

文章编号:1671-1637(2015)06-0110-08

城市可变信息标识选址算法

四兵锋,陈伯阳,蒋明清,杨小宝

(北京交通大学 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室,北京 100044)

摘要:考虑了道路等级、交通流量与道路运行状态等静态因素,以及信息叠加特征的动态因素;提出了一种考虑路段属性的城市可变信息标识(VMS)选址算法,运用回溯法的思想,针对与交通诱导密切相关的4个主要路段属性,包括道路等级、交通流量、布设效果与信息叠加度,对路段进行多层次筛选;引入2个参数,分别为路段交通流量和布设效果的遍历范围,通过调整这2个参数,控制不同属性之间的重要程度;基于北京市某局部路网对算法进行了验证。验证结果表明:当这2个引入参数由0.3增大到0.6时,布设路段顺序会发生改变,等级较高的路段即使交通流量较小也会得到优先布设,处于同一交通流量区间的路段,布设效果大的路段优先布设;在实际应用中,如果要求VMS多布设在等级较高的路段上,可以通过调整算法参数而进行布设顺序的调整。

关键词:可变信息标识;道路网络;回溯法;交通诱导;交通流量;交通等级

中图分类号:U491

文献标志码:A

Locating algorithm of urban variable message signs

SI Bing-feng, CHEN Bo-yang, JIANG Ming-qing, YANG Xiao-bao

(MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Not only the static factors including road grade, traffic flow, and road operation state, but also the dynamic factor of information attenuation property were considered, a locating algorithm of urban variable message sign (VMS) considering the properties of road sections was proposed. In view of 4 main road properties closely related to the traffic guidance, including road grade, traffic flow, layout effect, and information superposition, road sections were scanned in multi-level. The traversal ranges of traffic flow and layout effect of road section were introduced into the algorithm. The importance degrees of different properties were controlled by adjusting the two parameters. The algorithm was verified by using a local road network of Beijing City. Verification result shows that when the two parameters change from 0.3 to 0.6, the layout orders of different road sections change. The road sections with high grades have layout priority, even if the traffic flow is small. Based on the same interval of traffic flow, the roads with better layout effect are selected to locating VMS preferentially. In practice, if more VMSs are requested to layout on high-grade road sections, the layout order can be adjusted by adjusting the parameters. 4 tabs, 5 figs, 21 refs.

Key words: variable message sign; road network; backtracking method; traffic guidance; traffic flow; road grade

Author resume: SI Bing-feng(1972-), male, professor, PhD, +86-10-51684589, bfsi@bjtu.edu.cn.

收稿日期:2015-08-16

基金项目:国家973计划项目(2012CB725400);国家自然科学基金项目(71571013,71210001)

作者简介:四兵锋(1972-),男,河北邢台人,北京交通大学教授,工学博士,从事交通规划与管理研究。

0 引言

可变信息标识(Variable Message Sign, VMS)可以实时显示道路交通流量变化情况,并给驾驶人提供实时道路信息与参考路径以达到减缓拥堵的作用。VMS的使用效益取决于路网中安装的VMS数量与位置。根据发达国家使用VMS的经验,在城市路网中过多使用VMS会造成交通信息的混乱,如果不能很好地解决信息一致性问题,发布的交通信息可能在时间和空间上相互矛盾,造成VMS可信度的下降。目前,VMS布设大多依靠管理者的经验和主观判断,在VMS布设位置的合理性和选择性上缺乏很好的理论支持,使得在一些不需要布设的路段上布设了VMS,需要布设的路段反而没有布设VMS,在造成不必要浪费的同时降低了整个城市交通诱导系统的效率,因此,建立和完善一套科学的VMS布设选址方法,使得路网中一定数目的VMS起到较大的诱导效果,对整个城市交通诱导系统效率至关重要。

目前,国内外关于VMS的研究主要集中在显示内容^[1-2]、控制逻辑^[3-4]及其对驾驶行为影响^[5-9]等方面,关于VMS布设的选址问题研究较少。Gan等针对路网中常发拥堵路段,考虑了驾驶人对VMS信息的反应,采用双层规划方法研究了VMS最优的布设位置,优化目标为VMS效益最大化^[10];Huynh等提出了一个双层随机整数规划模型来描述VMS选址问题,其中上层模型描述VMS最优选址问题,优化目标为道路使用者的出行效用最大化,下层模型描述随机用户平衡配流问题,考虑了道路使用者对事故情况和信息的反应^[11];Chiu等采用双层规划模型描述VMS选址问题,上层模型描述最优选址问题,下层模型描述动态交通分配问题^[12];Fu等提出了动态交通排队延误模型,计算了路网中所有车辆的延误减少量,评价了VMS布设方案的效果^[13];Boyles等考虑了VMS的诱导效果和布设费用,采用自适应路径搜索方法研究了高速公路的VMS选址优化问题^[14];赵敬洋等采用行车路线理论研究了VMS选址优化问题,以典型行车路线上的路段为备选地点,以研究区域内所有VMS诱导效果最大化为目标,建立了优化模型^[15];倪富健等通过整数规划模型描述了VMS的选址优化问题,并采用遗传算法进行求解^[16-19];朱翀考虑了出行需求、路网布局与交通流等因素,运用模糊数学工具研究了VMS的选址问题^[20];尚华艳等采用元胞自动

机模型对VMS布设方案进行评价,通过在不同元胞中设置VMS,模拟交通系统内所有车辆行驶时间的变化,找出VMS布设的最佳位置^[21]。以上研究仅考虑了道路等级和交通流量这2个指标,没有充分考虑路网拓扑、诱导效果与交通信息之间的叠加等因素,已有方法也没有充分考虑不同因素之间的相互转化与替代问题,且求解过程比较复杂,很难应用到实际的交通管理中。

本文提出了一种考虑路网属性的VMS布设选址算法,运用回溯法的思想,针对路段的4个主要交通诱导属性:道路等级、交通流量、布设效果与信息叠加度,对路段进行多层次筛选。本文提出的VMS布设选址算法不仅考虑了道路等级、交通流量与道路运行状态等静态因素,还考虑了交通信息在路网中的叠加特征等动态因素。

1 影响VMS选址的路网属性

VMS布设的选址标准主要有以下4点:应布设在路网中重大分流点的上游路段;应布设在常发性拥堵点的上游路段;应布设在交通敏感区交通流量较大的路段;应考虑信息接力问题,使交通信息发布更协调和连贯。实际上,并不是路网中每条道路都布设VMS,其诱导效用才是最好的,一些路网因素会影响VMS的布设效果,这些因素决定了在哪些路段上应该优先布设VMS。根据以上布设基本原则,可归纳出影响VMS布设效果的主要路网属性。

1.1 道路等级

根据道路在城市路网中的功能,中国《城市道路设计规范》(CJJ 37—90)将城市道路分为4类,包括快速路、主干路、次干路和支路。道路的等级越高,其在路网中的作用就越重要,交通流量往往越大,因此,在等级较高的路段上布设VMS,其诱导效果也更为显著。

1.2 路网交通流量

交通流量是指在特定时间段内通过道路某一点、某一断面或某一车道的交通实体数。道路交通流量较容易检测,通过交通流量可以判定交通的拥挤状况。交通流量直接反映了路段的繁忙程度以及VMS发布的诱导信息的受众的多少,直接决定了VMS的诱导效果。

令 $x_{i,c}$ 为第 c 个观测时段内路段 i 上的交通流量,则路段 i 的平均交通流量 F_i 为

$$F_i = \frac{1}{C} \sum_{c=1}^C x_{i,c} \quad (1)$$

1.3 布设效果

VMS 的主要作用是向车辆发布前方道路的交通信息,使车辆尽量绕过拥堵路段,因此,VMS 应该显示下游路段的拥堵信息。不同路段上发生的交通事件和拥堵频率是不同的,或者说,不同路段的交通信息量是不同的。根据统计数据可得出各路段在特定时间内的交通事件和拥堵发生的频率,将路段 i 上的交通信息强度定义为该路段上交通事件发生频率。令 $y_{i,c}$ 为第 c 个观测时段内路段 i 上发生交通事件(包括拥堵状态)的数量,路网(共有 G 个路段)中路段 i 的事件发生率 T_i 为

$$T_i = \frac{\sum_{c=1}^C y_{i,c}}{\sum_{i=1}^G \sum_{c=1}^C y_{i,c}} \quad (2)$$

路段 i 上 VMS 的布设效果 Q_i 为

$$Q_i = \sum_j T_j \quad (3)$$

式中: T_j 为路段 j 的事件发生率, j 为路段 i 的相邻下游路段集合中的元素。

1.4 信息叠加度

城市交通状况时刻发生变化,因此,VMS 发布的交通信息具有一定时效性。当驾驶人获取某 VMS 发布的前方路段拥挤信息时,经过一段时间后,由于交通流的自发调节或交通管理部门对事件的处理,当车辆到达该路段时,路段的交通状况也许会变成畅通。实践证明,VMS 对驾驶人的诱导作用与 VMS 所指示的交通事件路段到 VMS 布设位置的距离成反比。在 VMS 布设中,需考虑已有 VMS 交通信息的叠加作用,本文提出了交通信息叠加度的计算方法,计算步骤如下。

Step 1:定义路段 j 上发布的信息在路段 i 上的作用效果 $P_{i,j}$ 为

$$P_{i,j} = \rho^{L_{i,j}} \quad (4)$$

式中: ρ 为参数,取值为 $0 < \rho < 1$; $L_{i,j}$ 为路段 j 的末节点到路段 i 的首节点之间的最短距离,可通过最短路算法确定。

Step 2:在路网中,针对所有布设 VMS 的路段,其发布的交通信息在路段 i 上的信息叠加度 I_i 表示为

$$I_i = \sum_j P_{i,j} \delta_j \quad (5)$$

式中: δ_j 为 0-1 变量,如果路段 j 上布设了 VMS 则为 1,否则为 0。

2 算法描述

定义 Ω 为路网中未布设 VMS 的路段集合; X

为路网中布设 VMS 的数量; S_i 为路段 i 布设 VMS 的顺序; α_d 为道路等级为 d 的路段流量遍历范围, $d=1,2,3,4$ 分别表示快速路、主干路、次干路和支路; β_d 为道路等级为 d 的路段布设效果遍历范围; Z_d 为道路等级为 d 的路段流量遍历集合; J_m 为流量级别为 m 的路段遍历集合, $m=1,2,\dots,M$; K_n 为布设效果级别为 n 的路段遍历集合, $n=1,2,\dots,N$ 。

算法运用回溯法的基本思想,针对路网的 4 个属性,包括道路等级、路网交通流量、布设效果与信息叠加度,对路网中各路段进行层层筛选。每利用其中 1 个属性对路段集合进行筛选完后,在其基础之上,利用下 1 个属性继续对路段进行筛选或者返回到上层属性,利用上层属性重新对路段进行筛选,如此反复,直至找出布设路段或者布设路段集合为止。算法流程见图 1,实线表示按各属性搜索布设路段集合的过程,虚线表示流程中回溯的过程。

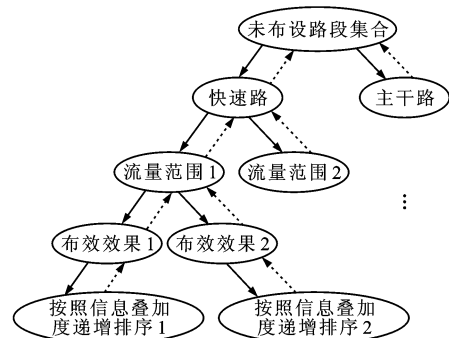


图 1 算法流程

Fig. 1 Algorithm flow

根据路网拓扑结构的基本信息(交叉口、路段长度、流量、事故数等信息),构造路网拓扑的基础数据库。根据最短路径算法求出网络拓扑中任意 2 个节点之间的最短路径,并保存最短路径长度。根据最短路径长度,计算出每个路段的信息叠加度,并存入信息叠加矩阵。利用路段的事故数目和总路网的事事故数目,计算每个路段的布设效果,把所得结果存入布设效果矩阵。由于路段信息叠加度反映的是已经布设 VMS 的路段对其他路段的影响,因此,每布设完 1 个路段都要对信息叠加矩阵进行更新。最后,利用回溯算法找出布设路段的顺序,该布设顺序即为最终布设结果。算法的具体过程如下。

Step 1:初始化参数,设置 $X, \Omega, \alpha_d, \beta_d, M, N$, 令 $S_i=0, i \in \Omega$, 道路等级 $d=1$, 遍历迭代次数 $k=1$ 。

Step 2:遍历 Ω 中所有路段,将等级为 d 的路段加入到集合 Z_d 中。

Step 3:将集合 Z_d 中的路段按照交通流量由高

到低排序,令流量遍历级别 $m=1$ 。

Step 4:确定路段流量的第 m 个遍历区间,即取 Z_d 中流量为前 α_d/M 的路段,并将这些路段放入集合 J_m 。

Step 5:对集合 J_m 中的路段,按照 Q_i 进行由高到低的排序,同时,令布设效果遍历级别 $n=1$ 。

Step 6:确定布设效果的第 n 个遍历区间,即取 J_m 中布设效果为前 β_d/N 的路段,并将这些路段放入集合 K_n 。

Step 7:如果满足条件 $m=n=1$,且 K_n 中布设效果最大的路段 i 的布设顺序 $S_i=0$,则执行 Step 10,否则,执行 Step 8。

Step 8:更新路网中所有路段的信息叠加度 I_i ,信息叠加度反映了已经布设 VMS 路段对未布设 VMS 路段的信息影响程度,信息叠加度越小,说明该路段受到已经布设的 VMS 的影响越小,越应该布设 VMS,相反,越不需要布设 VMS。

Step 9:在 K_n 中选择 I_i 最小的路段 i ,设置其布设顺序 $S_i=k+1$,执行 Step 11。

Step 10:在集合 K_n 中选择 Q_i 值最大的路段 i ,设置其布设顺序 $S_i=k$ 。

Step 11:判断 k 是否等于 X ,如果相等,则算法停止,否则,执行 Step 12。

Step 12:将已布设路段 i 从集合 K_n 、 J_m 、 Z_d 、 Ω 中删除。

Step 13:判断 K_n 是否为空,为空则返回至 Step 8,否则,执行 Step 14。

Step 14:判断 n 是否等于 N ,如果 $n \neq N$,则令 $n=n+1$,返回至 Step 6,否则,执行 Step 15。

Step 15:判断 m 是否等于 M ,如果 $m \neq M$,则令 $m=m+1$,返回至 Step 4,否则,执行 Step 16。

Step 16:判断 d 是否等于 3,如果 $d=3$,则令 $d=1$,否则,令 $d=d+1$,返回至 Step 2。

3 计算结果分析

选取北京市包含二环、三环、四环以及各环线之间的主干路、次干路构成的路网作为研究对象,研究区域见图 2,对应的路网拓扑结构见图 3。对路网中的交叉口和路段分别按顺序编号。路网共有 35 个交叉口,编号为 0~34,110 个路段,编号为 0~109,其中有快速路段 38 个、主干路段 12 个、次干路段 60 个。路段数据有:路段编号、起点交叉口编号、终点交叉口编号、道路等级(1、2、3 分别表示快速路、主干路、次干路)、交通流量与路段事故数。路网中

部分路段的相关数据见表 1。

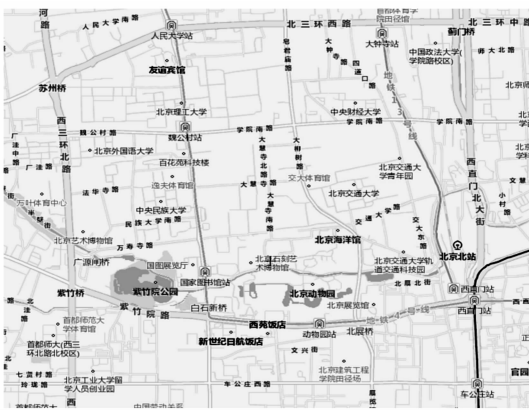


图 2 研究区域

Fig. 2 Research zone

表 1 部分路段信息

Tab. 1 Informations of some roads

路段	起点 交叉口	终点 交叉口	路段 等级	平均流量/ (veh · h ⁻¹)	事故数
23	10	5	1	5 100	30
109	34	33			69
84	27	23			38
108	33	32			43
70	23	16			37
7	5	1			24
43	16	10			30
107	32	31			48
97	31	27			39

进行初始化,设置 $X=30$, $M=N=3$, $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=0.3$, $\beta_1=\beta_2=\beta_3=0.3$ 。将所有路段放入集合 Ω 中且令 $S_i=0$,设置路段等级 $d=1$ (快速路段),遍历迭代次数 $k=1$ 。遍历 Ω 中所有路段,将快速路段加入到集合 Z_1 中,此时 Z_1 中共有 38 个路段。将集合 Z_1 中的路段按照交通流量进行由高到低排序,令 $m=1$ 。取 Z_1 中流量为前 10% 的路段,并将这些路段放入集合 J_1 中, J_1 中有 4 个路段,路段编号分别为 7、23、43、70。对集合 J_1 中的道路,按照布设效果进行由高到低的排序,结果见表 2,排序之后的路段顺序为 23、70、7、43,布设效果分别为 0.405 6、0.335 9、0.333 8、0.323 2。根据前面给出的计算步骤,最后可以得出路网中布设 VMS 的路段序列,前 9 个布设路段信息见表 3。

根据已知条件,快速路、主干路、次干路布设路段数分别为 4、2、3。从表 3 可以看出:算法得到的布设结果和设定数目完全一致;每轮回溯布设均先布设快速路段,再布设主干路段,最后布设次干路

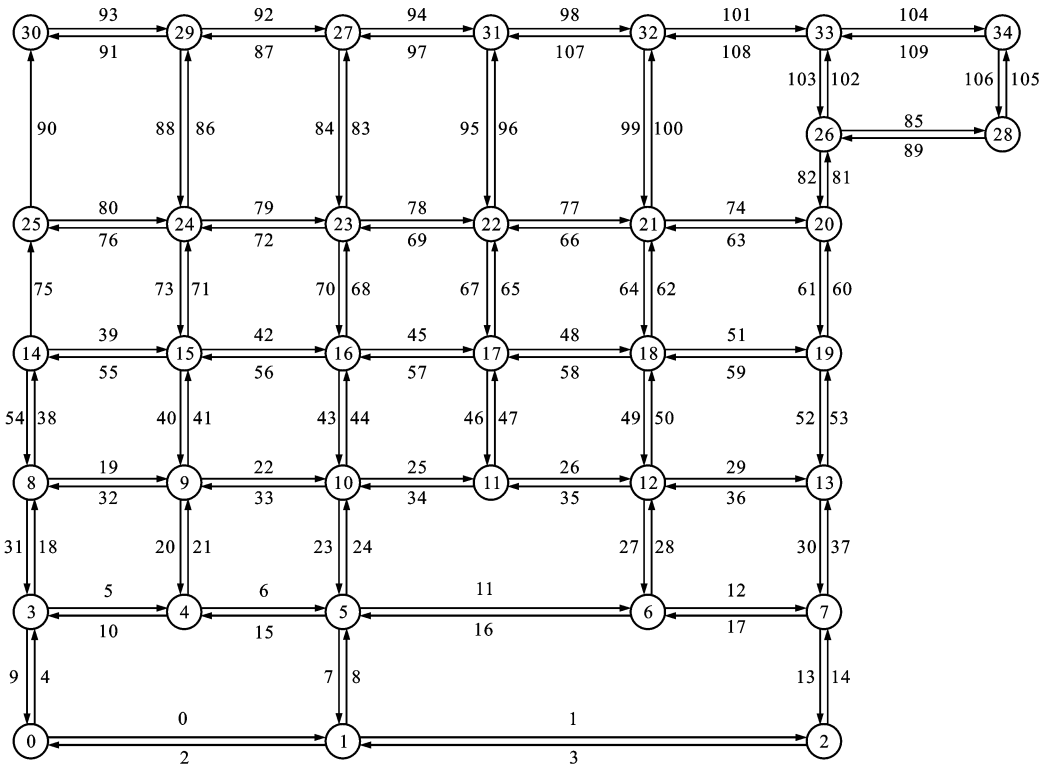


图 3 路网拓扑结构

Fig. 3 Topology structure of road network

表 2 集合 J_1 中路段信息Tab. 2 Informations of road sections in set J_1

路段	起点 交叉口	终点 交叉口	路段 等级	平均流量/ (veh · h ⁻¹)	布设效果
23	10	5	1	5 100	0.405 6
70	23	16			0.335 9
7	5	1			0.333 8
43	16	10			0.323 2

表 3 $\alpha_d = \beta_d = 0.3$ 时前 9 个布设路段信息Tab. 3 Informations of first 9 layout road sections
when $\alpha_d = \beta_d = 0.3$

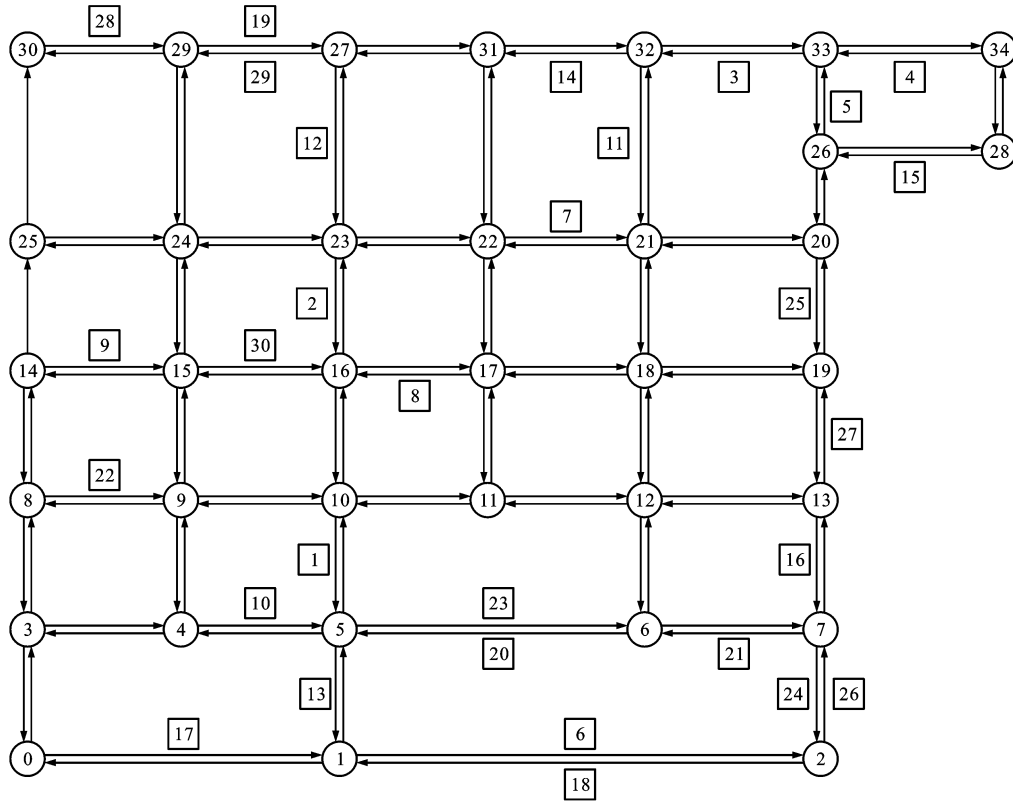
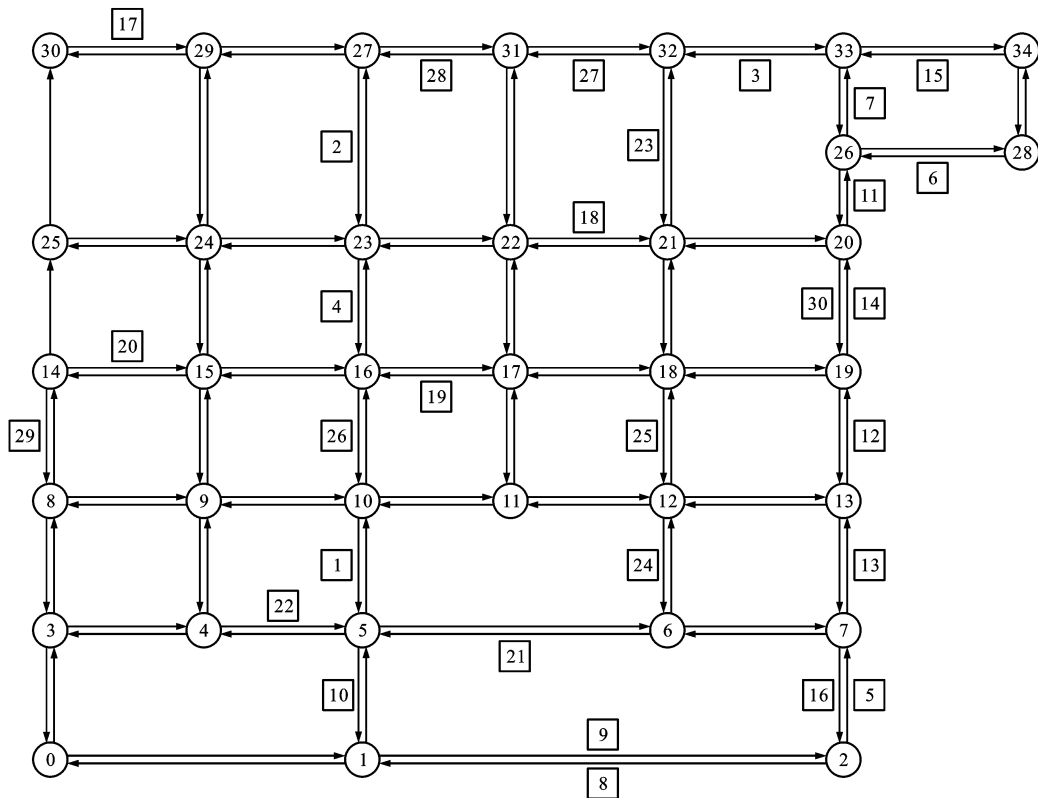
路段	起点 交叉口	终点 交叉口	路段 等级	平均流量/ (veh · h ⁻¹)	布设 效果	信息 叠加度	布设 顺序
23	10	5	1	5 100	0.405 6	0.000 0	1
70	23	16	1	5 100	0.335 9	0.090 9	2
108	33	32	1	5 100	0.340 1	0.042 8	3
109	34	33	1	5 100	0.352 8	0.125 8	4
102	26	33	2	4 800	0.352 8	0.302 5	5
1	1	2	2	3 200	0.338 0	0.360 2	6
77	22	21	3	4 500	0.422 5	0.402 6	7
57	17	16	3	4 700	0.335 9	0.578 5	8
39	14	15	3	1 900	0.380 3	0.245 7	9

段,在每个相同等级的路段集合中,优先布设交通流量较大的路段,而布设效果较大的路段优先布设 VMS。

假定算法中的参数取值为 $\alpha_d = \beta_d = 0.6$,前 9 个路段的布设顺序见表 4。 $N = M = 3$ 的情况下, α_d 、 β_d 取不同值时,算法得到的路网布设结果的拓扑结构分别见图 4、5,布设 VMS 的路段上的数字表示该路段的布设顺序。可以发现:随着参数的增加,每轮布设的路段数会随之增加,同时,路段布设顺序也发生

表 4 $\alpha_d = \beta_d = 0.6$ 时前 9 个布设路段信息Tab. 4 Informations of first 9 layout road sections
when $\alpha_d = \beta_d = 0.6$

路段	起点 交叉口	终点 交叉口	路段 等级	平均流量/ (veh · h ⁻¹)	布设 效果	信息 叠加度	布设 顺序
23	10	5	1	5 100	0.405 7	0.000 0	1
84	27	23	1	5 100	0.348 6	0.057 1	2
108	33	32	1	5 100	0.340 2	0.059 4	3
70	23	16	1	5 100	0.335 9	0.456 4	4
14	2	7	1	4 900	0.238 7	0.105 3	5
89	28	26	1	5 000	0.308 5	0.140 1	6
102	26	33	2	4 800	0.352 8	0.583 5	7
3	2	1	2	4 700	0.333 8	0.406 1	8
1	1	2	2	3 200	0.338 1	0.779 1	9

图 4 $\alpha_d = \beta_d = 0.3$ 时布设路段拓扑结构Fig. 4 Topology structure of layout road sections when $\alpha_d = \beta_d = 0.3$ 图 5 $\alpha_d = \beta_d = 0.6$ 时布设路段拓扑结构Fig. 5 Topology structure of layout road sections when $\alpha_d = \beta_d = 0.6$

了改变。对于同等级路段,随着每轮布设数目的增加,交通流量较小的路段也会优先布设 VMS,而对处于相同交通流量区间的路段,布设效果大的路段优先布设 VMS,因此,布设效果较大的路段布设顺序有所提前。另外,次干路布设数目最多,占总布设数目近一半,然后是快速路,主干路最少。在实际应用中,如果要求 VMS 多布设在等级较高的路段上,可以通过调整参数而进行布设顺序的调整。

4 结 语

(1)城市可变信息板的使用效果在很大程度上取决于路网中 VMS 的安装位置。现实中 VMS 布设选址仍然依靠管理者的经验,而国内外对该问题的研究也不够完善。本文对 VMS 的布设选址问题进行了研究,提出了基于回溯法的 VMS 选址自动生成算法。算法的特点为:基于图的遍历算法,容易实施;不仅考虑了道路等级、交通流量与道路运行状态等因素,还考虑了路网的拓扑结构与交通信息在路网中的衰减特征;不同影响因素之间具有优先级别,不同级别的指标之间可以相互转换。

(2)尽管提出的 VMS 布设选址算法简单实用,但还存在很多不足,主要包括:计算 VMS 衰减时采用路段间的最短距离作为计算依据,事实上,采用路段之间的出行时间更为准确;没有考虑不同的 VMS 对驾驶人的影响,事实上,不同的 VMS 会对驾驶人产生不同的影响;没有考虑路段交通流量和 VMS 之间的反馈关系,也就是说,在驾驶人看到 VMS 之后会改变行驶路线,道路拥堵情况会发生改变,本文并未考虑这个因素。

参 考 文 献 :

References :

- [1] MIOARA C, PATRICIA D. Comprehension and acceptability of on-board traffic information: beliefs and driving behaviour[J]. Accident Analysis and Prevention, 2014, 65(2): 123-130.
- [2] YAN Xue-dong, WU Jia-wei. Effectiveness of variable message signs on driving behavior based on a driving simulation experiment[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2014, 2014(1): 1-9.
- [3] MAMMAR S, MESSMER A, JENSEN P, et al. Automatic control of variable message signs in Aalborg[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1996, 4(3): 131-150.
- [4] MESSMER A, PAPAGEORGIOU M, MACKENZIE N. Automatic control of variable message signs in the interurban Scottish highway network[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1998, 6(3): 173-187.
- [5] ADLER J L, RECKER W W, MCNALLY M G. A conflict model and interactive simulator (FASTCARS) for predicting enroute driver behavior in response to real-time traffic condition information[J]. Transportation, 1993, 20(2): 83-106.
- [6] HASSANH M, ABDEL-ATY M A, CHOI K, et al. Driver behavior and preferences for changeable message signs and variable speed limits in reduced visibility conditions[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2012, 16(3): 132-146.
- [7] CHATTERJEE K, HOUNSELL N B, FIRMIN P E, et al. Driver response to variable message sign information in London[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2002, 10(1): 149-169.
- [8] ZHONG Shi-quan, ZHOU Li-zhen, MA Shou-feng, et al. Effects of different factors on drivers' guidance compliance behaviors under road condition information shown on VMS[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2012, 46(9): 1490-1505.
- [9] ERKE A, SAGBERG F, HAGMAN R. Effects of route guidance variable message signs (VMS) on driver behavior[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2007, 10(6): 447-457.
- [10] GAN Hong-cheng, HE Sheng-xue, DONG J. A model for determining optimal variable message sign locations[C]// IEEE. 2011 International Conference on Business Management and Electronic Information. New York: IEEE, 2011: 15-19.
- [11] HUYNH N, CHIU Y C, HUYNH N, et al. Finding near-optimal locations for variable message signs for real-time network traffic management [J]. Transportation Research Record, 2003(1856): 34-53.
- [12] CHIU Y C, HUYNH N. Location configuration design for dynamic message signs under stochastic incident and ATIS scenarios[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2007, 15(1): 33-50.
- [13] FU Li-ping, LI Shuo, HENDERSON J. A planning model for determining optimal CMS locations on a freeway-arterial network[J]. Communication and Transportation Systems Engineering and Information, 2005, 5(5): 101-120.
- [14] BOYLES S D, WALLER S T. Optimal information location for adaptive routing[J]. Networks and Spatial Economics, 2011, 11(2): 233-254.
- [15] 赵敬洋,郭明飞,郭海峰,等.基于典型行车路线理论的城市交通中诱导屏选址优化方法研究[J].浙江工业大学学报,2010,38(5):586-590.
ZHAO Jing-yang, GUO Ming-fei, GUO Hai-feng, et al. Research on location optimization of variable message signs based on typical traffic routing theory in urban transportation[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2010, 38(5): 586-590. (in Chinese)
- [16] 倪富健,刘志超.可变交通信息牌的最优分布模型[J].信息与控制,2003,32(5):395-398.
NI Fu-jian, LIU Zhi-chao. The optimal location of variable

- message signs[J]. Information and Control, 2003, 32(5): 395-398. (in Chinese)
- [17] 孙凤霞. 城市区域交通可变信息板布点方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- SUN Feng-xia. Study on the methods of urban regional traffic variable message signs setting locations[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- [18] 李小强. 可变信息标志(VMS)选址问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- LI Xiao-qiang. Research on the variable message signs (VMS) location problem [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [19] 李 悦. 城市交通诱导系统可变信息标志关键问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
- LI Yue. Study on key problems of urban traffic guidance system and its variable message signs[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006. (in Chinese)
- [20] 朱 翀. 城市交通情报板规划及布点研究[D]. 西安: 长安大学, 2005.
- ZHU Chong. Research on planning and positioning of VMS[D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)
- [21] 尚华艳, 黄海军, 高自友. 基于元胞传输模型的可变信息标志选址问题研究[J]. 物理学报, 2007, 56(8): 4342-4347.
- SHANG Hua-yan, HUANG Hai-jun, GAO Zi-you. Locating the variable message signs by cell transmission model[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(8): 4342-4347. (in Chinese)