

文章编号: 1002-0268 (2010) 11-0143-06

区域高速公路网络交通事件 传感器布设方法研究

陈雨人, 郑仕文, 童世鑫, 张翔

(同济大学交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要: 针对如何使用有限的传感器而获得最大的事件检测效益的问题, 依据区域高速公路网络拓扑特点, 充分利用匝道以及出入口的重要特性, 以常规的最短路径算法为基础研究了一种交通事件传感器的优化布设方法, 以高速公路网络行程时间标准差作为优化目标, 在充分利用现有资源前提下, 分别布设和优化路段和出入口事件检测器, 形成两层结构的事件检测传感器网络体系。并以上海市高速公路网为例进行了实例应用分析。结果表明, 依据合适的优化方法可以确定传感器最佳布设位置和数量, 同时结合高效的交通事件检测算法, 可以全面提升交通事件检测技术。

关键词: 交通工程; 优化布设; 行程时间标准差; 路网拓扑; 传感器; 交通事件

中图分类号: U491.31

文献标识码: A

Study on Deployment of Traffic Incident Detectors for Regional Expressway Network

CHEN Yuren, ZHENG Shiwen, TONG Shixin, ZHANG Xiang

(School of Traffic Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The problem that how to get maximum effect of traffic incident detection with limited detectors was discussed. The characters of regional expressway network topology, ramps and exit/entries were considered. The commonly used shortest path algorithm was applied to optimize detectors deployment. The standard deviation of travel time was selected to be optimization objective. In full use of existing resources, deployment and optimization for link and exit/entry traffic incident detectors were studied respectively, and a double-layer structure of event detection sensor networks was created. The application of this method to the expressway network of Shanghai shows that (1) appropriate optimized theory can be used to determine the optimal position and quantity of detectors; (2) transportation event detection technology can be advanced with efficient detecting algorithm.

Key words: traffic engineering; deployment optimization; standard deviation of travel time; road network topology; detector; traffic incident

0 引言

基于区域高速公路网上交通流参数(交通流量、平均车速以及车流密度等)的交通事件检测是目前安全态势分析和紧急情况处置的主要手段。大量事

故资料和研究表明在交通事故发生前后一段时间内以交通流量、平均车速以及车流密度等为主要内容的交通流特征会发生比较明显的变化^[1], 基于这种上下游交通流特征的变化, 结合大量历史统计资料的分析, 就能够确定一段时间以后发生各种交通事

收稿日期: 2010-06-18

作者简介: 陈雨人(1966-), 男, 工学博士, 教授, 研究方向为道路交通规划设计、道路安全与环境、道路交通计算机辅助工程。
(chenyr@tongji.edu.cn)

件的概率大小,从而可以进行交通事故预警和区域高速公路网安全态势分析。在这样的应用实践中,除了合适的模型和预测技术以外,实时或者短时内的交通流特征的样本点分布就显得相当重要,在某种程度上起着决定性的作用。目前所要求的实时和短时的交通流参数,基本上都是采用包括线圈、超声波、微波和视频等传感器检测技术而获得的,人们除了关注信息融合等技术以外,也同样关心这些传感器位置的布设情况,因为传感器位置的布设对交通事件检测效果影响很大,众多研究者在进行相关方面的研究。陈扶崑等使用仿真方法对路段固定传感器布设使用人工神经网络方法进行分析^[2];裴玉龙等借助均匀设计方法结合神经网络处理技术,对交通量检测设备布设方法进行研究^[3];江龙晖等通过数据筛选可以识别出交通传感器原始数据中的错误数据,保证了各种交通模型输入信息的可靠性^[4];Hu Shouren 等研究基于最小的预算情况下的车辆传感器布设问题^[5];Adam Danczyk 等研究基于混合整数线性方程的传感器布局优化问题^[6];Li Xiaopeng 等研究交通监控传感器优化布设的可靠性问题^[7]。

总的来说,这些布设方法更多在于宏观的把握和布局,比较适合于交通调查和数据统计方面的应用,这些传感器设施并不能完全适应交通事件检测、交通事故预测和安全态势分析的需要。本文认为应该充分结合区域高速公路网络的拓扑结构特点,突出匝道以及出入口在交通事件检测中的重要作用,同时尽可能充分利用现有传感器设施,更加科学高效地布置交通事件传感器,使得基于交通流参数的相关研究更加准确合理。本文第2节,简要分析了基于传感器检测交通事件的基本原理;第3节,主要分析了基于高速公路拓扑结构的交通事件检测传感器布设思路及优化技术。

1 基于传感器检测交通事件的基本原理

目前国内外主要应用自动交通事件检测算法(Automatic Incident Detection, AID)来感知交通事件的发生^[1-2],这里的交通事件包括:(1)交通事件检测:违法停车、逆向行驶、排队检测、拥堵检测、行人违章穿行、路面障碍物和车辆抛洒物检测等。(2)交通流参数:交通流量、平均车速车流密度和车道占有率等。目前用于交通事件检测的传感器主要有视频检测器、线圈检测器、超声波检测器以及微波检测器等,各自有其特点和缺点,其中的视频

检测和线圈检测是最为常用的技术,下面主要基于这2种传感器进行分析,这是因为一方面目前高速公路网已经大量安装了这2种传感器,可以充分利用现有资源;另一方面是视频检测经过十几年的发展在技术上已经相当成熟,所具有的优越性和高性价比已得到业界的公认,代表了未来交通事件检测的发展方向。事实上视频检测技术也可以看成是一种直接的检测方法,相应的AID算法可以直接判断交通事件的发生和消散,与仅依据交通流参数的非正常变化来间接判断交通事件发生的间接技术不同。总的来说直接检测技术无论在检测速度、精度等方面均应该优于间接检测技术,但是直接检测需要布设密集的视频传感器(摄像机),资金投入比较大,同时也会受到天气、光线、障碍物等方面的影响。而间接法则相对经济方便,是目前应用最多的方法,当然间接法检测精度很大程度上依赖传感器(线圈等)的布设密度和间距。这2种交通事件检测的基本原理可以通过图1表示。

对于直接事件检测,通过视频信息可以直接获

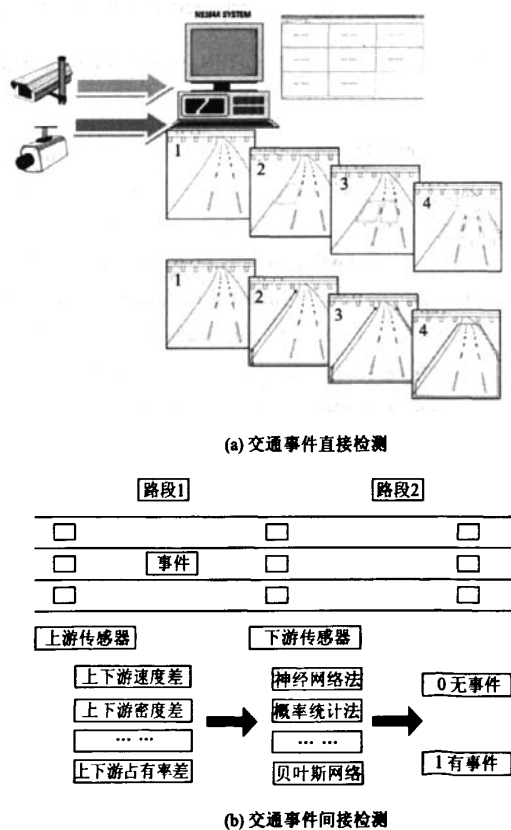


图1 交通事件检测的基本原理

Fig. 1 Basic principle of traffic incident detection

得有关事件情况, 视频传感器没有覆盖的区域当然也可以利用获取的交通流参数进行间接检测。对于间接检测来说, 通过上下游交通参数的变化, 基于合适的算法 (如神经网络, 贝叶斯网络等) 和判断阈值, 判定 2 个传感器之间有无发生交通事件, 可见传感器的位置是非常重要的因素。目前在高速公路网络系统中这 2 种技术应该能够协同工作, 取长补短, 共同构造一个高效, 经济, 高精度的交通事件检测系统。

2 基于高速公路网络复杂拓扑结构的传感器布设优化方法

高速公路网络有其重要的特点, 在相关应用研究中习惯将其简单视为路段 (Route) + 节点 (Node) 的模式, 如图 2 (a) 的形式, 基本忽略了构成节点具体枢纽互通的内在拓扑关系, 实在是浪费了许多重要的信息, 而在设置一个高效的直接检测和间接检测联合作用的交通事件检测的具体应用中, 本文在原来拓扑结构的基础上, 将每个节点 (Node) 再设计一层拓扑结构: 匝道 (Ramp) + 出入口 (Exit/Enter), 如图 2 (b) 所示, 就形成了路段 (Route) + 节点 (Node) 和匝道 (Ramp) + 出入口 (Exit/Enter) 的二层拓扑结构模式, 具体内容可参考文献 [8]。这种拓扑结构相比传统的结构可以包含更多的拓扑信息, 基于这种拓扑结构进行交通事件传感器布置将形成出口 - 入口传感器和匝道 - 路段传感器网络的形式, 从宏观上讲前者属于点, 后者属于线, 对简化交通事件检测的决策算法, 提高交通事件的检测精度都是有益的。

为此, 本文按照 2 个层次来布设传感器, 一个是解决出口 - 入口 (点) 的布置, 另一个是解决匝道 - 路段的布置, 下面分别进行论述。

2.1 出口 - 入口传感器的布置方法

出入口是高速公路中交通事故发生频次最多的地方, 同时在出入口附近交通流特征变化最为明显, 是交通事故预警和安全态势分析的重点区域。因此这里的传感器布置对整个高速公路网络的预警分析至关重要, 包含减速连接部出口、加速连接部进口、匝道合流点和分流点位置上的传感器应该是全覆盖的, 不应该出现盲区, 这也符合《国家高速公路网交通量调查观测站点布局规划》的要求。采用视频传感器布置是非常合适的, 既可以采用直接检测技术, 同时所获得的有关交通流参数也可以为路段上事件检测提供支持, 必要时也可以采用线圈等间接

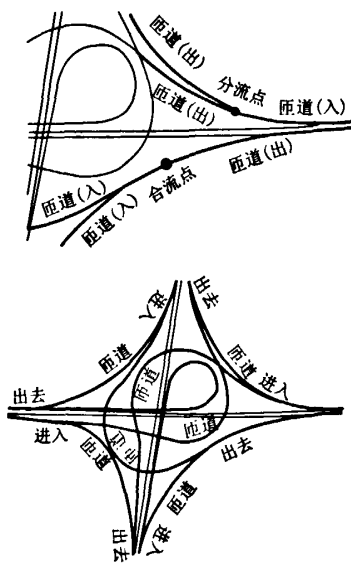
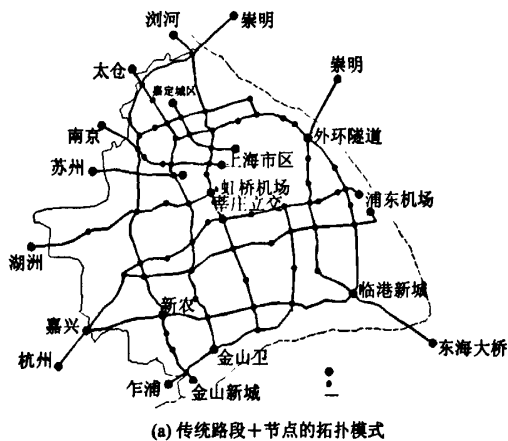


图 2 高速公路网二层拓扑结构

Fig. 2 Two-level topological structure of expressway network

传感器技术。图 3 是 4 种主要出入口传感器布置的方式, 使用视频传感器可以覆盖所有区域, 事实在这里对于每个出入口来说相当于布置了一个传感器 (组), 将为路段上提供必要的信息, 当然同时也需要来自路段传感器的配合。一般交通事件间接检测需要分析上下游 3 ~ 5 min 内的交通特征情况的, 这显然需要节点传感器和路段传感器之间的相互配合的。

2.2 匝道 - 路段传感器的布置方法

上述出入口传感器 (组) 布置完以后, 如果在路段上不再布置其他的传感器, 路网中的基本交通

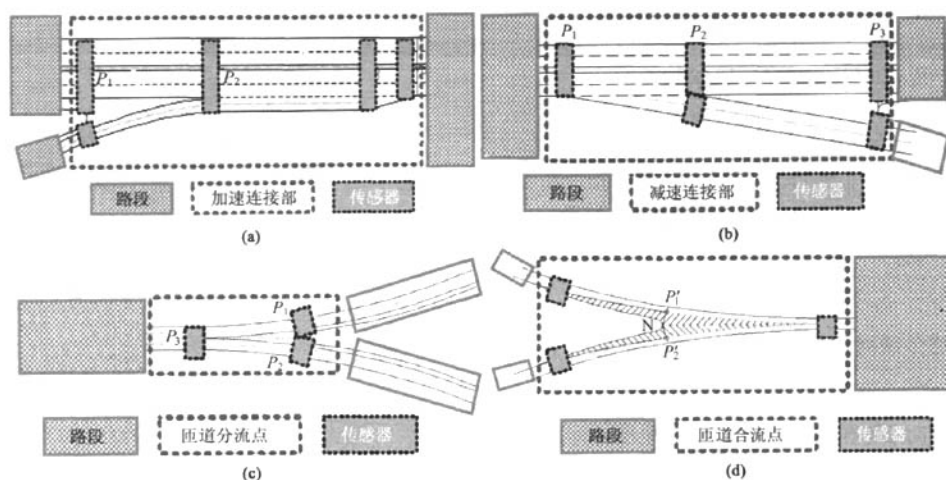


图3 出口-入口传感器的布置方法

Fig. 3 Deployment method of exit/entry detectors

流参数也可以依据出入口传感器(组)检测出来。但是由于高速公路网中的出入口相距比较远,这时所获得的交通流参数数据相当粗糙,属于2节点之间的一种平均数据,对交通事件检测这样高度依赖上下游交通特征变化的应用,信息是不充分的,交通事件的漏检就很容易发生,再复杂的算法也是没有用的。要解决整个问题就必须在路段上加密传感器,检出被平滑掉的峰值,这和回归统计的原理正好相反。在这一层拓扑结构中,出入口都被理解成一个节点^[8],可以由传感器检测出交通流参数,这样高速公路网被看成路段+节点的形式,目的就是要解决连接2节点之间路段上传感器位置的布置以及相互之间的间隔问题。显然传感器设置的越密,交通事件漏检的概率就越小,相应需要传感器的数量也就越多,反之亦然。

(1) 优化目标分析

设*i*和*j*是路网上布置了传感器的2个节点,*k*为连接2节点的路段上—可能需要布置传感器的点,一旦布置了传感器,也将其称为节点,如图4所示。

设*m*和*n*为这3个节点中的2点,用二分变量 X_{mn} 表示节点*m*和*n*之间的相邻关系,用 S_{mn} 表示2节点之间的路径长度,具体有 $S_{ik} = 0.5$ km和 $S_{jk} = 0.25$ km, \bar{V}_{mn} 为节点*m*和*n*之间的平均速度, T_{mn}^s 为*m*到*n*的行程时间(*m*和*n*间可以有新的传感器), T_{mn}^r 为行程时间(*m*和*n*间没有新的传感器)。设*h*为这3个节点中任意一点,用二分变量 Y_h 表示该点的状态,用 V_h 表示该点处所测得断面速度,具

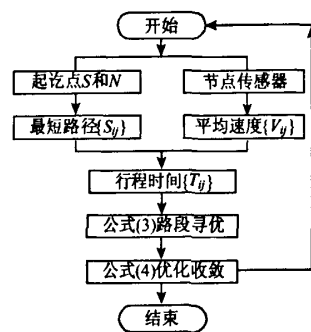


图4 路段传感器优化逻辑框图

Fig. 4 Logic diagram of optimization of link detectors
体有:

$$Y_h = \begin{cases} 1 & \text{节点 } h \text{ 处布置传感器} \\ 0 & \text{节点 } h \text{ 处不布置传感器} \end{cases}, \quad (1)$$

$$X_{mn} = \begin{cases} 1 & Y_m \times Y_n = 1, \text{ 且 } m \text{ 和 } n \text{ 间没有新的传感器,} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases}, \quad (2)$$

如果*i*、*k*和*j*全部安装有传感器,同时测得 $V_i = 35$ km/h, $V_k = 60$ km/h和 $V_j = 60$ km/h,则二分变量 X_{mn} 有 $X_{ik} = 1$, $X_{kj} = 1$, $X_{ij} = 0$,而二分变量 Y_h 有 $Y_i = 1$, $Y_k = 1$, $Y_j = 1$,点*i*、*k*之间的行程时间可以根据平均速度和路径长度计算得到,即 $\bar{V}_{ik} = \frac{V_i + V_k}{2} =$

$$47.5 \text{ km/h}, T_{ik}^s = \frac{S_{ik}}{\bar{V}_{ik}} = 38 \text{ s}, \text{ 同样点 } k, j \text{ 之间平均速度为 } \bar{V}_{kj} = \frac{V_k + V_j}{2} = 60 \text{ km/h}, \text{ 行程时间为 } T_{kj}^s = \frac{S_{kj}}{\bar{V}_{kj}} = 15 \text{ s}.$$

这样从点 i 到 j 的行程时间为 $T_{ij}^s = T_{ik}^s + T_{kj}^s = 53 \text{ s}$ 。

如果点 k 不安装传感器, 同样可以测得 $V_i = 35 \text{ km/h}$ 和 $V_j = 60 \text{ km/h}$, 则二分变量 X_{mn} 有 $X_{ik} = 0$, $X_{kj} = 0$, $X_{ij} = 1$, 而二分变量 Y_h 有 $Y_i = 1$, $Y_k = 0$, $Y_j = 1$, 点 i 、 j 之间的行程时间可以根据平均速度和路径长度计算得到, 即 $\bar{V}_{ij} = \frac{V_i + V_j}{2} = 47.5 \text{ km/h}$, $T_{ij}^r = \frac{S_{ik} + S_{kj}}{V_{ij}} = 57 \text{ s}$ 。

这说明传感器设置与否会很大程度上影响交通参数的计算, 为了表征传感器布置所带来的变化情况, 这里引入一个震荡量 E_{mn} , 令 $E_{mn} = X_{mn} \times (T_{mn}^s - T_{mn}^r)^2$, 也就是说加密的传感器可以恢复峰值。总的指导思想是在有限的传感器数量前提下, 获得最优的布设效果, 从寻优角度来讲, 选择 E_{mn} 最大的路段布置传感器。在满足 $\sum_{h=1}^N Y_h \leq R$ 情况下使得路网总的 $\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M E_{mn}$ 最小化, 表明路网上已经不需要增加传感器了, 这里 N 为全路网划分的路段数量, M 为所有节点之间存在的链接关系数量, R 为在路段上准备布置的各类传感器总和。优化目标为:

路段寻优: $\max E_{mn} = X_{mn} \times (T_{mn}^s - T_{mn}^r)^2$, (3)

优化收敛:

$$\min \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M (T_{mn}^s - T_{mn}^r)^2 \text{ 或者 } \sum_{h=1}^N Y_h \leq R. \quad (4)$$

(2) 路段传感器优化

根据上面所确定的优化思路, 遍历所有起讫点, 比如图 5 中由节点 S 到节点 N , 利用文献 [8] 描述的搜索算法获得最短路径集合 $\{S_{ij}\}$, 利用各节点现有的传感器获得各路段平均速度集 $\{\bar{V}_{ij}\}$, 计算出全路网基础行程时间集 $\{T_{ij}^r\}$, 然后布设第 1 只路段传感器, 根据公式 (3) 寻优, 然后节点传感器数量 + 1, 路段数量 + 1, 继续上述过程依次布置根据公式 (4) 决定是否停止优化。这一过程可以用图 4 的逻辑框图表现出来。

2.3 实例应用

为了验证上述方法的有效性, 笔者以上海市高速公路网为例进行了实例应用分析, 计划在路段上布设 2 个传感器。利用以前完成其他项目所建立起来的上海市高速公路网二层拓扑关系, 根据 Google Map 所提供的交通信息获得路段平均速度: 绿色路段为 70 km/h , 黄色路段为 50 km/h , 红色路段为 30



图 5 路段传感器布设优化

Fig. 5 Deployment optimization of road section detectors
km/h, 黑色路段为 10 km/h 。这个精度比较低, 不过没有关系, 由此可以计算出基础行程时间 $\{T_{ij}^r\}$, 然后布设路段传感器, 通过优化可以确定传感器 A 和 B 的位置, 见图 6。

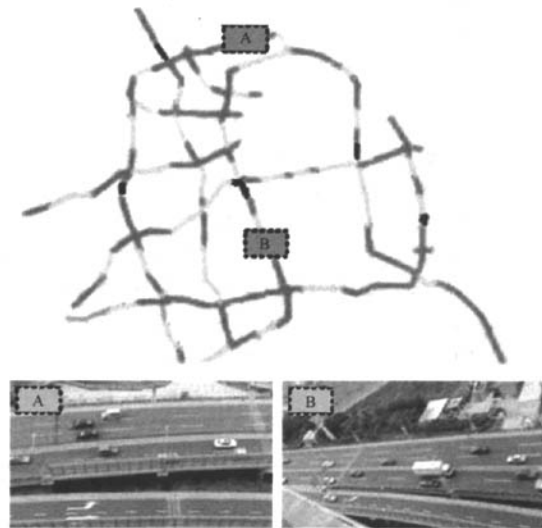


图 6 应用实例

Fig. 6 Application example

3 结语

通过交通流变化特征来检测交通事件, 传感器位置的布置很重要, 最好是能够将路网全部覆盖, 这是不可能也没有必要, 优秀的交通事件检测算法可以弥补存在的不足。围绕本文所建立的传感器的网络, 合适的检测算法在路段上分为高速模型（主线）和低速模型（匝道）; 出入口根据形式不同作为分类变量, 参与检测模型之中。基于贝叶斯统计理论的 logit 多分类变量模型配合本文所设计的传感器模型是比较适宜的, 这是以后进一步研究的内容。

参考文献:

References:

- [1] MOHAMED A A, ANURAG P. Crash Data Analysis: Collective vs. Individual Crash Level Approach [J]. Journal of Safety Research, 2007, 38: 581-587.
- [2] 陈扶崑, 吴中, 鲍业辉. 高速公路交通事故检测算法及固定检测器布设方案 [R/OL]. 南京: 河海大学, 2008. 2008-10-29 [2010-06-20]. http://www.paper789.com/paper_usi75b/.
CHEN Fukun, WU Zhong, BAO Yehui. Expressway Traffic Accident Detecting Algorithm and Fixed Detectors Deployment [R/OL]. Nanjing: Hohai University, 2008. 2008-10-29 [2010-06-20]. http://www.paper789.com/paper_usi75b/.
- [3] 裴玉龙, 刘博航, 徐慧智. 一种交通量检测设备布设方法的研究 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (9): 100-104.
PEI Yulong, LIU Bohang, XU Huizhi. Study on a Method to Set up Detector for Traffic Flow [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (9): 100-104.
- [4] 江龙晖, 姜桂艳, 张晓东, 等. 智能运输系统交通传感器数据的筛选与检验 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2004, 34 (1): 122-126.
GANG Longhui, JIANG Guiyan, ZHANG Xiaodong, et al. Screening and Checking for ITS Traffic Sensor Data [J]. Journal of Jilin University of Technology: Engineering and Technology Edition, 2004, 34 (1): 122-126.
- [5] HU Shouren, SRINIVAS P, CHU C H. Identification of Vehicle Sensor Locations for Link-based Network Traffic Applications [J]. Transportation Research Part B, 2009, 43: 873-894.
- [6] DANCZYK A, LIU X H. A Mixed - integer Linear Program for Optimizing Sensor Locations along Freeway Corridors [J/OL]. Transportation Research Part B: Methodological, 2010, doi: 10. 1016/j. trb. 2010. 04. 002 [2010-08-23]. http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V99-501CFXM-1&_user=10&_coverDate=05%2F07%2F2010&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=35a810de85cbea374b0bbeb1bf7dc1c3&searchtype=a.
- [7] LI Xiaopeng, OUYANG Yanfeng. Reliable Sensor Deployment for Network Traffic Surveillance [J/OL]. Transportation Research Part B: Methodological, 2010, doi: 10. 1016/j. trb. 2010. 04. 005 [2010-08-23]. http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V99-501CFXM-2&_user=10&_coverDate=05%2F07%2F2010&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=67b992aa7cab39078bf22b3beba607e4&searchtype=a.
- [8] 陈雨人, 陈少军. 包含立交匝道信息的高速公路网络复杂拓扑结构 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38 (2): 230-237.
CHEN Yuren, CHEN Shaojun. Complexity Topology of Expressway Network with Information of Interchange Ramps [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2010, 38 (2): 230-237.
- [9] 陈学强, 陈之遴, 计洪英, 等. 关于上海市外环线二期工程分隔带排水问题及方案的设计 [C] //上海市公路学会第6届年会学术论文集. 上海: 上海公路学会, 2002: 42-46.
CHEN Xueqiang, CHEN Zhilin, JI Hongqiang, et al. The Drainage Problems and Scheme Design of Median of Phase II Project of Outer Ring Road of Shanghai [C] // Proceedings of the 6th Annual Academic Symposium of Shanghai Highway and Transportation Society. Shanghai: Shanghai Highway and Transportation Society, 2002: 42-46.
- [10] 谈至明. 公路排水系统设计参数研究 [J]. 中国公路学报, 2006, 19 (2): 7-11.
- [11] 赵宾, 余智庆, 韩永红. 高速公路中央分隔带积水的危害与防治研究 [J]. 河南交通科技, 2000, 25 (5): 57-60.
ZHAO Bin, YU Zhiqing, HAN Yonghong. Study on the Injury and Prevention of the Waters in Central Separate Belt of Expressway [J]. Science and Technology of Henan Communication, 2000, 25 (5): 57-60.
- [12] RICH L, SAYED T. Evaluating the Safety Risk of Narrow Medians Using Reliability Analysis [J]. Journal of Transportation Engineering, 2006, 132 (5): 366-375.

(上接第25页)