

文章编号:1671-8879(2013)05-0086-07

高速公路紧急救援路线选择路径模型

韩晓宇, 卢昕玮, 吴群琪

(长安大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为了及时、有效地处理高速公路各种突发性交通事故,实现快速响应和紧急救助,以达到减少人员伤亡、经济损失与促进高速公路可持续发展的目的,从影响高速公路紧急救援的广义交通阻抗入手,分析了影响救援路线选择的路段长度、路段自身条件、天气状况与交通状况等主要因素,构建了高速公路紧急救援路线选择数学模型,研究了改进型 Floyd 加速算法在多点对多点救援路线选择中的应用,并将所建立的模型用于河南省高速公路的紧急救援路线选择。研究表明:当交通阻抗影响较小时,到达事故点原始距离最短的点即为救援车辆应该选择的驶入点;当交通阻抗影响较大时,到达事故点原始距离最短的点不一定是救援车辆应选择的驶入点;当交通阻抗影响异常大时,会迫使救援车辆放弃原始距离最短的驶入点,说明该模型在解决多点对多点救援路线选择中具有较好的效果,达到了选择合理有效救援路线的目的,为目前高速公路紧急救援决策提供有效的解决方案。

关键词:交通工程;广义交通阻抗;高速公路;紧急救援;路线选择

中图分类号:U491;F50

文献标志码:A

Path model for route selection for expressway emergency rescue

HAN Xiao-yu, LU Xin-wei, WU Qun-qi

(School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to effectively deal with sudden traffic accidents on expressway in time for quick response and emergency aid so as to reduce casualties and property loss and facilitate the sustainable development of expressway, principal influence factors including section length, section conditions, weather conditions and traffic conditions on route selection for expressway emergency rescue were analysed from general traffic impedances influencing expressway emergency rescue. A mathematical model for route selection for expressway emergency rescue was established and the application of improved Floyd accelerated algorithm to route selection for emergency rescue among multiple spots was studied. The model was applied to route selection for emergency rescue on Henan expressway. The results show that the starting point that has the shortest original distance to the accident point is the entry point for emergency rescue when the traffic impedance effect is small. The starting point that has the shortest original distance to the accident point is not always the entry point for emergency rescue when traffic impedance effect is large. The aid

收稿日期:2012-12-22

基金项目:国家社会科学基金西部项目(11XJY027);教育部人文社会科学研究青年基金项目(10YJC840029);

长安大学人文社会科学基金项目(0901);长安大学省级哲学社会科学重点研究基地项目(JD0901)

作者简介:韩晓宇(1975-),女,新疆哈密人,讲师,工学博士,E-mail:jijyyjj123@126.com。

vehicle will abandon the entry point with shortest original distance when traffic impedance effect is extremely large. The model has a good effect on solving problems of route selection for emergency rescue among multiple spots and achieves the aim of selecting the rational and effective rescue route, which provides effective solution scheme for decisions of route selection for expressway emergency rescue. 1 fig, 4 tabs, 13 refs.

Key words: traffic engineering; general traffic impedance; expressway; emergency rescue; route selection

0 引言

近年来,尽管中国高速公路的交通安全状况呈现出逐渐好转的趋势,但与普通公路相比,高速公路的交通安全形势依旧非常严峻^[1-2]。因此,如何在高速公路事故发生以后,做出最快速的反应,以最短的时间到达事故发生点,实施有效救援措施,降低事故死亡率,减少直接损失并避免二次事故的发生成为倍受关注的问题。目前国内外已经有相关文献对紧急救援路线选择问题作出了研究。杨晓璐等考虑城市交通系统的复杂性,以安德伍德(R. T. Underwood)模仿流体力学导出的车速——密度模型为基础,建立城市道路交通数据库;以城市交通路网作为建立事故救援路线的模型基础,利用 Matlab 运行 Floyd 算法对城市道路通行时间进行优化,确定一条时间最短的救援路线^[3]。孙华丽等针对突发事件发生后路网和救援物资需求的不确定性,以应急物资运达总时间最小和系统总成本最小为目标,建立了基于随机机会约束规划的多目标应急物流定位-路径模型,并设计了改进的遗传算法对其进行求解^[4]。Alexopoulos 利用状态空间划分方法研究了随机最短路径问题,最后用 Monte Carlo 方法模拟出了最短路径长度的分布函数^[5]。Loui 发现对于一般非线性效用函数,基于最优化原理的最短路径求解方法不适用,说明在随机网络中,不能使用期望效用最大的方法求解最优路径^[6]。柴干等针对交通事故与救援资源存在随机性的特点,建立了交通救援资源配置的随机模型,根据高速公路特有的道路条件与交通机理,确定了模型中救援服务水平、事故概率的权重,配置点至事故点的权值以及随机资源等参数值^[7]。朱晓波等应用应急系统选址主要模型——集合覆盖模型和最大覆盖模型,初步解决了高速公路紧急救援体系中多个服务点选址问题,分别建立了服务点安置费用相同和不同情况下的集合

覆盖模型,并给出模型解法步骤^[8]。然而关于高速公路紧急救援路线选择的成果并不多见。为此,本文从影响高速公路紧急救援的广义交通阻抗入手,构建高速公路紧急救援路线数学模型,研究了改进的 Floyd 算法在点对多点救援路线选择中的应用,为高速公路紧急救援决策提供有效的解决方案。

1 基于广义交通阻抗的路线选择主要影响因素分析

道路交通阻抗一般被认为是道路使用者在出行过程中在道路上花费的行程时间,对于高速公路紧急救援来说,交通阻抗主要为时间阻抗^[9]。在紧急救援中时间是第一要义,因此救援车辆按最短路线行驶是首选。

1.1 路段长度

在不考虑车辆行驶速度波动过大的前提下,不同的路段长度显然制约着行驶时间的长短。路段越长,则所消耗的行驶时间越长。

1.2 路段自身条件

高速公路跨越的地形区不同,则其几何线型、路面坡度等条件都会有较大区别。较之于平原高速公路,山区高速公路更多地受到地形、地质、水文条件等自然因素的限制,导致其线形复杂,具有多小半径曲线、多长大纵坡、多隧道且多长隧道、多桥涵构造物等特点。这些特点将会对救援车辆的行驶速度和安全产生不利影响,从而导致救援时间的拖延,因此山区路段的长度比例会影响紧急救援路线的选择。

1.3 天气状况

天气是道路交通的客观环境,会对高速公路的交通条件、车辆性能、驾驶人的行为产生影响。不利的天气条件可以导致能见度降低从而对驾驶人的行为产生负面影响,也可能导致路面摩擦因数改变,从而严重影响车辆制动以及转向性能,因此天气状况对救援车辆的行车安全至关重要。不利天气最终影

响结果会降低路段的通行能力,产生拥滞现象,对救援车辆的正常行驶和速度产生严重干扰。

1.4 交通状况

选择合理的救援路线,需要确定不同路段的实时交通状况。路段交通饱和度与交通流构成不同,道路通行能力也表现出较大差异。受到多种因素的影响,路段的饱和度在不同时间都可能有所不同,例如一天中的上午时段、节假日高速公路免费通行时期、旅游旺季的周末期间等时段车辆较多,容易产生拥堵现象。因此救援车辆在出发前必须考虑路网内每个路段的即时饱和度,当有路段饱和度过大时就应避免经过该路段。交通流中不同车种比例对交通安全影响不同,尤其大、小型车辆混合行驶对于高速公路的实际通行能力会产生明显的影响,随着大型车比例的增加,高速公路的通行能力相应地降低。

其他涉及到的因素还有道路安全标志与标线的设置、交通管制、参与交通的驾驶人特点等方面。

2 紧急救援路线选择模型构建

2.1 模型假设

(1)紧急救援车车况正常,行驶过程中基本不受交通规则约束,救援车驾驶人心理素质与驾驶技能良好,能在接到事故报警后借助警报器与标志灯持续性以路段最高限速安全行驶。

(2)高速公路路网各路段安全标志与标线设置合理,对行车安全可以提供应有的帮助。

(3)除天气原因以外,高速公路路网各路段均未因其他原因实施交通管制,例如道路养护或其他政治、军事、经济等原因,救援车辆可以正常通过。

(4)高速公路路网各路段无特殊限高、限宽、限重方面的要求,紧急救援车辆可正常通行。

(5)参与交通的其他驾驶人均能规范驾驶,并能主动保证紧急救援车辆的优先通行。

2.2 主要影响因素的考量与计算

2.2.1 路段长度

路段长度以高速公路网各重要节点间路段实测数据为准。

2.2.2 路段自身条件

路段自身条件主要考虑高速公路跨越的地形区所带来的线性、坡度方面的差异,因此需要确定山区高速公路比,引入调整系数 $0<\alpha<1^{[10]}$ 。

2.2.3 天气状况

主要的异常天气状况有雾、雪、雨、冰雹、大风、

结冰等。根据已有研究成果,得出主要异常天气对高速公路通行能力折减率,见表 1^[11-12]。

表 1 异常天气下的通行能力折减率

Tab. 1 Reduction rates of traffic capacity under unusual weather	
天气现象与等级	通行能力折减率
小雪	0.95
中雪	0.90
大雪	0.81
小雨	0.93
中雨	0.90
大雨	0.86
小雾	0.82
中雾	0.74
大雾	0.65
路面结冰	0.65

2.2.4 交通状况

其中车流量饱和度表示为

$$\delta=\frac{V}{C}\in(0,1)$$
 (1)

式中: δ 为车流量饱和度; V 为路段交通量; C 为相应路段的设计通行能力。

不同大型车比例下的通行能力折减率,见表 2^[11]。

表 2 不同大型车比例下的通行能力折减率

Tab. 2 Reduction rates of traffic capacity under different ratios of oversize vehicles							
大型车比例/%	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
通行能力折减率	0.90	0.82	0.76	0.72	0.69	0.68	0.67

2.3 模型构建

本文建立的紧急救援路线选择模型的目标函数最短用时虚拟路径模型为

$$\min \sum_{i=1}^n [\theta_{1i}(1+\alpha_i)+\theta_{2i}(1+\delta_i)]L_i/v_i$$
 (2)

$$\text{s. t.} \begin{cases} \theta_{1i}+\theta_{2i}=1 \\ \theta_{1i},\theta_{2i}\in(0,1) \\ L_i\geq 0,v_i\geq 0,\alpha_i\geq 0,\delta_i\in(0,1) \\ i=1,2,\cdots,n \end{cases}$$
 (3)

式中: L_i 为每条路段的长度; v_i 为每条路段的最高限速值,依据平原高速公路、山区高速公路与隧道等不同路段取其相应限速值; α_i 为各路段的山区高速公路比; θ_{1i} 、 θ_{2i} 为 2 个权重参数,由于在不同的路段,不同的因素对道路的影响比重不同,故加入权重参数体现这种区别。

其中,车流量饱和度 δ_i 是根据式(1)利用折减后的实际通行能力计算;路段的实际通行能力,可用如下公式计算获得

$$C_s = CI_t I_c \quad (4)$$

式中: C_s 为实际通行能力; I_t 为天气对通行能力的折减率; I_c 为大型车辆比对通行能力的折减率。

式(2)为目标函数,要求救援车辆经过若干条路径后到达事故点的总时间最短;式(3)为约束函数,由于研究的问题具有实际意义,因此路长、车速、山区公路长度比与饱和度等变量的取值大于等于0。

3 模型求解与算例

3.1 求解思路

本文综合几个主要因素来考虑最短路径,并将考虑的结果体现在路段长度的改变上。假设救援车辆可以按照相应路段的最高限速行驶,则将选择最短路径方案转化为了选择最短时间方案,这符合救援车辆以时间为第一要义的要求。

(1)计算路网中每条路段的饱和度 δ_i ,若 $\delta_i > 0.9$,则认为此路段比较拥堵,极有可能应急车道已被占用,故将此路段从路网中剔除,即救援车辆不考虑从此经过。

(2)令 $L_{si} = [\theta_{1i}(1+\alpha_i) + \theta_{2i}(1+\delta_i)]L_i$,可据此公式来计算综合考虑主要影响因素后每条路段换算出来的长度,并将 $\frac{L_{si}}{v_i}$ 作为权重赋给网络中相应的边(已剔除的边不赋值)。即权重表示救援车辆按相应路段的最高限速行驶所需的期望时间。

3.2 算法与算例

3.2.1 算法说明

最短路作为图与网络技术研究中的一个经典问题一直在工程规划、地理信息系统、通信和军事运筹学等领域有着十分广泛的应用,对该问题求解算法的设计和改进研究有着重要的理论和应用价值。传统的最短路算法主要有 Floyd 算法和 Dijkstra 算法等,其中 Floyd 算法主要用于计算所有节点对之间的最短路。经典的 Floyd 算法在应用于无向网络的计算时,会出现大量的重复计算,且整体计算量很大。为了减少工作量,并加快算法的迭代速度,提高计算效率,本文采用了结合 Gauss-Seidel 迭代思想的改进型 Floyd 加速算法来进行求解^[13]。

第一步,作初始距离矩阵 $\mathbf{D}^{(0)} = (d_{ij}^{(0)})$ 和序号矩阵 $\mathbf{A}^{(0)} = (a_{ij}^{(0)})$,其中

$$d_{ij}^{(0)} = \begin{cases} W_{ij}, i, j & \text{相邻时} \\ \infty, i, j & \text{不相邻或无路时} \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

$$a_{ij}^{(0)} = \begin{cases} \phi, i, j & \text{相邻时} \\ -, i, j & \text{不相邻或无路时} \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

此时距离矩阵 $\mathbf{D}^{(0)}$ 中的元素 $d_{ij}^{(0)}$ 表示任意两点 v_i, v_j 不经过其他节点的路长。

第二步,构造迭代矩阵 $\mathbf{D}^{(k)} = (d_{ij}^{(k)})$ 和序号矩阵 $\mathbf{A}^{(k)} = (a_{ij}^{(k)})$ 。

①对于迭代矩阵 $\mathbf{D}^{(k)}$ 的元素 $d_{ij}^{(k)}$

r 从 1 到 n ,且 $r \neq i, j$ 时,如果 $d_{ir}^{(k-1)}$ 或 $d_{rj}^{(k-1)} \geq d_{ij}^{(k-1)}$,说明插入接点 v_r 后路长 $d_{ij}^{(k-1)}$ 不会变短,此时无需计算 $d_{ir}^{(k-1)} + d_{rj}^{(k-1)}$ 。

否则, $d_{ij}^{(k)} = \min\{d_{ij}^{(k-1)}, d_{ir}^{(k-1)} + d_{rj}^{(k-1)}\}$

②相应地,序号矩阵 $\mathbf{A}^{(k)}$ 的各元素变化为

若 $d_{ij}^{(k)} = d_{ir}^{(k-1)} + d_{rj}^{(k-1)}$,且 $d_{ij}^{(k)} < d_{ij}^{(k-1)}$ 则记下点 v_r ,并在序号矩阵中 $\mathbf{A}^{(k)}$ 对应的元素 $a_{ij}^{(k)}$ 变为

$$a_{ij}^{(k)} = \{a_{ir}^{(k-1)}, v_r, a_{rj}^{(k-1)}\}$$

表明经过该次迭代后从节点 v_i 出发到节点 v_j 的最短路长经过节点 v_r 路长变短;

否则, $a_{ij}^{(k)} = a_{ij}^{(k-1)}$ 。

第三步,若 $\mathbf{D}^{(k+1)} = \mathbf{D}^{(k)}$,迭代终止;否则,返回第二步。

3.2.2 实例应用

以河南省部分高速公路网(包括大广高速、宁洛高速、永登高速、商周高速、兰南高速、京港澳高速等部分路段)为例,将路网抽象,如下页图 1 所示。图中事故点为 v_{10}, v_{13}, v_{24} ;点 $v_9, v_{11}, v_{13}, v_{21}, v_{24}$ 和 v_{27} 为互通立交,救援车辆无法从这些点进入高速公路;其余点均为高速公路的收费站(出入口),救援车辆可以从这些点进入高速公路;点与点之间的数字表示路段实际距离。

研究区域处于河南省中东部,河南省的高速公路山区路段主要在豫西和豫南,通过实地调研可知研究路段地形均属于平原微山丘型,故山区比例统一取 0.1($\alpha_i = 0.1$),权重取 0.2($\theta_{1i} = 0.2$)。饱和度对路段的影响较大,故权重统一取 0.8($\theta_{2i} = 0.8$)。计算过程中,对于饱和度超过 0.9 的路段,设其所需时间为 10 000 min,以方便程序计算,即表示不考虑从该路段通过,对于两点间没有直接路段相连的,也做了同样的假设。季节设置在冬季,天气影响主要根据不同路段除雪与结冰状况取相应的折减值。不同路段的实际交通量见下页表 3。

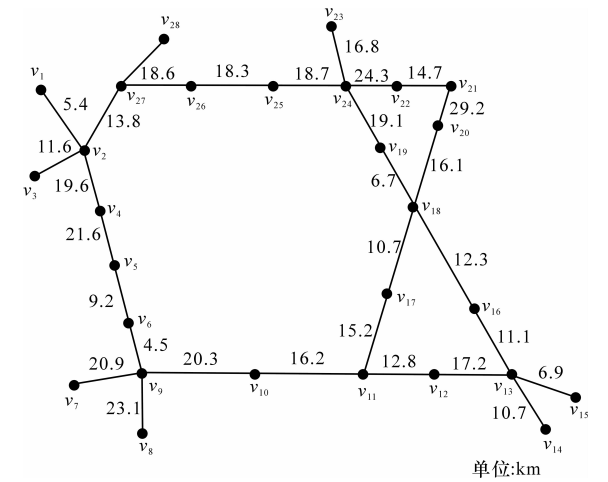


图 1 河南省部分高速公路网络抽象

Fig. 1 Abstract of part of expressway network in Henan

表 3 研究路段实际交通量

Tab. 3 Actual traffic capacity of test section

研究路段	实际月平均日交通量/(veh·d ⁻¹)	研究路段	实际月平均日交通量/(veh·d ⁻¹)
v ₁ —v ₂	43 960	v ₂ —v ₃	6 590
v ₂ —v ₄	43 037	v ₄ —v ₅	43 682
v ₅ —v ₆	39 063	v ₆ —v ₉	41 747
v ₇ —v ₉	11 972	v ₈ —v ₉	37 591
v ₉ —v ₁₀	11 972	v ₁₀ —v ₁₁	11 973
v ₁₁ —v ₁₇	10 565	v ₁₁ —v ₁₂	11 972
v ₁₂ —v ₁₃	11 972	v ₁₃ —v ₁₄	11 929
v ₁₃ —v ₁₅	11 972	v ₁₃ —v ₁₆	11 929
v ₁₆ —v ₁₈	11 929	v ₁₇ —v ₁₈	10 565
v ₁₈ —v ₁₉	11 929	v ₁₈ —v ₂₀	10 565
v ₂₀ —v ₂₁	10 565	v ₂₁ —v ₂₂	6 590
v ₂₂ —v ₂₄	6 590	v ₂₃ —v ₂₄	13 929
v ₁₉ —v ₂₄	11 929	v ₂₄ —v ₂₅	6 590
v ₂₅ —v ₂₆	6 110	v ₂₆ —v ₂₇	6 110
v ₂₇ —v ₂₈	6 590	v ₂ —v ₂₇	6 590

结合交通事故的历史资料和其他交通统计资料,选取了冬季某时段在类似天气下先后发生的 3 起交通事故,合并进行理论研究,并运用改进的 Floyd 算法对赋值后的具体模型进行求解。考虑到路网中有些点离事故点较远,计算结果不具有现实意义,故本文只给出了部分离事故点较近的路段的计算结果,即救援车辆从某出入口到达事故点所需的时间,最短路径即等同于最短时间。计算结果见表 4。

由计算结果可见,可使救援车最快到达事故点 v₁₀ 的出入口为 v₁₂,车辆行驶所需时间为 22.75 min,

表 4 救援车辆到达事故点期望时间部分计算结果

Tab. 4 Part of calculation results of expected time for aid vehicle to accident point

起点(终点)	终点(起点)	路径中间点	时间/min
v ₆	v ₉	v ₆ v ₉	10 000.000
v ₆	v ₁₀	v ₆ v ₉ v ₁₀	10 015.795
v ₇	v ₉	v ₇ v ₉	16.262 115
v ₇	v ₁₀	v ₇ v ₉ v ₁₀	32.057 377
v ₈	v ₉	v ₈ v ₉	10 000.000
v ₈	v ₁₀	v ₈ v ₉ v ₁₀	10 015.795
v ₁₀	v ₁₁	v ₁₀ v ₁₁	12.605 448
v ₁₀	v ₁₂	v ₁₀ v ₁₁ v ₁₂	22.755 665
v ₁₁	v ₁₃	v ₁₁ v ₁₂ v ₁₃	23.789 57
v ₁₀	v ₁₇	v ₁₀ v ₁₁ v ₁₇	24.322 582
v ₁₂	v ₁₃	v ₁₂ v ₁₃	13.639 354
v ₁₃	v ₁₄	v ₁₃ v ₁₄	7.361 435 4
v ₁₃	v ₁₅	v ₁₃ v ₁₅	5.471 601
v ₁₃	v ₁₈	v ₁₃ v ₁₆ v ₁₈	15.994 86
v ₁₃	v ₁₆	v ₁₃ v ₁₆	7.532 649
v ₁₉	v ₂₄	v ₁₉ v ₂₄	13.140 507
v ₂₂	v ₂₄	v ₂₂ v ₂₄	16.518 913
v ₂₃	v ₂₄	v ₂₃ v ₂₄	13.402 336
v ₂₄	v ₂₅	v ₂₄ v ₂₅	13.064 873
v ₂₄	v ₂₆	v ₂₄ v ₂₅ v ₂₆	24.398 464
v ₁₈	v ₂₄	v ₁₈ v ₁₉ v ₂₄	18.208 656
v ₂₁	v ₂₄	v ₂₁ v ₂₂ v ₂₄	27.471 806

可使救援车最快到达事故点 v₁₃ 的出入口为 v₁₅,车辆行驶所需时间为 5.47 min,可使救援车最快到达 v₂₄ 的出入口为 v₂₅,车辆行驶所需时间为 13.06 min。表 4 同时给出了各路径中间点信息,由此可得到救援车辆行驶的最佳路径。例如, v₁₂ 到 v₁₀ 的最佳路径是从出入口 v₁₂ 出发经 v₁₁ 点后到达事故点 v₁₀。此外,相关研究表明,根据交通事故受伤的特点,对于交通事故重伤者,在事发后 90 min 内给予急救,其生存率为 10% 以下;在 60 min 内得到救援,其生存率为 40%;在 30 min 内获救,其生存率高达 80%。对比上述计算结果,不难看出所有按照最佳路线行驶所需的时间均少于 30 min,最短的甚至不到 6 min,全部满足黄金救援时间 30 min 的要求,符合前述高速公路上的救援问题必须按照救援响应的时间最短来寻求最佳路径,才能使路段上任意一点发生交通事故后都能得到及时救助。

结合实际路网状况分析,同时可得以下结论。

(1)当交通阻抗影响较小时,到达事故点的原始距离最短的点即为救援车辆应选择的驶入点,如事

故 v_{13} 点。由于 v_{15} 到 v_{13} 的距离明显小于其他点到 v_{13} 的距离,且阻抗影响不大,所以换算后的虚拟路长仍然是 v_{15} 到 v_{13} 最短。

(2)当交通阻抗影响较大时,到达事故点原始距离最短的点不一定是救援车辆应选择的驶入点,如事故点 v_{24} 。图1中显示, v_{23} 到 v_{24} 的原始距离最短,但是由于天气和交通量的影响较大,导致换算后 v_{25} 到 v_{24} 的虚拟距离最短,即为救援车辆应选择的驶入点。

(3)当交通阻抗影响异常大时,会迫使救援车辆放弃原始距离最短的驶入点,如事故点 v_{10} 。图1中显示, v_6 到 v_{10} 的原始距离最近,但由于 v_6 到 v_9 的饱和度超过0.9,即该路段严重饱和,车辆行驶几乎处于停滞状态,故放弃选择该路段,计算结果显示可选择 v_{12} 作为救援车辆的最佳驶入点。

综上所述,研究高速公路上的救援路径选择是十分必要且具有实际意义的,现实中要避免盲目、武断地选择原始路径最短的路线作为最佳行驶路线,因为在绝大多数情况下,交通阻抗都是存在的,且其影响是显著的,甚至巨大的,即(2)、(3)两种情形才是现实生活中更常见的。因此,构建合理的数学模型,运用恰当的数学方法来求解,才能获得最适合客观状况的最佳救援路径。通过以上实例分析结果,可以说明本文构建的模型与采用的算法具有可靠性与有效性。

4 结 语

(1)从广义交通阻抗的概念入手,分析了高速公路紧急救援路线选择的主要影响因素有路段长度、路段自身状况、天气条件与交通状况等,必须综合考虑这些因素才能使得救援车辆安全、迅速地到达事故点,从而保证救援的速度和效率。

(2)综合考虑影响高速公路紧急救援路线选择的主要因素,构建了高速公路紧急救援路线选择的数学模型,并针对多点对多点救援的特点,给出了进行求解的改进型Floyd加速算法。该模型与算法在解决多点对多点救援路线选择中具有较好效果,并可以加快算法的迭代速度,提高计算效率。

(3)通过对河南省部分高速公路网紧急救援路线选择的实例应用分析,对构建模型与影响因素的可行性进行了验证。结果表明,当交通阻抗影响较

小时,到达事故点原始距离最短的点即为救援车辆应选择的驶入点;当交通阻抗影响较大时,到达事故点原始距离最短的点不一定是救援车辆应选择的驶入点;当交通阻抗影响异常大时,会迫使救援车辆放弃原始距离最短的驶入点。

(4)模型与选取的影响因素均具有较强的可行性,可以达到选择合理有效救援路线的目的,为目前高速公路紧急救援决策提供有效的解决方案。今后可进一步研究的方向主要有:可以考虑增加阻抗因素构建适宜的数学模型;不同类型救援资源的时间要求与救援路径选择;空中救援与陆地救援相结合的高速公路救援网络的建立等。

参考文献:

References:

- [1] 马壮林. 高速公路交通事故时空分析模型及其预防方法[D]. 北京:北京交通大学,2010.
MA Zhuang-lin. Temporal-spatial analysis model of traffic accident and its prevention method on expressway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [2] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报(2010年度)[R]. 北京:公安部交通管理局,2011.
PRC MPSTMB. Road traffic accident statistics 2010 annual report of the PRC[R]. Beijing: PRC MPST-MB, 2011. (in Chinese)
- [3] 杨晓璐,赵江平,王珂,等. 城市救援最佳路线确定[J]. 中国安全科学学报,2008,18(10):50-56.
YANG Xiao-lu, ZHAO Jiang-ping, WANG Ke, et al. Determination of the optimal rescue route in city[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(10): 50-56. (in Chinese)
- [4] 孙华丽,周战杰,薛耀锋. 考虑路径风险的不确定需求应急物流定位-路径问题[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(6): 962-966.
SUN Hua-li, ZHOU Zhan-jie, XUE Yao-feng. Emergency location-routing problem with uncertain demand under path risk[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(6): 962-966. (in Chinese)
- [5] Alexopoulos C. State space partitioning methods for stochastic shortest path problems[J]. Networks, 1997, 30(1): 9-21.
- [6] Loui R. Optimal paths in graphs with stochastic or

- multidimensional weights[J]. Communications of the ACM,1983,26(9):670-676.
 - [7] 柴干,赵倩,黄琪,等.高速公路交通应急救援资源的配置[J].中国安全科学学报,2010,20(1):165-170.
CHAI Gan,ZHAO Qian,HUANG Qi,et al. Allocation of emergency rescue resources for freeway traffic[J]. China Safety Science Journal,2010,20(1):165-170. (in Chinese)
 - [8] 朱晓波,钱振东,陆振波,等.高速公路紧急救援服务点选址模型的研究[J].交通运输工程与信息学报,2010,8(4):104-109.
ZHU Xiao-bo,QIAN Zhen-dong,LU Zhen-bo,et al. Study on models of freeway emergency rescue service site location[J]. Journal of Transportation Engineering and Information,2010,8(4):104-109. (in Chinese)
 - [9] 王元庆,周伟,吕连恩.道路阻抗函数理论与应用研究[J].公路交通科技,2004,21(9):82-85.
WANG Yuan-qing,ZHOU Wei,LY Lian-en. Theory and application study of the road traffic impedance function[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2004,21(9):82-85. (in Chinese)
 - [10] 向红艳.高速公路交通事件紧急救援系统研究[D].
(上接第63页)
 - [2] Hans D B,Amelie O,Philippe V B. Analytical calculation of internal forces in orthotropic plated bridge decks based on the slope-deflection method[J]. Journal of Constructional Steel Research,2008,64(12):1530-1539.
 - [3] Mustafa A,Mohammad A E,Shota U. Modelling and fatigue life assessment of orthotropic bridge deck details using FEM[J]. International Journal of Fatigue,2012,40(2):129-142.
 - [4] Kolstein K H. Fatigue classification of welded joints in orthotropic steel bridge decks[D]. Delft:Delft University of Technology,2007.
 - [5] Miki C,Tateishi K. Fatigue strength of cope hole details in steel bridges[J]. International Journal of Fatigue,1997,19(6):445-455.
 - [6] Xiao Z G,Yamada K,Ya S,et al. Stress analyses and fatigue evaluation of rib-to-deck joints in steel orthotropic decks[J]. International Journal of Fatigue,2008,30(8):1387-1397.
 - [7] Roman W,Alexis O. Secondary stresses in closed orthotropic deck ribs at floor beams[J]. Journal of Structural Engineering,1992,118(2):582-595.
 - [8] IIW Doc. IIW-1823-07, Recommendations for fatigue design of welded joints and components[S].
 - [9] Wolfgang F. Recommended hot-spot analysis procedure for structural details of ships and FPSOs Based on Round-Robin FE analyses[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering,2002,12(1):89-96.
 - [10] Fayard J L,Bignonnet A, Van K D. Fatigue design criterion for welded structures[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures,2007,19(6):723-729.
 - [11] Dong P. A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analysis of welded joints[J]. International Journal of Fatigue,2001,23(10):865-876.