重要程度,根据原因度明确行车风险因素属性,并由此找出复杂因果关系中的关键风险因素及货车行车安全系统中最直接、最根本的风险因素。研究表明:长大下坡路段限速值、车辆性能、动态反应判断能力、疲劳驾驶等是导致行车风险发生的最重要因素,而交通设施完备程度、年龄、道路结构物的重要度最低,影响程度最小;在原因因素中,气象状况原因度最大,对其他风险因素的影响大,且自身所受其他因素的影响也较小,而货车车型大小对其他风险因素影响较小;在结果因素中,超速的原因度绝对值最大,受其他风险因素的影响最大,属于行车风险系统的近邻风险层,是产生交通风险的直接致因;近邻风险是交通事故发生的最直接诱因,过渡风险与其他风险因素存在着联动关系,其既容易对系统中其他风险因素的变化敏感,也容易影响其他风险因素,本质风险驾驶人安全意识与态度是整个系统的根源性影响因素;关键链接因素交通流量、纵坡坡度和坡长、气象状况、交通组成特性与其他风险因素存在强联动关系,它们与其他风险因素发生复杂的非线性交互的可能性大,从而增大酿成交通事故的可能。

关键词:交通工程;山区;集成 DEMATEL-ISM;长大下坡路段;货车;风险因素识别

中图分类号:U491

文献标志码:A

Driving risk factors identification in long downhill sections of mountain area

HU Li-wei^{1,2}, LI Lin-yu¹, GU Han-yan³, JIANG Xing³, LI Xue-wei⁴, HU Cheng-yu²

(1. Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China; 2. National Engineering Laboratory for Surface Transport Weather Impacts Prevention, Yunnan Transport Planning and Designing Research Institute, Kunming 650200, Yunnan, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 4. School of Civil and Architectural Engineering, Panzhihua University, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

收稿日期:2018-09-16

基金项目:国家自然科学基金项目(61863019);陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室开基金项目(NELJA201605);云南省教育厅科学研究基金项目(2015Y082)

作者简介:胡立伟(1978-),男,山东潍坊人,副教授,工学博士,E-mail:liweihukm@sina.com。

Abstract: The intrinsic correlation and hierarchical structure among driving risk factors in long downhill sections of mountainous areas were obtained, to clarify the importance of each risk factor and determine key risk causes from the viewpoints of traffic safety and system engineering. Using literature extraction and the Delphi method, the risk factors were set up for truck driving in the long downhill sections of a mountain area. Based on the common characteristics of decision making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) and interpretative structural modelling (ISM), the advantages of IMS and DEMATEL method were clarified, and the complex risk factors were applied using the DEMATEL-ISM method. The relationship was transformed into an intuitionistic model of truck driving risk identification a good hierarchical structure in the high and lower slopes of the mountain area. The centrality and cause degree of various driving risk factors were calculated for determining the importance of the driving risk factors according to the central degree, and for defining the attributes of the driving risk factors according to the original degree. To find out the key risk factors in the complex causality and the most direct and fundamental risk factors in the truck driving safety system, for improving the safety of truck driving in the long downhill section of mountain area. The results show that speed limit value, vehicle performance, dynamic response judgment ability and driving fatigue are the most important factors leading to the occurrence of driving risk, while the importance of traffic facilities readiness, age and road structure is the lowest, of which the impact on the safety system of driving risk is the least. Among the irregular factors, meteorological condition has the greatest degree of effect, which also has a greater impact on other risk factors, while the other factors have a smaller impact in itself. The size of truck has a smallest impact on other risk factors. Among the resulting factors, the absolute value of cause degree of over-speed is the greatest, which is the most affected by other risk factors, belonging to the near-neighbor risk layer of the driving risk system, and it is the direct cause of traffic risk. Neighbor risk is the most direct cause of traffic accidents. Transition risk has a linkage with other risk factors, which is easy to be sensitive to the changes of other risk factors in the system, but also to affect other risk factors. Essential risk driver's safety awareness and attitude is the root factor of the whole system. The key link factors that traffic flow, gradient and slope length, meteorological conditions, and traffic composition characteristics, have strong linkage with other risk factors. They have a great possibility of complex non-linear interaction with other risk factors, thus increasing the possibility of traffic accidents. 4 tabs, 4 figs, 27 refs.

Key words: traffic engineering; mountain area; DEMATEL-ISM integrated method; long downhill section; truck; risk factor identification

0 引言

山区公路受其复杂的地形、地质条件及工程造价等的影响,纵断面线形设计中常采用连续长大下坡形式^[1]。随着载重货车的增多,加之受高海拔的影响,雾、冰雪、强侧风、强降雨等不良天气状况时有发生,因此长大下坡路段成为重特大交通事故的多发区。如何解决山区公路货车连续长大下坡过程中行车安全问题,是中国西部山区公路持续健康发展面临的新挑战。山区长大下坡路段货车交通事故的

发生与行车风险因素间各种复杂非线性耦合作用关联,货车行车风险体系是由人、车、路和环境等要素共同组成的一个复杂动态系统。由于风险组成要素自身动态变化、要素间相互关系的动态变化及受外界因素动态变化影响等特性,导致系统风险组成要素之间失调,造成交通事故。因此,探明山区长大下坡路段货车各行车风险因素间内在关联、层次结构,并明确各风险因素的重要度,找出关键风险因素,是分析其交通事故致因的前提和基础。

近年来,国内外学者对连续长大下坡路段货车

行车安全的研究主要从道路几何设计参数(纵坡坡度和坡长、平曲线曲率、平纵线形组合)^[2-5]及线形指标优化^[6-7]、不良气候条件^[8-9]、交通安全控制措施^[10-14](避险车道设置、交通标志标线、强制控速设施)、制动毂温升变化及热衰退^[15]、货车运行车速^[16]、交通流组成(货车比例)^[17]、驾驶人心理心理指标^[18-19]等方面开展。韩跃杰等研究了3种不同坡长(安全坡长、一般安全坡长、极限最大坡长)情形下的刹车毂温度预测模型,并确定了不同等级公路的合理坡长^[3]。郭忠印等建立了货车在长大下坡与连续弯组合路段的临界车速,并以临界车速作为安全服务水平判断标准,对长大下坡与连续弯组合路段货车行车危险位置进行识别^[16]。Torbic 等进行车辆动力学仿真,研究了水平曲线和纵坡设计组合准则^[5]。杨成里开发了山区不良气候下的综合控速技术^[8]。Yu 等的研究表明,气象条件特别是降雨,在交通碰撞事故发生模型中起着关键作用^[9]。朱启韬提出了避险车道总长度计算公式和避险车道引道的长度计算公式^[11]。Zhang 等基于泊松模型研究了连续下坡路段交通事故发生、交通流组成和车道密度的综合关系^[4]。廖军洪等对驾驶人心理增长率与连续长大下坡线形指标关系进行了探索^[19]。

综合来看,目前的研究多局限于连续下坡过程货车行驶中存在的突出问题进行单一分析,而没有从整体角度出发对系统风险进行统一辨识,没有对风险因素间内在联系进行梳理,对于长大下坡路段货车行车风险识别仍缺乏深入的理论研究。因此,本文将决策试验与评价实验室法(DEMATEL)与解释结构模型(ISM)相结合,探讨山区长大下坡路段货车行车风险事故的成因,在构建其风险因素集的基础上,建立了集成 DEMATEL-ISM 的山区长大下坡路段货车行车风险因素识别模型,对相似风险因素进行归类,明确了风险因素性质,揭示了各风险因素的重要度,找出了复杂因果关系中的关键因素,并系统识别了货车在长大下坡路段行车安全系统中最直接、最根本的行车风险因素,以期为提高长大下坡路段货车行车安全提供新的思路和方法。

1 山区长大下坡路段货车行车风险因素集

山区长大下坡路段货车行车风险因素集是由影响评判行车安全的驾驶人、道路、车辆和环境4个方面行车风险因素所组成的集合 U ,可表示为

$$U=\{U_1,U_2,U_3,U_4\} \tag{1}$$

式中: U_1,U_2,U_3,U_4 分别为评价货车行车安全的驾驶人、道路、车辆和环境4个方面的风险影响因素。

风险因素集的确定是风险识别是否科学合理的关键,下一步就是要确定因素集中具体的评价指标。鉴于山区长大下坡路段货车行车风险分析的复杂性,同时考虑到在山区公路行车安全系统中的一些关键因素对风险识别有着极大的参考价值,而实际的风险因素并非越多越好,关键在于其在风险分析中的作用,一般原则是用尽可能少的重要指标进行实际风险识别。基于此,本节从交通安全工程和系统观点出发,根据系统完整、层次分明、简明科学的原则,采用定性分析,结合文献萃取法和 Delphi 法,围绕山区长大下坡路段货车行车安全这一关键问题,从驾驶人、道路、车辆和环境4个方面提取20个行车风险因素^[2-5,8-14,17,20-24],构建了山区长大下坡路段货车行车风险因素集如下

$$U_1=\{\text{年龄 } u_1, \text{驾龄 } u_2, \text{驾驶人安全意识与态度 } u_3, \text{性别 } u_4, \text{疲劳驾驶 } u_5, \text{动态反应判断能力 } u_6\}$$

$$U_2=\{\text{货车车型 } u_7, \text{车辆性能 } u_8, \text{超速 } u_9, \text{超载/超限 } u_{10}, \text{交通组成特性 } u_{11}, \text{交通流量 } u_{12}\}$$

$$U_3=\{\text{道路结构物 } u_{13}, \text{平纵线形组合 } u_{14}, \text{纵坡坡度和坡长 } u_{15}, \text{路面状态 } u_{16}\}$$

$$U_4=\{\text{气象状况 } u_{17}, \text{交通安全设施完备程度 } u_{18}, \text{路侧障碍/路侧景观 } u_{19}, \text{长大下坡路段限速值 } u_{20}\}$$

本文在文献分析的基础上,结合专家访谈,确定风险因素的释义如表1所示。

2 山区长大下坡路段货车行车风险因素识别模型

2.1 风险因素识别模型的选定

交通安全风险识别的方法很多,近年国内外学者运用蒙特卡罗模拟方法、结构分析法、风险图法、专家调查法、事故树分析法、故障树分析法、灰色关联度分析法、数据包络分析法等^[25-26]对系统内部影响因素以及风险识别进行研究,各方法各有侧重和优势,应用时也各有条件要求,但这些方法难以有效分析结构要素之间的内在影响机制。比较各分析方法发现,ISM(图1)和 DEMATEL^[27](图2)可以弥补上述不足,而且能满足研究山区长大下坡路段货车行车风险要素的相关性、层次性、可操作性等要求,但 ISM 与 DEMATEL 也存在以下问题:ISM 方法计算可达矩阵时需要进行大量复杂的矩阵运算,且可达矩阵包含的信息不足,尽管可以将各因素进行层次划分,但通常视同一层的各影响因素之间处

表 1 山区长大下坡路段货车行车风险因素及释义

Tab. 1 Truck driving risk factors and interpretation in long downhill sections of mountainous area

风险因素	释义
年龄 u_1	货车驾驶人年龄
驾龄 u_2	货车驾驶人取得机动车驾驶证资格的年限
驾驶人安全意识与态度 u_3	驾驶人在长大下坡路段行车过程中对各种有可能对自己或他人造成伤害的潜在危险源的心里警觉性及对遵守驾驶安全操作规范、制度及正确使用安全护具的态度
性别 u_4	男性驾驶人或女性驾驶人
疲劳驾驶 u_5	驾驶人因在长时间连续行车或睡眠不足、睡眠质量差,产生生理机能和心理机能的失调,而在客观上出现驾驶技能下降的现象
动态反应判断能力 u_6	驾驶人驾驶过程中对外界各种信号刺激的快速应答的能力
货车车型 u_7	包括微型货车、小型货车、中型货车、大型货车
车辆性能 u_8	指车辆的操控稳定性、动力性、可靠性、制动性、平顺性等
超速 u_9	指货车驾驶人在长大下坡路段驾车行驶中,货车的行驶速度超过规定限速值
超载/超限 u_{10}	超载通常是指货车运输的货物超过货运车辆的装载能力;超限是指货运车辆的载货长度、宽度、高度超过规定的限度
交通组成特性 u_{11}	指各种车型在交通流中所占的比率,本文主要是分析货车在交通流中所占比例
交通流量 u_{12}	本文是指在选定时间段内通过长大下坡路段某一断面或某一车道的交通实体数
道路结构物 u_{13}	包括路肩的宽度及类型、路侧净空、路基边坡
平纵线形组合 u_{14}	长大下坡路段的纵断面线形与平面、横断面线形要素的组合方式
纵坡坡度和坡长 u_{15}	纵坡坡度是指纵断面上同一坡段两点间的高差与其水平距离之比;坡长是纵断面相邻变坡点的桩号之差,即水平距离
路面状态 u_{16}	包括路面抗滑性能(路面附着系数)、路面平整度、破损程度
气象状况 u_{17}	包括天气情况、能见度、降雨量、降雪量、风速和温度
交通安全设施完备程度 u_{18}	包括交通标志、标线、护栏、隔离栅、轮廓标、诱导标、防眩设施等交通安全设施设置的完善程度
路侧障碍/路侧景观 u_{19}	路侧障碍指路肩以外区域能干扰行车安全的包括边沟、路边树木、标志立柱、突出山石、护墙、桥栏、挡墙、灯柱、临时停放的车辆等在内的障碍物;路侧景观指道路沿线的绿化环境、边坡、临崖傍水等景观
长大下坡路段限速值 u_{20}	通常是指对一定长度距离内的长大下坡路段规定一定范围内的行车速度,主要目的为预先提醒司机在前方后续路段行驶中合理控制车速、防范超速危险

于同一地位且相互独立,各指标影响因素之间的主从关系与重要度模糊;而 DEMATEL 无法揭示复杂的山区长大下坡路段货车行车风险系统里风险因素内在结构,而专家根据其经验与专业水平给出的风险因素直接影响关系往往过于主观片面。

2.2 集成 DEMATEL-ISM 的山区长大下坡路段货车行车风险因素识别模型

根据前文建立的山区长大下坡路段货车行车风险因素集,同时鉴于 DEMATEL 与 ISM 的模型缺陷,本节基于 DEMATEL 和 ISM 存在的一定共性,吸取了其优点,运用集成 DEMATEL-ISM 方法,将复杂的风险因素关系转化为直观的具有良好层次结构关系的山区长大下坡路段货车行车风险因素识别模型,其具体建模步骤如下所述。

(1)确定山区长大下坡路段货车行车风险因素 $u_1, u_2, \cdots, u_n, u_i \in U$, 其中, $i, j = 1, 2, \cdots, n, n$ 为山区长大下坡路段货车行车风险因素的个数。

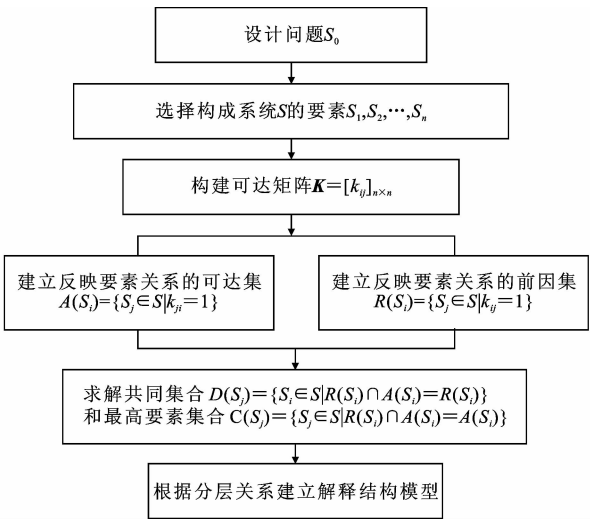
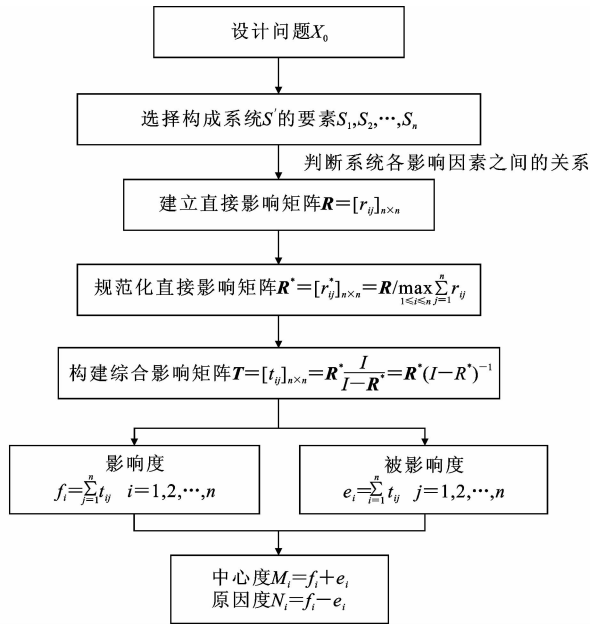


图 1 ISM 建模流程^[27]

Fig. 1 ISM modeling flow^[27]

(2)确定山区长大下坡路段货车行车安全系统的直接影响矩阵,根据收集到的有效专家问卷,获得

图2 DEMATEL 建模流程^[27]Fig. 2 DEMATEL modeling flow^[27]

因素间的初始直接影响矩阵 B

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \beta_{12} & \cdots & \beta_{1n} \\ \beta_{21} & 0 & \cdots & \beta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{n1} & \beta_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} = [\beta_{ij}]_{n \times n} \quad (2)$$

式中: β_{ij} 为山区长大下坡路段货车行车风险因素 u_i 对 u_j 的平均直接影响强度, 通常情况 $u_{ij} \neq u_{ji}$, 当 $i = j$ 时, 取 $u_{ij} = 0$ 。

对山区长大下坡路段货车行车风险初始直接影响矩阵 B 规范化, 得到新的矩阵 G , $G = [g_{ij}]_{n \times n}$, 即

$$G = \frac{B}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n \beta_{ij}} \quad (3)$$

式中: $[\cdot]_{n \times n}$ 为矩阵的元素表达形式, 每一行相加得到和的最大值为 $\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n \beta_{ij}$, 规范化处理结果为 $0 \leq$

$g_{ij} \leq 1$, 且 $\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n g_{ij} = 1$ 。

(3) 计算综合影响矩阵 T , $T = [t_{ij}]_{n \times n}$ 。 T 表示货车行车风险因素间关系, 是直接影响和间接影响的综合累加, 用以确定每个风险因素相对于山区长大下坡路段货车行车安全系统中最高水平因素的最终影响, 即

$$T = G^1 + G^2 + \cdots + G^n = G \frac{I - G^{n-1}}{I - G} \quad (4)$$

由于 $0 \leq g_{ij} \leq 1$, 因此, 当 $n \rightarrow +\infty$ 时, $G^{n-1} \rightarrow 0$, 有

$$T = G \frac{I}{I - G} = G(I - G)^{-1} \quad (5)$$

式中: I 为单位矩阵, 表示货车行车风险因素对自身的影响。

(4) 计算各行车风险因素的影响度 f_i 和被影响度 e_i 。根据式(5)计算得到的综合影响矩阵 T , 将元素每行的数值相加得到每个风险因素的影响度 f_i , 其求解的表达式如式(6)所示, 它表示各行因素对除去自身外的所有元素的综合影响值, 包含了直接或间接的影响; 同样可根据式(5)计算得到的综合影响矩阵 T , 将元素每列的数值相加得到相应因素的受影响度 e_i , 其求解的表达式如式(7)所示, 受影响度表示各列对应因素受到除自身外的其他风险因素的综合影响值, 即

$$f_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$e_i = \sum_{i=1}^n t_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

(5) 求得中心度 M_i 和原因度 N_i 。中心度 M_i 由影响度 f_i 和被影响度 e_i 相加得到, 原因度 N_i 由影响度 f_i 和被影响度 e_i 相减得到, 若 $N_i > 0$, 则该因素为原因因素, $N_i < 0$, 则该因素为结果因素, 即

$$M_i = f_i + e_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$N_i = f_i - e_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

(6) 绘制风险因素原因-结果图, 以中心度为横坐标, 原因度为纵坐标绘制, 标出各风险因素在笛卡尔坐标系上的位置, 就可以在图上分析山区长大下坡路段货车行车风险因素的重要程度和因果属性, 得出关键链接致因。

(7) 计算整体影响矩阵 H , $H = [h_{ij}]_{n \times n}$, 其计算表达式如下

$$H = I + T \quad (10)$$

(8) 为了抓住问题的本质, 简化系统层次结构, 依据整体影响矩阵 H , 得到标准化的可达矩阵 K , 可经反复试算并在专家及决策者经验的基础上设定阈值 λ ($\lambda \in [0, 1]$), 计算得可达矩阵 K , $K = [k_{ij}]_{n \times n}$, 即

$$k_{ij} = \begin{cases} 1 & h_{ij} \geq \lambda \\ 0 & h_{ij} < \lambda \end{cases} \quad (11)$$

(9) 依据可达矩阵 K 进行层级间划分, 即将不同的山区长大下坡路段货车行车风险划分到不同层次, 其中, 在可达矩阵 K 的第 i 行中, 使所有元素为 1 的列对应的要素所组成的集合, 定义为风险因素 u_i 的可达集合 R_i , 即

$$R_i = \{u_j | u_j \in U, k_{ij} \neq 0\} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

在可达矩阵 K 的第 i 列中, 使所有元素为 1 的

行对应的要素所组成的集合,定义为风险因素 u_i 的前因集合 S_i ,即

$$S_i=\{u_i \mid u_i \in U, k_{ij} \neq 0\} \quad i=1,2,\cdots,n \quad (13)$$

若 $R_i=R_i \cap S_i$,则 R_i 为最高级因素集合。

(10)验证公式 $R_i=R_i \cap S_i$ 是否成立,若成立,则 u_i 为最高层因素,并在矩阵 \mathbf{K} 中划除第 i 行和第 i 列。

(11)重复步骤(9)、(10),直到所有货车行车风险因素被划去。

(12)根据风险因素被划去的顺序,建立风险因素层次结构。

3 应用分析

(1)直接影响矩阵确定

根据建立的山区长大下坡路段货车行车风险

因素集 $U=(u_1,u_2,\cdots,u_{20})$,采用德尔菲法确定其因素之间的相互影响关系。本次调查问卷共发放 50 份,回收了 38 份,专家积极系数为 76%。被调查的道路交通安全专家根据自己的专业知识和工程经验对风险因素之间影响强度进行打分。本文规定用数字表示风险因素之间影响程度,其中:0 表示所有专家均认为 u_i 对 u_j 无影响,即不相关;1 表示有 0~1/3 的专家认为 u_i 对 u_j 有微弱影响,即弱相关;2 表示 1/3~2/3 的专家认为 u_i 对 u_j 有中等程度影响,即中等相关;3 表示 2/3 以上的专家认为 u_i 对 u_j 有很强的影响,即强相关。因此建立初始直接影响矩阵 \mathbf{B} 如表 2 所示。

表 2 初始直接影响矩阵 \mathbf{B}

Tab. 2 Initial direct influence matrix \mathbf{B}

β_{ij}	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}	u_{16}	u_{17}	u_{18}	u_{19}	u_{20}
u_1	0	1	2	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u_2	0	0	3	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u_3	0	0	1	0	3	2	1	0	3	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
u_4	0	0	0	0	1	3	0	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
u_5	0	0	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u_6	1	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
u_7	0	0	1	0	0	1	0	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
u_8	0	0	1	0	0	1	1	0	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
u_9	0	0	0	0	2	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	2
u_{10}	0	0	3	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u_{11}	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	1	0	1
u_{12}	0	0	0	0	2	2	0	0	3	0	0	0	1	3	0	0	0	2	0	1
u_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	1	0	0	0	0	2
u_{14}	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	2	0	1
u_{15}	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	0	1	1	2	1	1
u_{16}	0	0	0	0	1	2	0	3	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	2
u_{17}	0	0	0	1	2	3	0	0	3	2	1	3	1	1	0	0	0	3	1	2
u_{18}	0	0	0	0	1	2	1	0	2	0	1	2	1	1	0	0	0	0	2	1
u_{19}	0	0	0	0	1	1	0	0	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0
u_{20}	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0

(2)分析影响度 f_i 、被影响度 e_i 、中心度 M_i 、原因度 N_i

根据集成 DEMATEL-ISM 法,根据初始直接影响矩阵 \mathbf{B} ,由建模步骤第(2)、(3)步,计算得到规范化直接影响矩阵 \mathbf{G} 和综合影响矩阵 \mathbf{T} ;根据后续步骤第(4)、(5)步进而可以判别各因素属性,其计算结果如表 3 所述。根据建模的第(6)步,即可

得到风险因素区域图,如图 3 所示。

(3)计算可达矩阵,划分山区长大下坡路段货车行车风险因素递阶层次结构

根据建模第(8)~(12)步,可计算得到整体影响矩阵 \mathbf{H} ,依据整体影响矩阵,经反复试算设定阈值 $\lambda=0.1$,进而计算得到可达矩阵 \mathbf{K} 如下

K=

1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1

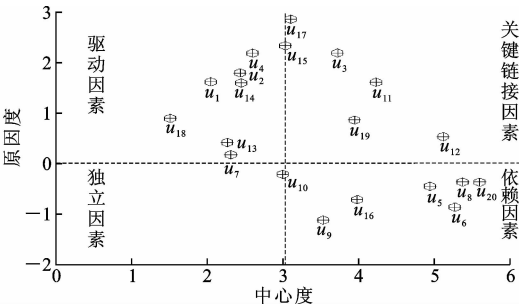


图 3 风险因素区域图

Fig.3 Regionals map of risk factors

依据可达矩阵 K 进行层级间划分,层级划分的过程及结果见表 4。利用 $R_i=R_i \cap S_i$,寻找长大下坡路段货车行车风险因素各层次的要 素集,当 i 为 5、6、9、10、16、18 时,满足可达集合 R_i 与前因集合 S_i 与其交集 $R_i \cap S_i$ 完全相同,则可知第 5、6、9、10、16、18 项行车风险因素组成递阶层次结构的第 1 层 $L_1=\{u_5, u_6, u_9, u_{10}, u_{16}, u_{18}\}$,划去表中 $u_5, u_6, u_9, u_{10}, u_{16}, u_{18}$,利用 $R_i=R_i \cap S_i$ 进行多次重复计算,依次可得到第 2~5 层 $L_2=\{u_4, u_7, u_8, u_{12}, u_{13}, u_{17}, u_{19}, u_{20}\}$, $L_3=\{u_1, u_2, u_{15}\}$, $L_4=\{u_{11}, u_{14}\}$, $L_5=\{u_3\}$ 。根据行车风险因素层级划分结果,按 $L_1 \sim L_5$ 分别自上而下排列,如图 4 所示。利用有向链接圆弧将各行车风险链接成多级递阶层次结构,圆弧指向表示某一风险因素对另一风险因素产生影响,若

表 3 DEMATEL 计算结果

Tab.3 Calculation results of DEMATEL

u_i	f_i	e_i	M_i 排序	因素属性
u_1	1.832	0.223	19	原因因素
u_2	2.113	0.329	16	原因因素
u_3	2.955	0.776	9	原因因素
u_4	2.394	0.216	14	原因因素
u_5	2.246	2.703	5	结果因素
u_6	2.207	3.076	3	结果因素
u_7	1.242	1.075	17	原因因素
u_8	2.505	2.878	2	结果因素
u_9	1.205	2.334	10	结果因素
u_{10}	1.391	1.612	13	结果因素
u_{11}	2.921	1.320	6	原因因素
u_{12}	2.825	2.301	4	原因因素
u_{13}	1.342	0.932	18	原因因素
u_{14}	2.022	0.436	15	原因因素
u_{15}	2.683	0.359	12	原因因素
u_{16}	1.633	2.356	7	结果因素
u_{17}	2.980	0.132	11	原因因素
u_{18}	1.201	0.316	20	原因因素
u_{19}	2.402	1.549	8	原因因素
u_{20}	2.617	2.991	1	结果因素

表 4 风险因素区域及层级划分

Tab.4 Risk factors areas and hierarchies

u_i	R_i	S_i	$R_i \cap S_i$	层级
u_1	u_1, u_8, u_9	u_1, u_{11}, u_{14}	u_1	L_3
u_2	$u_2, u_6, u_9, u_{12}, u_{18}, u_{20}$	u_2	u_2	L_3
u_3	u_3, u_5, u_{11}, u_{14}	u_3, u_4	u_3, u_4	L_5
u_4	u_4, u_5	u_4	u_4	L_2
u_5	u_5	$u_3, u_4, u_5, u_8, u_{14}, u_{15}, u_{18}$	u_5	L_1
u_6	u_6	u_2, u_6, u_{15}	u_6	L_1
u_7	u_7, u_9	u_7	u_7	L_2
u_8	u_5, u_8	u_1, u_8	u_8	L_2
u_9	u_9	$u_1, u_2, u_7, u_9, u_{13}, u_{15}$	u_9	L_1
u_{10}	u_{10}	u_{10}	u_{10}	L_1
u_{11}	u_1, u_{11}	u_3, u_{11}	u_{11}	L_4
u_{12}	u_9, u_{12}, u_{16}	u_2, u_{12}, u_{15}	u_{12}	L_2
u_{13}	u_{13}, u_{16}	u_{13}	u_{13}	L_2
u_{14}	u_1, u_3, u_5, u_{14}	u_3, u_{14}	u_3, u_{14}	L_4
u_{15}	$u_5, u_6, u_9, u_{12}, u_{15}, u_{18}, u_{20}$	u_{15}	u_{15}	L_3
u_{16}	u_{16}	u_{12}, u_{13}, u_{16}	u_{16}	L_1
u_{17}	u_{17}, u_{18}	u_{17}	u_{17}	L_2
u_{18}	$u_2, u_{15}, u_{17}, u_{18}, u_{20}$	u_{18}, u_{19}, u_{20}	u_{18}, u_{20}	L_1
u_{19}	u_{18}, u_{19}	u_{19}	u_{19}	L_2
u_{20}	u_{18}, u_{20}	$u_2, u_{15}, u_{18}, u_{20}$	u_{18}, u_{20}	L_2

箭头为双向,则表示两风险因素之间相互影响,具有交互作用。

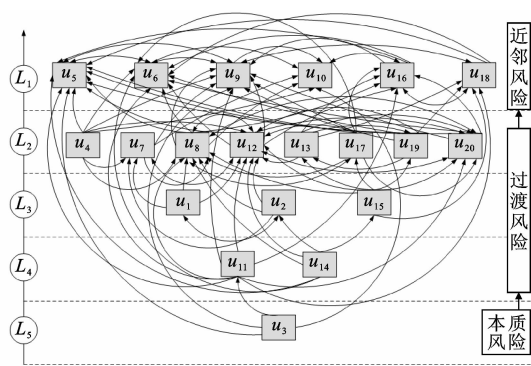


图 4 集成 DEMATEL-ISM 的山区长大下坡路段货车行车风险因素多级递阶层次结构

Fig. 4 Multilevel hierarchical structures of truck driving risk factors in long downhill sections of mountainous areas with integrated DEMATEL-ISM

4 模型结果分析

4.1 重要性分析

通过 DEMATEL 法可以分析货车行车风险因素的重要性,中心度反映了各行车风险因素的重要程度,其值越大表明在系统中的地位越重要。从表 3 可以看出,导致行车风险发生最重要的风险因素依次为长大下坡路段限速值 u_{20} 、车辆性能 u_8 、动态反应判断能力 u_6 、疲劳驾驶 u_5 、交通流量 u_{12} 、交通组成特性 u_{11} 、路面状态 u_{16} 、路侧障碍/路侧景观 u_{19} 、驾驶人安全意识与态度 u_3 、超速 u_9 。可见,对长大下坡路段的限速值进行合理设置对保障货车行驶安全极其重要。交通设施完备程度 u_{18} 、年龄 u_1 、道路结构物 u_{13} 重要度最低,说明其在货车行车安全体系中的影响程度最小。

4.2 原因因素分析

根据表 3,对原因因素按其原因度 N_i 排序,其从大到小依次为气象状况 u_{17} 、纵坡坡度和坡长 u_{15} 、驾驶人安全意识与态度 u_3 、性别 u_4 、驾龄 u_2 、年龄 u_1 、交通组成特性 u_{11} 、平纵线形组合 u_{14} 、交通安全设施完备程度 u_{18} 、路侧障碍/路侧景观 u_{19} 、交通流量 u_{12} 、道路结构物 u_{13} 、货车车型 u_7 。原因因素的原因度越大,表明其对其他风险因素的影响越大,而自身所受其他因素的影响较小。从图 4 可知,气象状况 u_{17} 处于多级递阶层次结构的 L_2 层,属于行车风险系统的过渡风险层,该风险因素影响着疲劳驾驶 u_5 、动态反应判断能力 u_6 、超速 u_9 、交通流量 u_{12} 、路面状态 u_{16} 。可见,对各种复杂危险路段例如长大下坡路段的冰、雪、霜冻等恶劣天气进行实时监控、提前预警并自动处置,不仅会降低气象状况对行车安

全的影响,同时也会降低其对其他风险因素产生的连带作用,显著提高驾乘人员行车安全。而货车车型 u_7 同样处于多级递阶层次结构图的 L_2 层,该风险因素影响着超速 u_9 、超载/超限 u_{10} ,表明相较于其他原因风险因素,该行车风险因素对其他风险因素影响较小,在货车行车风险管控中不必着重考虑。

4.3 结果因素分析

对结果因素按其原因度绝对值 $|N_i|$ 大小排序,从大到小依次为超速 u_9 、动态反应判断能力 u_6 、路面状态 u_{16} 、疲劳驾驶 u_5 、长大下坡路段限速值 u_{20} 、车辆性能 u_8 、超载/超限 u_{10} 。结果因素原因度绝对值越大,表明受其他风险因素的影响越大。从图 4 可知,超速 u_9 处于多级递阶层次结构的 L_1 层,属于行车风险系统的近邻风险层,是产生交通风险的直接致因,该风险因素同时受驾驶人安全意识与态度 u_3 、性别 u_4 、疲劳驾驶 u_5 、动态反应判断能力 u_6 、货车车型 u_7 、车辆性能 u_8 、交通组成特性 u_{11} 、交通流量 u_{12} 、路面状态 u_{16} 、气象状况 u_{17} 、交通安全设施完备程度 u_{18} 、长大下坡路段限速值 u_{20} 所影响。

4.4 层次性分析

运用 ISM 模型建立风险因素多级递阶层次结构,将 20 个风险因素划分为 5 层,包括了近邻风险、过渡风险(由浅层风险、中层风险和深层风险构成)和本质风险。第 1 层风险因素(疲劳驾驶 u_5 、动态反应判断能力 u_6 、超速 u_9 、超载/超限 u_{10} 、路面状态 u_{16} 、交通设施完备程度 u_{18})都是行车风险系统的近邻致因,它们之间相互影响相互制约,这些影响因素直接对行车安全产生影响,成为交通事故发生的最直接诱因,因此,交通主管部门对这些因素应引起足够重视,加大改善力度。第 2 层风险因素(性别 u_4 、货车车型 u_7 、车辆性能 u_8 、交通流量 u_{12} 、道路结构物 u_{13} 、气象状况 u_{17} 、路侧障碍/路侧景观 u_{19} 、长大下坡路段限速值 u_{20})对第 1 层因素有直接影响,是山区长大下坡路段货车行车风险的浅层风险。第 3 层风险因素(年龄 u_1 、驾龄 u_2 、纵坡坡度和坡长 u_{15})直接影响第 2 层,并通过第 2 层影响第 1 层或直接影响第 1 层,是山区长大下坡路段货车行车风险的中层风险。第 4 层风险因素(交通组成特性 u_{11} 、平纵线形组合 u_{14})对第 3 层风险因素产生直接影响,并通过第 3 层风险因素间接对第 2 层和第 1 层产生影响,或直接对第 1、2 层产生影响,是山区长大下坡路段货车行车风险的深层风险。第 2 层、第 3 层和第 4 层的风险因素共同构成过渡风险层,在整个系统中起着承上启下的作用,这类风险因素与其他风

险因素存在着联动关系,其既易对系统中其他风险因素的变化敏感,也易影响其他风险因素。第 5 层风险因素驾驶人安全意识与态度 u_3 是整个系统的根源性影响因素,其位于最高层,这个风险因素从根本上对交通事故的发生产生了影响,该因素直接或间接的以不同方式对其他风险因素产生影响,但通常容易被忽略,因此也应注意加强对货车驾驶人的继续教育,增强其安全隐患意识。

4.5 综合分析

综合来看,结合中心度与原因度分析,可将原因因素进一步划分为驱动因素和关键链接因素,将结果因素进一步划分为独立因素和依赖因素,如图 3 所示。驱动因素几乎都位于风险多级递阶层次结构的较高层,即位于过渡风险层和本质风险层,具有高驱动力低依赖度特征;关键链接因素则具有高驱动力和高中心度特征,表明这类因素不仅对其他因素影响大,而且在整个系统中重要性程度都比较高,这类风险因素与其他风险因素存在强联动关系,例如 u_{12} 、 u_{15} 、 u_{17} 、 u_{11} 在递阶层次结构中节点度较大,意味着与之相连的边的数目也较多,与其他节点发生复杂的非线性交互的可能性越大,从而增大交通事故发生的可能;独立因素具有低驱动力和低中心度的特征,这类因素在系统中不存在,说明行车风险因素都不是独立存在,而是相互影响制约进而对行车安全构成威胁。依赖因素大部分位于多级递阶层次结构的较低层,即近邻风险层和过渡风险的浅层因素,这些风险因素的发生与否与其他风险因素关系密切,其具有低驱动力和高依赖度的特征。虽然驱动因素不直接导致交通事故的发生,但仍会间接对其他风险因素产生影响,因此,在实际的交通风险管控中除应注意关注近邻风险层和关键链接风险因素,同时也不应忽略对深层次的驱动因素的改善,因为改善驱动因素的同时可间接提高其他风险因素的安全水平。

5 结 语

(1)结合文献萃取法和 Delphi 法,围绕山区长大下坡路段货车行车安全这一关键问题,从驾驶人、道路、车辆和环境 4 个方面提取 20 个行车风险因素,构建了山区长大下坡路段货车行车风险因素集。

(2)通过 DEMATEL 法中的中心度分析了各行车风险因素在系统中的重要程度,可知长大下坡路段限速值、车辆性能、动态反应判断能力、疲劳驾驶等是导致行车风险发生的最重要因素,而交通设

施完备程度、年龄、道路结构物的重要度最低,在货车行车安全体系中的影响程度最小。

(3)原因因素中,气象状况原因度最大,对其他风险因素的影响也越大,且自身受其他因素的影响较小,而货车车型对其他风险因素影响较小;在结果因素中,超速的原因度绝对值最大,受其他风险因素的影响最大,属于行车风险系统的近邻风险层,是产生交通风险的直接致因。

(4)近邻风险是交通事故发生的最直接诱因,过渡风险与其他风险因素存在着联动关系,其既易对系统中其他风险因素的变化敏感,也易影响其他风险因素;本质风险驾驶人安全意识与态度是整个系统的根源性影响因素。

(5)关键链接因素交通流量、纵坡坡度和坡长、气象状况、交通组成特性与其他风险因素存在强联动关系,它们与其他风险因素发生复杂的非线性交互的可能性大,从而增大交通事故发生的可能。

(6)本文成果一定程度上能够为公路运营管理与执法部门提供风险管控的决策依据,但本文模型因被问卷调查专家理论知识和工程实践经验的客观性,可能造成风险因素间关系判断不当。因此,后续研究可基于交通事故数据的挖掘,通过数理统计与概率分析更客观评判风险因素之间的相互影响程度,并通过本文的集成 DEMATEL-ISM 法建立相应风险识别模型。

参考文献:

References:

- [1] 廖学弟. 山区高速公路长下坡路段重型商用汽车行驶安全性研究[D]. 西安:长安大学,2010.
LIAO Xue-di. Study on the safety of heavy commercial vehicles on long downhill section of mountain expressway [D]. Xi'an:Chang'an University,2010.
- [2] 徐 进,邵毅明,赵 军,等. 山区道路弯坡组合路段重载车辆行驶速度模型[J]. 长安大学学报:自然科学版,2015,35(2):67-74.
XU Jin, SHAO Yi-ming, ZHAO Jun, et al. Vehicle speed model of heavy-haul vehicles on composite road section on curved slopes in mountainous areas [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2015, 35(2): 67-74.
- [3] 韩跃杰,许金良,刘永福,等. 连续长下坡路段的安全坡长[J]. 长安大学学报:自然科学版,2010,30(5): 35-39.
HAN Yue-jie, XU Jin-liang, LIU Yong-fu, et al. Safe

- slope length of continuous long downhill section[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(5): 35-39.
- [4] ZHANG T, LIU D, MI X. Research on the safety characteristic of continuous downgrade segment in two-lane highway[C]//ASCE. Proceedings of International Conference of Logistics Engineering and Management. Reston: ASCE, 2010: 1280-1289.
- [5] TORBIC D, DONNELL E, BRENNAN S, et al. Superelevation design for sharp horizontal curves on steep grades[J]. Transportation Research Record, 2014(2436): 81-91.
- [6] LAN C J, MENENDEZ M. Truck speed profile models for critical length of grade[J]. Journal of Transportation Engineering, 2003, 129(4): 408-419.
- [7] CHEN Y, SUN X, HU S. Long down-grade highway segment's safety investigation and causation inference in China [C]//ASCE. Proceedings of International Conference on Transportation Engineering. Reston: ASCE, 2007: 370-375.
- [8] 杨成里. 山区雾冰不良气候下高速公路行车安全保障技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- YANG Cheng-li. Study on the safety guarantee technology of expressway driving under the unfavorable weather of fog and ice in mountain area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [9] YU R, ABDELATY M, AHMED M. Bayesian random effect models incorporating real-time weather and traffic data to investigate mountainous freeway hazardous factors[J]. Accident Analysis & Prevention, 2013, 50(2): 371-376.
- [10] 李超, 王玉兰, 王长中. 公路避险车道灰色定位评估模型[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(5): 39-44.
- LI Chao, WANG Yu-lan, WANG Chang-zhong. Grey positioning evaluation model of highway escape lane [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(5): 39-44.
- [11] 朱启韬. 山区长大下坡道路安全性评价和避险车道设计研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- ZHU Qi-tao. Safety assessment and risk avoidance lane design of long downhill road in mountain area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011.
- [12] 褚端峰, 李浩然, 张存保, 等. 振动减速带对行车安全的影响及控速效果分析[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(6): 86-91.
- CHU Duan-feng, LI Hao-ran, ZHANG Cun-bao, et al. Effect of vibration deceleration belt on driving safety and speed control effect analysis[J]. Chinese Journal of Safety Sciences, 2014, 24(6): 86-91.
- [13] BAHLMANN C, ZHU Y, RAMESH V, et al. A system for traffic sign detection, tracking, and recognition using color, shape, and motion information [C]//IEEE. Proceedings of Intelligent Vehicles Symposium. New York: IEEE, 2005: 255-260.
- [14] AL-MADANI H, AL-JANAHI A R. Assessment of drivers' comprehension of traffic signs based on their traffic, personal and social characteristics[J]. Transportation Research Part F, 2002, 5(1): 63-76.
- [15] 胡立伟, 李林育, 王森, 等. 基于台架试验的长大下坡路段满载中型货车制动风险阈值研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(7): 135-144.
- HU Li-wei, LI Lin-yu, WANG Miao, et al. Study on braking risk thresholds of full-load medium-sized trucks on long downhill sections based on bench tests [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(7): 135-144.
- [16] 郭忠印, 宋灿灿, 李志勇, 等. 长大下坡与连续弯组合路段货车危险位置识别[J]. 公路工程, 2012, 37(6): 97-100.
- GUO Zhong-yin, SONG Can-can, LI Zhi-yong, et al. Identification of dangerous locations for trucks on combination sections of long downhill and continuous bend [J]. Highway Engineering, 2012, 37(6): 97-100.
- [17] ARCHILLA R, MORRALL J. Traffic characteristics on two-lane downgrades[J]. Transportation Research Part A, 1996, 30(2): 119-133.
- [18] FANG J, ZHOU R, CHAI H, et al. Geometric design parameters research of two-lane highway in mountainous terrain based on drivers' anticipation [C]//ASCE. Proceedings of the Tenth International Conference of Chinese Transportation Professionals. Reston: ASCE, 2010: 624-631.
- [19] 廖军洪, 邵春福, 郭洪波, 等. 连续长大下坡心率与线形指标关系模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12(4): 184-189.
- LIAO Jun-hong, SHAO Chun-fu, WU Hong-bo, et al. Modeling drivers' heart rate and highway alignment relationship on long steep downgrades[J]. Journal of Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2012, 12(4): 184-189.
- [20] 胡思涛, 项乔君. 高速公路路面状态安全评价方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(2): 130-135.
- HU Si-tao, XIANG Qiao-jun. Study on the safety assessment method of highway pavement state [J]. Jour-

- nal of Transportation System Engineering and Information, 2013, 13(2): 130-135.
- [21] 肖 虎. 山区公路交通安全风险评估相关研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
XIAO Hu. Study on traffic safety risk assessment of mountain highway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [22] 陈 凤. 福建北部山区高速公路交通安全风险评估[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
CHEN Feng. Traffic safety risk assessment of expressways in northern mountainous area of Fujian[D]. Fuzhou: Fujian Agricultural University, 2015.
- [23] 龙科军, 李 寅, 雷正保, 等. 基于加速度严重指数的公路路侧危险度评估[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 143-149.
LONG Ke-jun, LI Yin, LEI Zheng-bao, et al. Highway side risk assessment based on acceleration serious index[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 143-149.
- [24] 郭洪洋, 韩雪松, 刘 澜, 等. 驾驶员交通安全行为可靠性风险度量研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(6): 103-109.
GUO Hong-yang, HAN Xue-song, LIU Lan, et al. Study on the reliability risk measurement of driver's traffic safety behavior[J]. Chinese Journal of Safety Sciences, 2013, 23(6): 103-109.
- [25] CALABRESE A, COSTA R, MENICHINI T. Using fuzzy AHP to manage intellectual capital assets: An application to the ICT service industry[J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(9): 3747-3755.
- [26] LIAO J X, WANG J Z, LI T H, et al. A token-bucket based notification traffic control mechanism for IMS presence service [J]. Computer Communications, 2011, 34(10): 1243-1257.
- [27] 周德群, 章 玲. 集成 DEMATEL/ISM 的复杂系统层次划分研究[J]. 管理科学学报, 2008, 11(2): 20-26.
ZHOU De-qun, ZHANG Ling. Study on the hierarchical division of complex systems integrated with DEMATEL/ISM[J]. Journal of Management Science, 2008, 11(2): 20-26.

(上接第 115 页)

- ITS114. Application of tandem intersections in Shenzhen and performance analysis [EB/OL]. (2017-06-05) [2018-12-15] http://www.sohu.com/a/146249946_649849.
- [18] YANG Q, SHI Z. Performance analysis of the phase swap sorting strategy for an isolated intersection[J]. Transportation Research Part C, 2017, 77: 366-388.
- [19] ZHOU Y, ZHUANG H. The optimization of lane assignment and signal timing at the tandem intersection with pre-signal[J]. Journal of Advanced Transportation, 2014, 48(4): 362-376.
- [20] XUAN Y, GAYAH V V, CASSIDY M J, et al. Presignal used to increase bus-and car-carrying capacity at intersections: Theory and experiment[J]. Transportation Research Record, 2012(2315): 191-196.
- [21] ALLSOP R E. Estimating the traffic capacity of a signalized road junction [J]. Transportation Research, 1972, 6(3): 245-255.
- [22] GALLIVAN S, HEYDECKER B. Optimising the control performance of traffic signals at a single junction[J]. Transportation Research Part B, 1988, 22(5): 357-370.
- [23] WONG C K, WONG S C. A lane-based optimization method for minimizing delay at isolated signal-controlled junctions[J]. Journal of Mathematical Modelling and Algorithms, 2003, 2(4): 379-406.
- [24] WONG C K, HEYDECKER B G. Optimal allocation of turns to lanes at an isolated signal-controlled junction[J]. Transportation Research Part B, 2011, 45(4): 667-681.
- [25] 陈定江, 李有润, 沈静珠, 等. 生态工业园区的 MINLP 模型[J]. 过程工程学报, 2002, 2(1): 75-80.
CHEN Ding-jiang, LI You-run, SHEN Jing-zhu, et al. A MINLP model of eco-industrial parks[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2002, 2(1): 75-80.