

文章编号:1671-8879(2017)05-0089-08

时段交通限行的时空动态建模与路径优化方法

汪宏晨¹,张霞²,唐炉亮³,靳晨³

(1. 武汉大学 科学技术发展研究院,湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学 城市设计学院,湖北 武汉 430072;
3. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉 430079)

摘要:针对现有道路网数据模型无法对不同车型、不同时段动态网络拓扑进行有效建模与表达,传统路径规划方法缺乏对时段交通限行信息的支持,无法满足基本日常出行需求的问题,对时段交通限行中时段、车型(车号尾数)、限行信息的道路动态网络拓扑描述进行研究,提出不同时段交通限行下的道路动态网络拓扑模型,以实现不同车型(车号尾数)、不同时段复杂城市交通路网连通拓扑的动态建模;同时在 Dijkstra 算法的基础上,结合时段交通限行道路网络模型的特点,加入节点连通性判断,改进判断车道间及车道的车型、时间、转向限制等算法,构建了一种基于时段交通限行信息的路径优化方法,并以武汉市路网、武汉长江大桥和武汉长江二桥的时段交通限行信息为试验数据,完成不同车型、不同时段的跨江交通限行路径规划试验,以验证所提出模型的可行性。研究结果表明:基于时段交通限行的道路动态网络拓扑模型与基于时段交通限行信息的路径优化方法完善了当前交通数据模型与路径规划方法的不足,可满足在全新路网数据下的日常出行需求。

关键词:交通工程;时段交通限行;时段交通路网模型;动态网络拓扑;路径规划

中图分类号:U491 **文献标志码:**A

Time and space dynamic modeling and route optimization method of time-dependent traffic restriction

WANG Hong-chen¹, ZHANG Xia², TANG Lu-liang³, JIN Cheng³

(1. Office of Scientific Research and Development, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China; 2. School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China; 3. State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, Hubei, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing road network data model cannot make effective modeling and expression of dynamic network topology for different types and different time periods, and the traditional path planning method lacked the support of time-dependent traffic restriction information, which cannot meet the basic daily traffic demands, the dynamic network topology of time interval, vehicle type (number of mantissa) and restriction information in the time-dependent traffic restriction was analyzed. The dynamic road network topology model under different time-dependent traffic restrictions was proposed so as to achieve the dynamic modeling of the complex city traffic network connectivity topology for different vehicle types (number of mantissa) and different time intervals. Meanwhile, based on the Dijkstra algorithm, and

收稿日期:2017-04-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0503600);国家自然科学基金项目(41671442,41571430,41271442)

作者简介:汪宏晨(1974-),男,湖北天门人,副教授,E-mail:wanghc@whu.edu.cn。

combined with characteristics of network model of time-dependent traffic restriction road and other algorithms, such as judgment of nodes connectivity and improvement of judgment of vehicle type, time, steering limit, a route planning optimization method was constructed on the basis of time-dependent traffic restriction information. Taken the time-dependent traffic restriction information of Wuhan City road network, Wuhan Yangtze River Bridge and Wuhan Yangtze River Second Bridge as test data, the traffic restriction route planning experiment of different vehicle types and different periods was carried out to verify the feasibility of this model. The results show that the dynamic road network topology model and route optimization method on the basis of time-dependent traffic restriction perfect the deficiencies of the current traffic data model and route planning method, and also satisfy the daily travel demands under the new road network data. 2 tabs, 10 figs, 17 refs.

Key words: traffic engineering; time-dependent traffic restriction; time-dependent traffic road network model (TRM); dynamic network topology; route planning

0 引言

随着城市化进程的迅猛发展与城市交通设施日益发达,城市交通出现了前所未有的拥堵,细致化、动态化的交通管制策略应运而生,如设置公交专用道、奥运专用道、时段管制、车型管制等。时段交通限行是指对城市道路采取针对某种车型(或者车号尾数)在规定时间内限制通行的交通管制,它已成为解决城市交通拥堵、改善交通环境等问题的有效途径之一。但目前导航软件缺乏对时段交通限行信息的支持,现有交通路网数据模型也无法对不同车型、不同时段的动态网络拓扑进行有效建模与表达,给自主出行带来很大不便。因此,如何对复杂城市路网随不同时间、不同车型的时段交通限行进行动态拓扑建模,为公众提供符合自身情况的路径规划,具有重要的理论研究和应用价值。时段交通限行是城市交通复杂到一定程度以后出现的交通管制手段,在现实生活中已经是一个比较普遍的现象,但是目前国内外在这方面的研究较少,已有研究主要集中在静态交通路网数据模型等方面。面向交通应用以及技术推动产生了若干概念和模型,如线性参考模型^[1]、基于特征的非平面概念模型^[2-3]、综合车道模型、车行道模型、单向行驶车道模型^[3-5]、多尺度分层模型、三维道路模型等。这些模型针对不同的实际应用,采用了特定的表达方式,反映了道路数据的不同组织结构。

按模型的演化和表达技术,可将交通数据模型分为节点-弧段模型、导航数据模型、GIS-T 线性数据模型^[6]以及 GIS-T 时空数据模型这 4 类。基于此,本文针对时段交通限行的时段、车型、交通限行信息的动态路网拓扑描述进行研究,提出时段交通

限行的动态网络拓扑模型,以实现复杂城市交通路网的连通拓扑随不同时段、不同车型的动态建模,并以武汉市路网和武汉长江大桥、武汉长江二桥的时段交通限行信息为试验数据,完成不同车型、不同时间段的时段交通限行路径规划试验,以验证本文模型的可行性。

1 时段交通限行的交通特征和要素

时段交通限行信息按照发布方式和作用范围可划分为时段交通限行标志和城市车辆通行规定 2 种类型:①通过在交通路口、道路车道或路边设置时段交通限行标志,以图形、符号、文字、线段为基本单元,通过视觉传达方式向驾驶人和行人传达包括通行(禁行)时间、通行(禁行)车型等法定交通信息;②通过报纸、电视和政府网站等发布的时段交通限行规定,具有法令性质。时段交通限行标志和城市车辆通行规定这 2 种时段交通限行类型在作用范围、表达方式和包含的信息要素等方面都有所区别,如下页表 1 所示。

通过分析可以发现,时段交通限行有以下特性:

(1)动态性,时段交通限行导致路网具有动态的拓扑连通性,对不同时间、不同车型(车号尾数)都具有不同的道路连通拓扑,时段交通限行本身的生命周期也具有动态拓扑联通关系的交通特征。

(2)语义性,时段交通限行信息的发布无论是采用城市车辆通行规定,还是采用时段交通限行标志标牌,都具有丰富的时间、车型、限行等语义信息,因此,研究时段交通限行必须从语义角度对时段交通限行信息进行获取、识别、推理与表达。

(3)多层次性,时段交通限行信息可以作用于各

表 1 时段交通限行分类

Tab. 1 Classification of time-dependent traffic restriction

类别	城市车辆通行规定	时段交通限行标志
作用范围	道路、桥梁	道路、车道
时间范围	一段时间、长时间	长时间、周期性
表达方式	采用包含时间、车型(车号尾数)和限行方式的语言文字作为城市车辆通行规定进行发布	采用图形、符号、文字、线段为基本单元,通过视觉传达法定交通信息
发布方式	通过报纸、电视和政府网站等方式发布的城市交通规定	在道路路口、车道或路边设置时段交通限行的交通标志、标牌
包含信息	时间段、道路集、车型	时间段、转向限制、车型
举例	武汉长江大桥白天(6:00~19:00)车辆按照车号尾数分单双号通行,小型及以上货车全天禁止通行	

个层次的道路网络,从大范围区域路网的交通限制到局部车道的行车限制,可以作用于区域路网、道路、路段、车道等多个层次,为时段交通限行的表达增加了难度。

(4)多重性,某一道路交叉口或者道路间往往存在着多个不同生命期的时段交通限行对象,这就要求更加灵活的时段交通限行拓扑表达和拓扑更新方法。

(5)周期性,时段交通限行一般都具有一定的生命周期,同时,交通限行的时段也是有周期的,只是时段周期的长短不一样,时间的粒度(granularity)不一样。

时段交通限行信息主要包含时段(7:00~19:00)、车型(公交专用)、车牌尾号(单双号)、转向通行信息、其他(速度、高度、重量等)的限制因素等。相比于现有仅考虑的单一因素模型,时段交通限行可以看成是由以上限制因素按一定的语义关系构成的整体对象,需要一定的语义进行理解和推理,并进行生命周期管理。

2 时段交通限行的道路网络模型

2.1 概念模型

针对上述时段交通限行特性对路网拓扑模型提出的要求,本文提出基于时段交通限行的道路网络拓扑模型,该模型一方面能全面描述时段交通限行要素及其语义(如时段信息、道路信息、车辆信息、限行信息),另一方面可完整刻画城市道路“路网-道路-路段-车道”的多层次性,服务于局部车道到大范围道路管制需求,为时段交通限行环境下的路径规

划奠定了理论基础。本文采用面向对象的统一建模语言描述基于时段交通限行的道路网络拓扑模型的特征对象及其相互关系,如图 1 所示,其包括 4 个部分:道路网络信息、时段信息、车辆信息和交通限行信息。

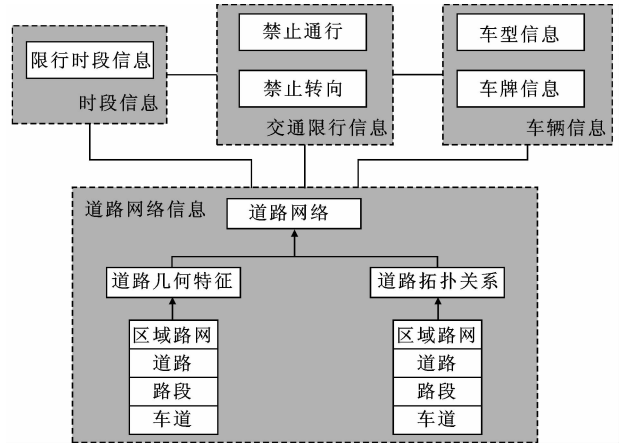


图 1 时段交通限行道路网络模型的概念模型

Fig. 1 Concept model of time-dependent traffic restriction road network model

2.2 逻辑模型

通常情况下所建立的道路网络拓扑都是静态的,而时段交通限行中,对于不同时间、不同车辆,其连通拓扑是不同的,随着时间动态变化,在时段交通限行道路网络的概念模型的基础上,本文提出时段交通限行道路网络的逻辑模型,如图 2 所示。

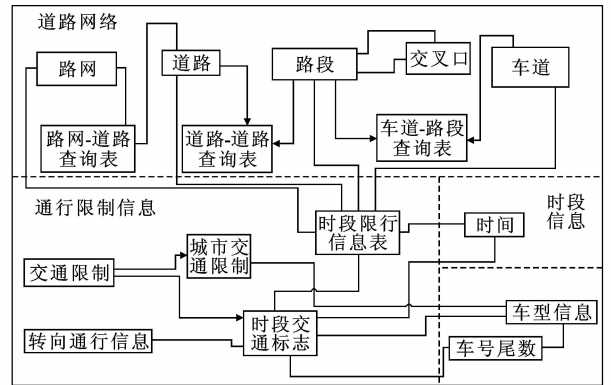


图 2 时段交通限行道路网络模型的逻辑模型

Fig. 2 Logic model of time-dependent traffic restriction road network model

2.2.1 多层次道路网络建模

时段交通限行作用的道路网络可能涉及到区域路网、道路、路段或车道,道路网络模型须能表达区域路网、道路、路段和车道的多层次级别,本文以传统的节点-弧段模型为基础,提出“路网-道路-路段-车道”的多层次建模方法,以满足时段交通限行中涉及的区域路

网、道路、路段或车道等道路信息的表达。

由于同一道路相同行车方向的车道往往具有相同的交通特征,如限速相同、转向相同、限行车型相同、拓扑关系相同等^[7]。因此,将车道作为建模的基本单元,将同一路段同一方向具有相同交通特征的多条车道(lane)聚合,如图3所示。

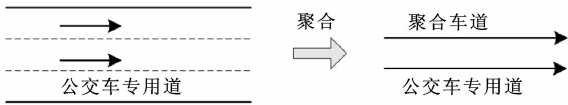
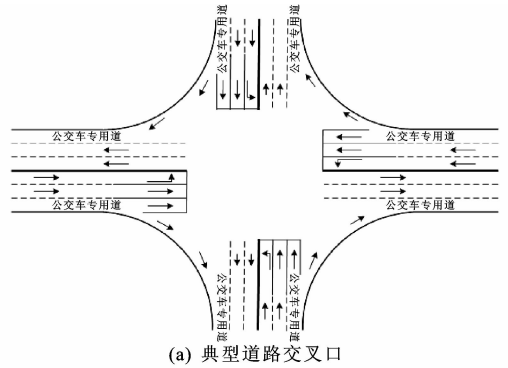


图3 具有相同交通特征的车道聚合

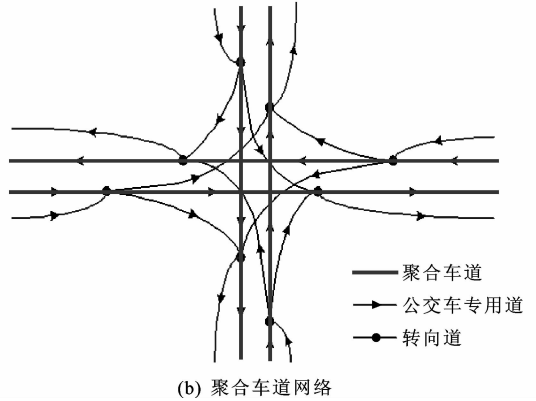
Fig.3 Polymerization of lanes with the same traffic features

该车道聚合方法可以结合动态分段方法,依照道路的真实情况,准确描述车道的交通特征,如许多城市大力发展公共交通,都设置了全天或者上下班时段(7:00~9:00、17:00~19:00)的公交车专用道[图4(a)],在距离交叉路口20~50m范围内,设置了4个方向车道(1个左转车道、2个直行车道和1个右转车道),在交叉口之间的路段是可变向的车道(用虚线设置)。本文采用聚合车道方法,首先将交叉口之间的2个直行车道进行聚合,当到了交叉口,连接左转、直行和右转的3个网络拓扑车道。因此,典型道路交叉口的网络拓扑可以用图4(b)表示。该车道聚合方法不仅克服了以往基于车道模型方法时的车道多、数据量大、网络拓扑复杂、同向车道间不可联通等局限性,提高了网络分析的效率,简化了拓扑关系;而且聚合车道和动态分段的结合可以更加准确地描述道路的真实情况和交通特征,有利于时段交通限行路网的表达与建模。

根据时段交通限行涉及到的区域路网、道路、路段和车道的多层次道路,结合聚合车道和动态分段方法,构建“路网-道路-路段-车道”的多层次道路网络和拓扑关系的数据结构,如下页图5所示。该模型描述了路网、道路、路段和车道之间的多层次关系,其中SJunctionID和EJunctionID分别为起始和终止交叉口的ID号,PositiveCarriages和OpptiveCarriages为道路2个不同方向所包含的实际车道。在拓扑上聚合车道属于道路段的一部分,具有行车方向,同时也受到城市交通法规的限制。CarriageWayID为车行道与路段CaWay_Segm关系的唯一标识,LaneNumb为包含的车道数。车道是车行道的一部分,是路网拓扑中的最小单元和组成部分,具有行车方向,Direction为车道方向,Pm_IDList为车行道受城市交通法规限制的标识号列表,通过该标识与时段交通限行信息相连接。



(a) 典型道路交叉口



(b) 聚合车道网络

图4 基于车道的典型道路交叉口与聚合车道网络拓扑

Fig.4 Lane-based typical road crossing and polymeric carriageway network topology

2.2.2 时间粒度与时段信息描述

通常认为时间是一维的轴,轴上的1个点确定1个时刻,时间轴上的1个区间确定1个时段。人们习惯使用日期单元和时钟单元等不同记时单位——粒度来描述绝对时间(如年、月、日、时、分、秒等)^[8],这些不同计时单位粒度刻画了描述事件的时间精确度,且粒度之间都具有精确的换算关系。根据时段交通限行信息的特点,本文提出一种能表达复杂时间的元组: $T < Granularity, DayPattern, DayFrom, DayEnd, PeriodTime, Startime1, Endtime1, Startime2, Endtime2, Startime3, Endtime3, \dots >$ 。DayPattern为日期类型;DayFrom和DayEnd为有效期起止日;PeriodTime为时段数;Startime和Endtime为限行时间段的起止时间,其时段数由PeriodTime决定。如2012年5月1日~12月31日每天7:00~9:00和17:00~19:00可以表示为: $T < Granularity: Day, DayPattern: Everyday, DayFrom: 2012/05/01, DayEnd: 2012/12/31, PeriodTime: 2, Startime1: 7:00, Endtime1: 9:00, Startime2: 17:00, Endtime2: 19:00 >$ 。

基于上述时间元组表达,建立日历运算方法如下:

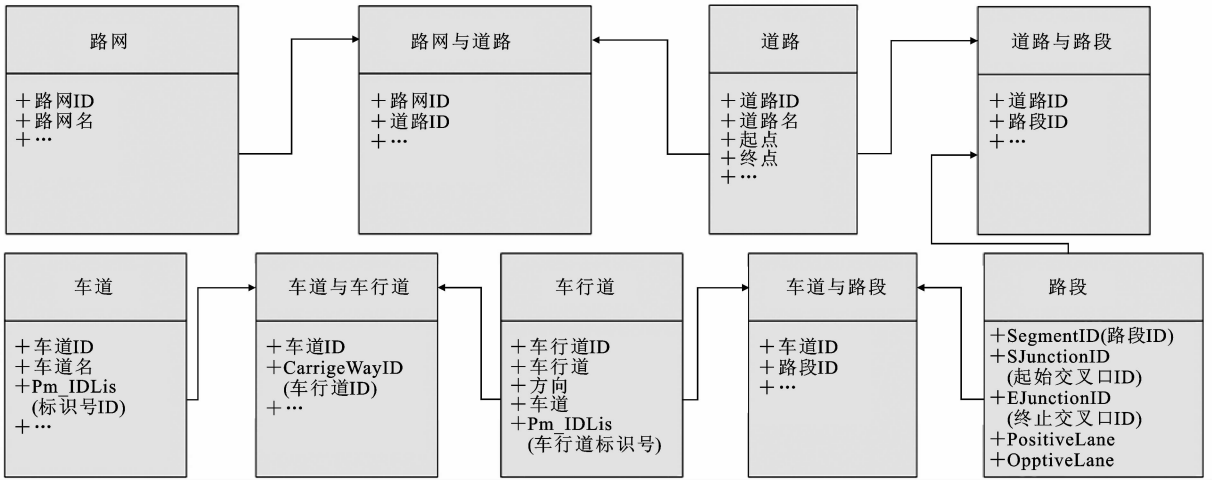


图 5 多层次道路网络和拓扑结构

Fig. 5 Multi-hierarchy road network and topology structure

(1) $Select(C, i, j, ref)$, C 为日历, i 和 j 为时间单元数量, ref 为计数起点, 若 ref 是 $begin$ 则表示从第 1 个时间单元开始计数, 若是 end , 则从最后 1 个时间单元开始计数。 $Select(\cdot)$ 函数表示从日历 C 每 1 个周期第 i 个时间单元开始选择 j 个时间单元;

(2) $Intersect(C1, C2, DayPattern)$ 为 2 个日历 $C1, C2$ 的交集, 当 $C1, C2$ 时间类型相同时才可以进行运算;

(3) $Union(C1, C2, DayPattern)$ 为 2 个日历的并集;

(4) $Exclude(C1, C2, DayPattern)$ 为从日历 $C1$

排除日历 $C2$ 。

2.2.3 车辆信息表达

时段交通限行中涉及的车辆信息主要包括车辆类型与车号尾数, 根据中国交通管理部门常用的车辆分类标准, 将车辆类型分为载客汽车、载货汽车、三轮汽车、低速货车、摩托车、挂车和特种车辆等^[9]。通过本体语言(ontology language)可以建立车辆分类层次结构, 按照层次结构编码方法进行车辆类型编码, 如图 6 所示。另外, 车号尾数也是时段交通限行的重要信息, 本模型中将车号尾数分为单号和双号 2 种, 如果车号尾数为字母, 则取其除去字母后的末位数字。

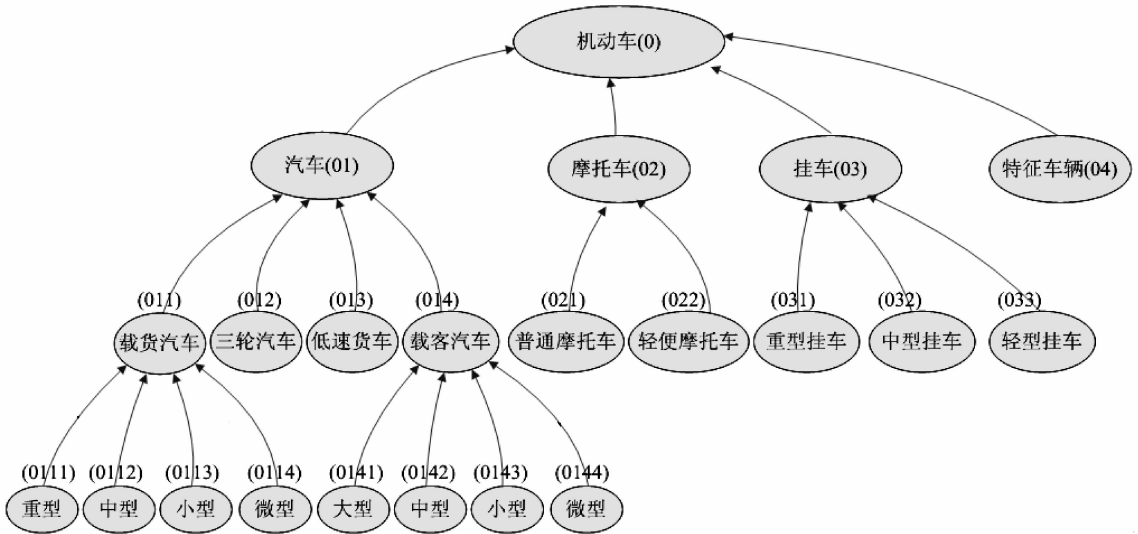


图 6 车辆分类层次与编码

Fig. 6 Classification hierarchy and coding of vehicles

2.2.4 交通限行信息表达

交通限行信息是时段交通限行的核心^[10-11], 主

要包括某些道路或车道限行和在交叉口处设置的交通转向限制。限行主要包括通行与禁行 2 种。转向

限制在大类上可以分为禁止转向和限制转向 2 种,禁止转向包括禁止左转、右转、直行和掉头 4 种;限制转向是指示只允许某种转向,通常包括只允许直行、左转、右转和掉头 4 种,通过本体语言可以建立交通限行层次结构,采用层次结构编码方法建立交通限行的统一编码,如图 7 所示。另外也有一些复杂的禁止转向和限制转向,但都可以表示成这些单方向转向的组合。

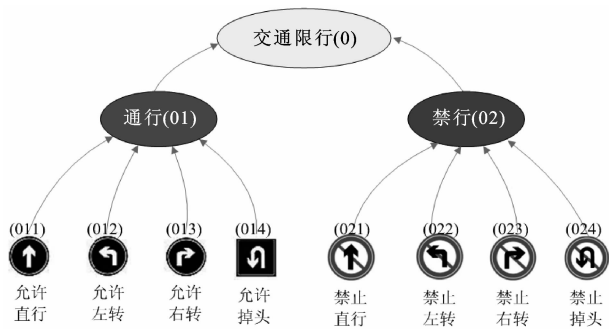


图 7 交通限行的层次与编码

Fig. 7 Classification hierarchy and coding of traffic restrictions

本文在交通限行层次结构的基础上,建立转向关

系模型: Turning (Turn_ID, Description), 其中 Turn_ID 为交通限行的类别编码。如禁止左转可以表示为: Turning (Turn_ID:022, Description: 禁止左转)。

3 基于时段交通限行的路径规划算法

本文在 Dijkstra 算法的基础上^[4], 结合时段交通限行道路网络模型的特点, 加入节点的连通性判断, 改进判断车道间及车道的车型、时间、转向限制等算法^[12-15], 将起点和终点转换为对应的起始车道和终止车道, 并判断其是否能转向和通行, 改进后的基于时段交通限行的路径规划算法如表 2 所示。

4 试验分析

本试验以 VC 6.0 为开发平台, 采用武汉城市路网数据, 结合武汉市交通管理规定“武汉长江大桥白天(7:00~19:00)实行按车号尾数分单双号限行, 全天禁止小型及以上货车通行”、“武汉长江二桥允许小型货车在晚上 23:00 至次日凌晨 6:00 通行”, 进行基于时段交通限行的路径规划试验。

表 2 基于时段交通限行的路径规划算法

Tab. 2 Algorithm of route planning based on time-dependent traffic restriction

步骤	算法	说明
步骤 1	S->startCarriage, E->endCarriage; if ! gothrough(startCarriage) ! gothrough(endCarriage) return;	//将起点和终点转换为起止车道 //如果起点和终点不可达则结束
步骤 2	For $\delta_i \in \text{CARRIAGEWAY}\{\$ $\delta_i \rightarrow \text{CDNode}_i;$ Map<int, CDNode>. add(ID, CDNode _i); K=CDNode _{start} ; Check CDNode _{start} ;	//初始化 //循环每个节点 //将每个节点 CDNode 放入容器内 //将 K 设置为起始点 CDNode _{start} //检查点 CDNode _{start}
步骤 3	SearchTopo(K, T); For DNode _j $\in T\{\$ if (! gothrough(DNode _j) ! Can_Turn (DNode _k , DNode _j)) { delete DNode _j from T; check DNode _j } Else; Length _j =min[Length _j , Length _k +l _j];	//查询拓扑 //对于 T 中的每个点 DNode _j //如果不可达或者无法转向 //从 T 中删除点 DNode _j //检查 DNode _j //如果满足条件则计算最短距离
步骤 4	i=arccmin(Length _j , T); CDNode _i . pre=CNode _k ; Check I; K=CDNode _i ;	//选取拓扑点 //将上一点设置为起点 //检查 I //将 CDNode _i 设置为 K
步骤 5	If CDNode _i == CDNode _{end} All check Return; Else Goto 3;	//结束搜索 //从第 3 步循环进行

从下页图 8 的试验结果可知, 在 2012 年 10 月 21 日上午 10:00 时, 鄂 A12061 和鄂 A12062 这 2

辆轿车从大东门前往江汉村, 根据上述规定, 车号尾数为偶数的鄂 A12062 车辆在单日不能通行武汉长

江大桥,只能绕道武汉长江二桥前往目的地[图 8 (a)],而车号尾数为奇数的鄂 A12061 车辆可以顺利在单日通行武汉长江大桥前往目的地[图 8(b)]。



图 8 2012 年 10 月 21 日上午 10:00 不同车号尾数的规划路径
Fig. 8 Route planning for cars with different last numbers at AM. 10:00 of October 21st, 2012

从图 9 可知,在 2012 年 10 月 21 日上午 10:00 时,轿车鄂 A12061 和小型货车鄂 A23058 从武昌大东门前往江汉村,武汉长江大桥全天禁止货车通行,武汉长江二桥白天也禁止通行。小型货车鄂 A23058 只能绕道白沙洲大桥前往目的地[图 9(a)],而车号尾数为奇数的轿车鄂 A12061 可以在单日通行武汉长江大桥前往目的地[图 9(b)]。

从图 10 可知,在 2012 年 10 月 21 日小型货车鄂 A23057 从金银岛花园到远洋大厦,由于武汉长江大桥全天禁止货车通行,武汉长江二桥只允许小型货车在晚上 23:00 至次日凌晨 6:00 通行,所以上午 11:00 只能绕道白沙洲大桥前往目的地,而早上 5:00 可以通过武汉长江二桥前往目的地。

5 结 语

(1) 基于时段交通限行的交通路网动态拓扑模型与路径规划方法采用车道聚合和动态分段^[16-17],实现了“路网-道路-路段-车道”的多层次道路网络建模,解决了复杂城市交通路网的连通拓扑随不同车型与车号尾数在不同时段的动态建模,弥补了当前

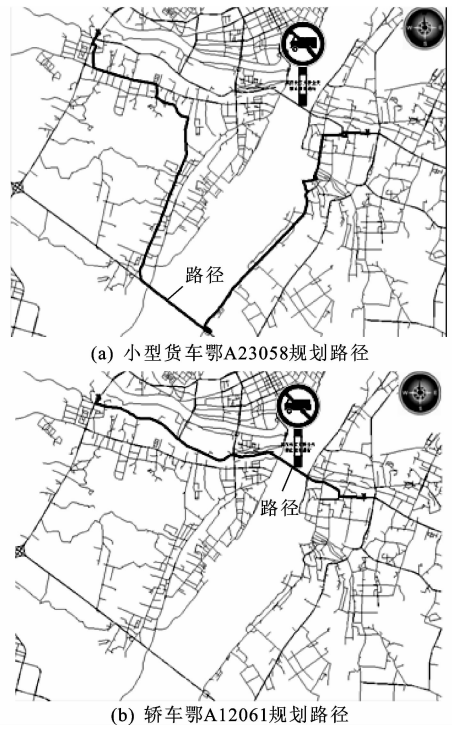


图 9 2012 年 10 月 21 日上午 10:00 时不同车型路径规划
Fig. 9 Route planning for different vehicle types at AM. 10:00 of October 21st, 2012

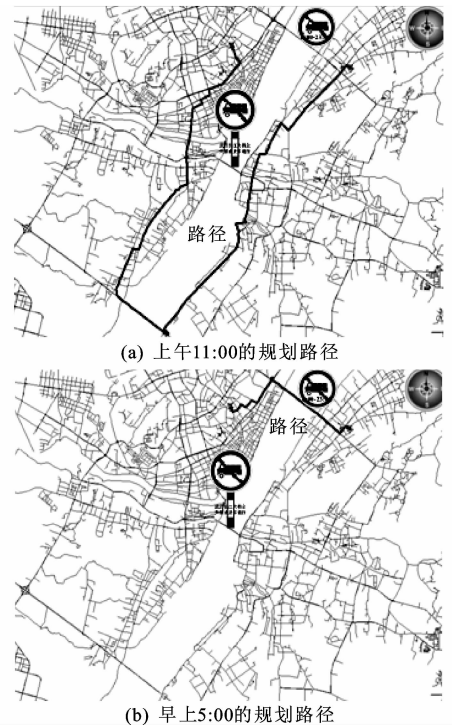


图 10 2012 年 10 月 21 日小型货车不同时间的规划路径
Fig. 10 Route planning for small truck at different time in October 21st, 2012

交通路网数据模型的不足,实现了基于时段交通限行信息的路径规划方法。

(2) 由于时段交通限行信息的语义性很强、数据

采集工作量大,今后应进一步研究时段交通限行信息的语义表达与获取。

参考文献:

References:

- [1] 桂智明. 面向导航的城市交通数据整体建模方法研究[D]. 北京:北京大学,2005.
GUI Zhi-ming. Navigation oriented integrated modeling of urban transport data[D]. Beijing: Peking University,2005.
- [2] LI Xiang, LIN Hui. A trajectory-oriented carriageway-based road network data model, part 2: Methodology[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2006, 9(2): 112-117.
- [3] JWONG C K, WONG S C, TONG C O. The advantages of the multi-period lane-based optimization method for traffic signal design[C]//Eastern Asia Society for Transportation Studies. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. Tokyo: Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2005:1358-1366.
- [4] BERGOUGNOUX P. Editorial: Geographic information systems and intelligent transportation systems[J]. *Geoinformatica*, 2000, 4(2): 123-125.
- [5] TANG Lu-liang, KAN Zi-han, ZHANG Xia, et al. Travel time estimation at intersections based on low-frequency spatial-temporal GPS trajectory big data[J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2016, 43(5): 417-426.
- [6] 刘德儿, 闫国年, 兰小机, 等. 城市基础地理数据库更新机制研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2010, 30(1): 155-159.
LIU De-er, LU Guo-nian, LAN Xiao-ji, et al. Study on updating city's fundamental geodatabase[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, 30(1): 155-159.
- [7] 杜婷婷. 城市轨道交通末班车条件下可达路径问题研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
DU Ting-ting. The reachable paths finding problem with constrain of last trains in urban mass transit network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [8] TANG Lu-liang, YANG Xue, DONG Zhen, et al. CLRIC: Collecting lane-based road information via crowdsourcing[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(9): 2552-2562.
- [9] 王雪丽, 恰汗·合孜尔. 基于 ArcGIS 的城市交通网络数据模型的建立[J]. *计算机与数字工程*, 2011, 39(4): 87-89, 118.
WANG Xue-li, QIAHAN Hezier. Modelling of urban transportation network based on ArcGIS[J]. *Comput-*
- er & Digital Engineering*, 2011, 39(4): 87-89, 118.
- [10] 郑燕飞. 构建基于车道的三维可视化道路网络模型[D]. 上海:华东师范大学,2010.
ZHENG Yan-fei. Construction of 3D visualization lane-based road network model[D]. Shanghai: East China Normal University, 2010.
- [11] 唐炉亮, 郑文斌, 王志强, 等. 城市出租车上下客的 GPS 轨迹时空分布探测方法[J]. *地球信息科学学报*, 2015, 17(10): 1179-1186.
TANG Lu-liang, ZHENG Wen-bin, WANG Zhi-qiang, et al. Space time analysis on the pick-up and drop-off of taxi passengers based on GPS big data[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2015, 17(10): 1179-1186.
- [12] ZHU Qing, LI Yuan. Hierarchical lane-oriented 3D road-network model[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2008, 22(5): 479-505.
- [13] 陈燕, 刘春, 辛飞飞, 等. 城市交通路网模型的更新方案与实现[J]. *交通信息与安全*, 2010, 28(4): 39-42, 48.
CHEN Yan, LIU Chun, XIN Fei-fei, et al. Method and implementation for updating of urban road network[J]. *Journal of Transportation Information and Safety*, 2010, 28(4): 39-42, 48.
- [14] 李清泉, 杨必胜, 郑年波. 时空一体化 GIS-T 数据模型与应用方法[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2007, 32(11): 1034-1041.
LI Qing-quan, YANG Bi-sheng, ZHENG Nian-bo. An integrated spatio-temporal data model for GIS-transportation and related applications[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(11): 1034-1041.
- [15] 韩国兴. 突发事件下列车大面积晚点分析与应急处置系统研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
HAN Guo-xing. Analysis and emergency disposal system research of train delay on large scale in emergency[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [16] TANG Lu-liang, KAN Zi-han, ZHANG Xia, et al. A network kernel density estimation for linear features in space-time analysis of big trace data[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2016, 30(9): 1717-1737.
- [17] 杨扬, 姚恩建, 潘龙, 等. 基于 GPS 数据的出租车路径选择行为研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(1): 81-86.
YANG Yang, YAO En-jian, PAN Long, et al. Taxi route choice behavior modeling based on GPS data[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2015, 15(1): 81-86.