

分类号: U491  
研究生学号: 200844E019

单位代码: 10183  
密 级: 公 开



# 吉 林 大 学

## 硕 士 学 位 论 文

智能交通中车辆最优路径规划策略研究

The Optimal Path Planning Strategy of  
Intelligent Transportation Vehicle

作者姓名: 林清岩

专 业: 交通运输工程

研究方向: 交通安全与管理

指导教师: 丁同强 副教授

李文波 正高工

培养单位: 交通学院

2013 年 12 月

未经本论文作者的书面授权，依法收存和保管本论文书面版本、电子版本的任何单位和个人，均不得对本论文的全部或部分内容进行任何形式的复制、修改、发行、出租、改编等有碍作者著作权的商业性使用（但纯学术性使用不在此限）。否则，应承担侵权的法律责任。

### 吉林大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的硕士学位论文，是本人在指导教师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：林涓岩

日期：2013 年 12 月 11 日

# 智能交通中车辆最优路径规划策略研究

---

## The Optimal Path Planning Strategy of Intelligent Transportation Vehicle

---

作者姓名：林清岩

专业名称：交通运输工程

指导教师：丁同强 副教授

李文波 正高工

学位类别：工程硕士

答辩日期：2013 年 12 月 7 日

## 摘 要

### 智能交通中车辆最优路径规划策略研究

经济和科学技术的高速发展,使汽车日益广泛地进入普通家庭的生活中。扩展了人类活动的范围,但是也给出行者带来了新的困难和挑战。由于城市交通道路的复杂性,固定意识的出行路经常引发严重的交通堵塞。出行者对地理环境和周围交通状况的陌生,荒野作业过程中的道路迷失,都使出行者迫切需要获得正确的出行路径。本文基于智能交通网络,研究了车辆行驶过程中的最优路径规划策略,主要的工作内容如下:

介绍了智能交通的基本组织框架,提出了智能交通路网模型及其数据存储结构,指出了智能交通的最优路径轨迹规划的重要影响。本文依据计算机图形学语言,建立基本的路网模型方程,分析了道路路网中的交叉口分布、道路的种类和等级,建立基于交通管制限制的转向限制路网模型并添加了转向限制列表。通过编程语言实现了道路路口节点类、道路路径节点类及转向限制表类的功能点定义。最后针对智能交通的路网模型,采用分层存储的方法,建立了详细图层和略图层之间节点和路径的相关联系。

基于计算机处理的地图图形学信息(GIS),首先组建、开发智能交通车辆最优路径规划策略研究的仿真平台,并对该路径规划仿真平台的主要功能进行介绍。其次建立了智能交通网静态路径规划的数学模型,并设置了不同道路阻抗下的最优价值函数模型。对几种经典的路径规划算法进行分析和比较后,设计了两种静态最优规划算法:道路路口节点对向查询和交通道路网分层查询,并在所建立的车辆路径规划仿真平台上对两种算法进行了算法的复杂度和路径规划效率进行分析。一是单、双向Dijkstra算法路径规划实验中,在图相邻数据结果存储下比图相邻接表数据存储下的最优路径规划策略效率低;二是 $A^*$ 算法在图相邻接表数据存储下,查询最优路径的效率高于Dijkstra算法;三是智能交通网中存储电子地图的数据结构上,图相邻接表数据结构优于图相邻数据结构。最后比较车辆静态最优路径规划策略。

对动态路径规划系统的整体框架进行了相关的介绍,依据相应的理论分析,对车辆动态最优路径规划问题划分为:自主车辆问题和协调车辆问题,即单车和多车的动态最优路径规划。建立了自主车辆的数学模型,并对模型进行求解分析。研究了基于道路节点及基于周期的动态路径规划算法,对两种算法的相应目标机制函数和数学模型进行



求解分析，并绘制了相应的算法实现流程图，分析了算法的实现难度值，实验的结果表示，两种算法可以有效的避免拥挤的交通路段，使车辆出行的代价降低。相对于车辆的静态路径规划，提高了车辆路径规划的实时效果和准确度。但是，在实际的交通情况下，导航车辆的不断增加，对于相同时间点始末道路节点相同的情况，车辆没有考虑其他车辆对交通道路情况的影响，势必产生了交通堵塞。对此，建立协调车辆的数学模型，对协调车辆的规划算法进行了程序上的实现。基于交通事故的协调车辆实验，验证了算法对交通堵塞道路的规避性；并通过对于交通堵塞道路数和费用的实验，考虑以出行者最优为价值函数，减少智能交通网的道路路径堵塞情况；调整算法的目标函数，找到用户最优和智能交通网最优的平衡点。对出行代价和道路拥挤情况进行分析，发现用户的出行代价和拥挤的道路数在一定范围之内是可调的，可以通过改变用户最优和智能交通最优的两者权重，满足用户的实时动态最优路径规划。

本文采用的静、动态算法可以提高车辆路径规划的效率，减少道路交通的堵塞程度并降低用户的出行费用，具有较高的实际应用价值。

**关键词：**静态路径规划策略，动态路径规划策略，路网模型， $A^*$  算法

# Abstract

## The Optimal Path Planning Strategy of Intelligent Transportation Vehicle

The rapid development of economy and science and technology makes cars becoming more and more widely into the ordinary family life. The scope of human activity is greatly expanded, but also it brings new difficulties and challenges to the traveler. Because of the complexity of the urban traffic road, fixed consciousness travel routes often causes serious traffic jam. That travelers are unfamiliar with the geographical environments and the surrounding traffic conditions, get lost in the process of wilderness homework make people urgently need to get the right travel routes. All these put forward the urgent need for the related social services. So in this paper, basing on intelligent transportation networks, the optimal path planning strategies of vehicles are studied. The main work is as follows:

This paper introduces the basic framework of intelligent transportation, puts forward the intelligent transportation networks model and its data storage structures, points out the important influence of the optimum path trajectory planning of the intelligent transportation. In this paper, on the basis of computer graphics languages, a basic network model equation is established; the intersection in the road network distribution, the type and grade of the road are analyzed; traffic control limits to restriction of the road network model is set up and added to the lists. By using the programming language, the definitions of the road intersection node, road path node and the limit function of the table class point are realized. Finally for intelligent transportation network model, adopting the method of hierarchical storage, the related links of the detailed layer and the sketch layer between the node and the path are established.

On the bases of the computer processing map graphics information (GIS), we firstly develop the intelligent transportation vehicle simulation platform of the optimal path planning strategy study. And the path planning is presented in the main functions of the simulation platform. Secondly, we establish the mathematical model of the static path planning of the intelligent transportation network and set the different road impedance model of the optimal value function. After analyzing and comparing several classic path planning algorithms we have designed two kinds of static optimal planning algorithms: one-gallon nodes to query and traffic road network layered query. And the complexity of the algorithm and the efficiency of the path planning of the two kinds of algorithms are analyzed on the vehicle path planning simulation platform which we have built. One is that in the single and double what algorithm for path planning experiments, under the adjacent figure data storage is lower than figure adjacent algorithm data is stored under the optimal path planning strategy; The second is that A-star algorithm under the table than figure adjacent data storage, query efficiency is higher than what is cut al

gorithm of the optimal path; The third is that it is stored in intelligent network electronic map data structure, graph adjacent table data structure due to adjacent data structure diagram. Finally we compare vehicle static optimal path planning strategies.

We do related presentations to overall the framework of dynamic path planning system, and according to the corresponding theoretical analysis, the vehicle dynamic optimal path planning problems are classified as: autonomous vehicles problem and coordination problem, namely, the optimal dynamic path planning of one car or many cars.

We establish the mathematical model of the autonomous vehicles, and analyze the model. Algorithm basing on one-gallon nodes and algorithm basing on the dynamic path planning are studied. By analyzing the two algorithm's corresponding target mechanism function and a mathematical model for solving and drawing the corresponding flow chart of algorithm implementation, implementation difficulty value of the algorithm, the results of the experiment show that two algorithms can effectively avoid the traffic road, make the travel cost to be reduced. Relative to the static path planning of the vehicle, it can improve the effect of the vehicle path planning, real-time and accuracy. But, in the actual traffic situation, navigation of the vehicle increases unceasingly, at the same point in time, one-gallon nodes in the same situation, vehicles without considering the impact of other vehicles on a road, which is bound to the traffic jam. For this, the mathematical model for coordinating the vehicles is established, coordinating the planning algorithm of the vehicle for the implementation of the program. By the coordination of traffic accident vehicle experiments we verify the algorithm on the evasion of the traffic road; we do the experiment on the number and the cost for a road traffic jams, consider the value of optimal function for the travelers to reduce the road congestion of the intelligent network path and the cost of the vehicle travel; we optimize the object function of the adjustment algorithm to find the balance between the user optimum and the intelligent transportation networks optimum. By analyzing the travel costs and the situation of the road congestion, we find that the user travel costs and the number of congested roads within a certain range are adjustable. The user's real-time dynamic optimal path planning can be satisfied by changing the weight of the user optimum and intelligent transportation optimum.

In this paper, both the static algorithm and the dynamic algorithm can improve the efficiency of the vehicle routing planning, reduce the degree of the traffic congestion and reduce the costs of the travel which is of a higher practical application value.

**Keywords :** Static path planning strategies, dynamic path planning strategies, network model, A\* algorithm

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论.....              | 1  |
| 1.1 论文研究背景及意义 .....        | 1  |
| 1.1.1 论文研究背景 .....         | 1  |
| 1.1.2 论文研究意义 .....         | 2  |
| 1.2 国内外发展现状及存在的问题 .....    | 3  |
| 1.2.1 道路交通系统的发展现状 .....    | 3  |
| 1.2.2 路径规划策略研究现状 .....     | 4  |
| 1.2.3 车辆最优路径规划策略研究现状 ..... | 5  |
| 1.2.4 国内外研究存在的问题 .....     | 5  |
| 1.3 本文主要内容及章节安排 .....      | 6  |
| 第 2 章 智能交通路网模型及数据结构 .....  | 9  |
| 2.1 引言 .....               | 9  |
| 2.2 智能交通路网数学模型建立 .....     | 10 |
| 2.2.1 路网模型的基本方程 .....      | 10 |
| 2.2.2 转向限制的路网模型 .....      | 11 |
| 2.3 存储路网数据结构设计 .....       | 14 |
| 2.3.1 图相邻矩阵数据存储 .....      | 14 |
| 2.3.2 图相邻接表数据存储 .....      | 15 |
| 2.4 交通道路层的数据存储 .....       | 18 |
| 2.5 本章小结 .....             | 19 |
| 第 3 章 车辆静态最优路径规划策略设计 ..... | 21 |



|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 3.1 引言 .....                    | 21 |
| 3.2 车辆路径规划仿真平台 .....            | 22 |
| 3.2.1 地理信息系统 .....              | 22 |
| 3.2.2 仿真平台软件框架 .....            | 22 |
| 3.2.3 简述平台基本功能 .....            | 23 |
| 3.3 建立静态路径规划数学模型 .....          | 24 |
| 3.4 静态路径规划算法设计 .....            | 25 |
| 3.4.1 道路节点对向查询 .....            | 25 |
| 3.4.2 交通道路网分层查询 .....           | 26 |
| 3.5 静态路径规划实验研究 .....            | 28 |
| 3.5.1 单、双向 Dijkstra 算法 .....    | 28 |
| 3.5.2 A*算法与 Dijkstra 算法比较 ..... | 31 |
| 3.5.3 A*算法与 A*分层算法比较 .....      | 36 |
| 3.5.4 静态规划策略比较 .....            | 37 |
| 3.6 本章小结 .....                  | 38 |
| 第 4 章 车辆动态最优路径规划策略设计 .....      | 39 |
| 4.1 引言 .....                    | 39 |
| 4.2 动态规划数学模型建立 .....            | 40 |
| 4.2.1 自主车辆数学模型 .....            | 40 |
| 4.2.2 协调车辆数学模型 .....            | 41 |
| 4.3 动态路径规划算法设计 .....            | 44 |
| 4.3.1 自主车辆规划算法 .....            | 44 |
| 4.3.2 协调车辆规划算法 .....            | 49 |
| 4.4 动态路径规划实验研究 .....            | 51 |
| 4.4.1 基于节点的自主车辆实验 .....         | 51 |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 4.4.2 基于周期的自主车辆实验 .....    | 54 |
| 4.4.3 基于交通事故的协调车辆实验 .....  | 56 |
| 4.4.4 协调车辆算法与堵塞道路数关系 ..... | 57 |
| 4.4.5 协调车辆算法与费用关系 .....    | 60 |
| 4.4.6 协调车辆的自主和中心最优实验 ..... | 61 |
| 4.5 本章小结 .....             | 62 |
| 第 5 章 总结和展望 .....          | 65 |
| 参考文献 .....                 | 69 |
| 致谢 .....                   | 73 |



环境，降低能源的消耗率。如图 1.1 所示为现代交通工程管理框架。

依据美国国家交通部门对智能车辆道路系统的化为 7 个大的方向<sup>[2]</sup>，而智能出行信息管理系统，是智能交通开发的重要组成部分，它作为连接出行者和道路中心管理系统的桥梁，智能出行信息管理系统，把实时动态路况采集信息、道路服务相关有效信息等，经中央处理系统分析处理后，通过现代化的车辆控制系统、电波等传播方式向信息使用者提供相对有效的道路路况服务信息，从而有效的提高道路使用效率，降低车辆堵塞所影响的相关负作用<sup>[3]</sup>。

动态最优路径规划策略是智能出行管理系统中的关键模块，策略的选择和有效性，直接影响出行者对道路复杂情况的预判能力，同时策略的实时性、可靠性及最优性是衡量智能交通中信息管理系统的重要技术指标。动态路径规划策略是依据智能交通的路网拓扑模型，引入实时交通信息反馈，通过中心式或车载处理器分析和计算后，提供给出行者道路选择功能。

最优的动态最优路径规划的选择，有利于降低出行车辆的能耗，有利于解决出行者对陌生城市路况情况的认知，有利于协调和控制城市车辆的路径规划，进而实现提高城市路况的使用效率，降低城市交通堵塞。

### 1.1.2 论文研究意义

经济和技术的高速发展使车辆更加有可能进入普通家庭的生活中，扩展了人类活动的范围和路径，但是也给出行者提出了新的困难和挑战。城市交通道路的复杂性，固定意识的出行路径引发的严重交通堵塞，使出行者迫切需要获得正确的出行路径；出行过程中，对不熟知地理环境和周围交通状况的把握和了解；车辆及出行者对社会服务的急迫需要；荒野作业过程中的道路迷失等。我们可以得出一个重要的结论，就是随着出行者活动范围的不断扩大，人们迫切需要对车辆自身所处的位置及周围环境有更有效的认识，并作出理性的判定<sup>[5]</sup>。有效提高出行车辆对动态路径的规划效果是解决城市交通堵塞的重要方法，本文研究的意义如下：

（1）智能交通方案是解决交通问题的一场信息化革命，动态最优路径规划策略作为智能交通出行者信息管理系统的重要研究问题，研究有效的最优动态路径规划策略是必要的。

（2）最优路径规划策略能够直接有效的提高道路的使用效率。减少城市交通堵塞情况的产生，可以做到节能减排的效果，引起更多的经济和社会效益。

(3) 建立具有与人类相似的神经控制单元智能交通网络,实时获得动态道路信息和社会服务,对信息进行高效的分析和处理,是出行者对社会和技术进步的迫切要求。

(4) 最优的动态路径规划策略研究是车辆导航领域的重要内力技术支撑,是衡量智能交通是否发达的重要技术指标。巨大的社会潜在需求和对道路拥堵所带来的巨大负面影响是本文研究的又一出发点。

综上所述,智能交通中车辆最优路径规划策略研究具有较强的理论和现实意义。完善和推动智能交通系统的发展,有效满足人类社会生活生产的需要,是作为一个道路交通领域研究重要课题,值得深思和研究。

## 1.2 国内外发展现状及存在的问题

### 1.2.1 道路交通系统的发展现状

道路交通系统的发展,主要产生于世界发达国家,主要原因是经济和技术的高速发展,势必产生交通隐患和问题。对于道路交通系统的构架主要源于欧美日等国,其中日本的道路交通系统的发展处于世界领先地位<sup>[7]</sup>。美国于 20 世纪中叶末期,提出基于电子无线路径规划方法来控制和改善交通状况。1994 年,提出解决道路交通系统的框架式方案—智能交通系统。其中共分为 7 个组成部分。智能出行信息管理系统,是智能交通开发的重要组成部分,车辆驾驶者可以通过道路交通中心或车载控制系统,输入起点和终点,就可获得最优的动态或静态最优路径<sup>[8]</sup>。

依据车辆行驶者获得最优规划路径的方法,区分为中心式和自发式两种导航系统<sup>[9]</sup>。中心式导航系统即是车辆须与道路交通控制中心进行数据的传输和通信,控制中心依据道路反馈系统,实时分析道路交通路况信息,对信息数据进行快速分析和处理,进行行驶车辆的最优路径规划。自发式导航系统是车辆导航系统中,匹配有行使过程中的路线图、导航定位装置,能够对路径的始末位置进行路径规划、路线匹配和行使引导。发达国家,尤其是日本,在自发式导航的相关技术一直处于领先地位,并具有较高的市场占有率。中心式导航技术源于需要各方面技术的整合和调整,一直在开发难度上较大,2005 年,Omar 和 Balqies 采取地理信息管理系统,实现了中心式导航技术的开发和应用<sup>[10]</sup>。

我国道路行驶智能信息管理导航装置起步较晚<sup>[13]</sup>,虽然拥有几百家的企业进行产品的开发,但是由于企业自身的发展和人员结构素质的差别,分层次和研发力量相对

薄弱，产品的开发声明周期较长，在产品的价值上依然无法满足中国消费者的需要。同时导航电子地图的实时更新有效性、价格的问题在一定程度上影响了导航产品的开发，也就影响了道路交通智能化的发展。

### 1.2.2 路径规划策略研究现状

统计学、最优控制、群体机器人、自主运动智能机器人等现代与人工智能相关的技术领域，最优路径规划策略一直以来就是各交通管理和控制专业研究的热点问题。限制于使用的领域和方法的不同，最优路径规划的策略也不同。常用的经典路径规划策略有 A\*算法、Dijkstra 算法、无目的搜索、贝尔曼-福特（Bellman-Ford）算法等。

1、在路径规划策略中，Hart 等科学家提出的 A\*算法广泛应用于引导式的路径搜索，引导式的路径规划策略是相对于无目的搜索方式提出的。在路径的规划过程中，进行下一节点运算时，引入全局信息变量，对目前节点到末点的距离进行统计估量运算，作为评价所选最优路径的可能性评价标准，这样就可以提高最优路径的规划策略。

最优路径的评价函数：

$$M=P+N \dots\dots\dots (1.1)$$

式中：P 为始点距目前点的过程值；N 为目前点距末点的过程值，简化计算时设所走的路径为直线。M 为始点到末点的过程值。路径的复杂度函数为： $R(a^b)$ ，a 为节点的统计平均相关路段数，b 为始点和末点间的路径规划深度值。

2、Dijkstra 算法<sup>[19]</sup>，是由荷兰计算机科学家艾兹赫尔·戴克斯特拉提出的，该算法使用广度优先搜索为评价指标。时间复杂度函数为  $T(r^2)$ ，其中 r 为路径规划的道路节点个数。该算法因计算相对简单，可以应用于不同的路网模型中。可以计算出道路模型中任意节点到其他相关节点的最优路径，在集中车辆的路径规划中占有优势。同时也存在计算量上的冗余，因为对于车辆的驾驶者主要关心的目标函数是始末的最优路径规划。

3. 无目的的路径规划，主要分为两类：广度和深度优先搜索。广度搜索即是连续继承式的节点搜索法，对于层搜索来说，先搜索完本层的节点。深度优先搜索即是当前扩展区最深的节点，一直沿着树状网络进行根部最深层。将规划完的节点从搜索中去除，返回未搜索的扩展节点<sup>[20]</sup>。该算法的依据是数据结构的分层树状结构。广度搜索的路况复杂度函数为  $R(a^{b+1})$  其中 a 为所有层的最大节点个数（不包括根节点），b



为搜索的层数。深度搜索的路况复杂度函数为  $R(a^b)$ ,  $a$  表示每一层的节点个数,  $b$  表示节点的深度值<sup>[22]</sup>。

### 1.2.3 车辆最优路径规划策略研究现状

车辆道路路径规划中,车辆的驾驶者可以利用存储于导航系统中的地图数据进行静态的最优路径规划,也可以依据实时动态路径反馈系统,依据动态最优路径规划算法结合静态地图,获得最优的动态最优路径。国内外道路交通管理专家,多集中采用经典的静态路径规划算法。Eiger 等科学家证明当道路规划过程函数为线性或指数分布时,Dijkstra 算法可以应用在静态网络中计算出最短路径。Hall 等科学家证明在经典的路径规划算法的计算最短路径,不适合于动态路径的轨迹规划。Pear 等证明  $A^*$  算法在用于道路路网的路径规划,并分析了其路况复杂度的有效性。Ford 等提出改进的路径规划算法,可以应用于地图的随机相容情况。国内同济大学的晏克非教授团队,采用路径规划的分段时间函数,将分段中的一小段信息设定为不变,研究了动态轨迹规划算法。

交通路网模型的数据存储结构设计上,多采用计算机的图形学分析语言数据结构。国外无线道路网络的普及较早,路面信息的检测和反馈系统完善,因此具备中心式导航的条件,同理具有车辆动态路最优规划所需要的信息元素。而我国由于城市交通的建设过程中,资金和技术等方面的限制,还没有建立完善的智能交通反馈系统,在导航系统也没有采用动态路径规划,这样在车辆的行使过程中,往往出现静态路径和实际动态路径的巨大差别,影响了交通出行<sup>[24]</sup>。

### 1.2.4 国内外研究存在的问题

道路交通规划的重要组成部分,即是所采用的电子地图。由于一个国家的领土范围上的差别,导致道路路况的复杂度各异。与日本相比,我国的道路电子地图生成数据较大,并且路网情况较复杂<sup>[25]</sup>。数据结构的存储格式应该更加的合理以及扩大物理存储空间。在动态的车辆路径规划中,搜索的实效性一直是评价智能交通系统的重要指标。为减少路径规划时间,如何能提高路径规划算法是非常重要的。

(1) 目前的路径规划算法较多,各种算法有其自身的局限性和使用效率等问题。在不同的车辆行驶过程中,采用何种算法使车辆信息管理系统执行效率较高,也是动态路径规划算法的一个重要问题。这不仅要对各个路径规划算法进行比较,也要通过

大量具体的实验分析得出有效的合理结论。

(2) 车辆道路的动态路径规划需要道路的实时信息反馈,这样就需要在城市的道路上,装设相应的检测传感器装置,需要投入大量的资金,及后期的维护成本。目前我国的经济状况还没有办法普及道路检测传感器装置,因此选择何种交通信息的获取方式,使道路动态路径规划性价比最优,也是需要考虑的重要问题。

(3) 在道路最优轨迹规划的过程中,动态路径规划在系统反应的实时和有效性上优与静态路径规划方法<sup>[26]</sup>。而如何设计效率较高的动态路径规划策略是中心式导航系统设计的关键问题。道路的动态路径轨迹规划,降低了车辆驾驶者的出行成本,对提高道路的使用效率,缓解道路拥挤具有现实意义。一般的交通工程科学家主要考虑动态的交通信息状况,未考虑迭代学习对导航车辆的影响。因此如何使车辆驾驶者和交通道路路况状况达到动态最优平衡,是道路动态最优规划的一个重要问题。

### 1.3 本文主要内容及章节安排

本文的研究目的是建立智能交通的路网模型及设计其数据结构,开发基于 GIS 组件的道路路径规划仿真系统,对 A\* 算法和单、双向迪科思切算法进行比较分析后,对车辆中对单车、多车动态路径规划算法进行仿真试验。

全文共分 5 章,章节安排如下:

第一章简要分析了国内外的研究现状,以及存在的问题。介绍了本文的研究目标和关键技术。

第二章基于交通路径限制的智能交通路网模型、存储路网模型的数据结构设计、道路路径的分层的保存、道路数字地图的实时加载。

第三章基于计算机处理的地图图形学信息 (GIS), 组件开发了智能交通车辆最优路径规划策略研究的仿真平台。在该仿真平台的基础上,从理论和实际实验两个方面,研究了不同算法的执行效率,应用了道路路口对向查询和依据交通道路层的分层结构进行交通网层查询,并对两种算法的执行效率进行分析和研究,并对各种经典算法相对于不同的存储路网数据结构进行分类对比性研究,得出车辆静态最优路径规划策略的选择方法。

第四章建立行驶过程中的动态路径规划数学模型,并针对自主和协调车辆两种动态路径规划进行算法设计,并对动态路径规划的相关算法,在车辆路径规划仿真平台

上，实现算法的具体实验。

最后，在总结全文的基础上，提出了若干有待深入研究的问题。



## 第2章 智能交通路网模型及数据结构

### 2.1 引言

道路交通系统的基本组成框架如图 2.1 所示，共分为五个子系统<sup>[33]</sup>，交通路况采集子系统、交通路况分析处理子系统、车载的 GPS 定位子系统、道路最优路径规划子系统、引导车辆导航信息执行子系统。除上述五大子系统正常工作，还应该包括无线通信网络的可靠支持。

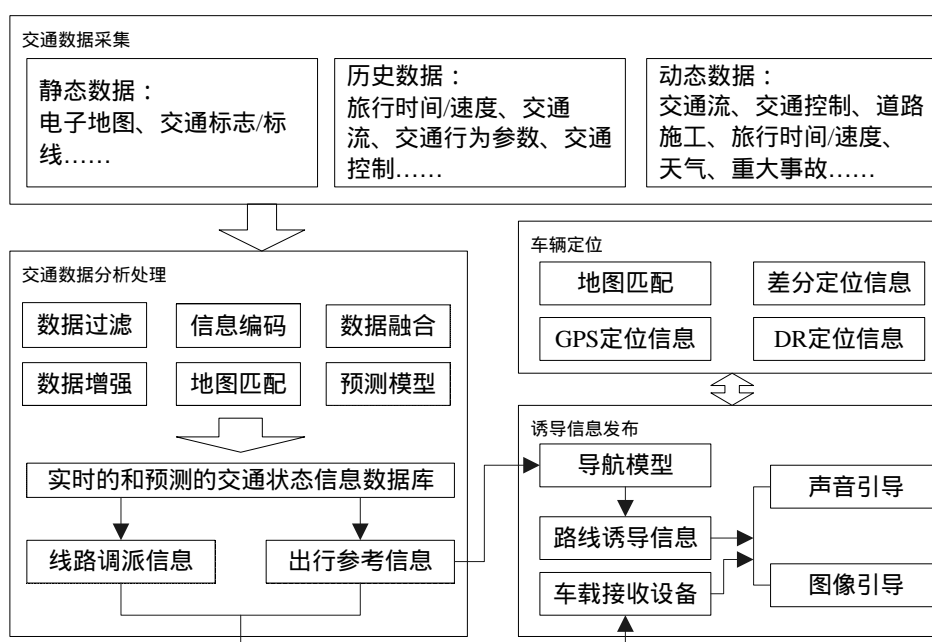


图2.1 道路交通系统组成框架图

在建立智能交通路网时，必须对组成交通道路网的相关节点和路径进行数学描述，从而把交通实际的道路情况抽象为具体的数学问题，便于智能交通工程控制系统处理器的识别、分析和处理。对于车辆的导航问题上，车辆的道路路径规划是车辆的行使者，获取始末点间最优的路径规划信息，同时要考虑道路交通的实时状况及周围环境所包含的复杂特性。因此智能交通的路径规划是路线、路线最优及性价比最优的综合评价指标。车辆的导航系统要求对车辆行驶过程中做出综合判断，并对进行最优的道路路径规划。如何将道路间的约束和复杂度使用合理的数学模型进行表示，并对路网模型的存储进行描述和设计，是道路动态轨迹规划的重要前提<sup>[32]</sup>。

本章分析了道路最优路径规划对道路路网模型数据信息的要求，以路网节点一道

路的路径为路网模型的基础，提出一种基于交通路况对交通路径规划限制的路网数学模型，采取分层多级链表的数据结构实现对路网模型的数字化存储。该智能交通的路网模型，以用户行驶过程的动态最优路径规划为需求点，对路网的空间信息、网点拓扑信息及相关属性信息进行分析研究，具备了道路信息节点信息完善、框架的结构清晰、适合于智能交通的最优动态路径规划需求等特点。

本章的主要工作包括：基于交通路径限制的智能交通路网模型、存储路网模型的数据结构设计、道路路径的分层保存、道路数字地图的实时加载。

## 2.2 智能交通路网数学模型建立

简单来说，智能交通的路网模型就是建立一个路网层上的所有道路路段和路口之间的数学描述上的逻辑基本关系。在数学建模的过程中，必须充分含有两个假设：一是能够准确的表达路网间的拓扑关系；二是路网节点在实际车辆行驶过程中的可通过性，即是否路网因某些限制而产生的数学间断点<sup>[36]</sup>。

依据计算机图形分析的结构，在做动态路径最优规划策略时，可以将智能交通道路网所包含的相关信息，抽象表示为两个基本的属性元素即：路径和道路节点。

道路节点：节点是智能交通电子地图中，最基本的构成元素。是描述智能交通网中，路径交汇点或区别某一路段上的不相关道路所应用的节点，可以描述道路路径的交叉点，及道路的始末点。在道路节点中，有一部分具有引导汽车行驶过程中，改变行车轨迹的信息描述点。

路径：就是关于智能交通实际路况的道路抽象，是两个道路节点间所描述的任何规则线段，它是描述节点与节点间的空间拓扑关系。

### 2.2.1 路网模型的基本方程

而对于最优道路路径规划策略的研究上来说，道路节点和路径就可以对智能交通网进行数学逻辑上的描述，这一个基本的数字路网模型图可以表示为：

$$\left\{ \begin{array}{l} G = (N, R, f) \\ N = \{n_1, n_2, n_3, \dots\} \\ n_i = (x_i, y_i) \\ R = \{r_1, r_2, r_3, \dots\} \\ f: f(r_i) = f(n_j, n_k) \end{array} \right. \dots\dots\dots (2.1)$$



式中： $G$  为智能交通道路的基本电子路网模型； $N$  为道路网络路口节点的集合， $n_i$  为表示道路路网的任意一个节点， $x_i, y_i$  为该任意节点的横、纵坐标； $R$  为道路路网层路径的集合， $r_1$  为道路路网任意一段路径， $f$  为两个道路路口节点之间或任意一条道路径的权重值。

## 2.2.2 转向限制的路网模型

需要注意的是在公式 2.1 中，提出的基本道路路网模型是一个理想情况的假设。而在动态路径规划中及行驶者车辆导航信息管理中，2.1 式所包含的信息量太少，对于动态最优路径规划是不充分。因此还需了解道路路网中的交叉口信息、道路的种类和等级，因此需要对公式 2.1 进行合理的修改。

### 1、道路中的交叉口分类

#### (1) 简单路口

在城市智能交通网络中，交叉道路口的行车规则可以描述为“十字路口”，其中“十字路口”含有无交通管制的路口，即行驶车辆可以按照道路选择转弯和掉头，如图 2.2 a 所示；含有禁止的交通管制路口，即对行驶车辆行驶过程中，禁止某一方向的行进，例如禁左、禁掉头。在交通路况中，单向道路一般限制禁直行和禁右，假设行驶道路为相对单行路，则禁止直行；假设行驶道路前方为左向单行道，则禁止右行。如图 2.2 b 所示，由于 L2 车道向左的单行道，因此从 L1 方向行驶车辆就要禁止右行。

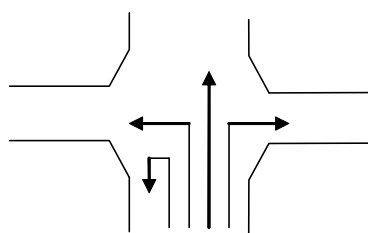


图 2.2 a 无交通管制

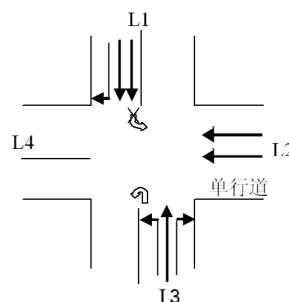


图 2.2 b 交通管制

#### (2) 复杂路口

经济和汽车技术的发展，汽车保有量的增加。汽车行驶过程中道路交汇路口的拥挤现象异常明显，为了有效的缓解拥堵的问题，依据城市交通路况的实际情况，在某



对于智能交通路网模型的建立过程中，车辆行驶过程中的主要限制是单向行驶管制，分为间断性、固定式、车类区分。而单向行驶的管制优势就是能够从宏观上协调道路路网，减少双向的交通堵塞，降低交通事故的并发率。

表 2.1 道路分类

| 序号 | 公路（城际道路） | 城市道路                 |
|----|----------|----------------------|
| 0  | 高速路、国道   | 选取原则以道路等级为主，等级高者优先选取 |
| 1  | 省道       | 与省道相连的城市道路           |
| 2  | 县道       | 与县道相连的城市道路           |
| 3  | 乡道、专用道路  | 城市其他路                |

综上所述，在道路口的交汇和复杂路口的交通管制，对车辆行驶过程中的动态路径规划有重要的影响，因此在智能交通的数学建模过程中必须考虑交通管制的行驶禁止状态。

在建模过程中引入道路路口节点限制表，简单来说，就是在数字电子地图的每个道路节点（包括复杂道路口）属性中添加能够表述限制信息的元素，即每一个节点都含有车辆行驶过程中的进入路径点 InRoadID，和禁止从路径点 OutRoadID 驶出，举例如图 2.5 所示，其节点 n 对应的转向信息如表 2.2 所示。

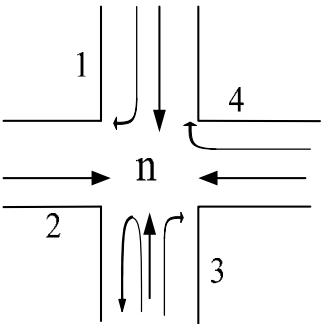


图 2.5 节点 n 转向管制图

表 2.2 节点 n 转向管制表

| Node ID | InRoad ID | OutRoad ID |
|---------|-----------|------------|
| n       | 1         | 1          |
|         | 1         | 4          |
|         | 2         | 1          |
|         | 2         | 2          |
|         | 2         | 3          |
|         | 3         | 2          |
|         | 4         | 3          |
|         | 4         | 4          |

## 2.3 存储路网数据结构设计

智能交通路网构建的空间拓扑结构中的交汇点和路径构成了“节点—线段”的数学逻辑描述，最终我们要依据计算机图形学语言的形式将相关路网信息进行数字化保存，以实现动态路径规划策略的计算。而在这一过程中，需要考虑两个方面的问题，即一是车辆行驶过程中到达目的地最优路径；二是车辆行驶过程中来源于交通管制的外部信息限制<sup>[37]</sup>。因此，本文应用路网道路节点相邻矩阵和相关表的数据存储结构，有效的描述了智能交通系统的路网模型，同时为了保证车辆动态路径规划的实时性效果，增加了道路交汇节点和路径的关联和路网交通管制限制的转向路况限制表。

### 2.3.1 图相邻矩阵数据存储

相邻矩阵数据存储结构是计算机描述图形语言中最基本的数据结构存储方法。相关的具体实现步骤如下：第一，在计算机编程环境下，创建一个具有 2 维的结构数组，设为： $D[i][j]$ ，结构中  $i=j=n$ ， $n$  为智能交通路网中的道路节点数。第二，以智能交通路网道路路口两个节点的相关路径的权值为例。假设道路口的两个节点有一条路径  $R$  直接相连接，路径  $r$  的开始道路节点为  $x$ ，末节点为  $y$ ，则二维数组中，以道路节点  $x$  为数组的行坐标，以末节点  $y$  作为数组的列坐标，即  $D[x][y]$  表述道路网路径  $R$  的长度值。第三，如果道路路径  $R$  为单向通行，这数据结构表示结束；如果道路路径  $R$  为双向通行，这要对数值进行赋值处理，即道路末节点赋值到数组行坐标下，始节点赋值到数组的列坐标下，可以得到  $D[y][x]$  为道路路径的长度。第四道路路口始末节点之间没有相关道路路径的连接，设两节点间的道路路径长度为无穷大，即  $D[x][y]$ ， $D[y][x]=\infty$ 。第五，道路节点与自身节点的距离为 0，所以  $D[m][m]=0$ ，其中  $m<n$ 。路段节点间距离的图相邻矩阵数据结构如图 2.6 所示。

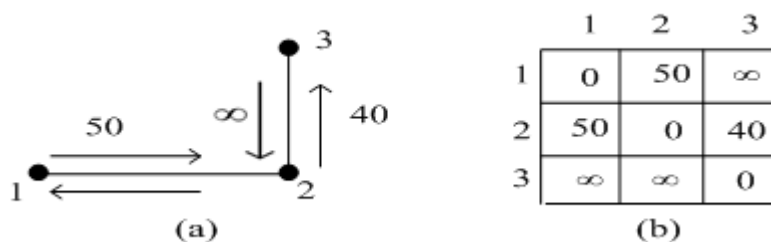


图 2.6 相邻矩阵数据存储图

图 2.6a 所示该智能交通路段包含三个道路节点 1、2、3，含有道路有效路径两

条。图中 1、2 两个节点为道路双向通行路径段，节点 2、3 为道路单向通行路径段，始末节点分别是 2、3。图 2.6b 为图 2.6a 的相邻矩阵数据存储结构设计和具体实现。

为满足相邻矩阵数据存储结构设计中可扩展性，即添加智能交通网络的其他相关元素的属性信息。可以通过计算机程序语言的结构体对二维数组的每一个元素进行赋值操作，结构体的成员变量是道路的路径相关属性信息。

该路网数据的存储方式相对简单，比较适合于简单的路径索引方法，例如 Dijkstra 算法。这种数据结构的存储方式，具有很明显的问题，即所能存储的路网信息量较少，含有道路路径的权值和连接路径相关节点的信息，对于智能交通动态路径的实时反馈信息，道路路况的监管限制，路况的其他环境附属信息，都无法进行有效的数据描述，不利于进行动态最优路径规划的有效复杂算法计算。另外一个问题就是计算机硬件存储资源的浪费，例如如果道路口相关节点之间没有有效路径，则其值即为无限大，这在动态路径规划计算的过程中属于无效信息。同时无穷大值在对动态路径规划的计算中无形中增加了计算机的计算量，也就是说，动态路径规划的实时性受到了影响。综上所述，在实际的计算机存储数据结构中很少采用上述数据结构。

为了解决上述的问题，也可以在计算机中，增加一个道路口节点数据即  $N[n]$ ,  $n$  为道路口的节点个数。设一维数组的相应元素的类型为结构体，用来存储道路口节点的相关信息属性。对每一个节点结构体中建立交通路况限制的转向连接表，因此这样即能兼顾数据结构简单，也可以满足节点实时信息的反应，从而满足动态路径规划算法的设计要求。

### 2.3.2 图相邻接表数据存储

图相邻接表的数据存储方法主要是能够解决相邻矩阵数据存储空间浪费的问题。相邻接表主要包括两类表：一是用于存储道路路况节点的信息，叫做节点表；二是可以存储道路路况中路径的信息，叫做路径表。在节点表中，为每一个路况节点设置一个单向的数据连接表，存储与该道路节点相联系的道路路径。引入道路路段的方向性，可以存储该以该节点起始的单向道路路径或与该节点相连接的双向道路路径；在道路路径连接表中，可以设置 16KB 的存储空间，以分别保存智能交通系统中路径的始末节点属性。依据上述信息的设计要求，我们可以根据节点，通过连接表查询该节点的道路路径属性；也可以根据路径，来查找该道路路径的始末节点。这样设计的数据存储结构，

有效的由节点扩展查询到路径，或者由路径查询到相关联的道路路口节点，避免搜索过程中查询道路电子地图原始数据的时间，提高了搜索的效率。

图 2.7 表示图相邻连接表的数据存储结构,图中,第一列为道路路口交汇的节点表,右边表示与该节点相关联的道路路径。该数据结构占有的计算机存储空间为  $O(n+e)$ ,  $n$  为智能交通网络中的节点个数, $e$  为与其相关联的路径数。很明显,与图相邻接数据存储表示方法相比,图相邻接表的数据存储空间相对减少,提升了计算机存储空间的利用率大大提高。

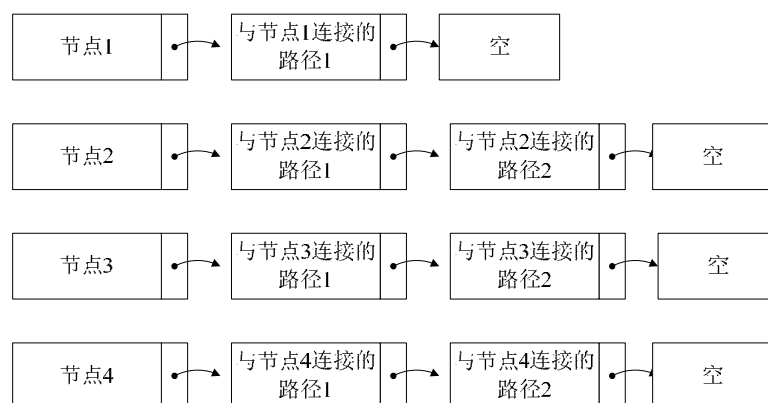


图 2.7 相邻接表数据存储

图相邻连接表数据结构的设计,也有一个问题,即如果想选择任意道路路口节点的路径是困难的,需要查询这一节点的所有相关路径,时间代价为  $T(e)$ 。针对道路节点的路径反复查询的最优动态路径规划算法  $A^*$  是一个较大的影响。针对这一问题,可以建立一个反方向的相邻接表。即存储与道路节点相关联的道路路径。相关的原理图与图 2.7 同理,区别在于存储查询进入该节点的道路路径。C 语言表示其具体的数据结构如下:

```
class CNode //定义节点类
{
    int idnum; // 道路路口节点符号
    double x,y; // 双数字行节点行列坐标
    char pass; // 定义符号型数据结构的交通管制记号
    COBArray *m_pass; // 交通管制转向表
    COBArray *linkroad; // 道路路口节点关联路径
}
class CRoad // 定义路径类
{
    int idnum; // 路径符号
    CString name; // 字符串型的路径名称
}
```



```

double    distance;    //路径长度
int start,dest;        // 路径的始末点符号
COBArray *shapepoint; //路径轨迹表形
char      direction;   //路径的单双向判断
int       width;       // 路径的宽度
int       num_vehicle; // 路径中行驶的车辆数
int       n_lane;      // 路径是几通道
float     m_speed;     //路径行驶车辆的平均速度
}
Class Network() //智能交通路网的层网定义
{
    Int Node_Num,Road_Num; //路网的节点数和路径数
    CNode  *nodes;         //道路的路径集合
    CRoad  *roads;         //道路的路径边集合
};

```

可以看出上述结构中没有对车辆行驶过程中，交通管制的外部信息反馈选择，而在现实的交通车辆行驶的过程中，交通转向是时刻存在的。为和设计的数据结构合理和规范化，在道路口节点类中含有一个标志为 pass(0 或 1)，用以判断在车辆行驶过程中的交通管制路口。交通转向的数据结构设计时，分为：一是某一道路口节点，关联的可通行路径较多，存储禁止路径；二是某一道路口节点，关联的不可通行的路径较多，存储通行路径；三是通行等同时，存储禁止路径。

但是这种结构没有存储转向限制信息，在实际的使用中，转向限制经常存在。通常为了节省存储空间，在结点结构里增加一个标志位 pass(0 或者 1)，用来标识转向表里的路段是可通行的还是不可通行的。如果一个结点关联的路段中，可通行的路段数量多，则存储不可通行的路段；如果一个结点不可通行的路段多，则存储可通行的路段；一样多时，存储禁止通行路段。交通转向表存储的是禁止路径通行道路。定义交通转向结构体 pass 为：

```

struct pass
{
    int RoadIn;    //始端路径
    int RoadOut;   //末端路径
};

```

同时在交通道路节点中引入：pass \*pass\_table，功能是存储任意节点的交通转向表信息。

智能交通管理的相关科学家，以计算机图形学的邻接表基础上，进行必要的改进，以适应不同类型的交通路径规划算法。在定义的道路口节点和路径结构类中，可以方便的进行新属性添加，以适应交通道路过程中的新情况。需要注意的是，以动态路径

规划时间最短为目标函数，则交通道路的权值应该为相关节点路径的通行时间。可以根据用户的实时需要进行改动。

依据类语言的特性，当需要修改智能交通网中的电子地图时，增加一条线路时，只需要做一个道路口节点和节点间路径的类实例，并判断是否有交通管制限制，有没有加入交通管制信息，对电子地图中其他路径是否产生影响。删除一条道路口节点和路径时，查询与此路径相关的路段或节点，设置其属性信息即可，便于在线修改智能交通网络的电子地图数据。

## 2.4 交通道路层的数据存储

智能交通的数字电子地图的数据存储，一般是以道路的某些特性进行分层数据存储。例如按照地图的道路等级将数字地图区分为详细图层和略图层。本文主要研究的内容是智能交通系统中，动态最优路径的规划策略，因此主要针对的是交通的道路图层，在道路图层中，道路的等级与数据的存储量成明显的反比状态。

分层地图的道路数据信息保存与单个图层的存储是一致的。本文以 2 个图层为例，描述进行交通道路层数据存储过程，按照道路等级区分为详细图层和略图层。由于两层之间的数据结构的一致性，为区别详细图层的道路口节点和路径，设略图层道路口节点为略层节点，路径为略层路径。

在建立完详细图层和略图层的数据结构存储后，还有在详细图层和略图层两层之间建立必要的数据节点和路径的相互数据联系。主要的步骤为：详细层 CDetailNode 节点和略图层 CSumNode 节点类，从基础道路口节点类 CNode 中继承相关属性。详细层 CDetailNode 节点，设值一个类型变量 commonnode，表示详细层对应的略图层的道路节点符号，如果没有略层道路节点，值为 0。在略图层 CSumNode 节点类，加入动态数组 detailnodes 建立与详细图层类相关的详细道路节点。同理，建立道路路径的详细层和略图层路径关联，相关程序代码如下：

```
class CDetailNode:public CNode
{
    int commonnode;
};

class CSumNode:public CNode
{
    CObArray *detailnodes
```

```
};

class CDetailRoad:public CRoad
{
    int commonroad;
};
class CSumRoad:public CRoad
{
    CObArray *detailroads;
};
```

举例说明如图 2.8 所示，并建立详细图层和略图层之间的数据相互关系表 2.3 所示

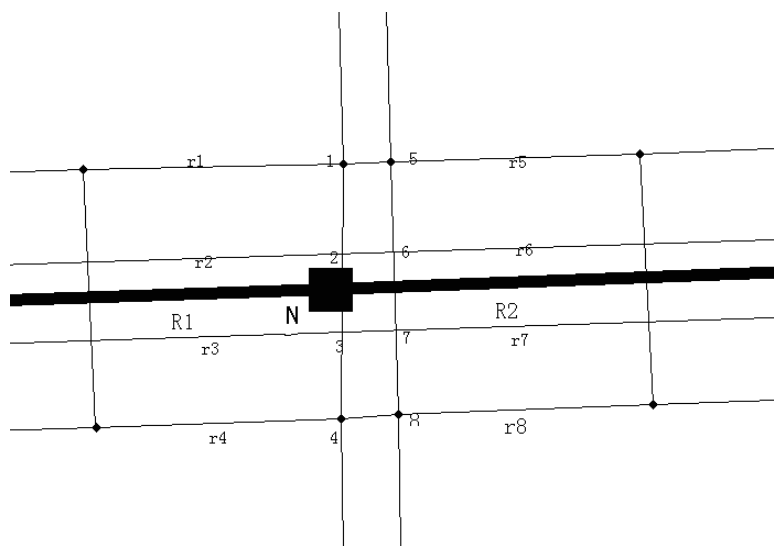


图 2.8 略图层节点、路径与详图图层节点、路径相互关系

表 2.3 略图层节点、路径与详图图层节点、路径相互关系

| 略图层节点 ID | 详细结点 ID | 略图层路径 ID | 详细路经 ID |
|----------|---------|----------|---------|
| N        | 1       | R1       | r1      |
|          | 2       |          | r2      |
|          | 3       |          | r3      |
|          | 4       |          | r4      |
|          | 5       | R2       | r5      |
|          | 6       |          | r6      |
|          | 7       |          | r7      |
|          | 8       |          | r8      |

2.5 本章小结

本章首先介绍了智能交通的基本组织框架，明确智能交通路网模型及其数据存储结构，对车辆在智能交通的最优路径轨迹规划的重要影响。依据计算机图形学语言，建立了基本的路网模型方程。分析后发现基本方程在计算机存储空间的利用问题和实际交通路网信息存在一定的不足，分析了道路路网中的交叉口信息、道路的种类和等

级，建立了基于交通管制限制的转向限制路网模型，添加了转向限制列表。针对存储路网数据的问题，分别设计了基于图相邻矩阵数据存储结构和图相邻连接表数据存储结构，并通过编程语言实现了道路路口节点类、道路路径节点类及转向限制表类的功能点定义。最后对智能交通的路网模型采用，分层存储的方法，建立了详细图层和略图层之间节点和路径的相关联系。该章节的研究为后续的 GIS 仿真平台的建立，车辆静、动态最优路径规划策略研究，提供基本的理论分析基础和数据结构，为路径规划实验研究做提供必要的技术支持。

## 第3章 车辆静态最优路径规划策略设计

### 3.1 引言

本文的第2章节主要研究了智能交通网络模型及数据结构,本章应用上章所述的数据结构实现的空间智能拓扑结构路网的基础上进行车辆的静态最优路径规划策略的研究。

介绍基于计算机处理的地图图形学信息 (GIS), 组件开发了智能交通车辆最优路径规划策略研究的仿真平台。简述该仿真平台的开发工具的选和仿真平台的整体软件设计框架, 并对该路径规划仿真平台的主要功能进行介绍。

在车辆最优路径规划策略的研究过程中, 智能交通路网的电子地图数据只需要一次下载到车辆导航系统或智能交通的中心控制端, 而最优的路径轨迹规划是一种迭代递进的寻优过程, 因此不同的地图数据存储结构势必影响车辆的最优路径轨迹规划效率, 通常认为数字地图的数据越有效处理, 车辆道路的路径规划中对相关数据的查询越快, 最优道路路径规划效率就越高。因此有必要研究智能交通路网的电子地图数据结构的存储和经典路路径轨迹规划之前的相关关系, 找到可靠性、快速性、鲁棒性最优的组合。

车辆的静态最优路径规划策略, 是利用存储于车载系统的固有静态地图数据, 查询始末道路路口节点的最优道路路径算法。静态最优路径规划策略的研究不仅是自主式车载导航信息系统的主要道路路径搜索方法; 也是智能交通系统中, 基于实时动态路况信息的中心式车辆导航系统的动态路径规划基础。常用的经典路径规划策略有 A\* 算法、Dijkstra 算法、无目的搜索、贝尔曼-福特 (Bellman-Ford) 算法等。查阅相关文献发现, 智能交通工程的相关科学家主要围绕一种算法在同一种数据结构上进行相应的比较理论和实验, 有悖于统计学和逻辑学概念。由于智能交通中数字地图的存储数据结构与路径规划执行效率的相互关系, 直接关系到智能交通中车行者车辆导航系统的实时性和可靠性。

本章在优路径规划策略研究的仿真平台的基础上, 从理论和实际实验两个方面, 研究了不同算法的执行效率, 应用了道路路口对向查询和依据交通道路层的分层结构进行交通网层查询, 并对两种算法的执行效率进行分析和研究, 并对各种经典算法相

对于不同的存储路网数据结构进行分类对比性研究，得出车辆静态最优路径规划策略的选择方法。

## 3.2 车辆路径规划仿真平台

### 3.2.1 地理信息系统

计算机技术的不断发展，尤其是中央核心处理器的处理效率的提高，在人类的生产生活过程中，存在很多的信息类型，尤其对自身环境和位置的空间相关信息重视程度，因此计算机处理技术和地理信息系统（GIS）的有机结合一直是计算机和交通工程科学家研究的热点问题。

目前，全世界拥有一个庞大的科技科研队伍及相关产业链对地理信息系统（GIS）进行开发和设计。并且取得了大量的实例化地理信息系统。普通市场上能见到的GIS软件，已达500多种，例如美国环境系统研究所开发和设计的ArcView，中国地质大学开发研究的MapGIS。另一方面计算机网络技术的发展（基于云平台）的应用，使基于因特网与GIS技术结合成为可能，例如中国国家遥感应用工程技术公司开发的GeoBeans<sup>[16]</sup>。

### 3.2.2 仿真平台软件框架

地理信息系统（GIS）软件的开发产品很多，由于GIS软件的设计和开发具有很强的专业技术特点，因此该软件的可扩展性和功能的全面性不能实现。因此对于车辆最优路径规划仿真平台和开发设计上，把GIS系统开发分为两层：一是通用信息层，低层开发的统一性，其设计的思想符合ISO国际软件开发标准；二是在通用信息平台的基础上，二次扩展开发功能，进行商业化地理信息系统。

地理信息系统（GIS）软件，开发的通用信息层组件，有MapX和MapObject。而MapX开发组件，为计算机软件开发人员，提供一个易于理解、功能强大的开发地图组件。在进行车辆路径规划仿真平台的上位机VC++、VB、C++软件开发界面，可以直接将MapX控件直接引入计算机编程软件，并结合相关的程序代码，进行MapX控件的属性设置、功能调用、地理空间信息的分析、电子地图的制作等。

面向对象的程序设计过程是，目前计算机软件开发的主要方式，考虑软件编写的工程实际、模块化、可扩展性等原因，基于智能交通路网模型数据结构的类、继承、



多态性和参数化类型,应用Visual C++ 6.0作为车辆路径规划策略仿真平台的开发工具。系统的软件框架如图3.1所示,系统软件开发框架的数据流,主要是围绕一是地理信息系统的MapX空间进行智能交通路网数字电子地图的显示,并对相关的道路路口节点和路径进行空间上的查询;二是通过ADO控件进行电子地图的基本元数据查询,这些基本元数据描述了电子分类信息,并对电子地图的属性数据库进行信息的细分查询。

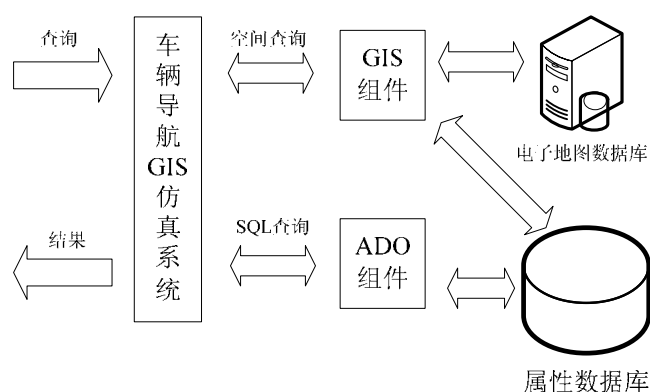


图3.1 车辆路径规划仿真平台软件框架

### 3.2.3 简述平台基本功能

该车辆路径规划仿真平台的主要功能就是对车辆的最优路径规划车辆进行仿真实验研究成为可能。主要分为六大功能子系统,如图3.2所示,其中车辆路径轨迹算法的程序仿真实现的子系统,主要在地图控制分层区、空间路径规划查询及智能交通路网的地图显示。系统仿真平台界面如图3.3所示。

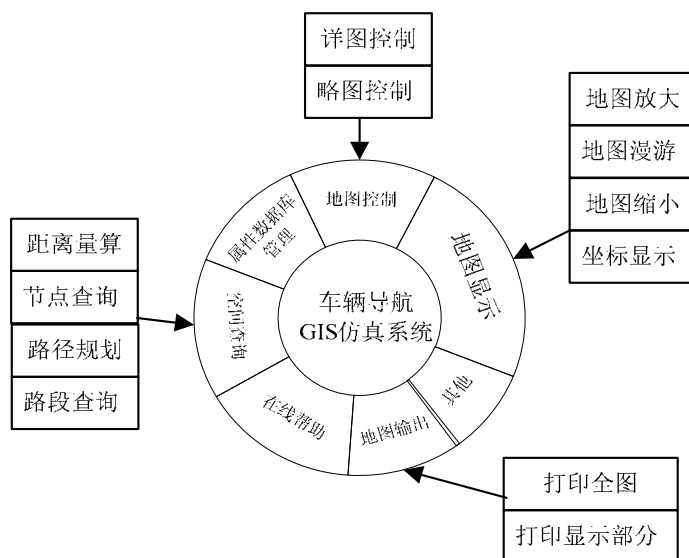


图 3.2 车辆路径规划仿真平台功能框图

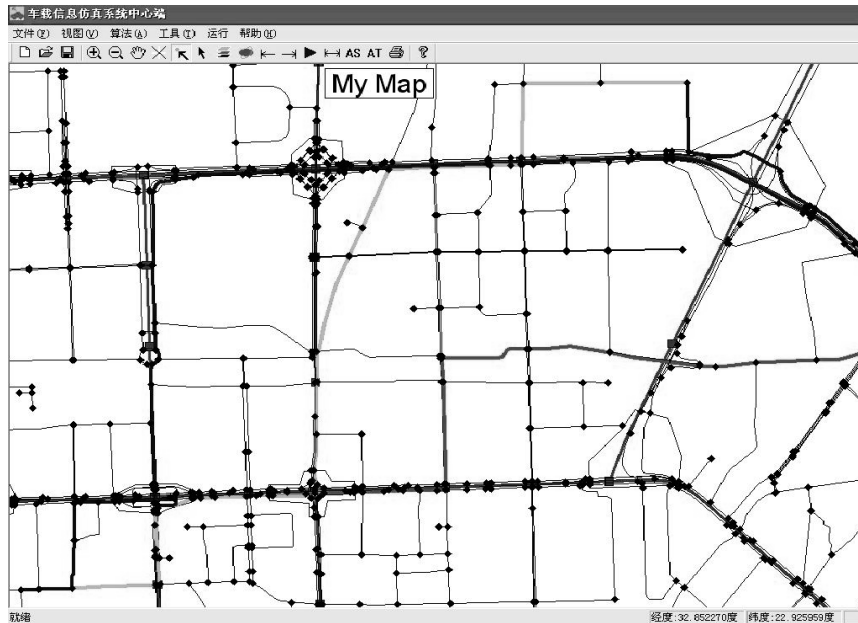


图3.3 车辆路径规划仿真平台程序显示界面

### 3.3 建立静态路径规划数学模型

依据智能交通原始电子地图，创建交通路网的空间拓扑结构相图  $G$ ，以此为基础建立静态路径规划数学模型，模型具体描述如下：

#### 1、定义智能交通路网的权值变量 $Q(G)$

实际智能交通中的两道路口节点，相关的任意道路路径都含有一个权值，依据电路的常用定义规则，称为道路阻抗，描述了车辆行驶过程中通过该道路路径所要消耗的能量变量值，该值可以定义：道路路径的空间距离、通过该道路路径所需时间、车辆行驶路程缴费，依据用户所关心的目标函数可以采用不同的权值测量方法。

最优路径规划的目标函数为：车辆行驶过程中的始末道路最短路径  $DistanceMin$ 。设  $Q(G) = f\{D(R)\}$ ，式中  $D(R)$  为车辆行驶过程中的路径值， $f\{D(R)\} = D(R)$ 。

最优路径规划的目标函数为：车辆行驶过程中的始末道路最短时间  $DistanceMin$ 。设  $Q(G) = f\{D(R), W(R)\}$ ，式中  $W(R)$  为道路路径的宽度和等级， $f\{D(R), W(R)\} = c \times D(R) \div W(R)$ ， $c$  为系数。假设车辆的平均速度与道路路径的宽度和等级成正比。

此外，据用户所关心的目标函数可以采用不同的权值测量方法，最优路径规划的目标函数为车辆行驶路程缴费最小的情况时，需要考虑车辆行驶过程中的道路的收费和油耗，并忽略车辆其他损耗。

## 2. 最优路径规划的目标函数 T

依据用户所关心的目标函数 T，可以采用不同的定义方法。通常在最优路径规划策略考虑，始末道路节点的路径最短、及车辆耗时最小等。

车辆在智能交通网络的行驶过程中，始末道路节点之间的道路路径，分为 m 条路径，车辆通过每条路径的时间为  $t_i$ 。最优路径规划的目标函数 T 定义为：

标函数 T 为最小路径：

$$T = \min\{\sum_{i=1}^m D(R_i)\} \dots\dots\dots (3.1)$$

标函数 T 为最小路径：

$$T = \min\{\sum_{i=1}^m t_i\} \dots\dots\dots (3.2)$$

因为：

$$t_i = f\{D(R_i), W(R_i)\} = c \times D(R_i) \div W(R_i) \dots\dots\dots (3.3)$$

则：

$$T = c \times \min\{\sum_{i=1}^m \frac{D(R_i)}{W(R_i)}\} \dots\dots\dots (3.4)$$

## 3.4 静态路径规划算法设计

智能交通工程科学家，为了提升车辆静态最优路径规划的时效性，提高道路交通网的使用效率，对静态路径规划算法进行了相应理论和实际改进。通常采用道路节点对向查询和交通道路网分层查询法，前者是依据计算机图形语言结构的最小道路路径查询方法，后者是依据对智能交通的道路层进行详略层划分后的一种快速查询方法。

### 3.4.1 道路节点对向查询

道路节点对向查询法是在车辆静态最优路径规划的过程中，即从出行者在设定好始末道路出口点后，一方面从始点开始向末点查询，另一方面是从末点开始向始点查询，并且查询的过程是两个方向上的交替进行，即数学中的二分法查询，程序直到两个方向的查询状态的结果值与当前设定的搜索点交汇结束查询过程。

该算法的关键技术在于查询时间上的如何确定。程序上规定当正向查询的当前点出

现在反向查询道路口节点列表时，或反向搜索的当前点出现在正向查询道路口节点列表时，查询程序结束。该算法在车辆静态最优路径规划过程中，提高了查询程序的查询效率，即节省了时间。程序上由于没有查询完全部的道路路径和道路口节点，有可能产生所规划的道路路径未必是最优结果。为了解决这一问题，当一个方向的当前状态查询已经出现在另一个状态查询列表中时，可以仍继续查询几步，如果查询的结果没有出现更加优化的路径，选择当前的路径；如果出现更加优化的路径，替换已查询的当前路径。

正向查询和反向查询过程中，如果每执行一步即跳转到另一个查询状态，计算机处理系统就需要不断的存储当前查询结果，和读取另一个查询状态，对计算机处理来说是一种无形的时间浪费，代码的执行效率下降。解决的方向就是在前向查询或后向查询，每一状态查询几步后，在切换另一个查询状态，可以降低两种查询的切换次数，有效避免处理器读存的时间，提高车辆静态最优路径的规划效率。

### 3.4.2 交通道路网分层查询

在第 2.4 节中，已经对智能交通网络进行了道路网的分层，在交通道路网分层查询过程中，需要满足对存储交通电子地图数据格式的特别设计要求。在数字电子地图的制作公司，对于交通的道路网，依据道路的不同功能等级不同，进行道路网的多层次划分。道路层的等级越高，交通道路的功能等级就越高，道路的路径就越少；而作为所有道路层的底层，空间交通网络图越详细，即包括城市轨道交通的所有道路路径。同时，有些交通网络电子地图制作公司，将相近的两条道路路径（距离和方向一致），组合成一条称作虚拟道路路径，设置为最高图层，也就是说，越高的图层，道路路径的抽象概念也就越明确。

智能交通网的电子地图最高层，基于道路的路径和道路口节点较少，车辆行驶的路径交通周围环境好，行驶者会选择这样的道路路径作为车辆行驶的轨迹。在车辆静态路径规划中，优先选择地图的相对高层，这样规划的道路路径符合车辆行驶者对车辆行驶路径最短或时间最小等最优目标值。

假设智能交通网数字地图设计制作公司，没有将数字电子地图进行道路层的划分，同时想使用交通道路网分层查询方法，应该满足以下两条原则：

（1）对车辆进行路径规划中，依据道路的功能等级进行划分网式的搜索，即查询

道路口等级高的道路路径，不考虑道路路口等级较小的路径；

(2) 在车辆路径规划中，对使用的交通智能数字电子地图，进行电子地图的预处理，在道路路网的路径详细层，抽出较高等级的道路路径。

在路径的规划过程中，一般情况下，可选择两层交通路网即可。本文在交通路网的划分过程中，采用了两层区别：详细图层和略图层，详细图层中包含了道路等级较低的路径，含有的道路路口等级较低的始末节点。

考虑到如果车辆驾驶者，在道路路口路径节点设置的过程中，始末节点道路路口节点的道路等级较低时，该详细地图存在于详图层。在路径规划过程中，首先在详图层查询到用车辆行驶者的始点及在略图层中邻近的略图层综合节点之间的最优路径，同时查询到详图层中的终点与其邻近的略图层的综合节点之间的最优路径。如果车辆行驶者始末节点的道路路口等级较高，可以直接在略图层进行最优的路径规划。

在详图层上从车辆行驶者的起始道路路口节点查找到邻近的略图层综合节点，可以选择迭代式的 A\* 算法，估计评价函数为  $H$ ，并取当前车辆行驶的路径点到末点之间道路路径的欧式距离。该车辆行驶状态下，不适合采用经典的路径规划算法-Dijkstra 算法，如图 3.4 所示进行分析说明。

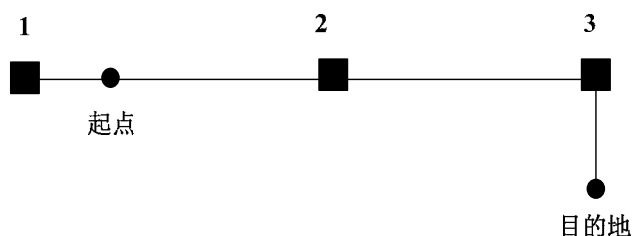


图 3.4 详图层到略图层节点查询图

图 3.4 中的圆形实心圆点，表示车辆路径规划的在详图层的实际始末点。正方形实心点为在详、略图层中均有效的综合节点。假设应用 Dijkstra 算法，由于该算法不具备迭代性、方向性，有可能查询到距离车辆行驶的起末点最近的道路路口节点，即从车辆起始点扩大到道路路口节点 1，末节扩大到道路路口节点 3，然后在略图层中以节点 1 和节点 3 为目的道路路径，成为最优路径。可以发现起点与节点 1 中含有重复的路径，因此即不是最优的。

应用 A\* 算法，迭代函数中的估计部分取车辆行驶路径的始末节点路径的欧式距离，则算法执行上，第一始点扩展到综合节点 2，末点扩展到综合节点 3；第二在略图层中

上取出道路口节点 2、3 的最优路径；第三连接道路口节点 2、3 的起点和末点。该车辆行驶的道路路径即是车辆行驶的最优路径，避免路径的叠加。

### 3.5 静态路径规划实验研究

车辆的静态最优路径轨迹规划，以复杂情况较大的北京市东城区的三环和四环之间的道路网数据为路径规划源。东西距离 10KM，南北距离 4KM。技术平台支持：Inter Pentium 4 1.8GHz,512M 内存，Microsoft Windows server 2003 操作系统。本文的所有实验均基于车辆路径规划仿真平台，如图 3.3 所示，可以通过放大、缩小查看整个地区的道路网情况，采用道路网道路功能的两层分类：略图层和详图层，细线为略图层网络结构，粗线为详图层网络结构。交通网略图层包含道路的路径段 178 条，道路口节点数 53 个，交通管制的转向限制为 8 条；详图层包括道路路径段 2031 条，道路口节点 1419 个，交通管制的转向限制为 2307 条。

应用图相邻矩阵数据存储上述北京市交通路网的电子地图信息，读入矩阵，经测量消耗时间为：9.937s；应用图相邻接表数据结构存储上述北京市交通网的电子地图信息时，经测量消耗时间为 12.031s。产生上述时间差的主要原因是，图相邻接数据结构，需要对电子地图信息进行其他处理，例如查询某一道路节点的邻接路径。

#### 3.5.1 单、双向 Dijkstra 算法

依据智能交通网电子地图以图相邻矩阵数据结构存储电子地图信息，针对任意道路路径的始末道路口节点，分别应用单向 Dijkstra 算法和双向 Dijkstra 算法，设道路的权值  $Q(G)$  为两节点道路的路径长度，最优函数目标取最短路径，评价方式为分别采用两种路径规划算法后，车辆行驶过程中所产生的最优时间消耗和规划路径长度。

Dijkstra 算法的基本思想是，首先查询到与车辆行驶过程所设置的始点直接相连的道路口节点，存储这些道路口节点与始点之间的道路路径距离；判断出最小路径并对该最小路径节点进行扩展，即与该节点直接相连路段；更新新的节点与车辆始点之间的路径，判断最短的节点扩展。算法循环计算，直至查找到目的地节点为止。

Dijkstra 算法的数学描述，设置任意道路口节点为  $(d_i, p_i)$ ，式中  $d_i$  为车辆行驶者设置的车辆行驶始点 S 与节点  $i$  的最小道路路径长度。 $p_i$  为最短路径的  $i$  的上一个节点。

设当前节点为  $C$  , 扩展节点的集合为  $K$  ,  $l(i, j)$  为连接道路口节点  $i$ 、 $j$  的有效道路路径距离。Dijkstra 算法的路径规划程序执行步骤如下 :

(1) 程序初始化 , 设置车辆始点  $S$  的  $d_s=0$  ,  $p_s$  为空 , 存储车辆始点为当前节点  $C$  , 其他节点为  $d=\infty$  ,  $p$  为空 ;

(2) 计算当前节点的扩展集合  $K$  , 计算  $K$  中任意一个节点的  $d_k$  ,  $d_k = \min\{d_k, d_c + l(C, k)\}$  , 设  $d_k$  值没有改变 ,  $p_k$  不替换 ;  $d_k$  值改变 ,  $p_k=C$  , 判断扩展集合  $K$  中的最小  $d_k$  点 , 定义为当前节点  $C$  ;

(3) 程序上判断 : 扩展集合  $K$  中包含车辆行驶者设定的目的地节点 , 车辆路径规划结束 ; 否继续执行程序 (2)。

经典的车辆路径规划 Dijkstra 算法是查询和计算所有点的最短有效路径。在实际的算法应用过程中 , 行驶者主要关心的是始末点最短路径 , 查询和计算出即可 , 这样的路径规划策略可以减少搜索的时间。

单方向的 Dijkstra 算法就是按照上述程序步骤实现的。双向 Dijkstra 算法 , 是在单向算法的基础上 , 引入目的地节点和开始节点的双向查询。其程序 (1) 相同 ; 程序 (2) 中增加目的地向始点的扩展当前节点 , 和扩展节点集合 , 并做同样的最小路径处理。程序 (3) 当双向查询的当前节点为同一节点 , 查询和计算出最优路径 , 程序结束。

在路径规划仿真平台中 , 任意选择车辆行驶路径的始末点 , 实验结果统计如表 3.1 所示。

表 3.1 单、双向 Dijkstra 算法比较

| 任务序号 | 单向 Dijkstra 算法 |         | 双向 Dijkstra 算法 |         |
|------|----------------|---------|----------------|---------|
|      | 时间 (ms)        | 路径长度(m) | 时间(ms)         | 路径长度(m) |
| 1    | 16             | 2657    | 16             | 2664    |
| 2    | 47             | 4723    | 94             | 4862    |
| 3    | 47             | 5349    | 125            | 5349    |
| 4    | 47             | 5403    | 110            | 5403    |
| 5    | 78             | 12081   | 265            | 12083   |
| 6    | 78             | 10760   | 250            | 10760   |
| 7    | 62             | 9949    | 250            | 9949    |
| 8    | 78             | 9168    | 250            | 9172    |
| 9    | 32             | 3668    | 47             | 3668    |
| 10   | 15             | 1014    | 15             | 1054    |
| 11   | 16             | 868     | 0              | 868     |
| 12   | 78             | 8717    | 219            | 8717    |
| 13   | 78             | 10098   | 250            | 10104   |

注意 : 列表中的时间 0 , 表示查询时间小于计算机准确定时 1ms。

对表 3.1 的 13 次电子地图规划，分析处理数据后，得出下列结论：

(1) 车辆行驶者设定的始末道路路径长度  $L < 3000\text{m}$  时，双向 Dijkstra 算法比单向 Dijkstra 算法，对车辆路径规划的效率低；始末道路路径长度  $L > 3000$  时，双向 Dijkstra 算法比单向 Dijkstra 算法对车辆路径规划的效率低；

(2) 单向 Dijkstra 算法在车辆静态最优路径规划策略的执行效率上优于双向 Dijkstra 算法；

(3) 智能交通中，最优路径规划时间是与道路路径实际长度大小有关。

(4) 列表中序号 5、6、8 比较后，发现车辆始末点路径长话费的时间比距离短路径时间少，主要原因在于路径的规划还和智能交通网中的道路结构、等级、路况有关。

理论分析上述两种算法出现的实验结果及原因：

理论上分析，可知双向 Dijkstra 算法查询的电子地图搜索范围小于单向 Dijkstra 算法，搜索效率较高；但是实验的路径长度变化时，出现相反结果。单向查询时，每扩展到下一个道路节点的路径，需要判断扩展节点中是否含有目的地节点即可，双向查询时还需要包括判断某一方向查询节点是否出现在对向查询扩展节点集内，这就增加了路径规划的计算时间；因此双向 Dijkstra 算法查询比单向查询的执行效率低；另一方面智能交通网中使用电子地图的形状问题。前面的单、双向 Dijkstra 算法查询忽略电子地图的形状问题，即假设电子地图无限大的情况。当车辆的始末节点的路径距离较短时，可不考虑图形形状的影响；当距离路径较大时，图形形状的影响明显。查询路径与电子地图图形的关系分析，如图 3.5 所示。

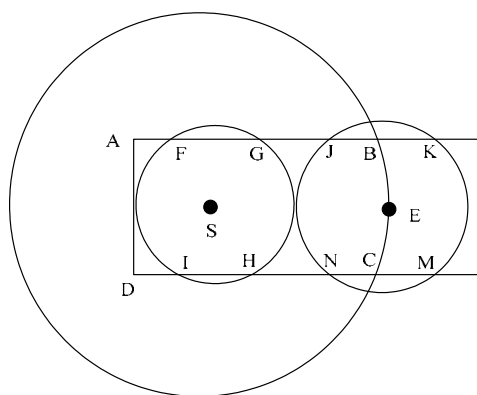


图 3.5 查询路径与电子地图图形学关系

车辆行驶者规划的始点为：S；末点为：E。理论上单方向的 Dijkstra 算法查询的



范围是一个大圆面积，双向的 Dijkstra 算法查询范围是两个小圆的面积，比较分析可以可知，双向的查询效率大于单向查询。实际情况下，由于交通网的电子地图大小和形状定义的关系，单向查询的搜索路径基本上为 ABCD，双向查询路径为 FGHI+JKMN，因此单向查询反而高于双向。本文使用的是电子地图的构成形状为矩形。

道路口节点的对向 Dijkstra 算法，查询的道路路径有可可能出现非最优的情况，即因为两个方向的查询，当前节点相遇即算法停止查询路径，而此刻，当前查询的另一个方向可能还有其他最短路径没有查询和计算到，此时停止查询可以节约道路路径的查询时间。需要保证路径规划的最优性，需要继续查询几步，直到确保查询到所有当前节点的扩展节点集，程序结束。

### 3.5.2 A\*算法与 Dijkstra 算法比较

依据智能交通网电子地图以带转向表的图相邻接表数据结构存储电子地图信息，在静态最优路径规划，对同一工况始末道路口节点一致的情况下，采用 A\*算法与 Dijkstra 算法，求出静态路径规划的所需要的时间及道路规划的路径长度。以道路路径的有效长度为权值。

Dijkstra 算法的路径查询程序步骤如 3.5.1 节所示，A\*算法是一种路径规划过程中比较经典的预测方式的搜索算法。采用智能交通网的全局信息变量，通过选择合理的预测估计评价函数，预设置优先查询的到路径方向，以减少搜索的道路口节点及路径的路段个数，实现查询的最优效率。

本文以道路口节点之间的欧式距离及道路等级为 A\*算法预测启发式的评价指标，定义如下所示：

$$\begin{cases} f(x) = g(x) + h'(x) \\ g(x) = \sum_{i=1}^k l(i) \times d(i-1, i) \dots\dots\dots (3.5) \\ h'(x) = d(x, t) \end{cases}$$

其中， $g(x)$  是始点到当前节点之间实际所产生的通过道路路径的费用，即是始末两节点之间的，每段路径的道路等级乘以道路的路径长度  $d(i-1, i)$  相加的代数和， $h'(x)$  是当前节点到目的地节点的最小代价值，本文取当前节点到目的地节点的欧式距离  $d(x, t)$ ， $l(i)$  为表 2.1 智能交通道路分类序号值；选择道路等级作为算法价值的评价指标，主要是考虑智能交通网中的高等级路，道路的路况及安全系数较高，虽然不是车

辆行驶过程中的最短路径，但是可以给行车者带来精神放松，提升交通安全指标。A\*算法主程序框图如图 3.6a 所示。

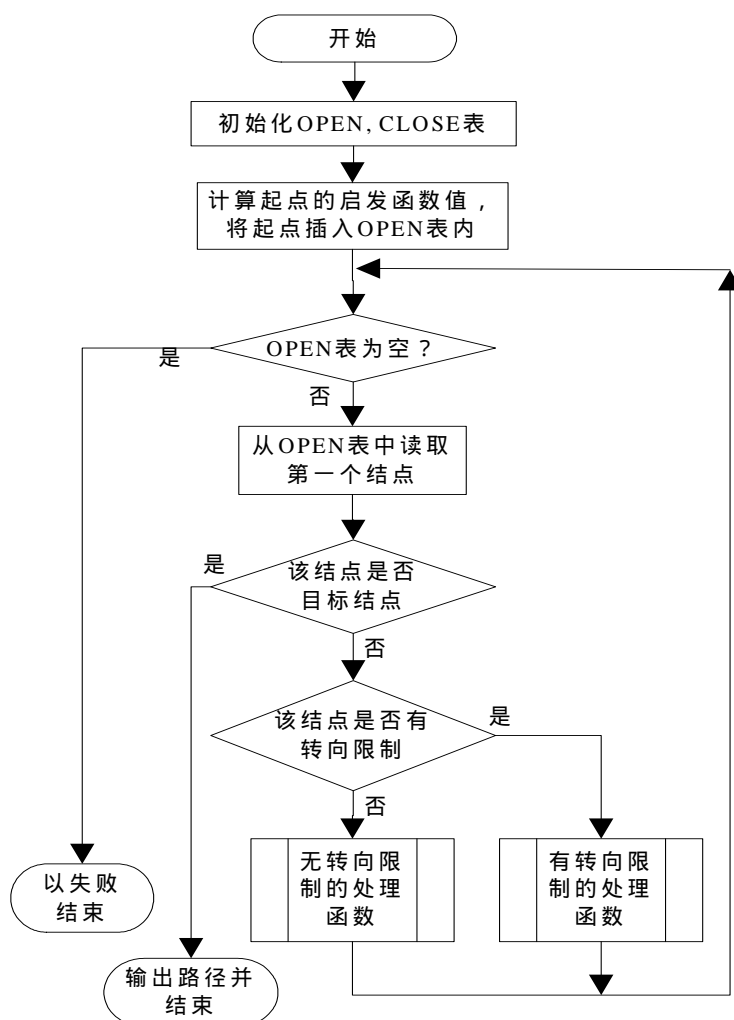


图 3.6a A\*算法程序主框架图

A\*算法主程序的设置步骤如下：

- (1) 创建 OPEN, CLOSED 表，将车辆道路起始点 S 放入 OPEN 表里；
- (2) OPEN 表为空，算法初始化失败，结束；
- (3) 取 OPEN 表中第一个节点，作为路径规划的第一个当前节点 C，存入 CLOSED 表；
- (4) 判断当前节点 C 是不是目标节点，如果是通过当前节点 C 的程序代码指针，一直查询到起始点，查询最优路径，程序结束；
- (5) 程序判断是否有转向处理；
- (6) 有无交通管制的转向列表处理子程序原理，程序框图如图 3.6b，3.6c 所示：

增加当前节点  $C$ ，填充为节点后的集合  $K$ ，查询全部的集合  $K$  中的节点。如果节点不在 OPEN, CLOSED 表，添加到 OPEN 表，其父类指针为  $C$ ，如果在 OPEN, CLOSED 表中，比较道路路径规划的当前节点与 OPEN, CLOSED 表中的代价值如果当前节点的代价  $g(k)$  小，就更新表中的代价以及父结点；

(6) 依据估价函数值  $f(x)$  从小到大的顺序，对 OPEN 表进行排序。

(7) 执行回调程序 (2)。

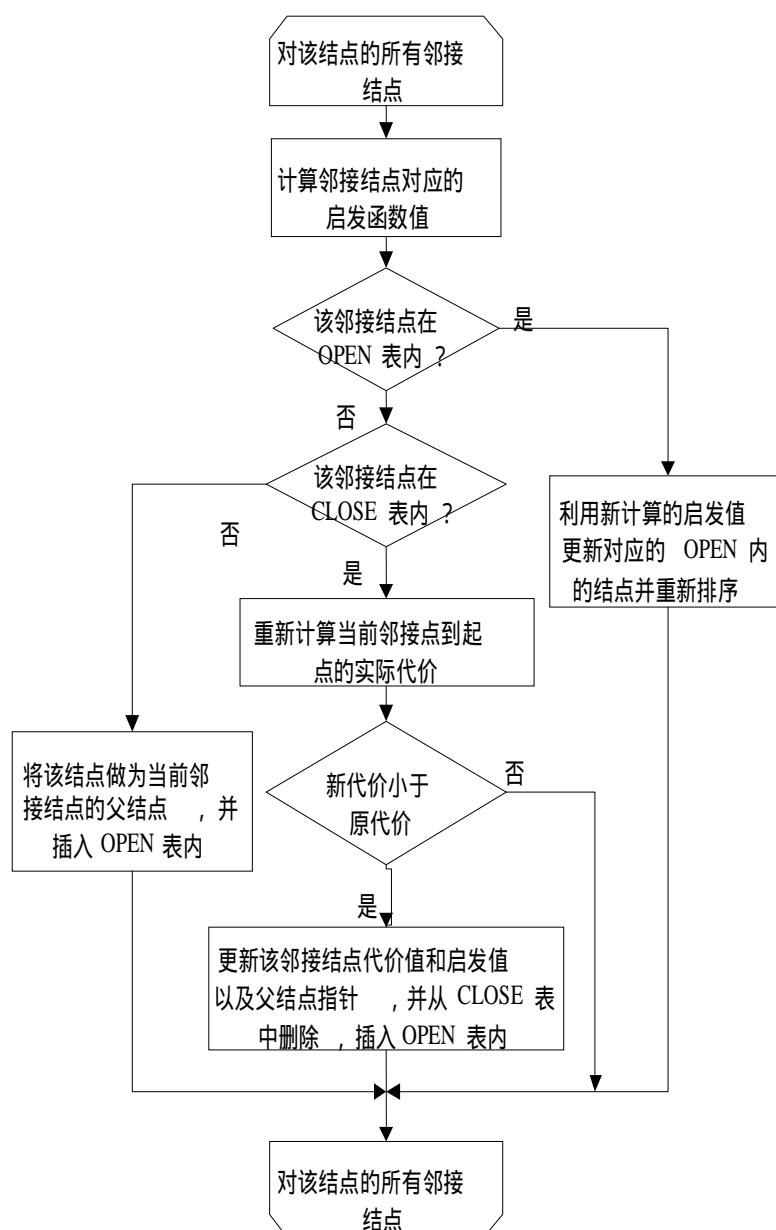


图 3.6b 无交通管制节点程序框架

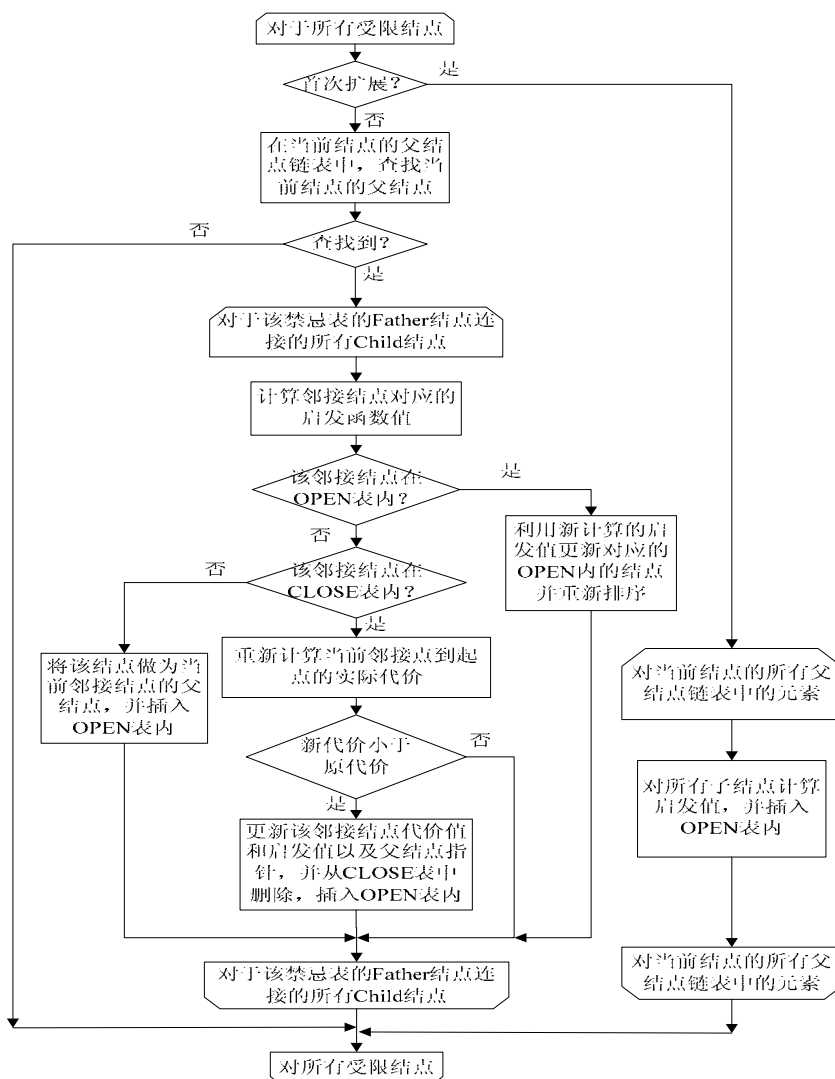


图 3.6c 交通管制节点程序框架

在路径规划仿真平台中，任意选择车辆行驶路径的始末点，A\* 算法与 Dijkstra 算法实验结果统计如表 3.2 所示。

表 3.2 A\* 算法与 Dijkstra 算法比较

| 序号 | 单向 Dijkstra 算法 |         | A* 算法  |         |
|----|----------------|---------|--------|---------|
|    | 时间(ms)         | 路径长度(m) | 时间(ms) | 路径长度(m) |
| 1  | 16             | 3225    | 0      | 3225    |
| 2  | 16             | 5901    | 0      | 5901    |
| 3  | 32             | 7804    | 0      | 7804    |
| 4  | 31             | 9683    | 16     | 9683    |
| 5  | 16             | 9869    | 16     | 9869    |
| 6  | 31             | 11109   | 15     | 11109   |
| 7  | 31             | 11734   | 0      | 11734   |
| 8  | 31             | 11147   | 16     | 11147   |
| 9  | 32             | 11444   | 0      | 11444   |
| 10 | 31             | 10631   | 0      | 10631   |
| 11 | 16             | 10790   | 0      | 10790   |
| 12 | 32             | 8963    | 0      | 8963    |
| 13 | 15             | 5107    | 0      | 5107    |
| 14 | 31             | 7726    | 0      | 7726    |
| 15 | 31             | 10188   | 16     | 10188   |
| 16 | 32             | 9695    | 16     | 9695    |
| 17 | 15             | 4852    | 0      | 4852    |
| 18 | 16             | 4292    | 0      | 4292    |
| 19 | 31             | 7457    | 0      | 7457    |

注意：列表中的时间 0，表示查询时间小于计算机准确定时 1ms。

对表 3.2 的 19 次电子地图规划，分析处理数据后，得出下列结论：

- （1）A\* 算法与 Dijkstra 算法，都可以在较短时间内，进行静态最优路径的规划；
- （2）A\* 算法路径规划算法优于 Dijkstra 算法。

A\*算法路径规划算法和 Dijkstra 算法的路径规划，由于 A\*算法路径规划算法加入了预测式的评价函数，即是一种有目的地的查询最优路径的方式，而 Dijkstra 算法是无目的地式的，发散性查询方式， A\*算法算法节省了智能交通网路径的查询距离。A\*算法与 Dijkstra 算法的路径比较示意图，如图 3.7 所示。

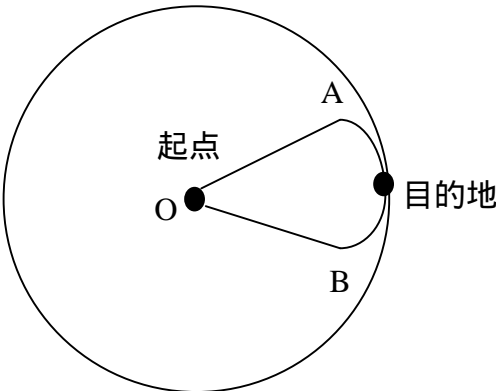


图 3.7 A\*算法与 Dijkstra 算法的路径比较

3.5.3 A\*算法与 A\*分层算法比较

依据智能交通网电子地以带转向表的图相邻接表数据结构存储电子地图信息，对同一工况始末道路口节点一致的情况下，采用 A\*算法与 A\*分层算法，求出静态路径规划的所需要的时间，及道路规划的路径长度。以道路路径的有效长度为权值。

A\*算法的路径规划思想及程序框架如 3.5.2 所示，智能交通网的 A\*分层算法，基本步骤如下：

（1）智能交通网道路交通层的详图上，采用 A\* 算法，查询到车辆行驶的始点 S 到邻近的略图层节点的最优规划路径 P1，A\*算法结束，保存当前最优节点 A；采用 A\*算法，查询车辆行驶的末点 D，到邻近的略图层节点的最优规划路径 P2，A\*算法结束，保存当前最优节点 B；

（2）智能交通网道路交通层的略图层上，采用 A\*算法，查询当前最优节点 A、B 的最优路径 P3；

（3）顺序连接 P1、P2、P3，查询到车辆行驶的最优路径，A\*分层算法结束。  
步骤（2）在略图层上利用 A\* 算法，找到 A，B 结点之间的最优路径 P3。  
步骤（3）顺次连接 P1，P3，P2，形成最终的最优路径，算法结束。

在路径规划仿真平台中，任意选择车辆行驶路径的始末点，A\*算法与 A\*分层算法实验结果统计如表 3.3 所示。

表 3.3 A\* 算法 与 A\*分层算法

| 序号 | A*算法   |         | A*分层算法 |         |
|----|--------|---------|--------|---------|
|    | 时间(ms) | 路径长度(m) | 时间(ms) | 路径长度(m) |
| 1  | 0      | 4067    | 0      | 4879    |
| 2  | 16     | 4009    | 0      | 4009    |
| 3  | 47     | 5187    | 15     | 5182    |
| 4  | 15     | 6402    | 31     | 8849    |
| 5  | 0      | 5104    | 0      | 5110    |
| 6  | 140    | 7190    | 0      | 7434    |
| 7  | 0      | 3688    | 0      | 3688    |
| 8  | 0      | 6742    | 0      | 6747    |
| 9  | 125    | 9399    | 16     | 9399    |
| 10 | 15     | 6787    | 0      | 6815    |
| 11 | 0      | 3865    | 0      | 3865    |
| 12 | 31     | 4816    | 0      | 4974    |
| 13 | 0      | 1747    | 0      | 1474    |
| 14 | 0      | 711     | 0      | 711     |

注意：列表中的时间 0，表示查询时间小于计算机准确定时 1ms。

对表 3.3 的 14 次电子地图规划，分析处理数据后，得出下列结论：

(1) 车辆路径规划的始末点较近时，A\* 算法与 A\*分层算法的路径规划时间基本相同，车辆路径规划的始末点较远时，A\*分层算法效率比 A\* 算法高；

(2) A\*算法查询的路径规划是最优的，A\*分层算法查询结果，未必是车辆行驶的最优路径，由于选择的是智能交通网中道路等级较高的路径，更能够满足出行者的需要；

(3) A\*算法基于智能交通网的详细图，A\*分层算法需要加入智能交通的道路图的略图层，就需要详图层和略图层时空上的切换，将略图层的电子地图数据写入计算机内存内。

理论分析产生 A\* 算法与 A\*分层算法差别的产生原因：

当车辆行驶者设置的起始道路口节点路径很近时，两种算法的查询最优道路路径的时间小于 1ms；随道路路径的增加，最优的时间开始增加，与 A\*分层算法的查询最优路径的过程时，放射扇子形状，实际交通网的电子地图对 A\*分层算法的影响因子较小，实际的查询效率较高。A\*分层算法主要是在交通道路网的略图层进行路径规划研究，忽略详图层的低等级道路，出现的问题就是，该算法实际的查询轨迹，并非车辆行驶的最短距离。

#### 3.5.4 静态规划策略比较

3.5.1—3.5.3 章节，在不同的智能交通网电子地图信息的存储数据结构，对经典的静态最优路径规划算法进行比较研究，实验研究的结果表明：

(1) Dijkstra 算法在图相邻数据结果存储下比图相邻接表数据存储下的最优路径规划策略低。

(2) A\*算法在比图相邻接表数据存储下的查询最优路径的效率高于 Dijkstra 算法，A\*分层算法的查询效率最高。

(3) 智能交通网中存储电子地图的数据结构上，图相邻接表数据结构由于图相邻数据结构。主要的原因是邻接表数据结构对于电子地图的图形数据进行了预处理，主要包含任意节点的相关路径规划，查询某一节点的交通管制转向限制。

(4) 智能交通中的车辆静态最优路径规划策略，可以根据存储电子地图的数据结构不同，采取相应的路径规划算法。一是交通网的道路图仅有详图层时，应用图相邻

接表数据结构，A\*算法；二是交通网的道路图分为两层，详图层和略图层，车辆行驶者的始末路径距离较短的情况下，A\*算法，始末路径距离较远的情况下，A\*分层算法。

### 3.6 本章小结

本章首先基于计算机处理的地图图形学信息（GIS），组件开发了智能交通车辆最优路径规划策略研究的仿真平台。对该仿真平台的开发工具的选和仿真平台的整体软件设计框架，并对该路径规划仿真平台的主要功能进行介绍。其次建立了智能交通网，静态路径规划数学模型，并设置了不同道路阻抗下的最优价值函数模型解。对几种经典的路径规划算法进行分析和比较，设计了两种静态最优规划算法：道路口节点对向查询和交通道路网分层查询，并对两种算法进行了算法的复杂度和路径规划效率分析，并在所建立的车辆路径规划仿真平台进行算法实现。静态路径规划的实验研究中，在不同的智能交通网电子地图信息的存储数据结构，同一工况条件下，对经典的静态最优路径规划算法进行比较研究。一是单、双向 Dijkstra 算法路径规划实验中，在图相邻数据结果存储下比图相邻接表数据存储下的最优路径规划策略低；二是 A\*算法在比图相邻接表数据存储下，的查询最优路径的效率高于 Dijkstra 算法，A\*分层算法的查询效率最高；三是智能交通网中存储电子地图的数据结构上，图相邻接表数据结构由于图相邻数据结构。主要的原因是邻接表数据结构对于电子地图的图形数据进行了预处理，主要包含任意节点的相关路径规划，查询某一节点的交通管制转向限制。最后比较车辆静态最优路径规划策略，并给出比较的结果，即在车辆在实际的路径规划中，可根据智能交通网电子地图图形的数据存储格式不同，选用相关的静态最优路径规划策略。



## 第4章 车辆动态最优路径规划策略设计

### 4.1 引言

智能交通道路网中，一方面对于交通实时周围信息不能得到有效的反馈时，车辆的出行信息管理系统，车辆只能用车载导航系统，即依据车载交通路网的电子地图进行道路静态路径规划；另一方面，在能够采集道路交通信息，并作出正确的道路交通周围情况的信息反馈，可采用车辆的动态最优路径规划，这也是智能交通工程科研领域研究的热点问题。车辆行驶的动态路径规划比静态路径规划更能够体现车辆行驶过程中状态的可信性、实时性及准确性。智能交通网中，中心式的动态路径规划系统的整体框架和接口如图4.1所示。

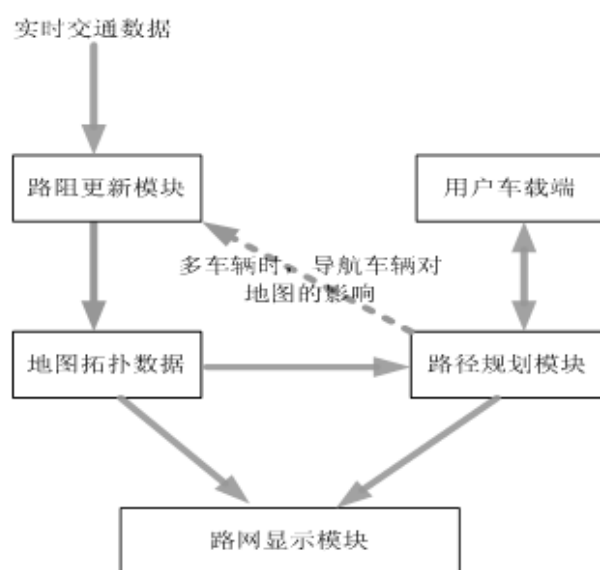


图 4.1 动态路径规划系统框架

智能交通的中心式控制处理系统，能够通过交通网中的各种传感器检测装置，接收道路交通网的实时反馈交通信息，并对有效信息进行分析和处理，周期性的更新车辆行驶过程中所经路路径的道路阻抗，替换交通智能网的地图空间数据信息。车辆行驶的出行者，向交通网中心控制系统，发出路径规划需求，中心道路处理控制系统根据需求，判断交通网的实时交通信息，动态规划出车辆行驶的最优路径，并传送路径数据到车载导航的道路网显示模块。车载的智能交通网道路显示功能模块，一是能够显示车辆行驶者设置始末节点周围的交通网地图；二是能够显示出中心路径规划控制系

统，所计算出的最优路径。如果多车辆对中心道路处理系统进行路径规划请求，需要考虑前者车辆道路路径规划对智能交通网道路交通情况的影响。

自主车辆动态路径规划算法设计的基本思想是，依据智能交通网的动态实时交通信息，忽略需要中心道路规划的车辆之间的相互影响；协调车辆的动态路径规划，是在自主车辆动态路径规划的基础上，引入多车辆之间的相关影响，算法的设计上关注单车对交通道路情况的作用。以整个智能交通网车辆行驶流和交通周围环境做为一个整体系统进行考虑，任意单独车辆最为交通智能网系统的微观组成。区分车辆动态最优路径规划为：自主车辆和协调车辆动态路径规划，主要考虑下述假设：

(1) 车辆道路路径导航过程中，是否把任意需求路径导航的车辆，做为影响整个智能交通状况的因素；

(2) 动态路径规划过程中，采取何种规划交通分析和处理装置，即中心式或车载路径规划终端。

解决目前交通堵塞的一个实时有效的方法，就是能够采集准确的交通网络的存储历史信息及当前的交通道路情况信息。城市交通工程发达的国家，在道路的路面的底部安装相关的感应线圈，实时获得车辆行驶路面的平均速度及行驶车辆之间的相互距离及车流量的长度信息情况；另一种方式是在行驶的城市出租车上安装 GPS，测量车辆行驶的速度，从而实时反映道路交通状态。在欧洲，智能交通中的基础设置中含有无线传感器网络，因此可以方便将车辆行驶周围地区的实时交通情况，上传到车辆行驶的车载出行信息管理系统，可实现自主车辆的最优路径规划；同时可以把交通信息实时发送到中心式路径规划处理控制系统，进行自主和协调车辆动态路径规划。

本章首先建立行驶过程中的动态路径规划数学模型，并针对自主和协调车辆两种动态路径规划进行算法设计，并对动态路径规划的相关算法在车辆路径规划仿真平台上实现算法的具体实验。

## 4.2 动态规划数学模型建立

### 4.2.1 自主车辆数学模型

模型建立的假设条件：

(1) 忽略交通网交通状况传感器检测的基本误差值；

(2) 智能交通网中的动态交通路况信息更新时间  $T$ ，符合道路交通信息变化和动

态路径规划时间需求；

(3) 智能交通网的实时交通信息流，能实时上传到交通网中心路径规划平台和车载路径规划端。

#### 基于静态路径规划模型的自主车辆数学模型

(1) 静态模型中的交通网道路路径集合  $R(G)$ ，修改为包含交通网动态实时信息的  $R(G, t)$ ；周期时间  $T$  内，认为动态交通信息没有改变。 $R(G, t)$  可采用离散数学方式进行描述， $R(G, w_i)$ ，式中  $w_i$  为周期时间数值为  $i \times T$  时刻的交通网状态信息。在周期时间  $T$  内，由于当前的交通路况信息不变及道路阻抗不变，可应用车辆的静态路径规划算法；

(2) 智能交通网中的动态道路阻抗函数确定。假设车辆行驶路段的实时交通平均车流速度，由安装与城市出租车上的 GPS 近似估算。取动态道路阻抗为车辆行驶路段的平均动态行驶时间为：

$$t_{ij} = \frac{d_j}{v_{ij}} \dots\dots\dots (4.1)$$

式中  $d_j$  为道路路径的长度； $v_{ij}$  为 GPS 计算获得的第  $i$  个周期  $T$  的行驶车辆行驶在  $j$  道路路径上的车流量平均速度。

(3) 车辆道路路径规划的价值函数。在车辆的动态最优路径规划中，不能同静态路径规划的价值函数一致，即目标函数上不能选取动态交通信息中的最短路径。通常选择车辆行驶的最短路径时间为目标函数，根据智能交通网的道路交通方式不同，动态路径规划的价值目标函数即不同。

#### 4.2.2 协调车辆数学模型

模型建立的假设条件：

(1) 车辆行驶过程中，由于道路路径上车辆行驶数量的增加和减少，及车辆行驶在道路路径上的位置不同，取对整个道路路径上的道路阻抗为均匀分布；

(2) 智能交通网的任意交通路径，交通流量状况的线性均匀分布，道路阻抗取车辆动态行驶过程中的平均时间；

(3) 车辆路径导航系统使用的交通网数字地图与中心式路径规划处理器的数字地图，两种具有准确一致的特点；

(4) 车辆行驶过程中的每条交通道路路径相互之间存在独立的关系，即任意一条交通道路路径情况变化，不影响其他道路交通状态。

(5) 每条道路是相互独立的，一条路段交通状况的变化，不影响其他路段的交通情况。

#### 数学模型建立

设车辆行驶在交通智能网络中的任意周期时间  $T$  内，车辆数学模型为：

$$C_i = \{(r_i, v_i, p_i) | i = 1, 2, \dots, N\} \dots\dots\dots (4.2)$$

$N$  为车辆行驶在始末路径中，所经历的交通状态改变周期  $T$  的数量值， $r_i$  为  $iT$  时刻车辆行驶过程中的某一路径， $v_i = f(r_i)$  为  $iT$  时刻车辆行驶的速度； $p_i$  为车辆行驶道路路径  $r_i$  的当前位置，即到此路径末点的有效长度距离。

$v_i$  可以与  $iT$  时刻车辆行驶过程中的该路段平均车辆速度近似相等，而车辆行驶的道路路径平均速度，与实际道路路径的长度、该路径的车辆行驶数量及道路实际宽度和道路等级有关，公式为  $v_i = f(r_i)$ 。实际的车辆路径规划时，可应用美国公路局提出的车辆行驶时间和交通流量的函数关系表示：

$$t_r = t_0[1 + \alpha(V/C)^\beta] \dots\dots\dots (4.3)$$

式中， $t_r$  为车辆行驶过程中的道路阻抗，车辆在该路段的平均行驶时间；

$t_0$  为无交通行驶量时的，路段平均行驶时间； $V$  为该道路路段的交通行驶量； $C$  为实际道路路段运行能力值； $\alpha$ 、 $\beta$  为系数值。

车辆行驶的交通路径的交通量，可以采用道路地下的感应线圈传感器，或者智能交通的摄像头，用该道路路段的实际长度除以车辆通过该路段的平均运行时间，即得到车辆行驶在该路段的平均速度。而车辆行驶过程中的道路等级及位置，可以通过车载系统的 GPS 和智能交通网的电子地图显示得到。

车辆行驶过程中，任意车辆从第  $j$  条道路路径驶入第  $k$  条，道路路径上的车辆行驶数量影响值为：

$$\begin{cases} n_{r_j} = n_{r_j} - 1 \\ n_{r_k} = n_{r_k} + 1 \end{cases} \dots\dots\dots (4.4)$$

式中， $n_{r_j}$  为  $r_j$  道路路径上的车辆行驶数，利用公式 4.3 进行道路上平均车辆行驶时间和平均行驶速度的计算。

智能交通道路网中，对交通网道路的实际影响，是每一个车辆的行驶过程的累加，即组成了车辆行驶过程中的统一道路阻抗。道路交通的实际情况，对道路的道路阻抗

产生影响，通过车辆的动态最优路径规划，可以改变车辆的行驶路线，从而使智能交通网中，某一路段的实际交通流量和交通状况得以改善。

协调车辆路径规划的价值函数：

依据车辆行驶过程中，所需要产生的具体规划效果，协调车辆最优路径规划的价值函数为：

(1) 车辆行驶者的目的最优，即用户行驶过程中所产生的消费最低，动态最优的路径规划算法中，采用 4.3、4.4 计算车辆道路行驶过程中的平均行程时间和道路行驶车辆数；

(2) 车辆行驶者在车辆的最优路径规划过程中，只完成一次动态路径规划，设车辆起始节点为  $n_{start}$ ，末点为  $n_{dest}$ ，车辆动态路径规划的路径为  $P(n_{start}, n_{dest})$ ，设目标函数为车辆行驶的时间最短，则车辆动态最优路径的规划价值函数为车辆行驶在该路段的时间，从而计算出车辆行驶的最短路径；

(3) 智能交通系统的整体最优为目标，即以交通道路网的堵塞道路路径最少，设置车辆行驶过程中的交通智能网每条路径最大限度车辆通过数。如果超出该道路通过的车辆数，则智能交通路径规划中心处理器，设置该道路路段为交通管制，直到交通路径的车辆较少到符合值结束；

(4) 价值的目标函数为车辆行驶者和智能交通系统之间的最优平衡。与出行者最优进行比较，可以加大任意车辆对交通道路路径平均影响因子权重值，因此当智能交通网中的，任意路径上车辆增加的数量达到一定值时，该交通路径的道路阻抗，就会快速增加，从而对其他申请需要导航的车辆进行必要的道路口节点分流，较少不必要的交通阻塞；在公式 4.3 中，改变系数  $\alpha$ 、 $\beta$  值，就可以实现道路路径的车辆数增加，改变道路的平均行程时间，同时可以改变车辆行驶者的出行费用和智能交通系统最优的权重值。

#### 模型求解

智能交通网中车辆的实际定位导航是依靠，车载定位装置 GPS 和电子地图想结合匹配算法后，得以确定车辆行驶的具体位置。实际车辆的任意时刻速度，可以通过车辆行驶过程中的道路车辆的平均速度表示。而道路车辆的平均行驶速度的计算上可以依据道路的长度与平均行驶时间的比值求出。道路的长度智能交通网电子地图两个节点之间的距离，平均行驶时间可以由道路上行驶的车辆数和静态信息按公式 4.3 进行计算。

智能交通中的实时相关信息，包括实际行驶的车辆数、实时发生的交通事故发生和交通管制道路信息。而行驶的车辆数可以通过一下方法进行获得。一是道路上针对车辆的传感器；二是可以使用 4.4 的公式进行计算求得。第一种的成本较高；第二种成本低，计算机处理的计算量较大，对于未能够安装定位设备的非导航车辆的道路实际行驶位置确定困难。行驶道路中的车辆行驶过程中的平均速度也是判断交通道路的实际情况的相关物理量，我们可以利用出租车所安装的 GPS 定位装置，获得车辆行驶过程中道路实际状况的平均速度。

实时的获取道路交通信息后，可以通过相应的理论换算成协调车辆规划算法中，所应用到的车辆在实际行驶道路中的动态平均行驶时间或路径行程时间，就可以建立按照行驶人员的各项不同要求，建立相关的目标函数，进行协调车辆的动态路径规划。具体的协调车辆数学模型选择，可以依据本节中的模型建立中的协调车辆路径规划的价值函数相关分类<sup>[41]</sup>。

### 4.3 动态路径规划算法设计

#### 4.3.1 自主车辆规划算法

##### (1) 基于道路节点自主车辆规划算法

基于道路节点自主车辆规划算法的相关策略的基本思路是，当自主车辆行驶到智能交通网中的道路节点时，对当前时刻的道路口实时交通进行判断，如果交通信息已经被修改，修改当前的交通道路节点为车辆行驶的起始点，车辆行驶的末点为终点，通过下一个周期时刻的实时交通状态信息，进行车辆行驶的道路路径规划，从而使车辆行驶过程中的整个道路路径为最优。

价值函数及自主车辆数学模型的解

设任意一次路径规划的最优道路路径为  $P(n_{i1}, n_{dest})$ ， $n_{i1}$  为  $i$  次的道路路径规划始点， $n_{dest}$  为规划路径的末点。这最后车辆行驶的道路路径为：

$$P = \{R(n_{i1}, n_{i2}) | i = 1, 2, \dots, N\} \dots\dots\dots (4.5)$$

式中： $P$  为车辆行驶过程的最优路径， $n_{i1}, n_{i2}$  为  $i$  次的道路路径规划始点和第二个节点， $N$  为车辆的动态路径规划次数，也表示最优路段可以分为多少个路段。

考虑的实时的动态交通信息，相应的价值函数取车辆行驶的最短路径，已经没有

什么具体的实际意义。取车辆道路行驶过程中的行驶时间，作为价值函数，计算公式：

$$T_z = \sum_{i=1}^N t(n_{i1}, n_{i2}) \dots\dots\dots (4.6)$$

式中， $t(n_{i1}, n_{i2})$  为从道路口节点  $n_{i1}$  到节点  $n_{i2}$  所用的时间代价， $T_z$  为车辆行驶路径的时间代价。当车辆行驶过程中，经过下一个道口节点后，程序利用实时交通信息，进行一次道路路径的最优规划，查询出车辆行驶的最优动态路径。车辆自身都配有全球定位装置可以与智能交通网的电子地图进行配对，计算车辆行驶到终点的时间。

#### 算法难度系数分析

当车辆行驶到道路路口节点，通过实时交通信息和路况的静态信息计算，求得道路的道路阻抗，因此动态路径的规划问题就变成了一个静态最优路径求解的问题。因此通过第三章的静态路径规划静态算法的比较，本文采用搜索率较高的 A\* 算法。

对于任意一个交通节点均采用 A\* 算法，求出动态路径规划算法的难度系数值。由于任意一个交通节点的智能交通网路径规划均是相互独立的，因此算法的复杂度可以求出为交通道路口个节点的道路路径规划复杂性之和，计算公式：

$$\int_{x=1}^d O(b^x) dx = O\left(\int_{x=1}^d b^x dx\right) = O\left(e^{\frac{d^2 \ln b}{2}}\right) \dots\dots\dots (4.7)$$

式中， $b$  为道路口节点的均值路段数， $d$  为始末节点的查询深度指标。

由公式只，始末点之间距离相差较大时，算法的难度系数较高。任意一下路段的路径的道路口规划，都是在车辆行驶过程中实现的，因此平均计算后，难度系数就会降低。自主车辆基于道路口节点的规划算法程序流程图为：

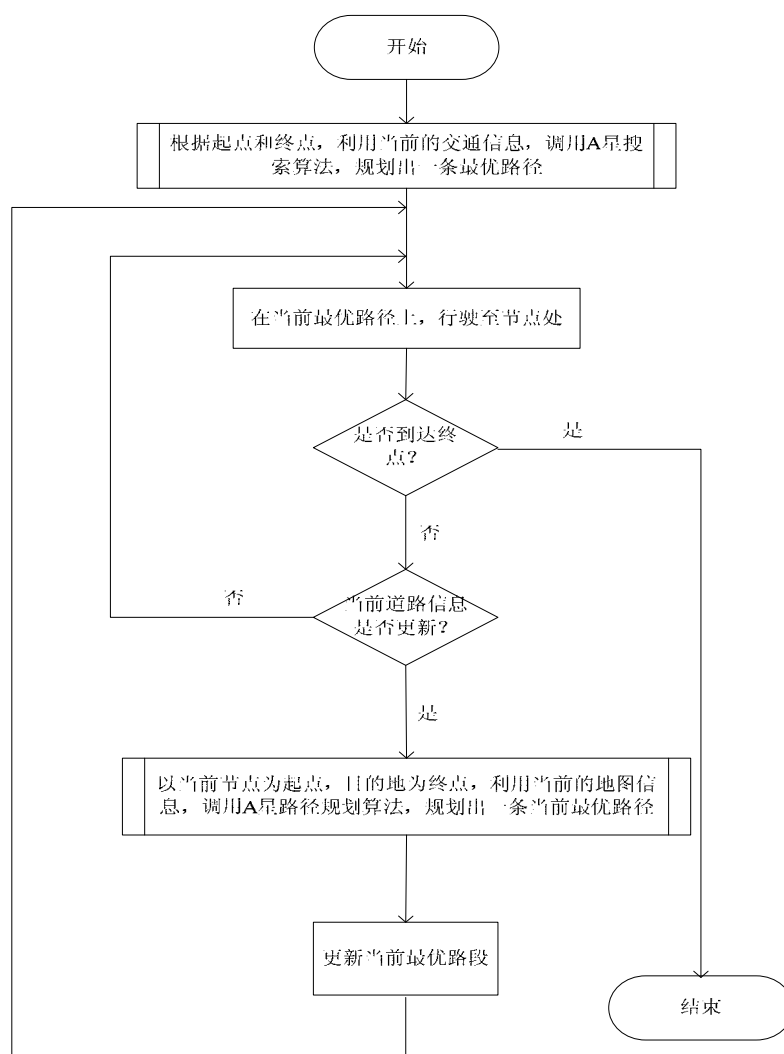


图 4.2 基于道路口的自主车辆规划算法流程

## (2) 基于周期的自主车辆规划算法

对于车辆行驶过程中, 任意一个道路节点动态规划算法问题, 应用周期时间对车辆行驶过程的动态路径进行规划。由于车辆行驶过程中的道路路径的实际长度是不均匀的, 其中某些的路段相对较短, 结果是动态路径规划的频率增加, 道路路径的规划实时性增强, 但是损失了系统的相关资源。实时的交通道路信息, 在某一定的较短时间里没有变化, 而车辆行驶的过程中已经通过了数个路口。同时, 相对于大规模的车辆路径规划, 车辆行驶过程中行驶到道路口的时间是不一致的, 也就出现了车辆进行动态规划的时间性是不定的, 导致申请服务的相关车辆超出或者减少, 导致交通路径规划服务器资源上的浪费。



因此对于自主车辆规划的道路口动态路径规划算法进行了改进，采取以时间均匀等分的方式进行自主车辆的道路路径规划。即以某一时间段为周期，例如 15 分钟，以此时间为节点，进行实时的交通信息更新，查询车辆行驶的道路路径位置及周围所在的路段，以车辆行驶的下一个道路口节点为始点，目标节点为终点，进行道路口的动态道路路径规划，与之前的最优车辆行驶的道路路径，进行规划比较，路径一致则不取代前面的路径，否则更新<sup>[42]</sup>。

#### 价值函数及自主车辆数学模型的解

设车辆行驶过程的时间代价为  $T_z$ ，并进行了动态路径规划的次数为  $N$  相应的规划道路路径为  $P_1, P_2, \dots, P_N$ ， $i$  次车辆动态规划的相关路段为  $R_i$ ， $R_i$  的始末节点为  $N_{istart}$ 、 $N_{idest}$ ，即车辆行驶的动态导始末点为  $N_{start}$ ， $N_{dest}$ 。则道路路径的规划  $P$  计算公式为：

$$P = \{p_1(N_{start}, N_{idest}), \dots, p_i(N_{idest}, N_{i+1dest}), \dots, p_N(N_{Ndest}, N_{dest}) \mid i = 1, 2, \dots, N\} \dots\dots (4.8)$$

设任意一次实时交通信息的改变，车辆所在的位置为  $p_i, i = 1, 2, \dots, N$  于当前道路段的末段节点长度为  $d_{R_i}, i = 1, 2, \dots, N$ ， $i$  次智能交通网的实时交通信息更新的下一个周期， $R_i$  道路路径的平均速度为  $v_{R_i}$ 。车辆行驶过程中，通过第一个交通更新的时间为  $t_1$ ，到达末点的时间为  $t_2$ 。

以车辆行驶过程的最短路径为价值函数，则价值函数的数学表达式为：

$$D_z = D(N_{start}, p_1) + \sum_{i=1}^{N-1} D(p_i, p_{i+1}) + D(p_N, N_{dest}) \dots\dots\dots (4.9)$$

$D(N_{start}, p_1)$  为  $N_{start}$ ， $p_1$  的相关道路路径距离。

设以车辆行驶的最短时间为价值函数，价值函数的数学描述是：

$$T_z = t_1 + N \times T + t_2 \dots\dots\dots (4.10)$$

$$t_1 = \frac{R(N_{start}, p_1)}{v_1(N_{start}, p_1)} \dots\dots\dots (4.11)$$

$$t_2 = \frac{R(p_N, N_{dest})}{v_N(p_N, N_{dest})} \dots\dots\dots (4.12)$$

时间  $t_1$ ， $t_2$  带入公式，求出车辆行驶的过程代价时间  $T_z$ 。 $R(N_{start}, p_1)$ ， $v_1(N_{start}, p_1)$  为车辆行驶过程中的第一个实时交通更新路段的长度和速度。而在车辆行驶过程中的，均以时间最短为价值目标函数。

设车辆行驶的道路路径规划是在车辆智能交通中心处理完成，这  $i$  段时间的  $t_i$  划

分，依据交通道路网上行驶的车辆  $n_i$ 、中心处理能力  $m$ ，更新的交通时间  $t_{ir}$  和道路路径规划的时间  $t_{ip}$ ，相关约束条件为：

$$T \geq \sum_{i=1}^N t_i$$

$t_i$  计算公式为：

$$t_i \geq m - t_{ir} - n_i \times t_{ip} \dots\dots\dots (4.13)$$

$t_i$  的取值受智能交通网道路申请的车辆数约束。

#### 算法难度系数分析

该算法的难度系数与车辆行驶工程中，实时交通信息的更新频率有关。设经过  $N$  次交通信息的更新，计车辆的动态路径规划为  $N+1$ 。每一次动态道路路径的规划，应用  $A^*$  算法，则算法的难度系数计算累加公式为：

$$(N+1)O(b^x) = O((N+1)b^x) \dots\dots\dots (4.14)$$

式中  $b$  为道路口节点的均值路段数， $d$  为始末节点的查询深度指标。算法的计算量较大，但是平均分配在车辆行驶过程中的每一个阶段，则计算量将减少。同时  $N$  可以根据具体的时间交通道路信息，进行必要的调整。

自主车辆基于周期的规划算法程序流程图为：

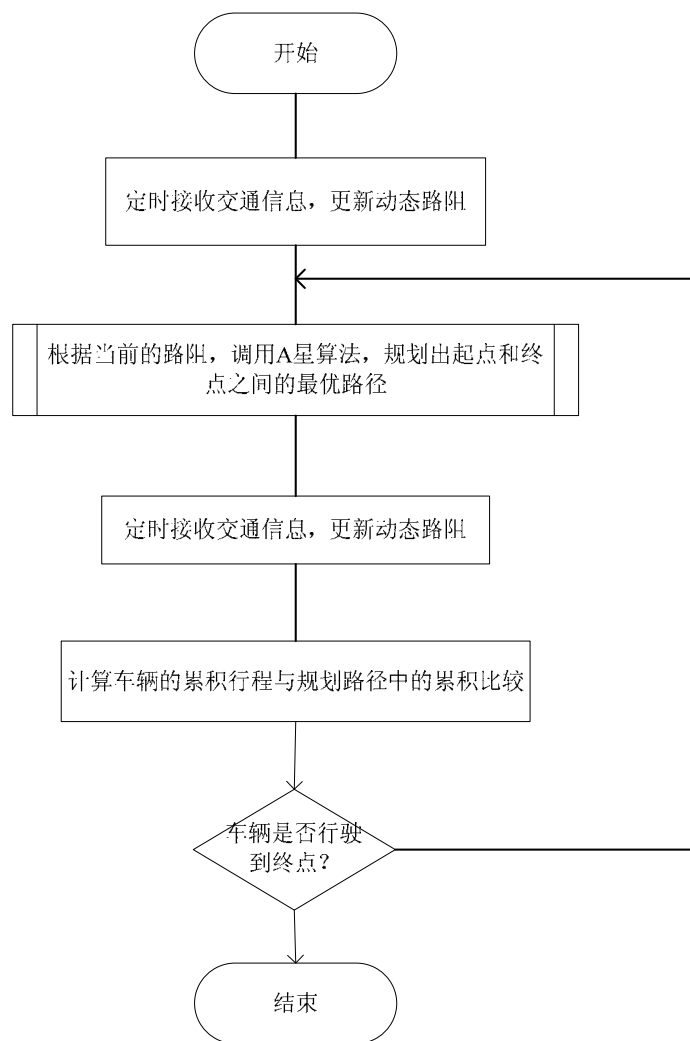


图 4.3 基于周期的自主车辆规划算法流程

#### 4.3.2 协调车辆规划算法

协调车辆的动态规划算法实现的关键就是考虑车辆行驶的路段，车辆行驶过程中由一条路段行驶到另一路段，能够引发车辆行驶过程中两个路段的车辆行驶数的变化，即驶出道路路径车辆减 1，驶入道路路径增加 1，车辆数的改变引起道路阻抗的变化，也就引起了车辆动态路径规划的有效结果<sup>[45]</sup>。协调车辆算法的流程图如图 4.4 所示

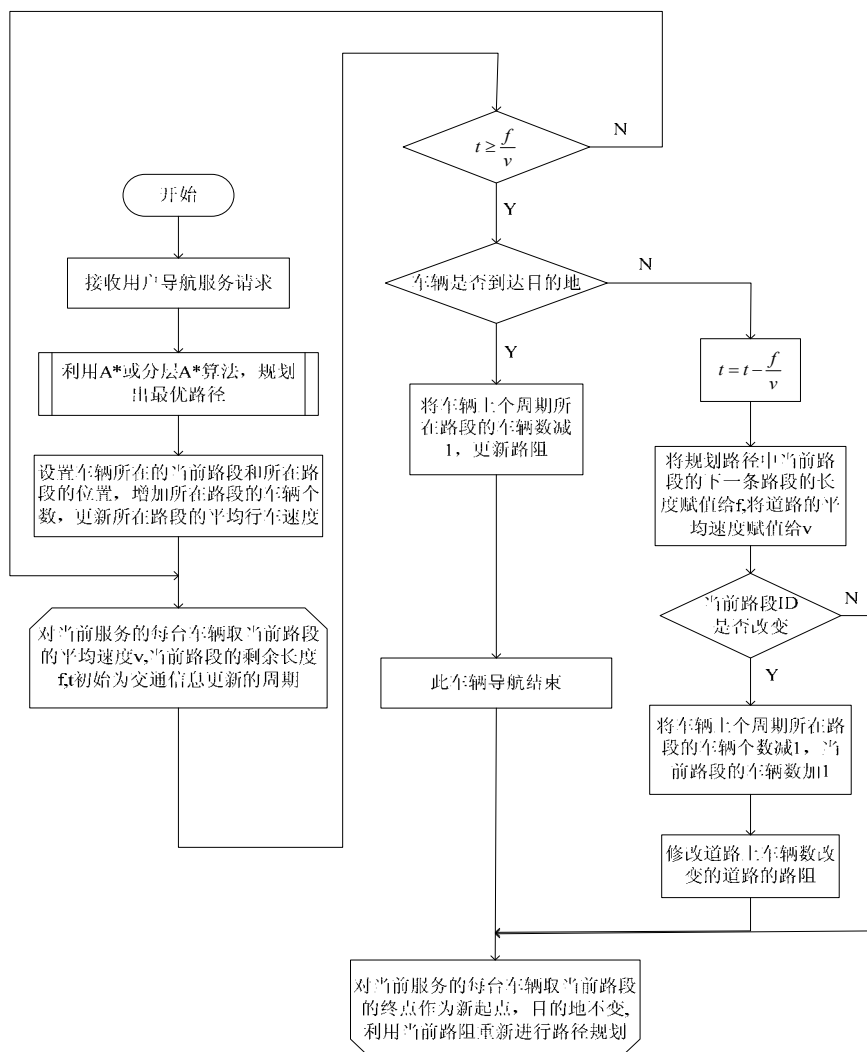


图 4.4 协调车辆规划算法的程序流程图

实际情况下, 车辆行驶过程中的路径规划的相关次数, 由申请路径规划的车辆数和数字地图的实时更新频率有关。一方面申请车辆导航数较多时, 相关的计算量就较大, 实时动态路径信息的实时更新频率较快时, 道路路径的阻抗在数字地图中更新后, 给予车辆重新规划的道路路径时间上就缺少。

智能交通网的交通更新周期  $T$  的选择与交通路径管理中心的计算机处理能力和申请路径服务的车辆数有关。计算公式为:

$$T \geq n \times (t_i + t_r) + m \times t_p \dots\dots\dots (4.15)$$

式中  $n$  为中心正在服务的车辆数,  $m$  为周期时间  $T$  内申请服务的车辆数,  $t_i$  为计算车辆实际位置的时间,  $t_r$  为计算道路车辆数及道路路阻的时间,  $t_p$  为车辆进行动态路径规划的时间; 为满足实时性的要求,  $T$  选择尽量小, 4.15 公式转化为:

$$T = n \times (t_{i\max} + t_{r\max} + t_{p\max}) + m \times t_{p\max} \dots\dots\dots (4.16)$$

协调车辆的规划算法，应采取实时效率较高的路径规划算法，由第三章所得到的结论可知，在车辆行驶的较小区域使用 A\*算法；在较大的区域内使用 A\*分层算法。

## 4.4 动态路径规划实验研究

### 4.4.1 基于节点的自主车辆实验

#### 1、基于道路口节点的自主车辆实验方法

- (1) 车辆静态路径规划算法，查询出车辆行驶的始末点最优路径；
- (2) 车辆行驶过程中，设置交通管制信息，更新道路交通路阻；
- (3) 对于周期时刻  $t$  乘以车辆行驶过程中路段的平均行驶车速，计算车辆行驶的道路路径长度，如果路径的累计长度大于当前规划的最优路径长度，车辆到达目的的，转(4)，没有到达，则重新进行静态的路径规划，查询出一条合适的最优路径，如果累计的长度小于当前路段的长度，则转到(3)。
- (4) 车辆行驶到达目的地。

车辆行驶的道路状况，根据车辆行驶过程中的行驶速度，划分为 4 中状况。1 交通无堵塞的情况；2 交通小堵塞的情况；3 交通较大堵塞的情况；4 交通严重堵塞的情况。在地图上以不同的颜色进行相关比较。交通状况与车辆行驶速度之间的数学关系式为：

$$L(v) = \begin{cases} 1 & v_0 \leq v \\ 2 & v_0/2 \leq v < v_0 \\ 3 & v_0/4 \leq v < v_0/2 \\ 4 & v \leq v_0/4 \end{cases} \dots\dots\dots (4.17)$$

式中， $L(v)$  为交通道路等级， $v$  为车辆行驶过程中的速度， $v_0$  为道路交通无堵塞情况下的车辆平均行驶速度。

#### 2、车辆行驶过程中的实时位置的确定及到达目地的时刻

在道路路径的仿真平台上，可以有效的仿真出交通信息随时间的一个变化过程，但是也要计算出车辆行驶到目的地的时间。考虑汽车行驶过程中从节点  $n_{i1}$  到  $n_{i2}$  的过程中，存在实时交通信息更新变化多次的情况，车辆行驶过程中的平均速度也是不断变化的，因此不能用车辆行驶的道路路径长度除以时间进行平均速度的计算。

设定  $R_i$  为车辆行驶的路段，车辆行驶的位置距离行驶末点的路径距离为  $d_{R_i}$ ，该时

间  $T$  内的  $R_i$  道路的平均速度为  $v_i = f(R_i, n_i)$  ,  $n_i$  道路路径  $R_i$  的行驶车辆数。

路径距离为  $d_{R_i}$  与  $T \times v_i$  , 一方面  $d_{R_i} \geq T \times v_i$  , 车辆行驶过程的路径没有驶出交通更新的当前路段 , 依据实时交通状况信息 , 替换  $v_i$  , 计算生出的道路路径长度为  $d_{R_i} = d_{R_i} - T \times v_i$  。

如图 4.5 所示 , 黑色的路径节点为交通更新过程中车辆的位置。

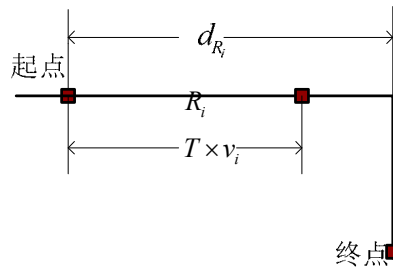


图 4.5 车辆未驶出的道路路径

另一方面设  $d_{R_i} \leq T \times v_i$  , 表示在一个动态变化的交通信息 , 车辆已经驶出该道路路径 , 可以对当前道路路径的末节点 , 不进行路径的规划 , 则一个周期时间为  $t_i = T - \frac{d_{R_i}}{v_i}$  , 对车辆行驶过程中的下一个路径长度赋值给  $d_{R_i}$  。这车辆在当前的实时交通信息下 , 更新新的  $v_i$  , 计算的当前的车辆行驶剩余路径长度为 :  $d_{R_i} = d_{R_i} - T \times v_i$  , 如图 4.6 所示。

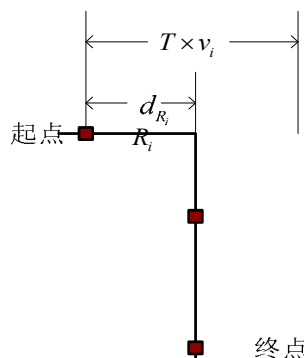


图 4.6 车辆未驶出的道路路径

### 3、实验结果

车辆的静态最优路径轨迹规划 , 以复杂情况较大的北京市东城区的三环和四环之间的道路网数据为路径规划源。东西距离 10KM , 南北距离 4KM。技术平台支持 : Inter Pentium 4 1.8GHz, 512M 内存 , Microsoft Windows server 2003 操作系统。本文的所有实验均基于车辆路径规划仿真平台 , 如图 3.3 所示 , 可以通过放大、缩小查看整个地区的道路网情况 , 采用道路网道路功能的两层分类 : 略图层和详图层 , 细线为略图层网络

结构，粗线为详图层网络结构。交通网略图层包含道路的路径段 178 条，道路口节点数 53 个，交通管制的转向限制为 8 条；详图层包括道路路径段 2031 条，道路口节点 1419 个，交通管制的转向限制为 2307 条。

图中红色标记的上三角形为车辆行驶过程中的起点，下三角形为车辆行驶过程中的末点。⊙ 为车辆的行驶过程中的交通堵塞路径。如图 4.7 所示，粗路线为车辆行驶过程中的静态路径规划，如图 4.8 所示，设定道路路径 4 为严重交通堵塞情况，车辆重新规划车辆行驶路径，其中粗线为重新规划的道路路径。当图 4.9 中车辆行驶到第 4 条道路路径时，设置第 5 路径为交通严重堵塞。图 4.10 可以看出，车辆开始掉头，并且沿新的最优车辆规划路径进行行驶，到达目的地。车辆行驶过程中所花费的时间如表 4.1 所示

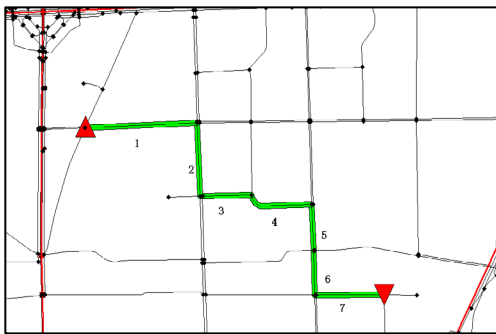


图 4.7 车辆初始路径规划

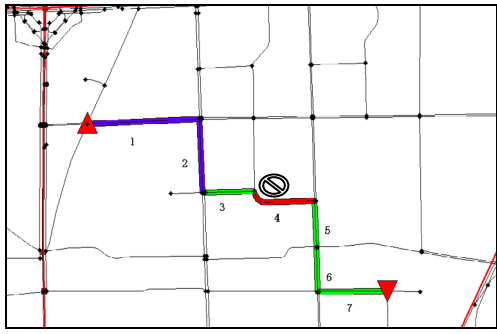


图 4.8 车辆行驶交通管制

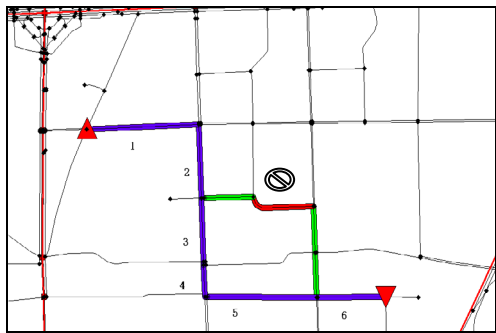


图 4.9 车辆行驶路径更新

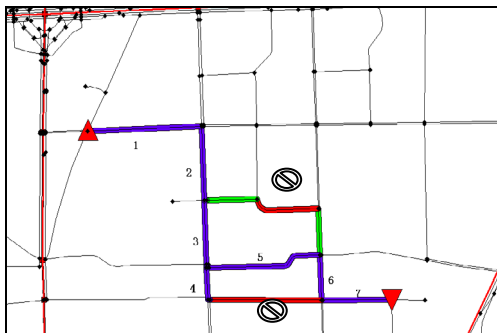


图 4.10 更新交通管制路径重新规划

表 4.1 基于节点的自主车辆规划效率

|             | 第 1 步   | 第 2 步   | 第 3 步   | 第 4 步   | 第 5 步   | ..... |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 新路径出行代价(s)  | 2438.85 | 2438.85 | 2447.28 | 2447.28 | 2537.40 | ..... |
| 旧路径行驶的代价(s) | 2438.85 | 2438.85 | 2890.85 | 2890.85 | 3476.85 | ..... |
| 节省的代价比例     | 0%      | 0%      | 14.4%   | 14.4%   | 36.97%  | ..... |

#### 4、算法评价

该实验为基于节点的自主车辆实验的动态道路路径规划。由于交通信息是时刻变化的，没有对将来时刻的交通网络信息的判断是不准确，而只能获得实时的交通路况信息。当依据实时交通路况信息所规划出的车辆行驶最优路径，当随时间不段变化的过程中，道路交通状况的改变，不能保证将来时刻的车辆行驶道路况为最优。应用迭代方式进行车辆的道路路径最优规划，车辆行驶过策划那个中的任意道路口节点，依据更新的交通道路信息，进行实时的道路路阻，进行路径规划。由于进行多次的路径规划，计算机的计算量明显出现增加，但是每次路径规划的时间上不集中，而是分散到车辆行驶过程中的各个节点时刻，不会造成计算量的突增，造成计算机的瘫痪问题。

算法的优点是使车辆行驶过程中的，实时性与车辆的静态路径规划相比较有明显的提高，可以减少车辆行驶者在行驶过程中的出行成本。尤其道路越长，节省的相对代价就越多。

不足一是车辆行驶过程中的相关交通信息传输费用增加，动态的交通道路信息进程数据处理后，通过无线传输装置传送到车载终端；二是没有考虑到车辆行驶过程中，车辆本身对交通路况的影响，可能会出现多个导航的车辆选择同一条道路，引起车辆行驶路径的交通堵塞。

##### 4.4.2 基于周期的自主车辆实验

###### 1、基于道路口节点的自主车辆实验方法

- (1) 依据交通道路的阻抗，进行车辆行驶路径的最优轨迹规划；
- (2) 采用定时装置，设定均等时间；
- (3) 每一段的时间间隔，进行交通信息的交通道路阻抗的更新，并根据车载的GPS定位装置，确定车辆行驶在道路路径上的位置，并以车辆道路行驶的下一个节点，作为车辆行驶的始点，这段路径的末节点为终点，对车辆行驶的道路路径进行规划；
- (4) 车辆行驶一段时间后，如果路径有效值大于当前路径的有效值，对车辆行驶到目的地进行判断，到达，程序结束，没有到到，将车辆行驶的下一个路径作为当前



的道路径，转（4）。

## 2、实验结果

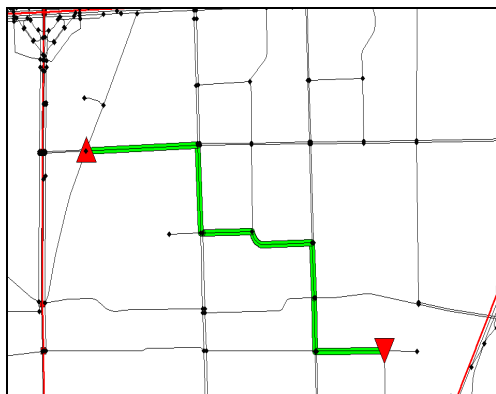


图 4.11 车辆初始路径规划

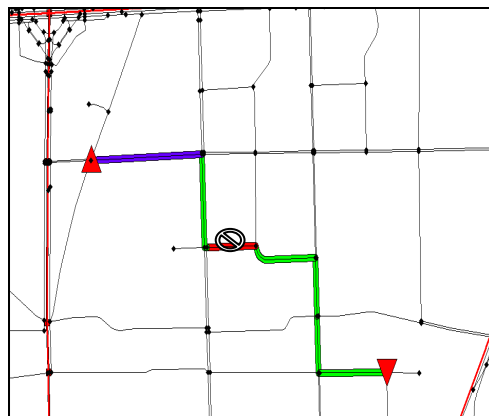


图 4.12 车辆行驶交通管制

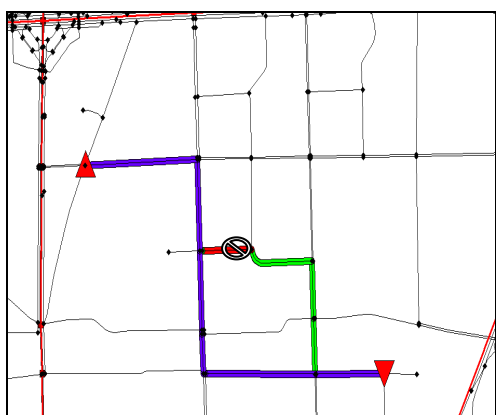


图 4.13 车辆行驶路径更新

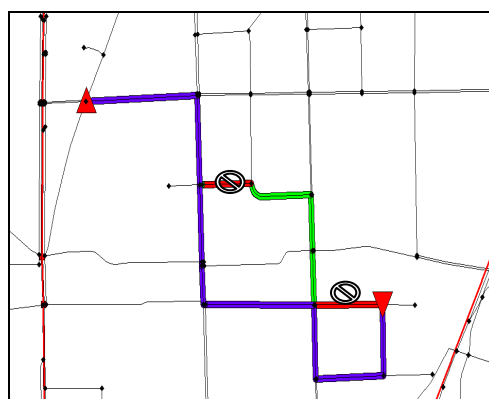


图 4.14 更新交通管制路径重新规划

将道路的交通状况分为 1, 2, 3, 4 四个等级，来描述交通的拥挤情况，等级越高，表示拥挤现象越严重。图中红色标记的上三角形为车辆行驶过程中的起点，下三角形为车辆行驶过程中的终点。“⊙”为车辆的行驶过程中的交通堵塞路径。实验的过程是，在车辆行驶的路径过程中，设置交通状态管制信息，对于实时的当前交通信息，进行新的路径规划。图 4.11 是实时当前交通信息未更新时，车辆行驶的规划路径结果。图 4.12, 4.13 为车辆行驶过程中，改变当前的交通信息，重新进行的路径规划，图 4.14 是车辆行驶过程中，设置的道路拥挤的情况，新的最优路径规划，对该交通堵塞道路节点，进行了绕行，最终车辆到达了行驶者设定的终点。

表 4.2 基于周期的自主车辆规划效率

| 观察次数       | 1        | 2        | 3        | 4        |     |
|------------|----------|----------|----------|----------|-----|
| 规划的路径代价(s) | 2438.848 | 2703.781 | 2447.284 | 3541.492 | ... |
| 实际最优代价(s)  | 2438.848 | 2447.284 | 2447.284 | 3053.576 | ... |
| 提高效率       | 0%       | 0%       | 10.5%    | 15.98%   | ... |

### 3、算法评价

该算法是拥有与节点的自主车辆动态路径规划算法一样的优点,实时的有效规划车辆行驶的道路路径,可以对交通实时增加的交通堵塞,进行绕行,对车辆行驶者的出行成本,进行了降低,并且相比于节点的动态路径规划算法,计算的次数减少。由于是基于一定周期的自主车辆规划算法,在基于交通路径规划的中心式处理系统中,不会出现计算、处理上的不可控,并能够有利于中心的处理器进行有效的计算。

该算法的优势就是在于能够充分使用系统的计算资源。根据申请导航的车辆数量,进行算法的有效变更频率,满足了车辆行驶过程中的实时性要求,同时能够产生相应控制的系统自适应性及鲁棒性。

算法的不足之处就是未对车辆行驶过程中,对交通道路的影响进行考虑。

#### 4.4.3 基于交通事故的协调车辆实验

图 4.15,4.16 中红色标记的上三角形为车辆行驶过程中的起点,下三角形为车辆行驶过程中的终点。“⊙”为车辆的行驶过程中的交通堵塞路径。实验的过程中,引入了交通路径堵塞情况,如图 4.15 所示,在发生交通堵塞事故时,行驶的车辆是无法获得该交通信息的,车辆动态规划的路径经过了事故的发生路段,车辆行驶的不是最优路径,对出行者是一个出行上的错误引导。而图 4.16 中,以车辆行驶的道路路径中心式处理的方式中,对交通堵塞的信息进行了考虑,实时更新了车辆行驶的道路阻抗,对交通堵塞进行判断,进行了有效的避让,能够对车辆的行驶过程,提高了车辆行驶过程中的实时动态和准确性。

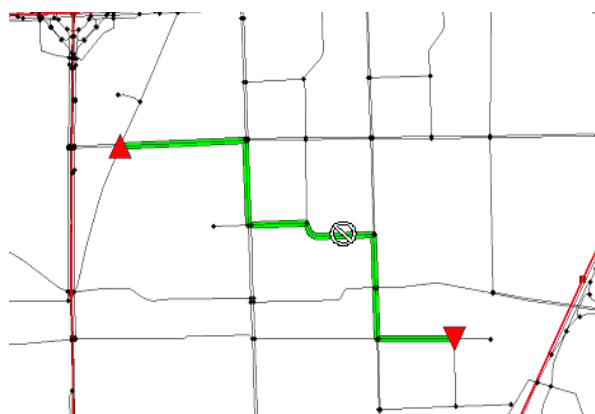


图 4.15 自主式车辆动态路径规划

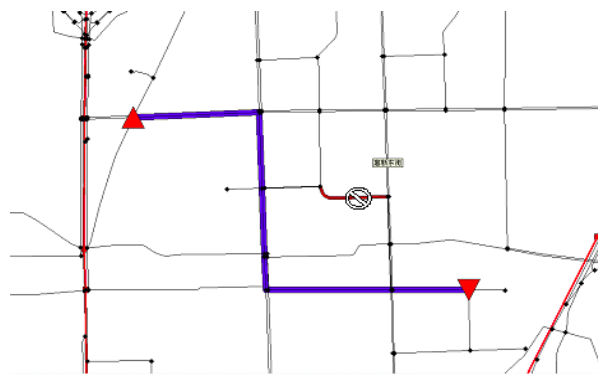


图 4.16 中心式车辆动态路径规划

通过本次实验，我们可以得出以下结论，自发式进行路径规划的车辆，不能实时的获得相应的交通信息，对于智能交通网中出现的相关交通状况，不能够进行实时的处理，导致交通堵塞的近一步加剧，使出行的代价值增加。而智能交通网中的以控制中心的导航方法，对多个车辆的动态路径进行了轨迹的规划，能够获得相应的实时交通信息，并对这些交通情况进行了有效的处理，能够有效的减缓交通堵塞的情况，提高道路路况的使用效率。

#### 4.4.4 协调车辆算法与堵塞道路数关系

对于智能交通网中，多车辆的协调路径规划过程中，自主式车辆的路径规划，不考虑车辆行驶的道路路径，对周围交通状态的影响，即没有车辆申请路径规划对交通状况的改变，产生对于始末点相同的目标节点，引起同一路径的规划。假设车辆不断增加，即会因此道路的交通堵塞现象。而基于路径规划中心式的控制，就会对多车辆的申请路径规划的这一问题进行解决，避免交通堵塞情况的产生。任意车辆行驶在道路路径中的变化，对道路的路径阻抗引起影响，当道路路径的车辆产生一定的影响时，车辆行驶的道路成本就会不断的提高，后申请的车辆道路路径规划到路径阻抗较小的道路，从而绕开相关的道路段，减少智能交通网中的堵塞现象。

为定量分析协调车算法的实验结果，道路交通状况的等级分为为 1, 2, 3, 4 等级，来对交通当前状况进行描述，等级越高，交通堵塞的现象就会越严重。

为便于定量描述实验结果，才用第四章采用的方法，将道路的交通状况分为 1, 2, 3, 4 四个等级，来描述交通的拥挤情况，等级越高，表示拥挤现象越严重。图 4.17 到图 4.20 表示交通等级的改变对交通道路车辆数量的增加变化情况。每一等级的实验

都进行了实验的统计，并对相关数据进行了曲线拟合分析。

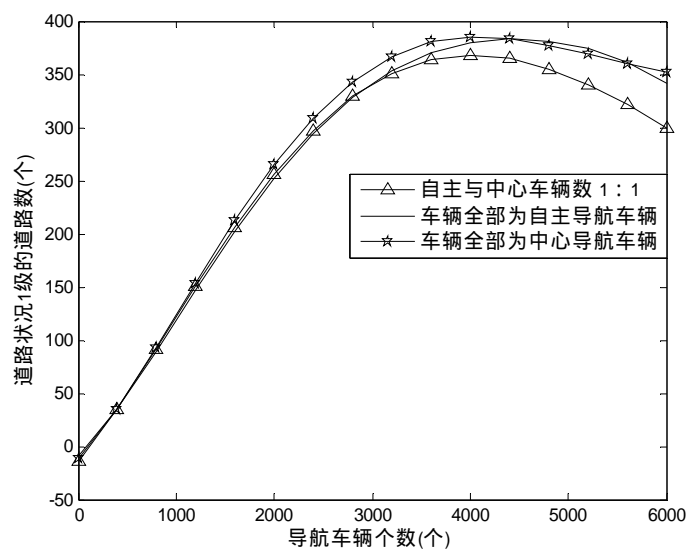


图 4.17 道路状况等级 1 与导航车辆数关

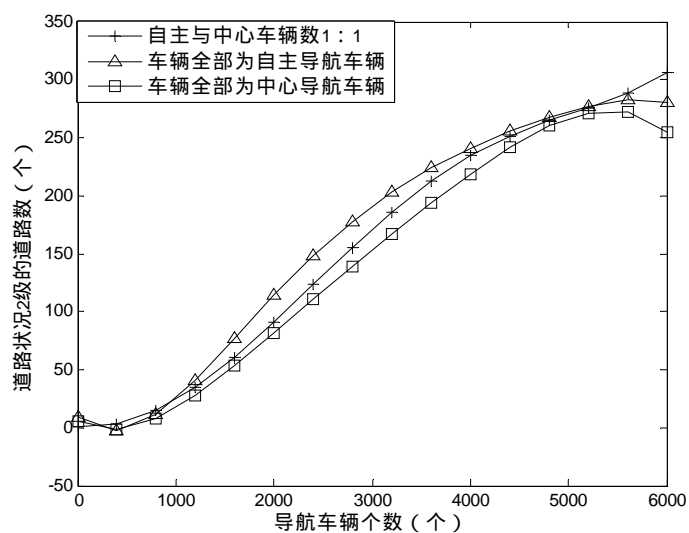


图 4.18 道路状况等级 2 与导航车辆数关系图

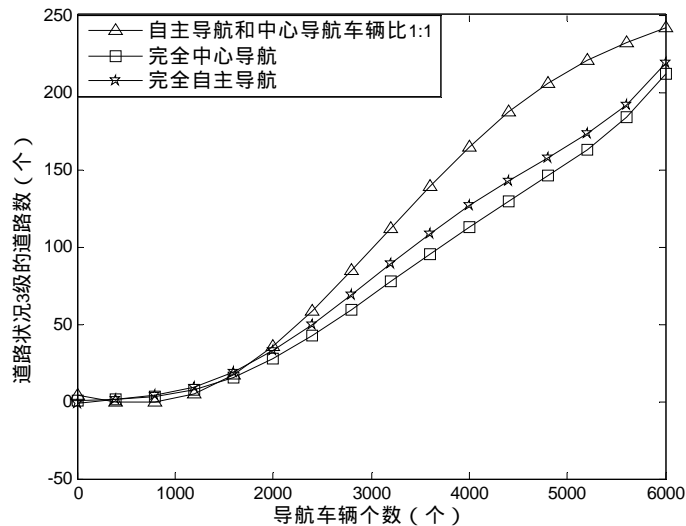


图 4.19 道路状况等级 3 与导航车辆数关系图

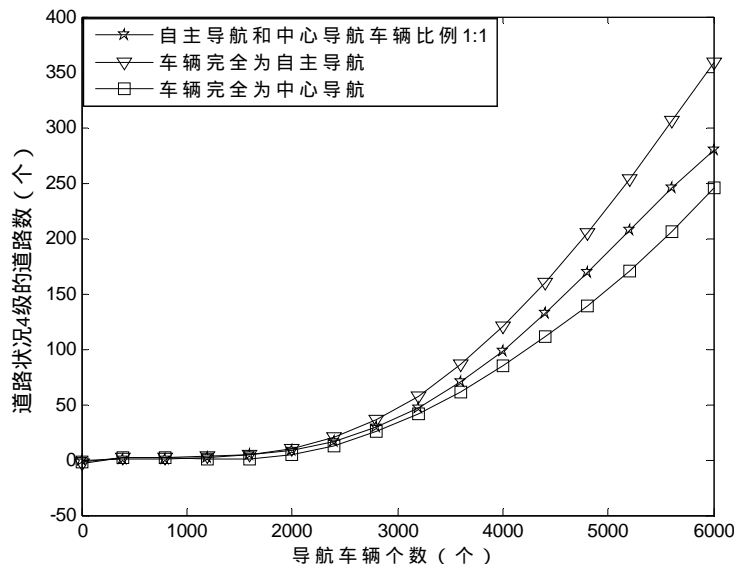


图 4.20 道路状况等级 4 与导航车辆数关系图

智能交通网中，申请道路交通路径规划的车辆数较小时，车辆选取的导航方式对交通的路段堵塞情况较小，这源于申请车辆较小，对道路智能网的动态路径规划并未产生相关的系统性。对车辆的导航选择方式进行比较后，可以发现当导航车辆数不断增加后，路径规划的中心式导航的道路拥挤情况增加的速度缓慢，当智能交通网中申请车辆的数量达到 6000 时，智能交通的中心式路径规划比自主路径规划产生的拥挤状况少了近 1/3。

交通事故和拥挤的道路数实验，相关价值函数是以用户的最优方式，即满足出行过程中出行者所产生的费用最小。出行者选择的是出行的相应费用较低，和避免交通

拥挤的道路路段。依据某一道路路径的行驶车辆数不断的增加，导致通过该道路的路径平均时间增加，道路的路径阻抗也就增加，可以使出行者选择该路段的数量减少，这种结果就是对道路路径的车辆进行了有效的控制，减少了智能交通网中的车辆拥挤数量。

因此，对车辆动态最优路径的规划考虑前车对系统的影响是有必要的，对后续车辆的路径规划，提高了车辆行驶的出行效率，改善了道路堵塞情况，提高交通道路路径的使用效率。

#### 4.4.5 协调车辆算法与费用关系

由于多车的中心路径规划方式，有效的减少了智能交通网中的堵塞道路数，提高了道路路径的使用效率，实现了整个智能交通网的最优。当车辆出行者选择的值函数为出行者的当前最优时，多车的中心式导航费用应该低于自主式车辆导航的费用。协调车辆的规划算法，对车辆平均出行时间进行了比较，得出的实验结果为图 4.21 所示。

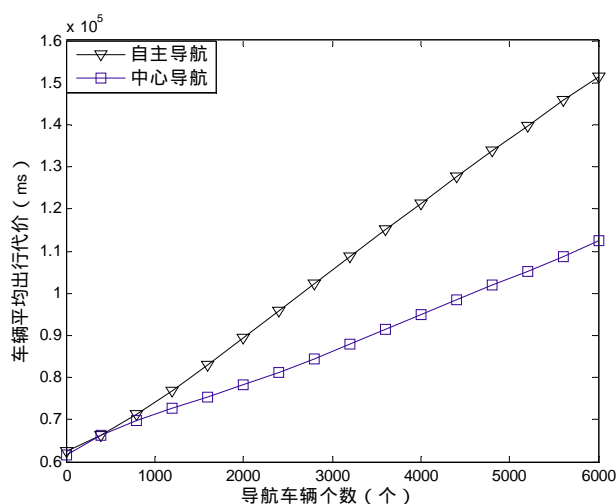


图 4.21 自主和中心式平均出行代价与导航车辆数关系图

图 4.21 中，可知申请车辆导航数量的增加，车辆的道路路径拥堵的数量不断增加，车辆行驶道路上的行驶速度降低，引起了车辆行驶过程中的出行代价的增加。对于智能交通网中电子地图的有限范围之内，用户的出行代价的变化比较缓慢，当道路路径中的车辆，达到一定数量时，用户的出行代价增长速度较快。通过实验的结果表明，基于智能交通网中的多车辆动态最优路径规划算法比自主式的静态最优路径规划算法相比，出行的平均代价降低。

#### 4.4.6 协调车辆的用户和系统最优实验

当车辆的路径规划过程中，价值函数取车辆行驶的出行者费用及交通道路堵塞情况最少的平衡点。4.4.3—4.4.5 是关于价值函数为用户的最优，通过调节出行者的费用及交通堵塞情况的权重，可以产生其他目标函数。两者之间的平衡权重方法是在动态协调规划算法中，调节车辆数对实际的道路阻抗的影响，而车辆行驶过程中的出行代价，还应按照实际的道路阻抗进行计算。改变系统的权重，可以增加车辆行驶的道路的车辆数，引起道路阻抗的改变。当道路行驶的车辆还未达到最大的通行能力时，道路的道路阻抗已经达到了最大的通行能力相等，以后申请的车辆将不会选择该条道路，可以减低该条路径上的拥挤情况。

智能交通网的道路路径中心式的规划中，应用协调车辆的规划算法，并对以出行者最优，及出行者和智能交通网系统之间平衡为价值函数，两种条件选择情况下的，随申请导航的车辆数增加时，道路拥挤等级为 4 的数量变化，如图 4.22 所示。

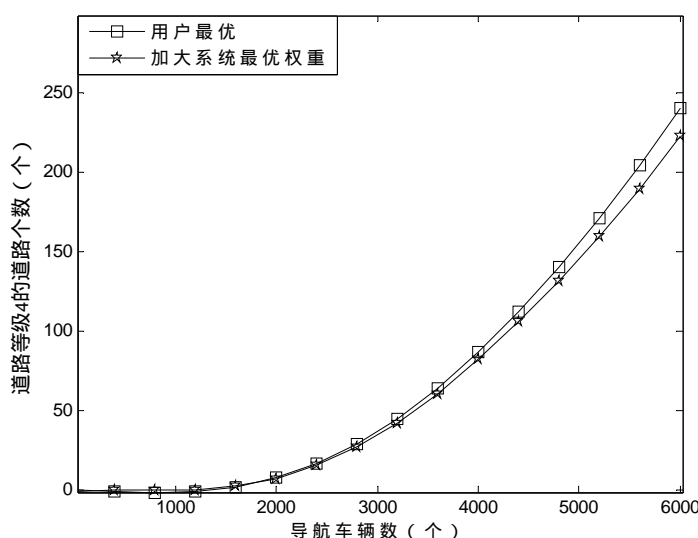


图 4.22 自主和中心式道路等级 4 的道路个数与导航车辆数关系图

如图 4.22 所示，当车辆行驶过程的目标函数为用户和智能交通网的系统平衡点时，智能交通网中的道路堵塞道路数减少约 5%~10%，继续增加交通道路网上的车辆数后，堵塞的道路数将会进一步减少。

如图 4.23 所示，对于目标函数为用户和智能交通网的系统平衡点时，对用户的出行代价进行实验研究。理论上，修改后的价值目标函数，会到来出行者出行的代价提高，且在申请导航车辆数量的增加，出行者的出行代价也将增加较快。图 4.23 看出，

当引入智能交通网系统作为多车协调的动态路径规划，车辆的出行代价升高，与估计分析是一致的。

继续增加车辆行驶的数量，能够改善道路的拥挤情况，但是用户的平均出行时间也同样要增加。因此在多车辆的最优路径规划算法中，根据实际情况，进行出行者和系统之间权重之间的调节，即道路阻抗较大时，提高系统的权重，当车辆较少时，提高出行者最优的权重。

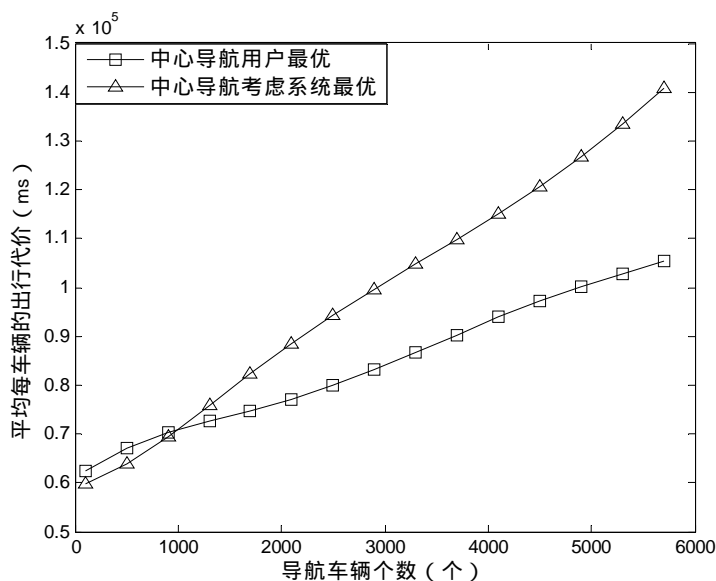


图 4.23 价值函数为行驶者和系统最优平衡点的出行代价图

## 4.5 本章小结

本章首先对动态路径规划系统的整体框架进行了相关的介绍，并依据相应的理论分析，对车辆动态最优路径规划问题划分为自主车辆和协调车辆，即单车和多车的动态最优路径规划。

建立了自主车辆的数学模型，并对模型进行求解分析、价值函数的规定，并研究了基于道路节点及基于周期的动态路径规划算法，对两种算法的相应目标机制函数和数学模型进行求解分析，并绘制了相应的算法实现流程图，分析了算法的实现难度值，实验的结果表示，两种算法可以有效的避免拥挤的交通路段，使车辆出行的出行代价降低，相对于车辆的静态路径规划算法而言，提高了车辆路径规划的实时效果和准确度。但是，在实际的交通情况下，导航车辆的不断增加，对于相同时间点，始末道路节点相同的，车辆没有考虑其他车辆对交通道路情况的影响，势必产生了交通堵塞的问题，因此在这一条件下，需要应用协调车辆的交通路径规划算法。



建立了协调车辆的数学模型，以及道路交通模型、车辆模型、价值函数以及道路的路径阻抗的相关计算公式。并对协调车辆的规划算法进行了程序上的实现。基于交通事故的协调车辆实验，验证了算法对交通堵塞道路的规避性；并通过车辆相对于堵塞道路数和费用的实验，考虑以出行者最优的价值函数，相对于车辆的静态路径规划算法，能够减少智能交通网的道路路径堵塞情况，有效减少了车辆出行者的代价；最优调整算法的目标函数，以用户最优和智能交通网最优的平衡点，并对出行代价和道路拥挤情况进行分析，发现用户的出行代价和拥挤的道路数在一定范围之内是可调的，可以通过改变用户最优和智能交通最优的两者权重，满足用户的实时动态最优路径规划。



## 第5章 总结和展望

经济和技術的高速发展，使车辆更加有可能进入普通家庭的生活中，扩展了人类活动的范围和路径，但是也给出行者提出了新的困难和挑战。城市交通道路的复杂性，固定意识的出行路径引发的严重交通堵塞，使出行者迫切需要获得正确的出行路径；论文基于智能交通网络，研究了车辆行驶过程中的最优路径规划策略，总结如下：

1、介绍了智能交通的基本组织框架，明确智能交通路网模型及其数据存储结构对车辆在智能交通的最优路径轨迹规划的重要影响。依据计算机图形学语言，建立了基本的路网模型方程。分析后发现基本方程在计算机存储空间利用问题和实际交通路网信息存在一定的不足，分析了道路路网中的交叉口信息、道路的种类和等级，建立了基于交通管制限制的转向限制路网模型，添加了转向限制列表。针对存储路网数据的问题，分别设计了基于图相邻矩阵数据存储结构和图相邻连接表数据存储结构，并通过编程语言实现了道路路口节点类、道路路径节点类及转向限制表类的功能点定义。

对智能交通的路网模型采用，分层存储的方法，建立了详细图层和略图层之间节点和路径的相关联系。该章节的研究为后续的 GIS 仿真平台的建立，车辆静、动态最优路径规划策略研究，提供基本的理论分析基础和数据结构，为路径规划的实验研究做提供必要的技术支持。

2、基于计算机处理的地图图形学信息（GIS），组件开发了智能交通车辆最优路径规划策略研究的仿真平台。对该仿真平台的开发工具的选和仿真平台的整体软件设计框架，并对该路径规划仿真平台的主要功能进行介绍。其次建立了智能交通网，静态路径规划数学模型，并设置了不同道路阻抗下的最优价值函数模型解。对几种经典的路径规划算法进行分析和比较，设计了两种静态最优规划算法：道路节点对向查询和交通道路网分层查询，并对两种算法进行了算法的复杂度和路径规划效率分析，并在所建立的车辆路径规划仿真平台进行算法实现。

在不同的智能交通网电子地图信息的存储数据结构，同一工况条件下，对经典的静态最优路径规划算法进行比较研究。一是单、双向 Dijkstra 算法路径规划实验中，在图相邻数据结果存储下比图相邻接表数据存储下的最优路径规划策略低；二是 A\*算法在比图相邻接表数据存储下，的查询最优路径的效率高于 Dijkstra 算法，A\*分层算法

的查询效率最高；三是智能交通网中存储电子地图的数据结构上，图相邻接表数据结构由于图相邻数据结构。主要的原因是邻接表数据结构对于电子地图的图形数据进行了预处理，主要包含任意节点的相关路径规划，查询某一节点的交通管制转向限制。最后比较车辆静态最优路径规划策略，并给出比较的结果，即在车辆在实际的路径规划中，可根据智能交通网电子地图图形的数据存储格式不同，选用相关的静态最优路径规划策略。

3、对动态路径规划系统的整体框架进行了相关的介绍，并依据相应的理论分析，对车辆动态最优路径规划问题划分为，自主车辆和协调车辆问题，即单车和多车的动态最优路径规划。

建立了自主车辆的数学模型，并对模型进行求解分析、价值函数的规定，并研究了基于道路节点及基于周期的动态路径规划算法，对两种算法的相应目标机制函数和数学模型进行求解分析，并绘制了相应的算法实现流程图，分析了算法的实现难度值，实验的结果表示，两种算法可以有效的避免拥挤的交通路段，使车辆出行的出行代价降低，相对于车辆的静态路径规划算法而言，提高了车辆路径规划的实时效果和准确度。但是，在实际的交通情况下，导航车辆的不断增加，对于相同时间点，始末道路节点相同的，车辆没有考虑其他车辆对交通道路情况的影响，势必产生了交通堵塞的问题，因此在这一条件下，需要应用协调车辆的交通路径规划算法。

建立了协调车辆的数学模型，并对道路交通模型，车辆模型，价值函数以及道路的路径阻抗的相关计算公式。并对协调车辆的规划算法进行了，程序上的实现。基于交通事故的协调车辆实验，验证了算法对交通堵塞道路的规避性；并通过车辆相对于堵塞道路数和费用的实验，考虑以出行者最优的价值函数，相对于车辆的静态路径规划算法，能够减少智能交通网的道路路径堵塞情况，有效减少了车辆出行者的代价；最优调整算法的目标函数，以用户最优和智能交通网最优的平衡点，并对出行代价和道路拥挤情况进行分析，发现用户的出行代价和拥挤的道路数在一定范围之内是可调的，可以通过改变用户最优和智能交通最优的两者权重，满足用户的实时动态最优路径规划。

在对智能交通网的车辆最优路径规划中，论文对相应的静、动态的最优路径进行了算法策略方法的研究，还需进一步所作的工作是：

1、智能交通网中，对道路路径进行交易通信息的预测关注。对交通新型的准确预

测，是动态路径最优规划的必要条件，这也是今后在动态的路径规划中必须要解决的关键性技术。因此对依据交通的历史信息情况，采用合作预测精度的方法是未来研究的一个课题。

2、智能交通网中的车辆交通路径规划，必须采用可靠性较高的数据通信协议，也是未来研究的一个课题。

智能交通网的动态多车协调性导航，也是智能交通发展的一个重要趋势，通过控制策略的相应研究，本文采用的静、动态算法可以提高车辆路径规划的效率，减少道路交通的堵塞程度和改善用户的出行费用，具有较高的实际应用价值。



## 参考文献

- [1] [美] 赵亦林 著, 谭国真 译. 车辆定位与导航系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 1999.
- [2] Roy L Courtney. A Broad View of ITS Standards in the US [C]. IEEE Conference on ITSC, 1997:529-536.
- [3] 陆化普. 智能交通运输系统[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [4] Institute of Transportation Engineers & US Department of Transportation ITS Joint Program Office. National ITS Architecture-The Concept[J]. ITE Journal, 1999(5):9-12.
- [5] 常青, 杨东凯, 寇艳红, 张其善. 车辆导航定位方法及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [6] David Levinson. The Value of advanced traveler information systems for route choice. Transportation Research Part C 11(2003):75-87.
- [7] 杨琪, 王笑京, 齐彤岩等. 智能交通系统标准体系原理与方法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [8] G. A. Giannopoulos The application of information and communication technologies in transport. European Journal of Operational Research 152(2004):302-320.
- [9] 高自友, 任华玲. 城市动态交通流分配模型与算法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [10] Broggi A, Bertozzi M, Fascioli A and Conte G. 王武宏, 沈中杰, 侯福国, 易冰 (译) 智能车辆—智能交通系统的关键技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [11] 杨兆升. 城市交通流诱导系统理论与模型[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [12] 富立, 范耀祖. 车辆定位导航系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [13] 张其善, 吴今培, 杨东凯. 智能车辆定位导航及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [14] 唐克双, 姚恩建. 日本ITS开发和运用的实例—名古屋基于浮动车信息的P-DRGS简介[J]. 城市交通, 2006, 4(3):74-76.
- [15] 杨殿阁, 卜健, 郑四发, 李克强, 连小珉. 车载导航系统的研究与实现[J]. 汽车技术, 2005(1): 1-4.
- [16] 蒋捷, 韩刚, 陈军. 导航地理数据库[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

- [17] 宋建华, 李治安, 郑兴. 导航数据库在 ITS 和 LBS 中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2006, 29(6):42-45.
- [18] 张小京. 车载导航产品的数字地图格式[J]. 全球定位系统, 2004: 6-9.
- [19] 韩刚, 蒋捷 等. 车载导航系统中顾及道路转向限制的弧段 Dijkstra 算法[J]. 测绘学报, 2002, 31(4):366-368.
- [20] 段莉琼, 雷大伟. 车辆自导航系统中加入道路转向限制的最短路径算法[J]. 海洋测绘, 2003, 23(5):12-15.
- [21] 任刚, 王炜 等. 带转向延误和限制的最短路径问题及其求解方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2004, 34(1):104-108.
- [22] 王丰元, 潘福全等. 基于交通限制的路网最优路径算法[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(1):92-95.
- [23] 郑年波, 李清泉等. 基于转向限制和延误的双向启发式最短路径算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(3):256-259.
- [24] 裴钟哲. 车辆导航系统的路线优化研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2004.
- [25] 刘春, 姚连璧. 车载导航电子地图中道路数据的空间逻辑描述[J]. 同济大学学报, 2002, 30(3): 346-351.
- [26] 刘春, 史文中, 刘大杰. 导航电子地图中道路数据的空间索引和组织[J]. 工程勘察, 2003, (1): 38-41.
- [27] 叶常春, 周兴铭. 导航数字地图数据组织方法和预取策略探讨[J]. 计算机工程与科学, 2004, 26(4): 39-41.
- [28] 丁捷 等. 汽车导航用电子地图的高效路网模型[J]. 汽车工程, 2003, 25(3): 232-235.
- [29] 方钰, 何启海. 移动导航系统数字地图数据的描述与组织[J]. 计算机应用, 2005, 25(11): 2673-2675.
- [30] 陆锋, 周成虎, 万庆. 基于特征的城市交通网络非平面数据模型[J]. 测绘学报, 2000, 29(4):334-341.
- [31] 陆锋, 周成虎, 万庆. 基于特征的城市交通网络非平面数据库的实现[J]. 测绘学报, 2002, 31(2): 182-186.
- [32] 陆峰, 周成虎, 万庆. 基于层次空间推理的交通网络行车最优路径算法[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(3): 226-232.



- [33] 张可, 刘小明, 王笑京. 车辆自动导航系统基本框架研究[J]. 北京工业大学学报, 2001, 27(1): 21-26.
- [34] 曹晓航. GPS 车载导航系统技术趋势浅析[J]. 现代测绘, 2006, 29(1): 14-17.
- [35] 宋薇. 基于 GPS\_GSM 车辆监控系统服务器设计与实现[D]. 吉林大学, 2006.
- [36] 《卫星定位车辆信息服务系统》第二部分: 车载终端与服务中心信息交换协议( 修订稿—征求意见稿 ) [S], 中华人民共和国信息产业部, 2005.
- [37] 冯林 等. 车辆监控系统中通信服务器性能优化设计与实现[J]. 计算机工程与应用, 2005:199-201.
- [38] 原仓周, 柳重堪, 张其善. 大规模车辆监控通信服务器的设计与实现[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(3):232-235.
- [39] 杜军平. SQL Server 2000 数据库开发[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [40] 方明. 车载导航终端定位数据处理与应用层通信协议设计[D]. 吉林大学, 2006.
- [41] 闫志强. 基于嵌入式技术的车载导航终端设计与实验研究[D]. 吉林大学, 2006.
- [42] 丁捷, 杨殿阁, 颜波, 李克强, 连小珉. 汽车导航用电子地图的高效路网模型[J]. 汽车工程, 2003, 25(3): 232-235.
- [43] 李挺, 杨殿阁, 罗禹贡, 颜波, 郑四发, 李克强, 连小珉. 受限路网中汽车行驶最优路径算法及优化实现[J]. 汽车工程, 2005, 27(6): 706-709.
- [44] 杨殿阁, 罗禹贡, 丁捷, 李克强,, 连小珉. 基于单线模型的交通车载电子地图[J]. 清华大学学报( 自然科学版 ). 2006, 46(5): 716-719.
- [45] 王延亮, 张玉娟. 城市导航电子地图的道路模型[J]. 测绘与空间地理信息, 2005, 28(3):62-64.



## 致 谢

本篇论文是在吉林大学丁同强老师指导下完成的，在硕士学习期间，丁同强老师给了我极大的帮助，在他的悉心指导下，我查阅了大量的资料，学习了相关的知识，对此课题有了比较深刻的了解。在整个硕士学习期间，丁老师指导我克服了很多困难，对我的课题提出了很多精辟的见解，大大开拓了我的思维。同时老师渊博的学术知识，严谨的治学精神以及实事求是的风格更将会令我受益终生。在此我向尊敬的丁同强老师致以由衷的感谢。

同时也要感谢吉林大学交通学院交通安全研究组，组内良好的学术氛围，积极进取的科研精神，为本人硕士期间的研究提供了一个良好的科研环境，感谢研究室的各位老师、师兄师姐、师弟师妹们。

此外，还要感谢李文波高级工程师等人在论文研究过程中给我很大帮助。最后再一次衷心的感谢在我学习成长过程中所有给予我关心、帮助、鼓励、批评的老师、亲人、同学和朋友们。