



华南理工大学  
South China University of Technology

# 硕士学位论文

## 区域协调路径集的优选方法 与信号控制模型研究

作者姓名	吴蔚
工程领域	交通信息工程及控制
校内指导教师	卢凯 教授
所在学院	土木与交通学院
论文提交日期	2021 年 4 月

**Research on Optimization Method and Signal Control**  
**Model of Regional Coordination Path Set**

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

**Candidate: Wu Wei**

**Supervisor: Prof. Lu Kai**

South China University of Technology

Guangzhou, China

分类号：U491.4

学校代号：10561

学 号：201820107579

华南理工大学硕士学位论文

# 区域协调路径集的优选方法 与信号控制模型研究

作者姓名：吴蔚

指导教师姓名、职称：卢凯 教授

申请学位级别：全日制学术型硕士

学科专业名称：交通信息工程及控制

研究方向：智能道路交通控制与管理

论文提交日期：2021 年 4 月 23 日

论文答辩日期：2021 年 6 月 6 日

学位授予单位：华南理工大学

学位授予日期： 年 月 日

答辩委员会成员：

主席：徐建闽

委员：张晓明、刘伟铭、卢凯、马莹莹

# 华南理工大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。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后果由本人承担。

作者签名：吴蔚

日期：2021年6月6日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属华南理工大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许学位论文被查阅（除在保密期内的保密论文外）；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。

本学位论文属于：

☐ 保密，（校保密委员会审定为涉密学位时间：\_\_\_\_年\_\_\_\_月\_\_\_\_日）于\_\_\_\_年\_\_\_\_月\_\_\_\_日解密后适用本授权书。

☒ 不保密，同意在校园网上发布，供校内师生和与学校有共享协议的单位浏览；同意将本人学位论文编入有关数据库进行检索，传播学位论文的全部或部分内容。

（请在以上相应方框内打“√”）

作者签名：吴蔚

日期：2021年6月8日

指导教师签名：李光

日期：2021年6月8日

作者联系电话：18813298120

电子邮箱：308873233@qq.com

联系地址(含邮编)：广州市天河区华南理工大学交通大楼 419(510640)

## 摘要

由于城市居民交通出行需求的不断增长，道路交通的方向性协调控制需求日益明显。为了实现城市交通信号控制的精细化，协调对象的选取不应停留在子区层面，而需要进一步细化到有向路径连线上。对此，本文以车辆轨迹数据作为数据支撑，以协调路径集作为研究对象，从协调对象的选取、协调模型的建立以及控制方案的评价等方面展开相关科学研究，着重区域协调路径集的构成与优选方法、面向区域协调路径集的信号控制模型、协调路径集控制效果的评价方法等。本论文的主要研究工作及研究成果如下：

1) 考虑控制区域内交叉口之间的方向性协调控制需求，通过定义协调路径、协调路径链与协调路径集，以及构成路径链的父路径与子路径，建立了一套可以反映出协调控制方向性需求的概念体系，并分析了协调路径链的计数方法；分别给出了利用轨迹数据和车牌识别数据的路径链生成方法，搭建 VISSIM 仿真平台，为后续研究工作提供数据支撑与方法验证。

2) 针对路网中车辆的轨迹分布，从路径链经过的交叉口数量（路径链长度）和所承载的交通流量的角度，分别制定了相应的协调路径集优选法则与流程；算例分析结果表明，该方法能够根据拟协调的交叉口数量和行驶路径流量，选出控制区域内流量较大的主要路径链，可进一步丰富控制子区与交叉口群的划分理论。

3) 考虑控制区域内交叉口之间的方向性协调控制需求，将协调路径集作为协调对象，基于 NEMA 双环相位结构建立信号控制模型，实现协调路径集的进一步优选，以及信号周期、信号相序、相位时间、相位差的综合优化；以协调路径的流量总和最大为目标，通过对各交叉口协调相位中心时刻点进行约束，求解最优信号控制方案；通过算例结果表明，该模型可以极大地保证了协调路径集的优化效果，满足路网中协调控制需求非对称性需求。

4) 考虑到路网交通运行状况与路段交通运行状况的联系，提出了一种基于路段权重系数的路网交通运行状况评价方法；通过定义权重系数，量化各个路段交通运行状况在整个路网中的权重大小，建立起路段、协调路径链、协调路

径集和路网交通拥堵指数的联系；通过算例表明，该方法能更加科学合理地对当前协调路径集交通状态进行判别，为协调路径集控制效果提供了一种新的评价方法。

**关键词：**协调控制；协调路径集；信号优化；车辆轨迹；交通状态评价

# Abstract

Due to the continuous growth of urban residents' travel demand, the demand for directional coordinated control of road traffic is increasingly obvious. In order to realize the refinement of urban traffic signal control, the selection of coordination objects should not stay at the sub-area level, but needs to be further refined to the connection of the directed path. In this regard, this paper uses the vehicle trajectory data as the data support, takes the coordinated path set as the research object, and carries out relevant scientific research from the selection of the coordinated object, the establishment of the coordination model and the evaluation of the control scheme, focusing on the composition and optimization method of the regional coordinated path set, the signal control model for the road network coordinated path set, the evaluation method of coordination path set control effect, etc..

The main scientific research work and the research results obtained are summarized as follows:

1) Considering the directional coordinated control requirements between intersections in the control area, by defining the coordinated path, the coordinated path chain and the coordinated path set, as well as the parent path and the sub path that constitute the path chain, a set of conceptual system was established which can reflect the directional requirements of coordination control, and the counting method of coordination path chain was analyzed. The method of generating path chain using trajectory data and license plate recognition data was given respectively. The VISSIM simulation platform was built to provide data support and method validation for subsequent research work.

2) According to the trajectory distribution of vehicles in the road network, from the perspective of the number of intersections (the length of the path chain) and the traffic flow carried by the path chain, the corresponding optimization rules and processes of coordinated path set are formulated respectively. The analysis results of the example show that the method can select the main path chain with the larger flow

in the control area according to the number of intersections to be coordinated and the flow of the driving path, which can further enrich the division theory of control sub-areas and intersection groups.

3) Considering the demand of directional coordinated control between intersections in the control area, the coordinated path set was taken as the coordinated object, and the signal control model was established based on the Ring-and-Barrier phase structure, and the comprehensive optimization of signal period, to realize the further optimization of the coordinated path set and the comprehensive optimization of the signal cycle, phase sequence, phase time and phase offset. In order to maximize the total flow of the coordinated path, the optimal signal control scheme was solved by constraining the coordinated phase center point of each intersection. The calculation results of the case show that this model can greatly ensure the optimization effect of the coordinated path set and meet the asymmetric demand of the coordinated control demand in the road network.

4) Considering the relationship between the traffic condition of the network and roads, an evaluation method of network traffic condition based on road weight coefficient was proposed. By defining the weight coefficient, the weight of the road traffic condition in the whole network is quantified, and the relationship among the traffic congestion indexes of road section, coordinated path chain, coordinated path set and road network was established. The example shows that the method can judge the traffic condition of the current coordinated path set more scientifically and reasonably, and provides a new evaluation method for the control effect of the coordinated path set.

**Keywords:** Coordination Control; Coordination Path Set; Signal Optimization; Vehicle Trajectory; Traffic Condition Evaluation



# 目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
目 录.....	V
第一章 绪论.....	1
1.1 论文研究来源.....	1
1.2 研究背景及意义.....	1
1.2.1 研究背景.....	1
1.2.2 研究意义.....	2
1.3 国内外研究现状.....	3
1.3.1 轨迹数据的应用.....	3
1.3.2 协调对象的选取.....	4
1.3.3 交通信号控制方法.....	5
1.3.4 交通运行状态评价.....	6
1.4 研究方案.....	8
1.4.1 研究目标.....	8
1.4.2 研究内容.....	8
1.4.3 技术路线.....	10
1.5 本章小结.....	11
第二章 路径集构成分析与路径链生成方法.....	12
2.1 协调路径集构成分析.....	12
2.1.1 协调路径集.....	12
2.1.2 父路径与子路径.....	15
2.1.3 路径链计数方法.....	17
2.2 路径链生成方法.....	20
2.2.1 基于轨迹数据的路径链生成方法.....	20
2.2.2 基于车牌识别数据的路径链生成方法.....	21
2.3 算例分析.....	22
2.3.1 VISSIM 仿真平台.....	22
2.3.2 路径链生成.....	27

2.4 本章小结 .....	30
第三章 区域协调路径集优选方法及敏感性分析 .....	31
3.1 协调路径集优选方法 .....	31
3.1.1 优选法则 .....	31
3.1.2 优选流程 .....	34
3.2 协调路径集优选方案 .....	35
3.2.1 法则 1 .....	36
3.2.2 法则 2 .....	38
3.3 敏感性分析 .....	39
3.3.1 法则 1 .....	39
3.3.2 法则 2 .....	43
3.4 本章小结 .....	46
第四章 面向区域协调路径集的信号控制模型 .....	47
4.1 相位结构 .....	47
4.2 模型建立 .....	49
4.2.1 约束条件 .....	49
4.2.2 目标函数 .....	53
4.3 算例分析 .....	54
4.3.1 基础数据 .....	54
4.3.2 模型求解 .....	56
4.3.3 仿真对比 .....	62
4.4 本章小结 .....	67
第五章 协调路径集控制效果的评价方法 .....	68
5.1 基于路段权重系数的交通运行状态评价方法 .....	68
5.1.1 路段权重系数 .....	68
5.1.2 路段及路网运行状态评价方法 .....	69
5.2 协调路径集交通运行状态的评价方法 .....	71
5.2.1 路径权重系数 .....	71
5.2.2 评价步骤 .....	72
5.3 算例分析 .....	75
5.3.1 路段交通运行状态评价 .....	75

5.3.2 协调路径集交通运行状态评价 .....	79
5.4 本章小结 .....	80
结论和展望.....	82
主要结论和创新点.....	82
研究展望.....	83
参考文献.....	84
附录.....	92
攻读硕士学位期间取得的科研成果.....	99
致 谢.....	101

## 第一章 绪论

### 1.1 论文研究来源

本论文研究来源于：城市路网协调路径集的形成机理与控制方法研究，国家自然科学基金项目，编号 61773168。

### 1.2 研究背景及意义

#### 1.2.1 研究背景

随着国民经济的飞速发展与居民收入的不断增加，人民生活水平的日益提高，机动化交通比例大大增加。根据公安部发布的数据，截止 2020 年底，全国机动车保有量达 3.72 亿辆，其中汽车 2.81 亿辆，全国共 70 个城市的汽车保有量超过百万辆，13 个城市超 300 万辆，3 个城市超过 500 万辆。交通需求与交通供给的不平衡，导致交通拥堵问题变得愈加严重。城市规模与道路红线的限制，导致扩大路网规模与增加道路设施等增加交通供给的措施难以满足不断增长的交通需求。因此，如何从交通管控入手，在现有交通组织和交通设施基础上，充分利用有限道路资源，采取科学有效的交通管控措施，提高路网的交通运行效率，是交通管理部门缓解交通拥堵问题的一大关键。

随着城市路网密度与交通出行量的增加，信号交叉口的数量也逐年增加，信号交叉口之间的相关关系及相互影响也愈来愈密切，由此决定了现代城市交通信号控制不仅仅是为提高单个交叉口或单条干道的通行能力与通行效率，更是要将提高整个控制区域的交通运输效率，减少整个区域内车辆停车延误与污染排放作为控制目标，实现绿波协调控制的网络化。我国交通信号控制的发展方向必将由单交叉口与独立干道的信号控制方式逐步向区域协调控制方式过渡与转变。

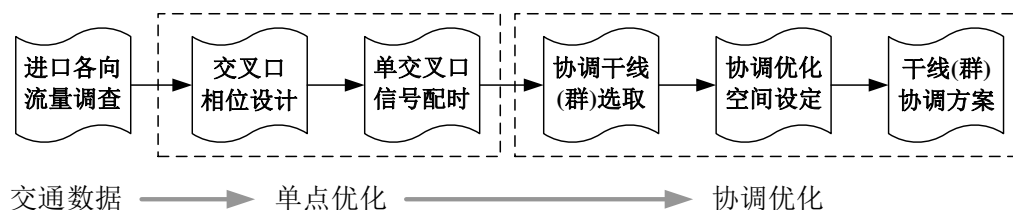
随着大数据技术的飞速发展，交通数据源日益丰富，交通数据量不断膨胀，数据的采集、存储以及处理手段也渐渐成熟，数据质量也有所提升。交通数据的有效性和准确性对交通信号优化效果起到决定性作用。车载 GPS、手机信令、视频卡口等检测精度的提高，使车辆轨迹数据得以获取。在未来，随着汽车电子标识的广泛使用，高渗透率、高精度、高质量车辆轨迹数据的获取将不再成为问题。因此，如何利用海量的轨迹数据进行区域信号控制，提高车辆运行效率，是未来研究的一大热点。

### 1.2.2 研究意义

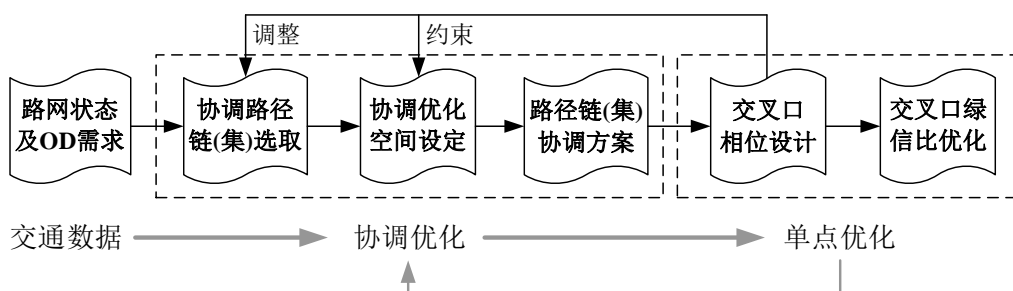
由于城市居民交通出行需求的不断增长，城市交通供需不平衡的矛盾日益凸显，城市交通问题日益严重，已成为制约城市发展、影响社会经济环境的重大社会问题。由于受到土地资源、财政能力的限制，城市道路建设难以跟上车辆增长的速度，因此采取科学有效的交通管控措施，以提高路网的交通运行效率。

传统的交通信号优化设计基本上都是遵循先“点”后“线”再“面”的自下而上设计流程，即首先着眼于单交叉口，使单交叉口运行效果达到最优后，再建立相应的干线及干线群协调控制模型，并在设定的协调优化空间内求解最优协调控制方案，如图 1-1 a)所示。

然而，在这种区域交通信号配时优化设计思路下，如果遵循单交叉口运行效果最佳的配时方案，再进行干道协调控制时将会非常受限，因此在进行区域协调控制时先实现单交叉口运行效果最优意义不大。因此，本文提出一种自上而下新型信号设计思路，从路网层面出发进行交通信号协调控制方案的顶层优化设计，根据路网上车辆运行轨迹确定协调控制的对象，并针对协调控制对象进行协调控制方案的设计，从而保证了协调对象的协调控制效益，实现路网整体运行效果的全局最优，如图 1-1 b)所示。



a) 传统的区域交通信号配时优化设计思路



b) 新型的区域交通信号配时优化设计思路

图 1-1 区域交通信号配时优化设计思路

本文将结合车辆时空轨迹数据和交通流量数据，通过构建协调路径集的概念体系，建立一套基于车辆时空轨迹数据的面向协调路径集的交通信号协调控制模型算法，以

满足城市交通信号控制的精细化需求；通过定义路段权重系数，结合车辆时空轨迹数据对路网交通运行状态进行分析评价，并对信号优化方案进行反馈。本文研究的方法可以实现城市交通信号协调控制的精细化，满足城市居民出行的方向性需求，对于实现区域信号控制整体最优和提高协调路径集通行效率具有重要意义。

### 1.3 国内外研究现状

本文研究主要涉及四个方面：（1）轨迹数据的应用；（2）协调对象的选取；（3）交通信号控制方法；（4）交通运行状态评价。因此从以下四个方面对相关国内外研究现状进行阐述。

#### 1.3.1 轨迹数据的应用

车辆轨迹数据作为一种重要的交通数据，可以用于提取和计算一些交通状态参数，是进行城市交通控制与管理的基础数据之一。轨迹数据是时空环境下，在对运动过程中的移动对象进行采样时，所获得的包括采样时间、样点位置、速度等数据信息<sup>[1]</sup>，能反映路网中的交通状态。近年来，随着定位技术的发展和普及，如全球定位系统（GPS, Global Positioning System）、北斗卫星导航系统（BDS, BeiDou Navigation Satellite System）和无线蜂窝网等，以及无线互联网技术的推动和智能终端设备的不断创新，轨迹数据的质与量均有了显著提升<sup>[2]</sup>。因此，如何充分利用轨迹数据并有效挖掘其背后的信息成为一个研究热点。

在交通参数提取方面，卢开明等<sup>[3]</sup>利用多源轨迹数据，分析车辆运行特性，构建交叉口运行综合评价基本特征指标提取方法并进行验证，为信号交叉口运行评价提供一种新思路；唐克双等<sup>[4]</sup>利用车辆轨迹数据，设计速度、加速度、加速度变化率等关键行为参数统计方法，通过分析驾驶行为特征，对在信号控制交叉口的车辆危险驾驶行为进行判定；Comert G<sup>[5]</sup>通过分析排队长度估计误差与交通流中浮动车百分比之间的规律，提出了一种基于浮动车基本信息（如位置、速度、时间等）的排队长度的估计方法，实现实时滚动的排队长队估计，并利用 VISSIM 进行模拟评估；C Nie<sup>[6]</sup>提出利用车牌识别数据测量的不同交通状况动态以确定控制参数；邬群勇等<sup>[7]</sup>提出了基于出租车轨迹数据的道路交通拥堵指数计算方法，并通过定义道路拥堵值可疑度，对异常的拥堵指标进行修正；Goodall N.J 等<sup>[8]</sup>提出了一种适用于低采样条件下的车辆位置预测算法，利用

轨迹数据，根据附近采样车辆的加速度和车辆跟随模型来预测非采样车辆的位置。

在交通信号控制方面，Yin J<sup>[9]</sup>提出了一种队列强度自适应（QIA）算法，以车辆轨迹数据为唯一输入进行自适应信号控制；Ilgin Guler 等<sup>[10]</sup>结合车辆轨迹数据和检测器数据，以交叉口延误或停车次数最小为目标，提出了一种交叉口交通控制算法，以提高交叉口通行效率；Day C.M 等<sup>[11]</sup>根据浮动车轨迹数据进行虚拟检测，计算出车辆的到达率，利用到达率实现相位差优化，并通过与实际检测器的优化结果对比，发现该模型优化相位差的精度较高；Tiaprasert K 等<sup>[12]</sup>利用离散小波变化进行车辆排队长度估计，提出了基于浮动车轨迹数据的自适应信号控制算法，并通过 VISSIM 仿真验证了该模型对定时控制和自适应控制的有效性；He X 等<sup>[13]</sup>将最优控制问题转化为非线性优化问题，基于轨迹数据建立车辆最佳行驶速度的模型，求解车辆最佳行驶速度方案，提供车辆通行效率。

综上所述，虽然在基于轨迹数据的交通参数提取和交通信号控制方面都进行了大量研究并取得了显著成果，但仍面临着以下几方面的挑战：（1）轨迹数据规模庞大且具有多样性，如何对规模大、类型多的轨迹数据长期存储，成为了交通控制应用所面临的严峻问题；（2）由于技术上的限制，目前采集的轨迹数据存在渗透率低、准确度差等问题，如何对轨迹数据进行清洗，减小低渗透率带来的影响，成为轨迹数据应用所面临的挑战；（3）在面对规模庞大且冗杂的基础轨迹数据，在不同的场景下，根据不同需求筛选轨迹数据，建立模型对轨迹数据进行深度挖掘，提取有效信息；（4）轨迹数据的广泛应用将给交通控制理论研究带来巨大变革，基于多源轨迹数据的交通需求预测、交通流分析等方面的研究将成为新的发展趋势。

### 1.3.2 协调对象的选取

随着路网交通信号控制精细化管理要求的日益提高，区域协调控制需求的方向性要求也愈加明显，因此如何进一步细化交通信号控制的层次结构，使之能够直接反映出各路段连线的不同协调控制需求，是现代交通控制所面临的一个基础性问题。

现有的协调设计对象选取多是以控制子区<sup>[14]</sup>或交叉口群<sup>[15]</sup>为主，其本质是研究交叉口的归属问题。不少国内外学者分别考虑路口间距<sup>[16,17]</sup>、交通流量<sup>[16,18]</sup>、交通密度<sup>[19]</sup>、排队长度<sup>[20,21]</sup>、信号周期<sup>[20,21]</sup>、信号相位<sup>[22]</sup>、交通状态<sup>[23]</sup>以及饱和度<sup>[24,25]</sup>等因素对交叉口关联度进行分析，并以此作为控制子区与交叉口群划分的依据。现有的相关研究多是利用单个或多个影响因素，通过建立关联度模型<sup>[20-22]</sup>来综合评价交叉口之间

的关联性强弱，控制子区与交叉口群的划分算法主要包括遗传算法<sup>[26]</sup>、模糊算法<sup>[27]</sup>、Newman 算法<sup>[28]</sup>、Ncut 算法<sup>[29]</sup>、聚类算法<sup>[30-32]</sup>。例如，卢凯等<sup>[26]</sup>提出了一种快速划分控制子区的方法，利用降维处理和遗传算法解决划分过程中出现的维数灾难问题；田秀娟等<sup>[28]</sup>通过对交叉口间关联性影响因素进行综合分析，利用改进的 Newman 算法实现了面向不同时段交通特性的控制子区动态划分；曲大义等<sup>[32]</sup>在传统关联度模型的基础上，考虑了车辆的离散性、阻滞性及 OD 分布，建立了路径关联度模型与基于层次聚类法的交叉口群动态划分方法；段后利等<sup>[33]</sup>考虑车队行驶的离散性，建立了基于超图划分算法的控制子区划分模型，并通过实际路网分析了控制子区划分算法在高峰与平峰时段的适用性；别一鸣等<sup>[34]</sup>根据饱和度分析了不同状态下的子区划分目标与优先级问题，建立了关联度模型和子区划分算法，提出了控制子区划分框架及动态划分策略。

综上所述，现有的协调设计对象优选方法多以交叉口之间关联度大小作为参考依据，通过确定交叉口的归属特性，对控制子区或交叉口群进行划分，而很少差异化对待控制区域内甚至交叉口之间的方向性协调控制需求，难以解决控制子区内协调路线之间的异质性问题。因此需要对控制子区与交叉口群进行再细化，充分结合路径上的交通需求及其交叉口之间的可协调性，实现对区域交通协调设计对象的进一步优选。

### 1.3.3 交通信号控制方法

由于城市居民交通出行需求的不断增长，城市交通供需不平衡的矛盾日益凸显，城市交通问题日益严重，需采取科学有效的交通管控措施，以提高整个控制区域的交通运行效率。我国交通信号控制的发展方向必将由单交叉口与独立干道的信号控制方式逐步向区域协调控制方式过渡与转变。

现有的干道协调控制方法多以数解法<sup>[35-41]</sup>和模型法<sup>[42-56]</sup>为主。在数解法方面，王殿海等<sup>[35]</sup>剖析了经典绿波数解法的优缺点并修正了相位差计算方法、绿波带宽计算方法以及理想交叉口与实际交叉口的匹配方法；卢凯等<sup>[36-40]</sup>提出了针对不同放行模式和不同绿波带型的双向绿波数解算法。在模型法方面，Little 等<sup>[42-44]</sup>率先提出了半整数相位差干线信号协调控制方法，并以交通流量为带宽权重建立了 Maxband 绿波模型；Gartner 等<sup>[45-49]</sup>在 Maxband 绿波模型的基础上，考虑了路段带宽的差异性，以路段流量及绿波带宽需求为依据设置路段的带宽权重，提出 Multiband 绿波模型；Ma 等<sup>[50]</sup>提出多模式、可分离的 PM-BAND 干线绿波模型，将干线分段和信号协调同时考虑。



区域绿波模型以干道绿波控制模型为基础,允许干线交叉、甚至闭环。因此,区域绿波模型需考虑网络拓扑结构以及网络节点的相位约束。在已有的区域协调控制研究中,根据优化目标的不同可分为:基于绿波带优化法<sup>[57-60]</sup>以及基于交通流模拟的效益指标(延误、如停车次数、饱和度、排放等)优化法<sup>[61-62]</sup>。徐建闽等<sup>[61]</sup>构建了以总延误最小为目标的区域协调控制双层规划模型,实现对公共周期、绿信比和交叉口相位差的优化,但无法优化相位相序;Lu 等<sup>[63]</sup>提出相位中心时刻点的概念,以交叉口实际绿灯中心时刻与理想绿灯中心时刻的时间差的余弦函数作为优化指标建立区域绿波协调控制优化模型,实现公共周期、相位相序、相位时间以及相位差的综合优化,但仅考虑进口单放这一种放行方式;王昊等<sup>[59]</sup>以网络绿波带宽加权和最大为目标,建立了混合整数线性规划的网络绿波模型,通过约束松弛获得网络绿波控制模型的最优解;Yan 等<sup>[60]</sup>根据车辆轨迹挑选出路径集,以路径集连续绿波带宽最大为目标建立区域绿波控制模型。

然而,现有的绿波协调控制模型算法往往需要事先确定各交叉口协调相位的绿信比分配方案,难以体现出绿信比优化对于绿波协调控制的作用,无法实现绿信比(相位时间)与公共信号周期、相位相序、相位差的共同优化。此外,目前的绿波协调控制模型主要仅适用于干道交通信号协调控制,能够针对实际路网实现区域交通流的组合信号优化模型较少,如何建立同时面向各股待协调交通流的区域绿波协调控制模型还有待进一步研究。

#### 1.3.4 交通运行状态评价

城市道路的拥堵程度能够借助交通状态评价指标反映出来,而各类交通参数又是后者的根基。在道路交通运行状态评价方面,许多国内外研究机构做了多视角的探究。美国《道路通行能力手册》(Highway Capacity Manual 2000)中使用饱和度(V/C)、交叉口延误及道路服务水平(Level of Service, LOS)实现道路运行质量综合评价;美国德克萨斯州交通研究所先后提出采用行程时间指数<sup>[64]</sup>(TTI, Travel Time Index)和道路交通拥挤度指数<sup>[65]</sup>(RCI, Roadway Congestion Index)来评价道路交通运行状态。日本提出拥挤度<sup>[66]</sup>(CD, Congestion Degree)作为交通运行状态的评价指标,即路段实际交通量与基准交通量之比。澳大利亚采用拥堵指数<sup>[67]</sup>来评价道路交通拥堵状况,即在路段长度及路段速度限制情况下实际旅行时间和自由状况旅行时间的差值。还有一些国家以行驶速度<sup>[68]</sup>、车道占有率<sup>[69]</sup>等作为交通运行状态的衡量指标。而在我国,2002 年公安

部在《城市交通管理评价指标体系》中对城市主干路的交通运行状态进行了定义，并将其划分为 4 个等级<sup>[70]</sup>；2011 年，北京市交通委提出了交通拥堵指数的概念，并将其划分为 5 个等级<sup>[71]</sup>。

此外，针对交通运行状态评价指标及划分标准，也有不少国内外学者进行了大量的研究。一方面进行了交通运行状态评价指标的选取和量化方法的研究，包括流量<sup>[72]</sup>、速度<sup>[73-74]</sup>、密度<sup>[75]</sup>、延误率指数<sup>[76]</sup>、饱和度、拥挤度<sup>[77]</sup>、占有率<sup>[78-79]</sup>等；另一方面确定交通运行状态等级的划分标准，如畅通、轻度拥挤、重度拥挤等。

达庆东等<sup>[78]</sup>通过流量和占有率的相位角来划分交通运行状态，并根据相邻交通状态点之间的关系将交通状态分为三类；皮晓亮等<sup>[80]</sup>采用模糊 k 均值聚类方法对车辆流量、路段平均速度、道路占有率进行聚类分析，并对交通状态的分类标准进行了研究；任其亮等<sup>[81]</sup>基于流量、速度、占有率等基础数据选取特征数据，通过聚类分析对交通状态进行分类；于荣等<sup>[82]</sup>通过选取流量、速度、占有率等交通状态特征参数，提出基于 SVM 的交通状态模式识别以提高分类精度；黄艳国等<sup>[83]</sup>考虑路段等级系数和重要度系数确定交通状态权重系数，建立路网状态模型，对路网交通运行状态进行分级；韦清波等<sup>[84]</sup>综合考虑天气和特殊日等因素对交通拥堵的影响，建立基于 kNN 算法的交通拥堵指数预测模型，实现对道路交通运行状态的研判；李泽钧等<sup>[85]</sup>利用聚类方法对区域拥堵的时空特征进行分析，建立区域拥堵评价模型，对重点区域的运行状态进行分级。

在交通信号控制效果的评价方面，Sarvi 等<sup>[86]</sup>通过分析浮动车数据的时空分布特征，利用实际交通流对路网控制效果进行评估；Mekky<sup>[87]</sup>以路口和路段评价为基础，提出了一种分布式评价模型，从而实现控制效果评价；Porikli 等<sup>[88]</sup>通过视频检测数据的离散余弦变化，建立隐马尔科夫模型实现路网控制效果的判别；于德新等<sup>[89]</sup>通过建立基于延误、停车次数、排队长度和通行能力的多目标评价函数，对交通信号控制效果进行评价。

综上所述，在交通运行状态评价指标的选取及划分标准的研究上，国内外已经取得了很大的进展并得以应用。然而由于不同国家和地区的交通环境、车辆组成及车辆性能等方面存在差异，交通流基础数据也不同，因此选取的评价指标和划分标准也有所不同，尚未形成统一标准，使得评价结果可能存在一定的差异性。

## 1.4 研究方案

### 1.4.1 研究目标

本文将以车辆轨迹数据作为数据支撑，以协调路径集作为研究对象，从协调对象的选取、协调模型的建立以及控制方案的评价等方面展开相关科学研究，着重研究协调路径集的构成与优选方法、面向区域协调路径集的协调控制模型、协调路径集的控制效果评价方法等，研究目标如下：

- 1) 通过研究“协调路径集的构成分析”，建立一套可以反映出协调控制方向性需求的概念体系，进一步丰富控制子区与交叉口群的划分理论；
- 2) 通过研究“区域协调路径集优选方法”，确定路网中协调路径的优化组合，为路网交通信号的协调优化与控制策略设计指导；
- 3) 通过研究“面向路网协调路径集的信号控制方法”，实现路网交通信号协调控制的整体设计，为路网协调路径集的联动控制提供设计框架；
- 4) 通过研究“协调路径集的控制效果评价方法”，实现对协调路径集交通状态进行判别，为协调路径集控制效果提供一种科学的评价方法。

### 1.4.2 研究内容

#### 一、本论文的研究内容

##### (1) 协调路径集的构成分析

考虑到现有的交通控制子区划分方法无法反映控制区域内交叉口之间的方向性协调控制需求，通过定义协调路径、协调路径链与协调路径集，以及构成路径链的父路径与子路径，建立了一套可以反映出协调控制方向性需求的概念体系。

##### (2) 区域协调路径集的优选方法

针对路网中车辆的轨迹分布，从路径链经过的交叉口数量（路径链长度）和所承载的交通流量的角度，分别制定了相应的协调路径集优选法则与流程。

##### (3) 面向路网协调路径集的信号控制方法

通过分析 NEMA 双环相位结构，选取公共信号周期、各交叉口相位时间、相位中心时刻点等作为优化变量，研究了信号配时参数之间的约束关系，以所能协调的车辆数最大为目标，建立了一种面向协调路径集的区域绿波协调控制优化模型，实现协调

路径集的进一步优选及交通信号控制参数的优化。

### （4）协调路径集控制效果的评价方法

考虑到路网交通运行状况与路段交通运行状况的联系，通过定义权重系数来量化各个路段交通运行状况在整个路网中的权重大小，提出了一种基于路段权重系数的路网交通运行状况评价方法，对当前协调路径链（集）及路网交通状态进行判别，为协调路径集控制效果提供了一种新的评价方法。

## 二、章节结构安排

### 1) 第一章 绪论

首先介绍本文的研究来源、研究背景及意义，通过对现阶段的主要交通问题的分析，引出区域协调控制对提高道路通行效率的重要性；然后通过分析国内外轨迹数据获取及应用、路网交通运行状态评价、协调对象的选取和区域协调方案设计的研究现状，总结研究进展及存在的不足；最后对研究目的、研究框架和研究思路进行综合阐述。

### 2) 第二章 路径集构成分析与路径链生成方法

考虑控制区域内交叉口之间的方向性协调控制需求，通过对协调对象进行分解细化，给出协调路径（包括父路径、子路径）、协调路径链、协调路径集的概念，以及协调路径链的计数方法；提出基于轨迹数据及车牌识别数据的路径链生成方法，并搭建基于 VISSIM 的车辆数据获取仿真平台，获取车辆轨迹数据和车牌识别数据，对出行链生成方法进行进一步验证，同时为后续研究提供数据支撑和算法验证平台。

### 3) 第三章 区域协调路径集优选方法及敏感性分析

针对路网中车辆的轨迹分布，从路径链经过的交叉口数量（路径链长度）和所承载的交通流量的角度，分别制定相应的协调路径集优选法则与流程，并分析流量波动对协调路径集优选结果的影响。

### 4) 第四章 面向区域协调路径集的信号控制模型

根据协调路径集初步优选结果，基于 NEMA 双环相位结构建立一种非饱和交通状态下的区域绿波协调控制优化模型，实现协调路径集的进一步优选及交叉口的周期、相位相序、绿信比、相位差等交通信号参数的优化。

### 5) 第五章 协调路径集控制效果的评价方法

考虑到路网交通运行状况与路段交通运行状况的联系，通过定义权重系数，量化

各个路段交通运行状况在整个路网中的权重大小，提出一种基于路段权重系数的路网交通运行状况评价方法。同时，将此评价方法进一步延申至协调路径集体系中，实现对协调路径集控制效果评价。

## 6) 结论与展望

总结论文的成果与创新点，分析本文研究中存在的不足，结合各相关研究要点对今后研究工作提出展望。

### 1.4.3 技术路线

本文将以车辆轨迹数据作为数据支撑，在分析车辆时空轨迹的基础上，以协调路径集作为研究对象，从协调对象的选取、协调模型的建立以及控制方案的评价等方面展开相关科学研究。通过算例和仿真分析，验证本论文方法的适应性。本论文的技术路线如下图所示。

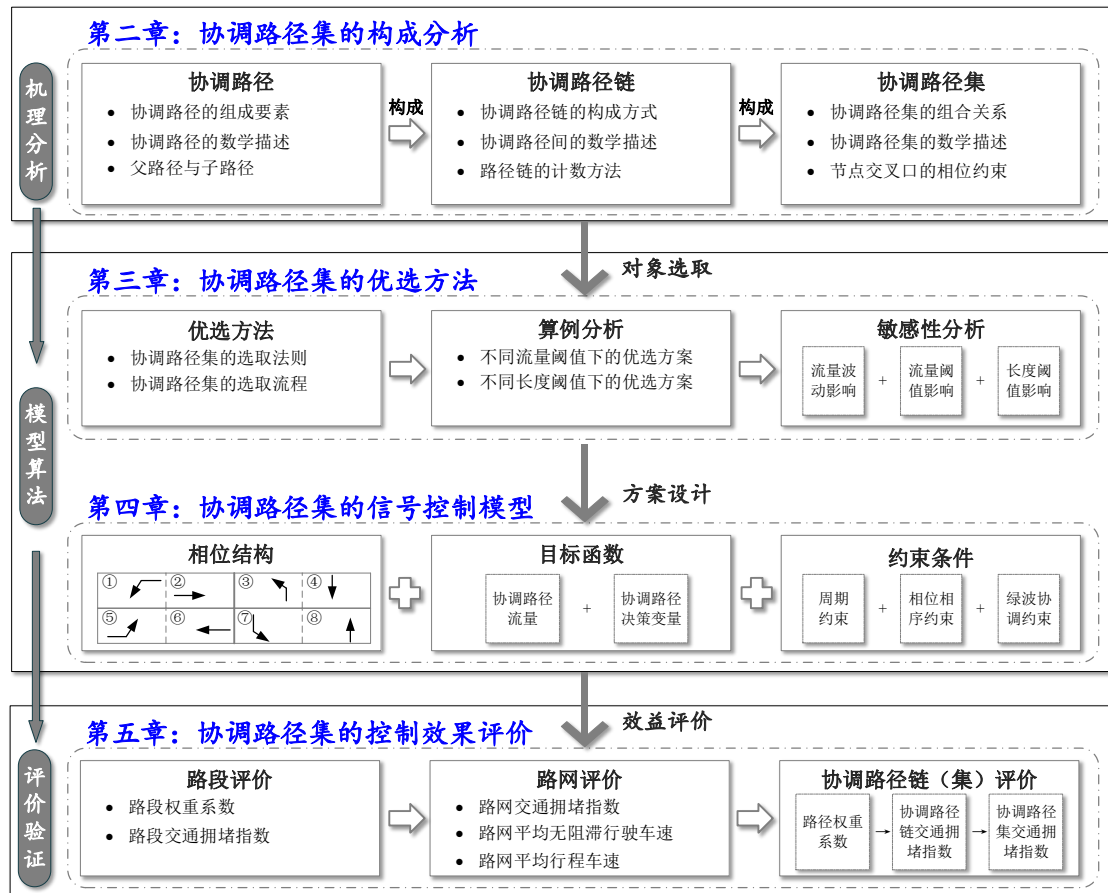


图 1-2 论文研究路线图

## 1.5 本章小结

本章首先对本文的研究来源、研究背景及意义进行阐述，通过分析现阶段的主要交通问题，引出区域协调控制对提高道路通行效率的重要性；并通过分析国内外轨迹数据获取及应用、协调对象的选取、区域协调方案设计和交通运行状态评价的研究现状，总结研究进展及存在的不足；最后对研究目标、研究框架和研究思路进行综合阐述。

## 第二章 路径集构成分析与路径链生成方法

由于城市居民交通出行需求的不断增长，道路交通的方向性协调控制需求日益明显。为了实现城市交通信号控制的精细化，协调对象的选取不应停留在子区层面，而需要进一步细化到有向路径连线上。考虑控制区域内交叉口之间的方向性协调控制需求，通过定义协调路径、协调路径链与协调路径集，以及构成路径链的父路径与子路径，建立了一套可以反映出协调控制方向性需求的概念体系，并分析了协调路径链的计数方法。同时，分别给出了利用轨迹数据和车牌识别数据的路径链生成方法。最后搭建 VISSIM 仿真平台，为后续研究工作提供数据支撑与方法验证。

### 2.1 协调路径集构成分析

#### 2.1.1 协调路径集

例如，某控制区域  $R$  由 11 条道路  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $\dots$ 、 $A_{11}$  相交而成，其中包含  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $\dots$ 、 $I_{28}$  共 28 个交叉口，如图 2-1 a) 所示，通过子区划分方法将其划分成 3 个控制子区  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ ，如图 2-1 b) 所示。

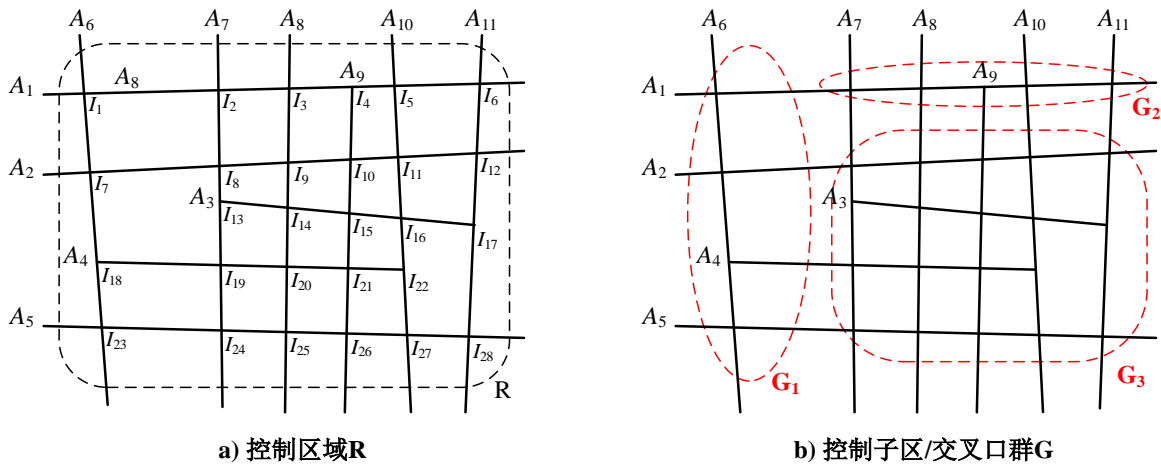


图 2-1 控制区域与控制子区

假定在控制子区  $G_3$  中，行驶线路  $L_1$ 、 $\dots$ 、 $L_9$  上的交通流量较大、协调控制需求较高，需选取它们作为协调对象，如图 2-2 所示，为此定义协调路径、协调路径链、协调路径集，其概念说明如下：

**[定义 1] 协调路径：**协调路径是一条连接上下游交叉口相关进出口道的有向连线，它既反映了相邻交叉口之间的有向关联，也代表了需要进行协调设计的行驶车流。任

意一条协调路径将包含两个信号控制交叉口，通过信号交叉口节点实现其与上下游协调路径的互连。

**[定义 2] 协调路径链：**协调路径链是一条由若干协调路径首尾相连所构成的有向连线，它代表了一条需要进行协调设计的行驶路线。两条协调路径链之间可以存在一个或多个交叉节点，通过对交叉节点所对应的信号交叉口设置相位时间基点约束条件，从而建立起协调路径链之间的交叉关系。

**[定义 3] 协调路径集：**协调路径集是一个由若干条协调路径链所构成的相交连线集合，它能表示出路网中所有需要进行协调设计的行驶路线。在协调路径集中，路径链数目越多、长度越长则越有利于扩大协调控制的范围，但与此同时协调路径链之间的交叉节点约束条件也将增多，从而降低相应协调路线的控制效果。

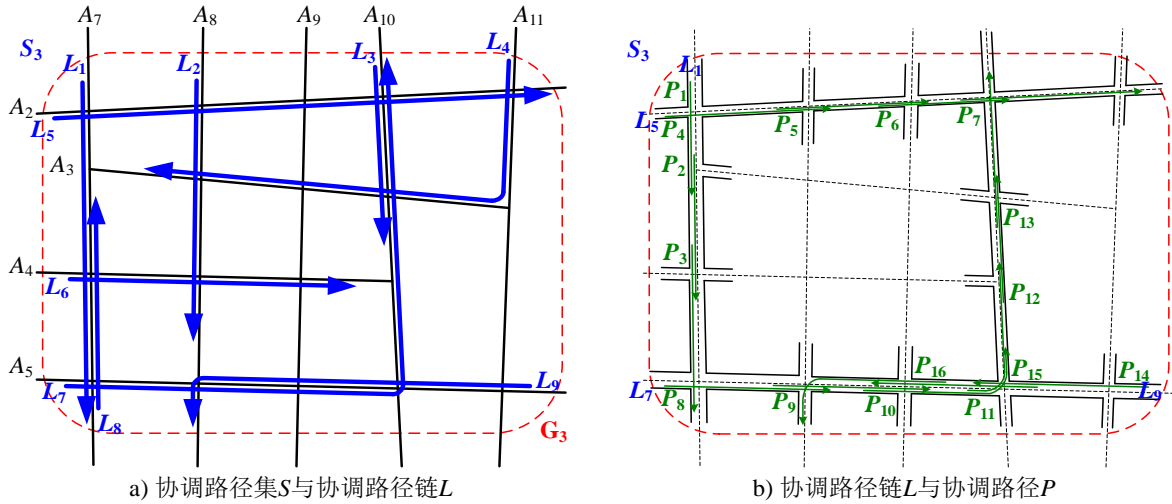


图 2-2 协调路径集体系

在此，将协调路径命名为  $P_{(x, x_a \rightarrow x_b; y, y_a \rightarrow y_b)}$ ，其中  $x$  与  $y$  分别表示协调路径所经过的上游与下游交叉口编号， $x_a$  与  $x_b$  分别表示协调路径穿过上游交叉口  $x$  的进口道与出口道编号， $y_a$  与  $y_b$  分别表示协调路径穿过下游交叉口  $y$  的进口道与出口道编号；将协调路径链命名为  $L_{(x, x_a \rightarrow y, * \rightarrow \dots \rightarrow z, z_b)}$ ，其中  $x$ 、 $y$ 、 $z$  表示协调路径链经过的交叉口编号， $x_a$  表示协调路径链进入第一个交叉口  $x$  的进口道编号， $z_b$  表示协调路径链离开最后一个交叉口  $z$  的出口道编号。

以图 2-3 所示的协调路径与协调路径链为例，协调路径  $P_{(1, 4 \rightarrow 2; 2, 4 \rightarrow 2)}$  表示选取从交叉口  $I_1$  西进口至交叉口  $I_2$  东出口的车流进行协调设计，其包含信号交叉口  $I_1$  与  $I_2$ ；协调路径  $P_{(2, 4 \rightarrow 2; 3, 4 \rightarrow 1)}$  表示选取从交叉口  $I_2$  西进口至交叉口  $I_3$  北出口的车流进行协调设计，其



包含信号交叉口  $I_2$  与  $I_3$ ；通过交叉口节点  $I_2$  将协调路径  $P_{(1,4 \rightarrow 2; 2,4 \rightarrow 2)}$  与  $P_{(2,4 \rightarrow 2; 3,4 \rightarrow 1)}$  相连，即可构成协调路径链  $L_{(1,4 \rightarrow 2; * \rightarrow 3,1)}$ ，其表示将选取从交叉口  $I_1$  西进口至交叉口  $I_3$  北出口的车流进行协调设计。协调路径链既可以由若干协调路径首尾相接而成，也可以仅由单条协调路径组成，如图 2-3 中的  $L_{(1,4 \rightarrow 2; * \rightarrow 3,1)}$ 、 $L_{(2,2 \rightarrow 1,4)}$ 、 $L_{(4,2 \rightarrow 3,3)}$ 。

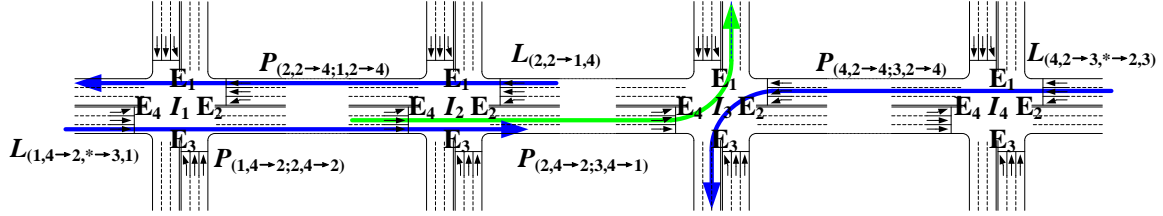


图 2-3 协调路径与协调路径链的示例分析

在图 2-3 中，由于协调路径链  $L_{(1,4 \rightarrow 2; * \rightarrow 3,1)}$  与  $L_{(4,2 \rightarrow 3,3)}$  存在 1 个交叉节点  $I_3$ ，因此交叉口  $I_3$  的西进口左转相位时间基点  $O_{3WL}$  与东进口左转相位时间基点  $O_{3EL}$  将满足约束条件：

$$O_{3WL} = O_{3EL} + \Delta t_{3(EL \rightarrow WL)} + k \cdot C \quad (2-1)$$

其中  $\Delta t_{3(EL \rightarrow WL)}$  为交叉口  $I_3$  的西进口左转相位与东进口左转相位时间基点之间的时间间隔，其大小将由交叉口  $I_3$  的具体信号配时方案决定； $C$  为信号周期； $k$  为整数。

由于协调路径链  $L_{(1,4 \rightarrow 2; * \rightarrow 3,1)}$  与  $L_{(2,2 \rightarrow 1,4)}$  存在 2 个交叉节点  $I_1$  与  $I_2$ ，因此交叉口  $I_1$  和交叉口  $I_2$  的西进口与东进口直行相位时间基点将满足约束条件：

$$\begin{cases} O_{1WS} = O_{1ES} + \Delta t_{1(ES \rightarrow WS)} + k_1 \cdot C \\ O_{2WS} = O_{2ES} + \Delta t_{2(ES \rightarrow WS)} + k_2 \cdot C \end{cases} \quad (2-2)$$

由此可见，通过在交叉节点设置相应约束条件，可以实现协调路径链之间的共同优化。

将图 2-4 a) 所示的协调路径集  $S_3$  的物理结构描述如图 2-4 b) 所示的几何结构。图中，协调路径集  $S_3$  共包含 9 条协调路径链，12 个交叉节点，其中由两条路径链相交形成的交叉节点 8 个 ( $I_8$ 、 $I_9$ 、 $I_{12}$ 、 $I_{14}$ 、 $I_{20}$ 、 $I_{25}$ 、 $I_{26}$ 、 $I_{27}$ )，由三条路径链相交形成的交叉节点 4 个 ( $I_{11}$ 、 $I_{16}$ 、 $I_{19}$ 、 $I_{24}$ )。对于一个由  $n$  条路径链相交形成的交叉节点，将确定  $n-1$  个相位时间基点约束条件，因此协调路径集  $S_3$  总共将确定  $8 \times 1 + 4 \times 2 = 16$  个相位时间基点约束条件。

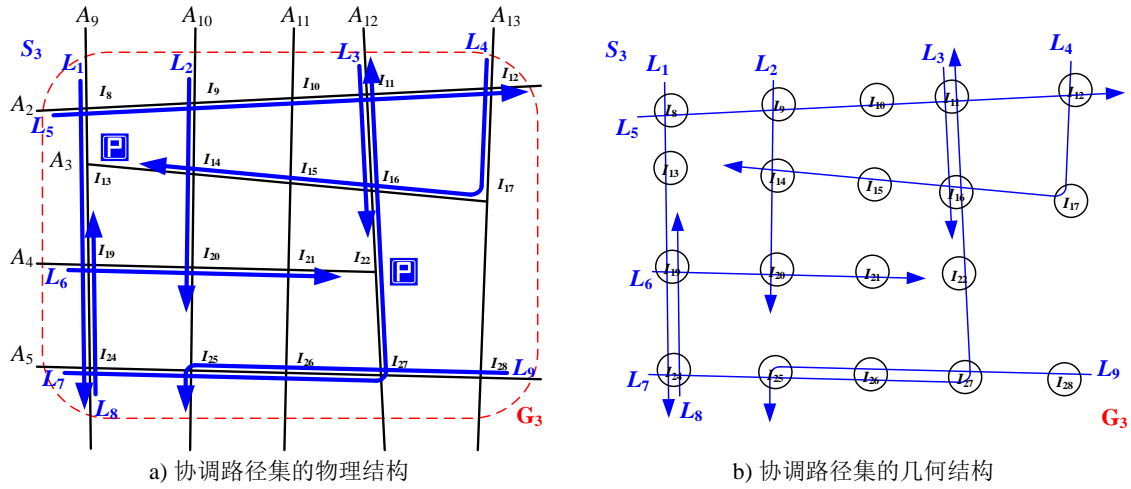


图 2-4 协调路径集的示例分析

当协调路径集中协调路径链的交叉节点越多，则相位时间基点约束条件也越多，此时要获得理想的协调控制效果也越困难。当协调路径集中所有的协调路径链均不存在交叉节点，则所有交叉口都不存在相位时间基点约束条件，此时可以采取单向协调控制方式对控制区域内所有协调路径链进行信号控制。

### 2.1.2 父路径与子路径

为了获得尽可能大的绿波协调控制效益，需要在考虑路径链的交通流量大小与协调控制效果的条件下，以最大限度地增加协调路径链的长度。为此定义父路径与子路径概念如下：

**[定义 4] 父路径：**父路径是两条相连路径中的上游路径。

**[定义 5] 子路径：**子路径是两条相连路径中的下游路径。

父路径与子路径是成对出现，在图 2-3 中，在协调路径链  $L_{(1,4 \rightarrow 2, * \rightarrow 3, 1)}$  上， $P_{(1,4 \rightarrow 2; 2, 4 \rightarrow 2)}$  是  $P_{(2,4 \rightarrow 2; 3, 4 \rightarrow 1)}$  的父路径， $P_{(2,4 \rightarrow 2; 3, 4 \rightarrow 1)}$  是  $P_{(1,4 \rightarrow 2; 2, 4 \rightarrow 2)}$  的子路径。

再以图 2-5 所示的控制区域为例，对父路径、子路径以及协调路径链之间的关系分析如下：

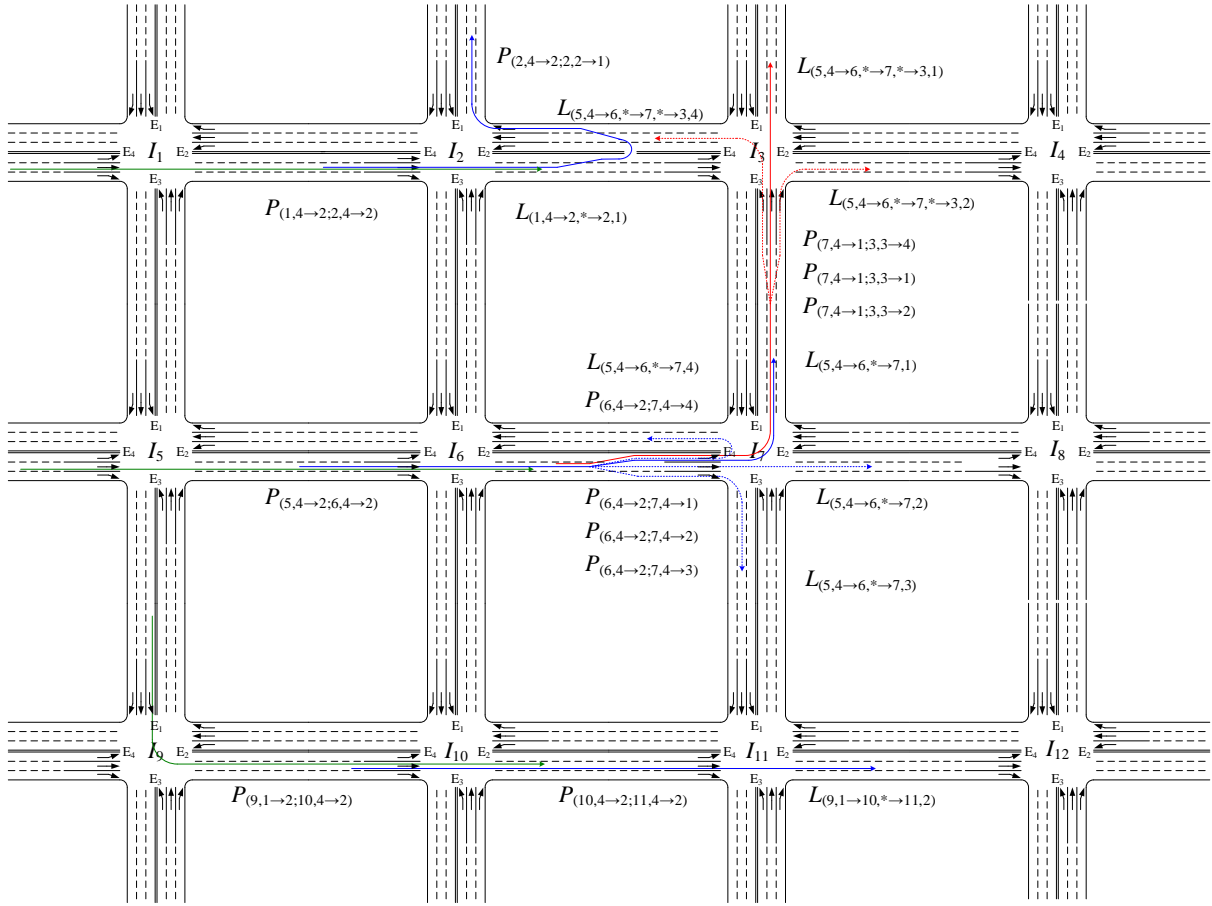


图 2-5 父路径与子路径

1) 在协调路径链  $L_{(9,1 \rightarrow 10, * \rightarrow 11, 2)}$  上, 父路径为  $P_{(9,1 \rightarrow 2; 10, 4 \rightarrow 2)}$ , 子路径为  $P_{(10, 4 \rightarrow 2; 11, 4 \rightarrow 2)}$ , 父路径与子路径在交叉口  $I_{10}$  处通过共同的进出口方向  $E_4 \rightarrow E_2$  进行连接。

2) 父路径  $P_{(5, 4 \rightarrow 2; 6, 4 \rightarrow 2)}$  在下游交叉口  $I_6$  的进出口方向  $E_4 \rightarrow E_2$  上产生 4 条子路径  $P_{(6, 4 \rightarrow 2; 7, 4 \rightarrow 1)}$ 、 $P_{(6, 4 \rightarrow 2; 7, 4 \rightarrow 2)}$ 、 $P_{(6, 4 \rightarrow 2; 7, 4 \rightarrow 3)}$ 、 $P_{(6, 4 \rightarrow 2; 7, 4 \rightarrow 4)}$ , 对应形成 4 条协调路径链  $L_{(5, 4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, 1)}$ 、 $L_{(5, 4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, 2)}$ 、 $L_{(5, 4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, 3)}$ 、 $L_{(5, 4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, 4)}$ 。

3) 在协调路径链  $L_{(5, 4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, 1)}$  的基础上, 以  $P_{(6, 4 \rightarrow 2; 7, 4 \rightarrow 1)}$  作为父路径, 在下游交叉口  $I_7$  的进出口方向  $E_4 \rightarrow E_1$  上产生 3 条子路径  $P_{(7, 4 \rightarrow 1; 3, 3 \rightarrow 4)}$ 、 $P_{(7, 4 \rightarrow 1; 3, 3 \rightarrow 1)}$ 、 $P_{(7, 4 \rightarrow 1; 3, 3 \rightarrow 2)}$ , 可延续分别形成 3 条协调路径链  $L_{(5, 4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 4)}$ 、 $L_{(5, 4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 1)}$ 、 $L_{(5, 4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 2)}$ 。

4) 对于路段中掉头的协调路径链  $L_{(1, 4 \rightarrow 2, * \rightarrow 2, 1)}$ , 父路径为  $P_{(1, 4 \rightarrow 2; 2, 4 \rightarrow 2)}$ , 子路径为  $P_{(2, 4 \rightarrow 2; 2, 2 \rightarrow 1)}$ 。

由此可见, 一条父路径可以衍生出多条子路径, 因此在生成协调路径链时需要首先优选出延续父路径的子路径, 即路径链的延伸方向。

### 2.1.3 路径链计数方法

由于在路网中存在长度不同、起讫点不同以及中间点不同的各种路径链，因此对于各种路径链的数量应根据父路径与子路径之间的衍生关系进行分类统计（不计掉头）。

为了反映路径链的结构特点与长度特性，在此定义包含  $l$  段协调路径的第  $i$  条路径链为  $L_i^{(l)}$ ，例如  $L_i^{(1)}$  为第  $i$  条路径，将包含  $l$  段路径的路径链数量记为  $N_l$ ，此时  $i=1,2,\dots,N_l$ 。

#### 1) 协调路径数量 $N_1$

由于任意一条有向路段的上游交叉口有 3 种驶入流向，下游交叉口有 3 种驶出流向，如图 2-6 a)所示的有向路段  $I_1 \rightarrow I_2$ ，故任意一条有向路段存在  $3 \times 3 = 9$  条协调路径与之对应（如图中蓝色线段所示）。对于  $3 \times 3$ 、 $3 \times 4$ 、 $4 \times 4$ 、 $4 \times 5$ 、 $5 \times 5$ 、……、 $n \times m$  的方格路网分别存在 24、34、48、62、80、……、 $4nm - 2n - 2m$  条有向路段，可以推出协调路径数量  $N_1$  的计算公式为：

$$N_1 = 9 \times (4nm - 2n - 2m) = 36nm - 18n - 18m \quad (n \geq 3, m \geq 3) \quad (2-3)$$

#### 2) 协调路径链数量

对于终点处于控制子区范围内的协调路径与协调路径链，可以在下游交叉口的 3 个驶出流向分别生成一条新的协调路径链，如图 2-5 中的  $L_{(5,4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, 1)}$ 、 $L_{(5,4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, 2)}$ 、 $L_{(5,4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, 3)}$  和  $L_{(5,4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 4)}$ 、 $L_{(5,4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 1)}$ 、 $L_{(5,4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 2)}$ 。对于终点处于控制子区范围外的协调路径与协调路径链，则无法连接新的下游协调路径，此时将停止生成新的协调路径链，如图 2-6 a)中交叉口  $I_6$  的  $E_2$  出口和交叉口  $I_7$  的  $E_3$  与  $E_4$  出口。根据终点处于控制子区范围外的不同位置情况，需要对所涉及的协调路径与协调路径链进行分情况讨论。

##### a) 协调路径链数量 $N_2$

由图 2-6 a)所示的方格路网可见，对于控制子区边界上的顶点交叉口，例如  $I_7$  而言，存在 2 个出口  $E_3$  与  $E_4$  无法连接下游协调路径。由于  $E_3$ （ $E_4$ ）出口的上游交叉口可以为  $I_4$  与  $I_8$ ，所对应的上游交叉口驶入流向包括交叉口  $I_4$  的  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_4$  入口和交叉口  $I_8$  的  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  入口，因此对于子区边界上的每一个顶点交叉口，存在  $2 \times 2 \times 3 = 12$  条协调路径不能生成新的协调路径链（如图中绿色线段所示）。对于控制子区边界上的非顶点交叉口，例如交叉口  $I_6$  存在 1 个出口  $E_2$  无法连接下游协调路径。由于  $E_2$  出口的上游交叉

口可以为  $I_3$ 、 $I_5$  与  $I_9$ ，所对应的上游交叉口驶入流向包括交叉口  $I_3$  的  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_4$  入口，交叉口  $I_5$  的  $E_1$ 、 $E_3$ 、 $E_4$  入口和交叉口  $I_9$  的  $E_2$ 、 $E_3$ 、 $E_4$  入口，因此对于子区边界上的每一个非顶点交叉口，存在  $1 \times 3 \times 3 = 9$  条协调路径不能生成新的协调路径链（如图中灰色线段所示）。

综合起来，对于如图 2-6 a) 所示的  $3 \times 3$  方格路网，在其子区边界上共有 4 个顶点交叉口，4 个非顶点交叉口，合计将有  $4 \times 12 + 4 \times 9 = 84$  条协调路径不能生成新的协调路径链，因此包含 2 段路径的路径链数量为  $3 \times (216 - 84) = 396$  条。

对于更大规模如  $3 \times 4$ 、 $4 \times 4$ 、 $4 \times 5$ 、 $5 \times 5$  的方格路网计算方式类似，可以推出  $n \times m$  的方格路网在其子区边界上共有 4 个顶点交叉口， $2n + 2m - 8$  个非顶点交叉口，故其协调路径链数量  $N_2$  的计算公式为：

$$N_2 = 3 \times [N_1 - 4 \times 12 - (2n + 2m - 8) \times 9] = 3N_1 - 54n - 54m + 72 \quad (2-4)$$

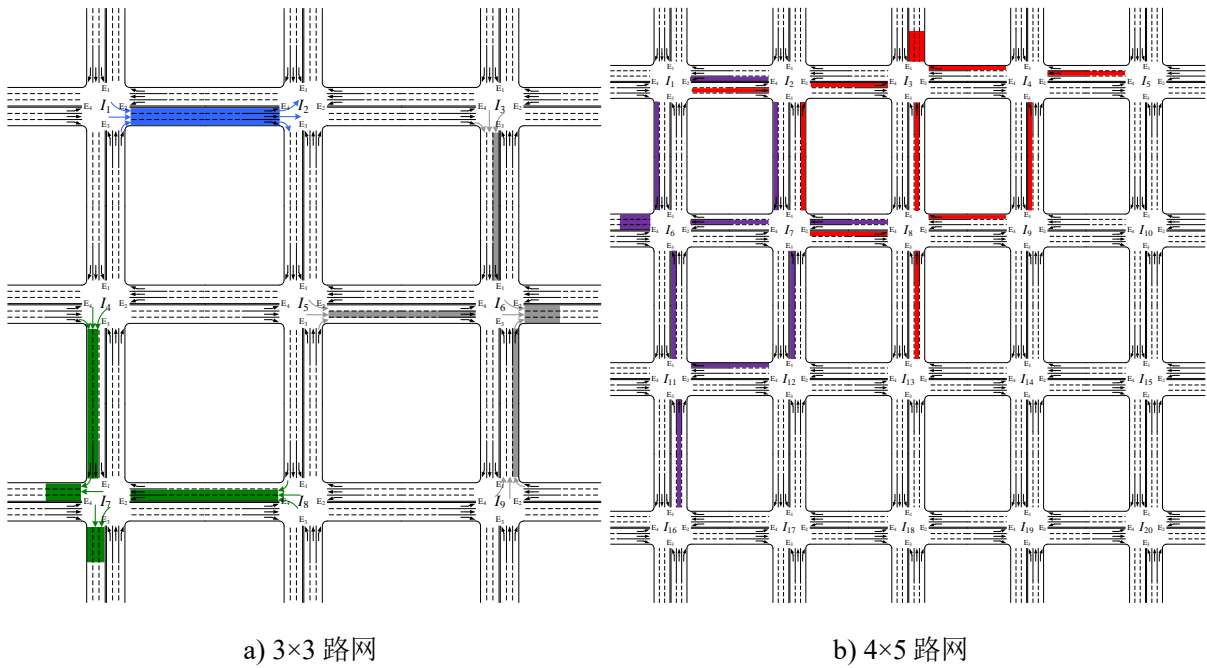


图 2-6 协调路径与协调路径链数量分析

#### b) 协调路径链数量 $N_3$

与计算路径链数量  $N_2$  的分析思路类似，需要分别针对控制子区边界上的顶点交叉口与非顶点交叉口，计算不能继续延伸的协调路径链数量。但需要注意的是，对于不同的路网结构，其边界交叉口出口所不能继续延伸的协调路径链数量计算公式不尽相同。

例如，对于图 2-6 a) 所示的  $3 \times 3$  方格路网，控制子区边界上的每一个顶点交叉口都

存在 2 个出口无法连接下游协调路径，每个出口的上游交叉口可以有 4 种路径组合，例如对于交叉口  $I_7$  而言，其上游交叉口路径组合包括  $I_1 \rightarrow I_4 \rightarrow I_7$ 、 $I_5 \rightarrow I_4 \rightarrow I_7$ 、 $I_5 \rightarrow I_8 \rightarrow I_7$ 、 $I_9 \rightarrow I_8 \rightarrow I_7$ ，而最上游的起始交叉口又有 3 种驶入流向，因此存在  $2 \times 4 \times 3 = 24$  条协调路径链不能生成新的协调路径链。控制子区边界上的每一个非顶点交叉口都存在 1 个出口无法连接下游协调路径，每个出口的上游交叉口可以有 5 种路径组合，例如对于交叉口  $I_6$  而言，其上游交叉口路径组合包括  $I_2 \rightarrow I_3 \rightarrow I_6$ 、 $I_2 \rightarrow I_5 \rightarrow I_6$ 、 $I_4 \rightarrow I_5 \rightarrow I_6$ 、 $I_8 \rightarrow I_5 \rightarrow I_6$ 、 $I_8 \rightarrow I_9 \rightarrow I_6$ ，而最上游的起始交叉口都有 3 种驶入流向，因此存在  $1 \times 5 \times 3 = 15$  条协调路径链不能生成新的协调路径链。综合起来，合计将有  $4 \times 24 + 4 \times 15 = 156$  条协调路径链不能生成新的协调路径链，故包含 3 段路径的路径链数量为  $3 \times (396 - 156) = 720$  条。

对于图 2-6 b)所示的  $4 \times 5$  方格路网，控制子区边界上的每一个顶点交叉口都存在 2 个出口无法连接下游协调路径，与  $3 \times 3$  方格路网情况类似，因此存在  $2 \times 4 \times 3 = 24$  条协调路径链不能生成新的协调路径链。控制子区边界上的每一个非顶点交叉口都存在 1 个出口无法连接下游协调路径，但各个出口的上游交叉口路径组合情况却有所不同，需要进行分类讨论，其中一类交叉口的上游交叉口有 6 种路径组合（如图中紫色线段所示），包括交叉口  $I_2$ 、 $I_4$ 、 $I_6$ 、 $I_{10}$ 、 $I_{11}$ 、 $I_{15}$ 、 $I_{17}$ 、 $I_{19}$  共 8 个，另一类交叉口的上游交叉口有 7 种路径组合（如图中红色线段所示），包括交叉口  $I_3$  与  $I_{18}$  共 2 个，同样由于最上游的起始交叉口都有 3 种驶入流向，因此合计将有  $4 \times 24 + 8 \times 1 \times 6 \times 3 + 2 \times 1 \times 7 \times 3 = 282$  条协调路径链不能生成新的协调路径链，故包含 3 段路径的路径链数量为  $3 \times (1260 - 282) = 2934$  条。

同理，可以计算其它路网结构下的路径链数量  $N_3$  及  $N_4$ ，如表 2-1 所示。如前所述，由于不同路网结构将对控制子区边界上的非顶点交叉口协调路径链延伸产生不同影响，因此需要根据协调路径链长度与路网结构，分情况推导路径链数量计算公式，例如通式  $f_2(n, m) = 126n + 126m - 288$  ( $m \geq 3, n \geq 3$ )，通式  $f_3(n, m) = 342n + 342m - 1008$  ( $m \geq 4, n \geq 4$ )。

表 2-1 不同规模路网的协调路径与路径链数量

	3×3 路网	3×4 路网	4×4 路网	4×5 路网	5×5 路网	$n \times m$ 路网
路径数 $N_1$	216	306	432	558	720	$36nm - 18n - 18m$
路径链数 $N_2$	396	612	936	1260	1692	$3N_1 - 54n - 54m + 72$
路径链数 $N_3$	720	1242	2088	2934	4104	$3N_2 - f_2(n, m)$
路径链数 $N_4$	1224	2412	4536	6732	9900	$3N_3 - f_3(n, m)$

## 2.2 路径链生成方法

### 2.2.1 基于轨迹数据的路径链生成方法

车辆轨迹数据主要来源于车载 GPS 定位装置<sup>[90]</sup>，主要利用 GPS 设备，在实时获取车辆位置信息，并在给定时间间隔内上报服务器，从而获得具有固定时间间隔的车辆轨迹数据。车辆轨迹数据字段含义如表 2-2 所示。

表 2-2 车辆轨迹数据字段含义

序号	参数名称	参数说明	备注
1	vehicle_id	车辆 id	
2	lng	经度	东经
3	lat	纬度	北纬
4	locateion_time	时间戳	采集时间
5	gps_speed	GPS 速度	单位: km/h
6	mileage	GPS 里程	单位: km

车辆轨迹数据包含车辆经过路网时给定时间间隔的经纬度，对车辆所经过的位置进行地图匹配，可以获取车辆的路径链。基于轨迹数据的路径链生成方法的流程图 2-7 所示，具体步骤如下：

**Step1:** 提取某时间段某车辆经过研究路网的轨迹数据，并将该车辆的轨迹数据按时间先后顺序进行排序，将第一条轨迹记录作为车辆的起始位置和当前过车记录；

**Step2:** 若存在下一条车辆轨迹记录，计算下一条记录与当前位置的时间差，并根据车辆经过两点的自由流平均行驶时间，判断该车辆是否在两点间终止行驶，若是，转步骤 3；若否，转步骤 4；若不存在下一条车辆记录，转步骤 5；

划分三个时间段，设置判断标准：

1) 夜间 1:00-6:00，22:00-24:00：若车辆经过两点的时间差大于自由时间 1.5 倍，则认为该车辆在两点间终止行驶；

2) 平峰：若车辆经过两点的时间差大于自由时间 1.5 倍，则认为该车辆在两点间终止行驶；

3) 高峰：若车辆经过两点的时间差大于 1800s，则认为该车辆在两点间终止行驶；

**Step3:** 将当前轨迹记录的位置作为该车辆的终止位置，生成本条轨迹，并将下一条轨迹记录当作下一条轨迹的起始位置和当前过车记录，转向步骤 2；

**Step4:** 将当前的下一条轨迹记录的位置作为车辆轨迹中的一个经过点，将该轨迹

记录作为当前轨迹记录，返回步骤 2；

**Step5:** 生成该车辆全部轨迹，并将车辆的轨迹点匹配到地图上。

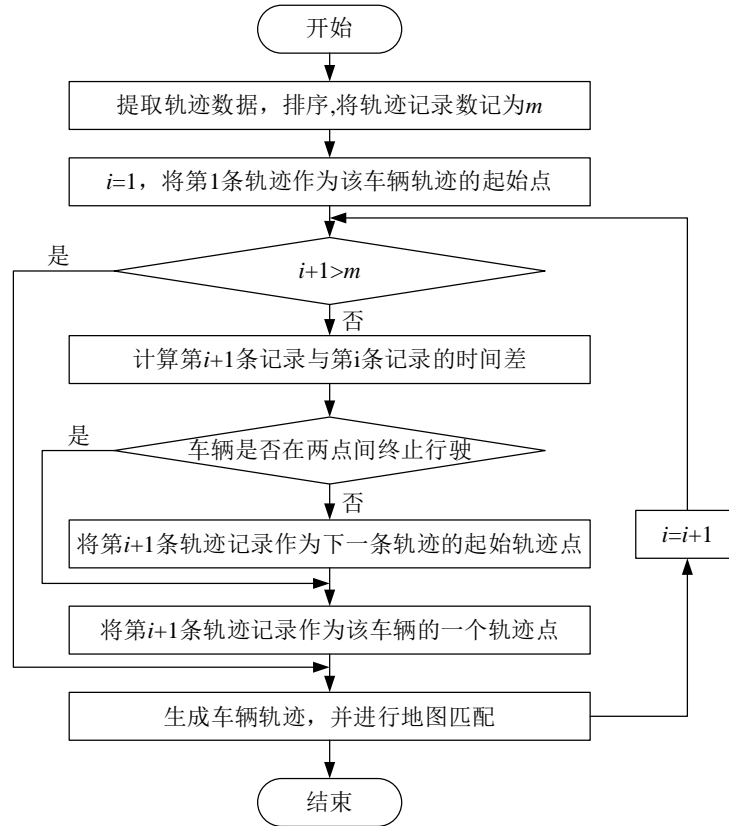


图 2-7 基于轨迹数据的路径链生成方法流程图

### 2.2.2 基于车牌识别数据的路径链生成方法

目前，车牌识别数据的主要是通过电警卡口获取的。随着视频监控产品清晰度与性能的提高，人工智能技术在视频图像处理领域的不断成熟，大幅度地降低了系统的漏拍率和误检率，高清智能卡口、电子警察等设备的用途也更加广泛，不仅可以记录违法车辆，也可提供相关车辆数据。

当车辆经过车牌检测器时，可以返回车辆的车牌和经过检测器的时间，根据车牌检测器所在的路段，可以获取车辆的路径链。基于车牌识别数据的路径链生成方法具体步骤如下，流程图与图 2-7 类似，这里不再赘述。

**Step1:** 提取某时间段某车辆经过车牌检测点的过车记录，并将该车辆的车牌识别数据按时间先后顺序进行排序，将第一条数据作为车辆的起始位置和当前过车记录；

**Step2:** 计算各车牌检测点间的自由流平均过车时间；



**Step3:** 若存在下一条车辆记录, 计算下一条记录与当前位置的过车时间差, 并根据该检测点与当前位置检测点的自由流平均过车时间, 判断该车辆是否在两个检测点间终止行驶, 若是, 转步骤 4; 若否, 转步骤 5; 若不存在下一条车辆记录, 转步骤 6;

划分三个时间段, 设置判断标准:

1) 夜间 1:00-6:00, 22:00-24:00: 若过车时间大于自由时间 1.5 倍, 则认为该车辆在两个检测点间终止行驶;

2) 平峰: 若过车时间大于自由时间 1.5 倍, 则认为该车辆在两个检测点间终止行驶;

3) 高峰: 若过车时间大于 1800s, 则认为该车辆在两个检测点间终止行驶;

**Step4:** 将当前过车记录的所在位置作为该车辆的终止位置, 生成本条轨迹, 并将下一条过车记录当作下一条轨迹的起始位置和当前过车记录, 转向步骤 2;

**Step5:** 将当前的下一条过车记录的所在位置作为车辆轨迹中的一个经过点, 将该过车记录作为当前过车记录, 返回步骤 2;

**Step6:** 生成该车辆全部轨迹。

## 2.3 算例分析

### 2.3.1 VISSIM 仿真平台

VISSIM 是一个离散的、随机的微观仿真软件, 能够模拟城市道路和公路的交通状况。在 VISSIM 内部, 信号状态产生器可从交通仿真器中读取检测数据, 也可向其发送信号状态, 如图 2-8 所示。VISSIM 既可以利用动画向用户直观展示车辆运动状态, 也可以输出各种统计数据, 如: 交通量、行程时间、排队长度、延误、停车次数等指标以及车辆轨迹数据。

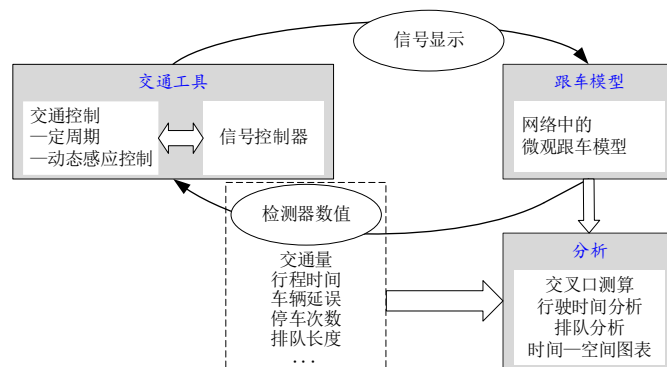


图 2-8 VISSIM 工作原理

VISSIM 可基于设定的时间间隔和车辆的驾驶行为进行建模。在 VISSIM 仿真中，通过设置车道、车辆输入、交通构成、路径决策、公交线路、交通信号、冲突区等改变交通场景，进行仿真并获取评价结果。VISSIM 的主要应用如图 2-9 所示。

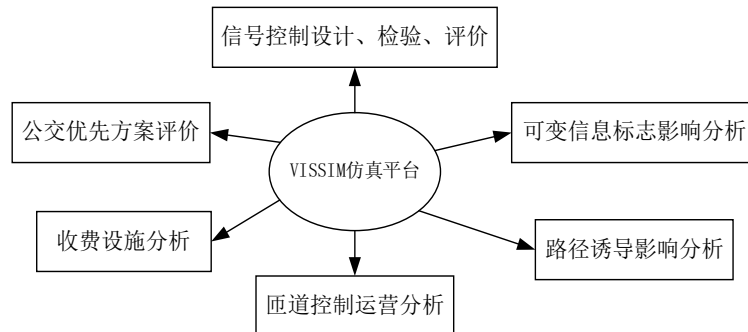


图 2-9 VISSIM 主要应用

车辆轨迹主要是通过无线电定位系统功能的设备进行采集，如 GPS、移动蜂窝定位技术以及一些地图服务为用户提供的位置上报功能。但是由于存在隐私问题而导致难以获取全部车辆的轨迹数据；由于应用程序的局限性以及节能等问题而导致采样率较低；由于定位精度较差而导致轨迹数据精度不高。因此，实际采集的轨迹数据难以直接应用于交通信号控制。

依据实际路网图、交叉口平面布局、实际车道功能情况、交通渠化等绘制路网拓扑结构，依据交通流量数据设置车辆输入、交通构成、路径决策，依据交叉口配时方案设置信号灯，利用 Vissim4.3 交通仿真软件搭建车辆仿真平台，获取车辆轨迹数据，具体步骤如下：

- 1) 导入实际路网底图，并调整地图比例。
- 2) 按照底图、交叉口布局、车道功能，绘制路网拓扑结构。
- 3) 根据实际交通状况设置路网边界驶入交通流量、路径决策、交通构成、车速分布等。
- 4) 根据实际调查的交叉口信号控制方案设置各交叉口信号灯组及信号控制方案，无信号控制的冲突车流设置由优先规则。
- 5) 在各交叉口附近设置数据检测器，并在 VISSIM 菜单栏中依次选择“Evalutation”→“File”，打开评价窗口，勾选“Data Collection”评价，单击“Configuration”新建检测器，勾选“Raw data”生成车牌识别数据，勾选“Complied data”生成车辆统计数据，如图 2-10 所示。

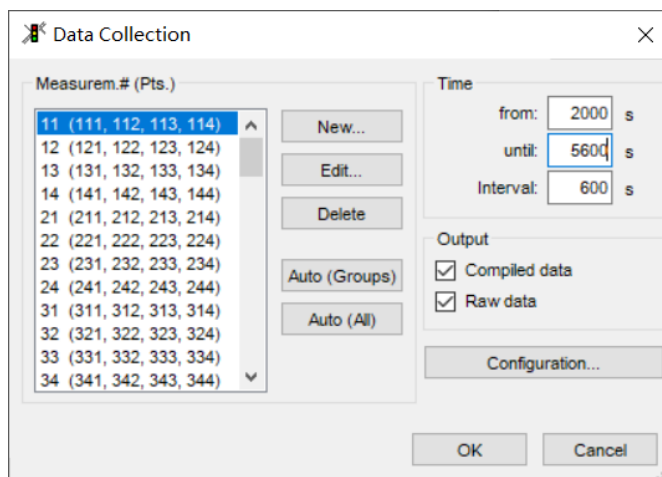


图 2-10 数据采集评价设置

仿真结束后，输出的车牌识别数据保存在后缀名为“.mer”文件中，如图 2-11 所示。

16\_intersection.mer - 记事本

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)

Data Collection Point 1643: Link 336 Lane 1 at 11.428 m, Length 0.000 m.  
Data Collection Point 1644: Link 270 Lane 1 at 11.888 m, Length 0.000 m.

Data C.P.	t(enter)	t(leave)	VehNo	Type	Line	v[m/s]	a[m/s <sup>2</sup> ]	Occ	Pers	tQueue	VehLength[m]
433	2000.17	-1.00	8024	100	0	12.1	0.14	0.03	1	0.0	4.55
642	-1.00	2000.19	7262	100	0	3.4	-2.90	0.19	1	73.2	4.55
643	2000.16	-1.00	7342	100	0	5.8	-2.75	0.04	1	52.8	4.55
822	-1.00	2000.07	7311	100	0	10.5	1.71	0.07	1	69.8	4.11
1144	-1.00	2000.11	7522	100	0	11.1	0.17	0.11	1	16.2	4.11
1413	2000.15	-1.00	7451	100	0	5.4	2.98	0.05	1	66.0	4.76
1414	2000.08	-1.00	7443	100	0	5.1	2.86	0.12	1	63.0	4.11
1531	-1.00	2000.16	7535	100	0	5.4	-3.63	0.16	1	48.8	4.61
1611	2000.06	-1.00	6638	100	0	10.9	0.50	0.14	1	163.2	4.55
232	-1.00	2000.40	7327	100	0	11.7	0.13	0.20	1	60.6	4.76
322	-1.00	2000.32	6956	100	0	5.9	2.90	0.12	1	100.6	4.40
323	-1.00	2000.38	6744	100	0	5.9	2.89	0.18	1	162.4	4.11
432	-1.00	2000.24	7951	100	0	11.6	-0.20	0.04	1	10.2	4.76
511	2000.35	-1.00	7797	100	0	5.7	3.13	0.05	1	40.8	4.61
512	-1.00	2000.22	7736	100	0	11.6	0.19	0.02	1	50.4	4.61
513	2000.37	-1.00	7978	100	0	11.4	0.16	0.03	1	0.0	4.11
521	2000.32	-1.00	7417	100	0	4.1	-2.80	0.08	1	74.0	4.55
823	-1.00	2000.21	6769	100	0	10.9	0.79	0.01	1	139.2	4.11
824	-1.00	2000.36	6381	100	0	10.8	1.58	0.16	1	111.4	4.61
1233	-1.00	2000.35	7863	100	0	11.1	-0.20	0.15	1	29.8	4.11
321	2000.44	-1.00	6841	100	0	8.1	-2.91	0.16	1	123.0	4.76

图 2-11 车牌识别数据

6) 根据实验需求设置路段评价参数。为在特定时间间隔内收集通过路段区段的车辆数据，需“Evaluation”→“File”中勾选“Link Evaluation”，单击“Configuration”设置路段参数，如路段密度、路段编号、车道编号、路段长度、路段起讫点坐标等，以通过路段评价获取基于路段区域的仿真结果，如图 2-12 所示。

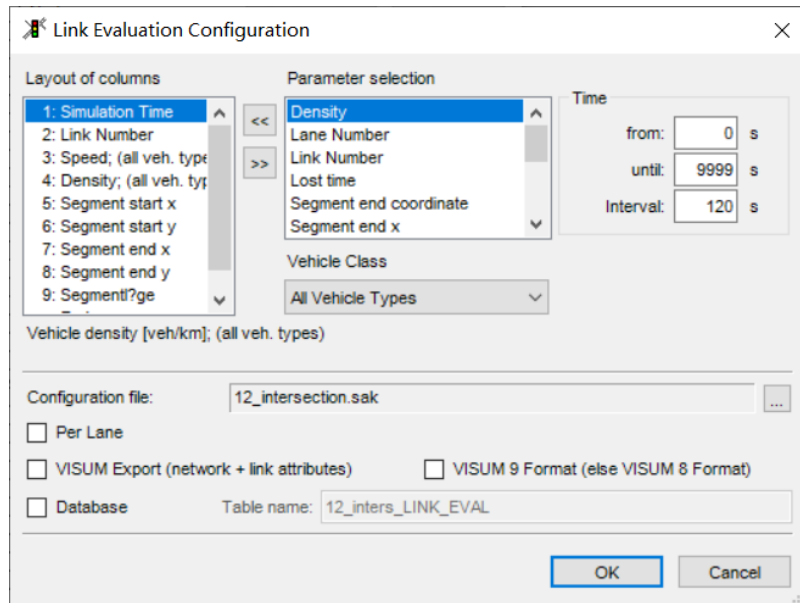


图 2-12 路段评价设置

仿真前，还需将路段评价长度设置为路段实际长度。双击每条路段，在弹出的“Link Data”对话框选择“Other”→“Evaluation”，在弹出的“Link Evaluation”对话框中，在复选框“Link Evaluation”打勾，在文本框“Segment Length”中填入路段实际长度，激活区段评价功能，定义区段长度，如图 2-13 所示。

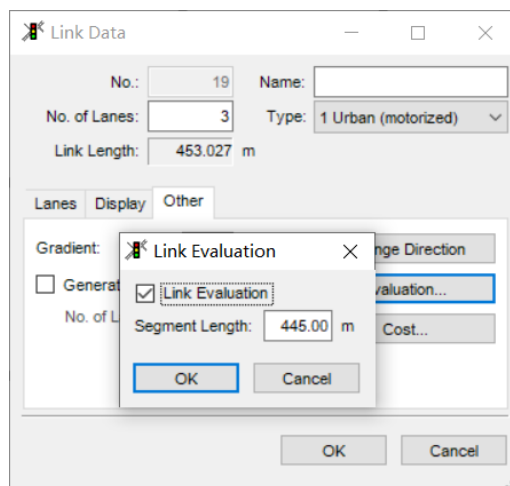


图 2-13 路段评价数据文件

仿真结束后，路段评价数据保存在后缀名为“\*.str”文件中，如图 2-14 所示。

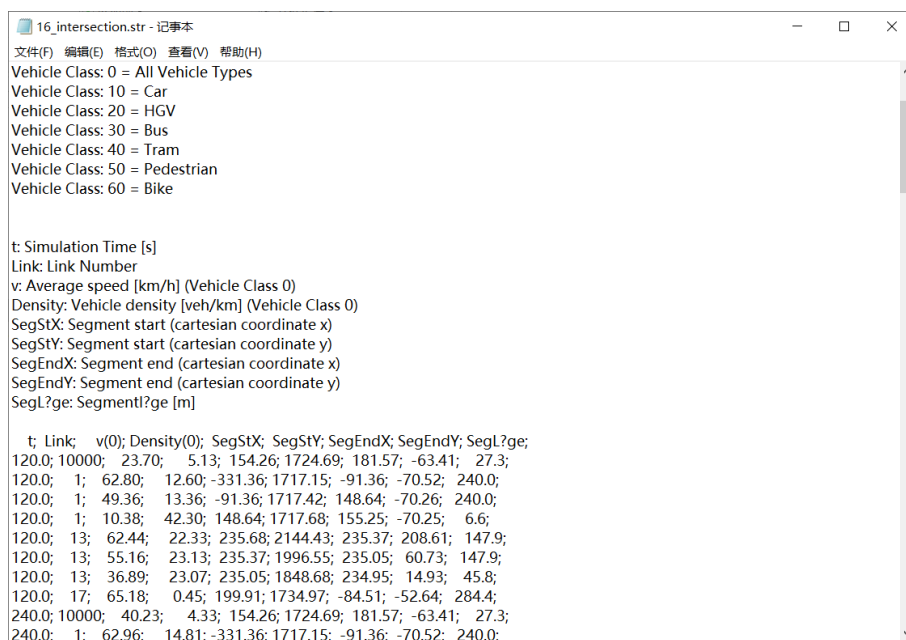


图 2-14 路段评价数据文件

7) 为获取车辆在路网内轨迹数据，需“Evalutation”→“File”中勾选“Vehicle Record”，单击“Configuration”添加相关参数，如仿真时间、车辆编号、路段编号、车速、车辆所在坐标等，如图 2-15 所示；点击“Filter”设置数据采集起始时间、终止时间及时间间隔等参数，如图 2-16 所示。

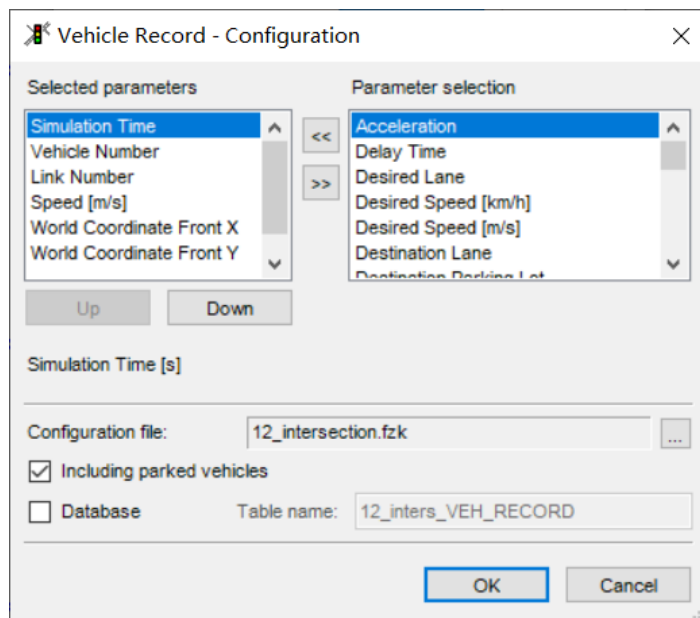


图 2-15 车辆记录配置

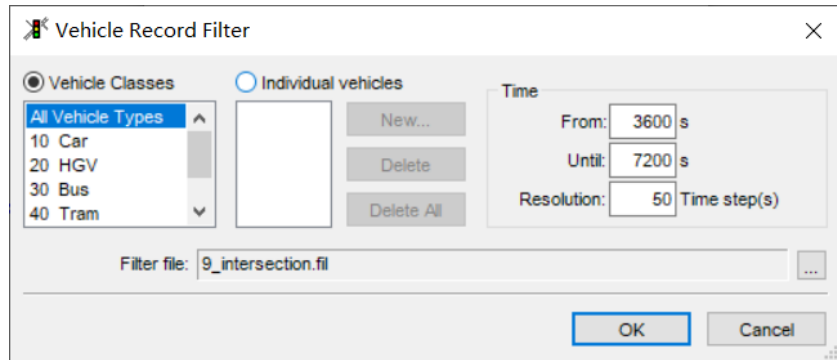


图 2-16 车辆记录过滤配置

仿真结束后，输出的车辆轨迹数据保存在后缀名为“.fzp”文件中，如图 2-17 所示。

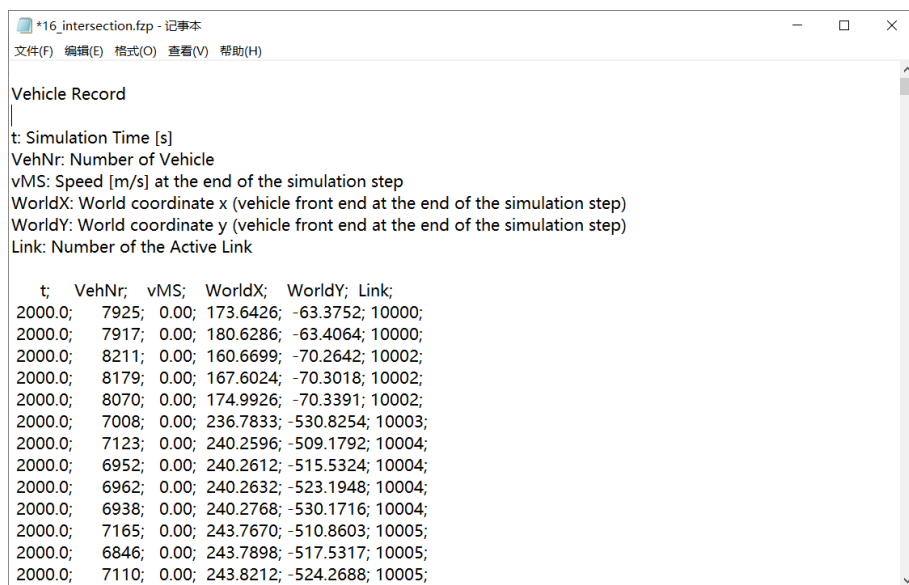


图 2-17 车辆记录数据文件

### 2.3.2 路径链生成

已知某区域路网，包含 4 条东西向干线  $A_{EW1}$ 、 $A_{EW2}$ 、 $A_{EW3}$ 、 $A_{EW4}$  与 4 条南北向干线  $A_{SN1}$ 、 $A_{SN2}$ 、 $A_{SN3}$ 、 $A_{SN4}$  交叉形成，其中包含  $I_{(1,1)}$ 、 $I_{(1,2)}$ 、 $\dots$ 、 $I_{(4,4)}$  共 16 个交叉口， $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\dots$ 、 $R_{40}$  共 40 条路段，路网结构如图 2-18 所示。

已知路网边界驶入交通流量及各交叉口交通流量转向比例，如表 2-3 和表 2-4 所示。

表 2-3 路网边界驶入交通流量 (pcu/h)

干道	$A_{EW1}$	$A_{EW2}$	$A_{EW3}$	$A_{EW4}$	$A_{SN1}$	$A_{SN2}$	$A_{SN3}$	$A_{SN4}$
东进口	1400	1100	900	400	—	—	—	—
西进口	1000	900	600	1600	—	—	—	—
南进口	—	—	—	—	800	900	800	600
北进口	—	—	—	—	1400	500	700	900

表 2-4 各交叉口交通流量转向比例

	东进口			西进口			南进口			北进口		
	左	直	右	左	直	右	左	直	右	左	直	右
$I_{(1,1)}$	0.31	0.42	0.27	0.09	0.78	0.13	0.12	0.81	0.07	0.13	0.85	0.02
$I_{(1,2)}$	0.72	0.22	0.06	0.05	0.79	0.16	0.10	0.79	0.11	0.32	0.40	0.28
$I_{(1,3)}$	0.14	0.78	0.08	0.10	0.84	0.06	0.14	0.76	0.10	0.09	0.83	0.08
$I_{(1,4)}$	0.12	0.84	0.04	0.11	0.78	0.11	0.13	0.79	0.08	0.18	0.76	0.06
$I_{(2,1)}$	0.11	0.79	0.10	0.13	0.81	0.06	0.12	0.81	0.07	0.14	0.79	0.07
$I_{(2,2)}$	0.12	0.81	0.07	0.06	0.82	0.12	0.12	0.85	0.03	0.12	0.79	0.09
$I_{(2,3)}$	0.12	0.79	0.09	0.10	0.79	0.11	0.09	0.84	0.07	0.18	0.76	0.06
$I_{(2,4)}$	0.09	0.82	0.09	0.07	0.82	0.11	0.12	0.78	0.10	0.17	0.79	0.04
$I_{(3,1)}$	0.14	0.84	0.02	0.30	0.45	0.25	0.07	0.79	0.14	0.79	0.15	0.06
$I_{(3,2)}$	0.09	0.81	0.10	0.11	0.83	0.06	0.14	0.77	0.09	0.10	0.82	0.08
$I_{(3,3)}$	0.08	0.81	0.11	0.17	0.77	0.06	0.10	0.82	0.08	0.12	0.80	0.08
$I_{(3,4)}$	0.08	0.80	0.12	0.14	0.78	0.08	0.12	0.81	0.07	0.18	0.77	0.05
$I_{(4,1)}$	0.32	0.44	0.24	0.12	0.84	0.04	0.08	0.81	0.11	0.36	0.52	0.12
$I_{(4,2)}$	0.33	0.52	0.15	0.08	0.80	0.12	0.17	0.78	0.05	0.11	0.82	0.07
$I_{(4,3)}$	0.21	0.68	0.11	0.14	0.81	0.05	0.09	0.84	0.07	0.27	0.42	0.31
$I_{(4,4)}$	0.33	0.59	0.08	0.76	0.17	0.07	0.68	0.25	0.07	0.31	0.44	0.25

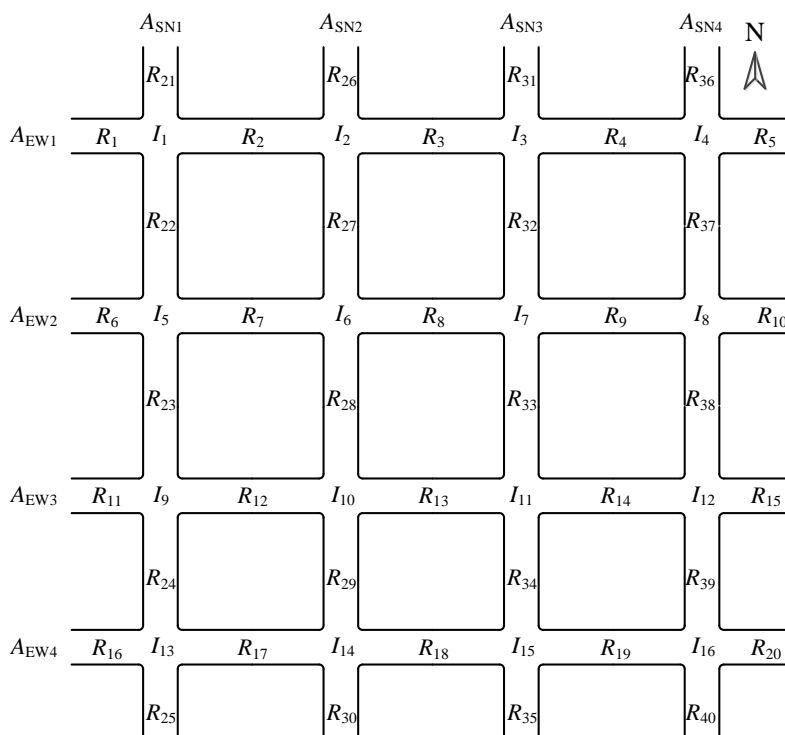


图 2-18 路网结构图

利用 Vissim 绘制区域路网（如图 2-19 所示），输入路网边界驶入交通流量，通过行驶路径决策，仿真获取车辆轨迹数据和车牌识别数据。

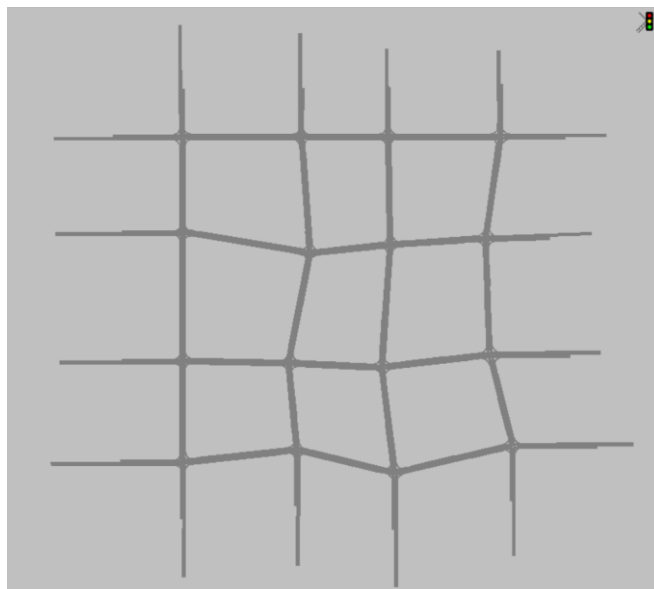


图 2-19 VISSIM 仿真图

利用 Matlab 对车辆行驶轨迹和车牌识别数据进行整理，生成车辆轨迹，将流向相同的轨迹进行合并汇总，绘制路径链如图 2-20 和图 2-21 所示。

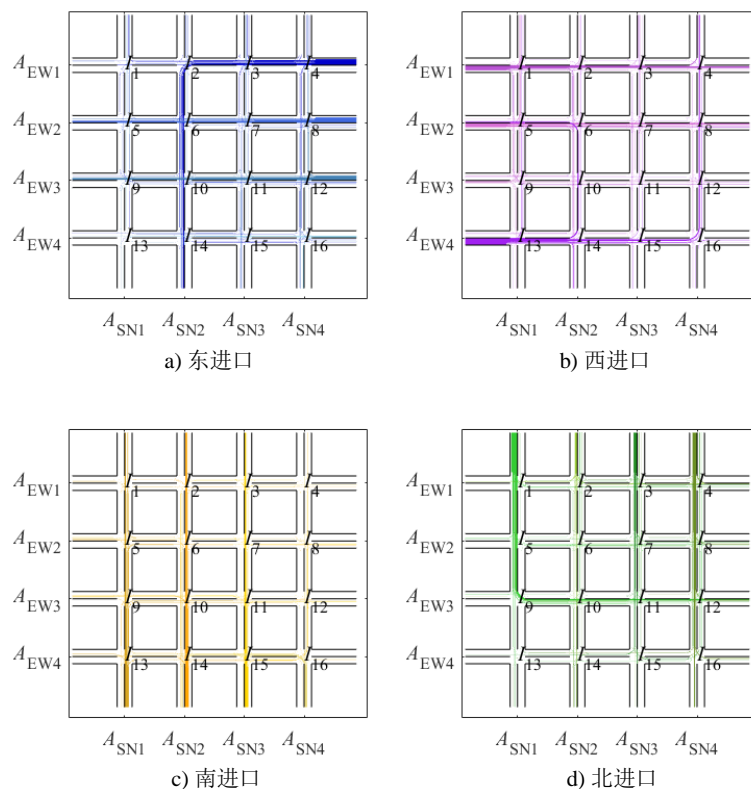


图 2-20 基于车辆轨迹数据生成的路径链



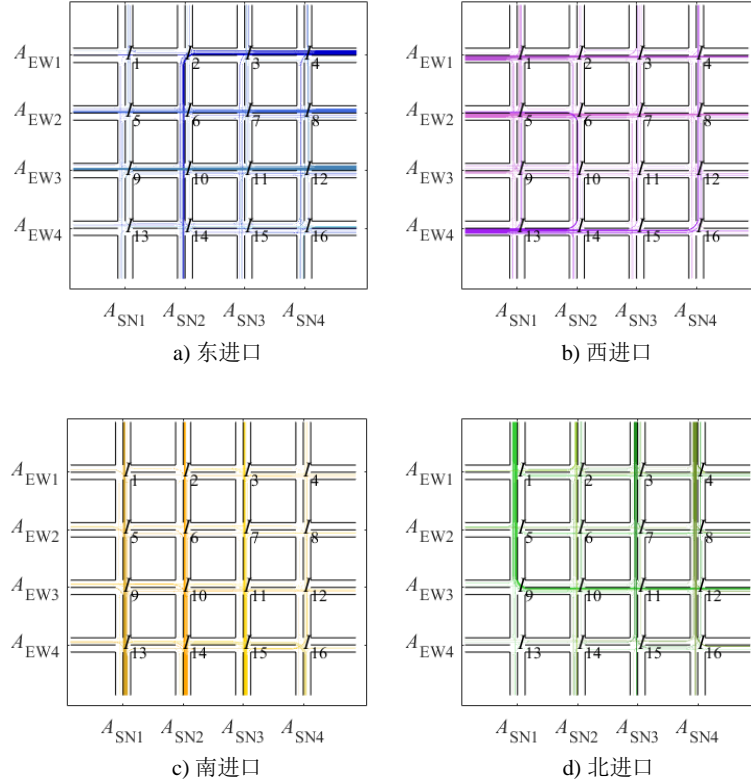


图 2-21 基于车牌识别数据生成的路径链

图 2-20 和图 2-21 a)、b)、c)、d)分别反映了路网中东、西、南、北各个进口方向的车流行驶路径流量大小，轨迹线越宽所对应的车流量越大。对比图 2-20 和图 2-21 发现，两种轨迹生成方法所生成的轨迹相近， $L_{(4,2 \rightarrow 3, * \rightarrow 2, * \rightarrow 6, * \rightarrow 10, * \rightarrow 14, 3)}$ 、 $L_{(8,2 \rightarrow 7, * \rightarrow 6, * \rightarrow 5, 4)}$ 、 $L_{(12,2 \rightarrow 11, * \rightarrow 10, * \rightarrow 9, 4)}$ 、 $L_{(1,4 \rightarrow 2, * \rightarrow 3, * \rightarrow 4, 2)}$ 、 $L_{(5,4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 8, 2)}$ 、 $L_{(13,4 \rightarrow 14, * \rightarrow 15, * \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1)}$ 、 $L_{(13,3 \rightarrow 9, * \rightarrow 5, * \rightarrow 1, 1)}$ 、 $L_{(14,3 \rightarrow 10, * \rightarrow 6, * \rightarrow 2, 1)}$ 、 $L_{(15,3 \rightarrow 11, * \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 1)}$ 、 $L_{(1,1 \rightarrow 5, * \rightarrow 9, * \rightarrow 10, * \rightarrow 11, * \rightarrow 12, 2)}$ 、 $L_{(4,1 \rightarrow 8, * \rightarrow 12, * \rightarrow 16, 2)}$ 为主要路径链，可见两种方法均有效。

## 2.4 本章小结

考虑到现有的交通控制子区划分方法无法反映控制区域内交叉口之间的方向性协调控制需求，本章通过对协调对象进行分解细化，给出了协调路径（包括父路径、子路径）、协调路径链、协调路径集的概念，分析了协调路径链的延伸规律，提出了基于轨迹数据及车牌识别数据的路径链生成方法；并通过搭建基于 VISSIM 的车辆数据获取仿真平台，获取车辆轨迹数据和车牌识别数据，对路径链生成方法进行进一步验证，同时为后续研究提供数据支撑和算法验证平台。

## 第三章 区域协调路径集优选方法及敏感性分析

针对路网中车辆的轨迹分布，从路径链经过的交叉口数量（路径链长度）和所承载的交通流量的角度，分别制定了相应的协调路径集优选法则与流程，进一步丰富控制子区与交叉口群的划分理论。

### 3.1 协调路径集优选方法

#### 3.1.1 优选法则

随着路网交通信号控制精细化管理要求的日益提高，区域协调控制需求的方向性要求也愈加明显，因此如何进一步细化交通信号控制的层次结构，使之能够满足各路段连线的不同协调控制需求，是现代交通控制所面临的一个基本问题。

在路网中，路径链的流量一定程度上可以反应出行者对线路的需求度，路径链的流量越大，协调控制的需求也越大。而协调的路径链所经过的交叉口越多，协调路径链上的车辆可以连续通过的交叉口也越多，但同时协调的难度增加，因此选择合适长度的路径链也至关重要。

为了使协调控制方案设计能够最大限度地考虑到子区内的行驶车辆，在形成协调路径集时需要综合考虑各条路径链所经过的交叉口数量（路径链长度）和所承载的交通流量。

##### （1）路径链长度最大

为了尽量保持协调路径之间的连续性，同时兼顾协调控制方案应能获取到的最低实际效益，制定流量约束下基于路径链长度最大的路径集优选法则如下。

**[法则 1]:** 在满足流量约束条件  $q_i^{(l)} \geq q_0$  下，选出长度排名处在前  $r$  位的协调路径链（长度相同时以流量大小作为第二选择准则）构成协调路径集。

对于流量阈值  $q_0$  的设定，可以根据车道数  $n_L$ 、信号周期大小  $C$  以及单周期单车道需要协调的车流量  $\bar{q}_L$  进行计算，如式（3-1）所示。例如，当  $n_L = 2$ 、 $C = 120$ 、 $\bar{q}_L = 6$  时，可以计算  $q_0 = 360 \text{pcu/h}$ 。

$$q_0 = n_L \times \frac{3600}{C} \times \bar{q}_L \quad (3-1)$$

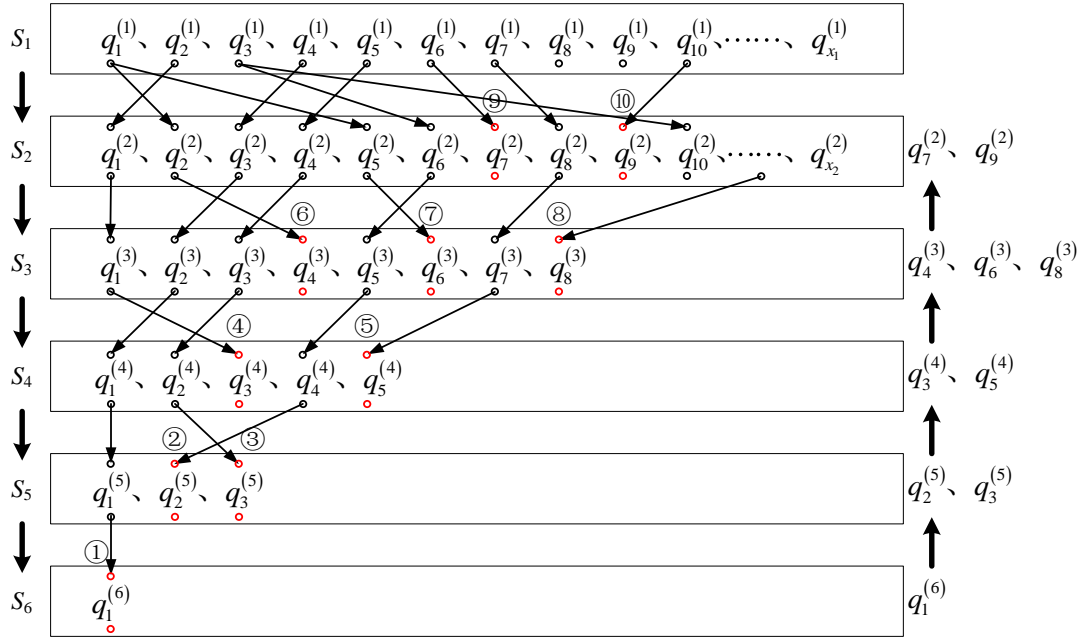


图 3-1 流量约束下基于路径链长度最大的路径集优选示例

通过图 3-1 所示示例，对于流量约束条件下基于路径链长度最大的路径集优选过程分析如下。在图 3-1 中， $S_1$ 、 $S_2$ 、.....、 $S_6$  分别表示满足流量约束条件的包含 1、2、.....、6 段协调路径的路径链可选集合； $q_i^{(l)}$  表示在协调路径链可选集合  $S_l$  中流量排名处于第  $i$  位的路径链流量； $q_{x_l}^{(l)}$  表示在协调路径链可选集合  $S_l$  中排名处于最后一位（第  $x_l$  位）的路径链流量，示例中  $x_3 = 8$ 、 $x_4 = 5$ 、 $x_5 = 3$ 、 $x_6 = 1$ ；路径链流量之间的箭头连线表示了协调路径链的延伸情况，例如  $q_4^{(1)}$ 、 $q_3^{(2)}$ 、 $q_2^{(3)}$ 、 $q_1^{(4)}$ 、 $q_1^{(5)}$ 、 $q_1^{(6)}$  之间的箭头连线依次连接起来形成了一条满足流量约束条件长度为 6 的协调路径链， $q_1^{(1)}$ 、 $q_2^{(2)}$ 、 $q_4^{(3)}$  之间的箭头连线依次连接起来形成了一条满足流量约束条件长度为 3 的协调路径链。

当路径链长度超过某一段数时，若已不存在满足流量约束条件的路径链，则路径链可选集合规模已然确定，此时须在之前确定的路径链可选集合中按照“长度优先、流量兼顾”的原则，反向依次提取出排名在前的协调路径链，构成最终确定的协调路径集。例如在图 3-1 中，当路径链长度超过 6 段时已不存在满足流量约束条件的路径链，因此路径链可选集合包括  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$ 、 $S_6$ ，根据“长度优先、流量兼顾”的原则，依次从  $S_6$ 、 $S_5$ 、 $S_4$ 、 $S_3$ 、 $S_2$  中选出  $q_1^{(6)}$ 、 $q_2^{(5)}$ 、 $q_3^{(5)}$ 、 $q_3^{(4)}$ 、 $q_5^{(4)}$ 、 $q_4^{(3)}$ 、 $q_6^{(3)}$ 、 $q_8^{(3)}$ 、

$q_7^{(2)}$ 、 $q_9^{(2)}$  作为排名在第 1-10 位的协调路径链，构成最终确定的协调路径集。需要说明的是，由于路径链可选集合  $S_5$  中的  $q_1^{(5)}$  可以继续延伸为  $q_1^{(6)}$ ，因此不再重复纳入协调路径集。此外，排名靠后的短路径链如果已包含于排名靠前的长路径链，则该短路径链也不再纳入协调路径集。例如，假若  $q_7^{(2)}$  为图 2-5 中的路径链  $L_{(6,4 \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 1)}$ ， $q_6^{(3)}$  为图 2-5 中  $q_5^{(2)} = L_{(5, 4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, 1)}$  延伸形成的路径链  $L_{(5, 4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 1)}$ ，则路径链  $L_{(6, 4 \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 1)}$  将不会被纳入协调路径集。

### (2) 路径链总流量最大

为了使得控制子区内尽可能多的行驶车辆获得协调控制效果，同时考虑到交叉口数量增加会逐渐减弱协调设计效果，制定长度约束下基于路径链总流量最大的路径集优选法则如下。

**[法则 2]:** 在满足长度约束条件  $l \leq l_0$  下，选出流量与长度乘积（总流量大小）排名处在前  $r$  位的协调路径链构成协调路径集。

对于长度阈值  $l_0$  的设定，可以根据控制区域的规模或可协调交叉口的数量进行设定。以  $l_0 = 5$  为例，通过图 3-2 所示示例，对于长度约束下基于路径链总流量（路径链流量与长度乘积）最大的路径集优选过程分析如下。在图 3-2 中， $S_1$ 、 $S_2$ 、.....、 $S_5$  分别表示包含 1、2、.....、5 段协调路径的路径链可选集合； $q_i^{(l)}$  与  $q_{x_i}^{(l)}$  表示的含义同图 3-1。

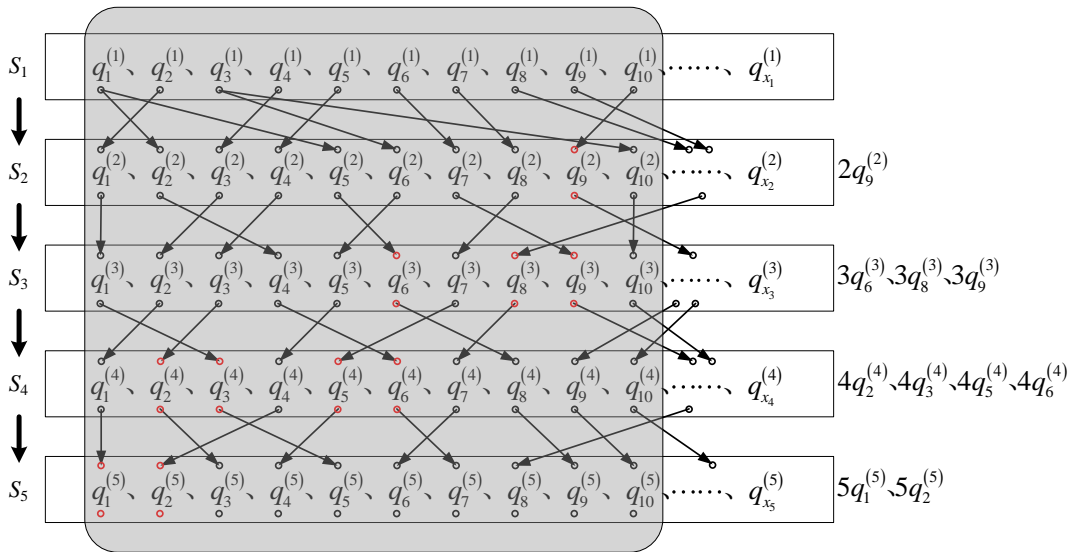


图 3-2 长度约束下基于路径链总流量最大的路径集优选示例

当路径链长度达到  $l_0$  时，路径链可选集合规模初步确定，此时须在路径链可选集合中按照“总流量最大”的原则，依次提取出排名在前的协调路径链，构成最终确定的协调路径集。例如在图 3-2 中，路径链可选集合包括  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$ ，根据“总流量最大”的原则，依次从  $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$  中选出总流量排名在第 1-10 位的  $5q_1^{(5)}$ 、 $4q_2^{(4)}$ 、 $4q_3^{(4)}$ 、 $5q_2^{(5)}$ 、 $4q_5^{(4)}$ 、 $4q_6^{(4)}$ 、 $3q_6^{(3)}$ 、 $3q_8^{(3)}$ 、 $3q_9^{(3)}$ 、 $2q_9^{(2)}$  所对应的  $q_1^{(5)}$ 、 $q_2^{(4)}$ 、 $q_3^{(4)}$ 、 $q_2^{(5)}$ 、 $q_5^{(4)}$ 、 $q_6^{(4)}$ 、 $q_6^{(3)}$ 、 $q_8^{(3)}$ 、 $q_9^{(3)}$ 、 $q_9^{(2)}$  作为协调路径链，构成最终确定的协调路径集。值得注意的是，由于路径链可选集合  $S_4$  中  $q_1^{(4)}$  的总流量  $4q_1^{(4)}$  没有其延伸出来的  $q_1^{(5)}$  的总流量  $5q_1^{(5)}$  大，因此  $q_1^{(4)}$  不再重复纳入协调路径集；而集合  $S_4$  中  $q_2^{(4)}$  的总流量  $4q_2^{(4)}$  比其延伸出来的  $q_3^{(5)}$  的总流量  $5q_3^{(5)}$  大，因此仅将  $q_2^{(4)}$  纳入协调路径集，即最终确定的协调路径链之间不应存在包含关系。

### 3.1.2 优选流程

制定法则 1 “流量约束下基于路径链长度最大的路径集优选”的流程如图 3-3 a) 所示，制定法则 2 “长度约束下基于路径链总流量最大的路径集优选”的流程如图 3-3 b) 所示。

法则 1 是以路径链流量为约束条件，按“长度优先，流量兼顾”的原则排序生成协调路径集优选方案；法则 2 则是以路径链长度为约束条件，按“总流量优先”的原则排序生成协调路径集优选方案。可以看到，这两个法则都综合考虑了路径链的长度及其交通流量，但在优选评价指标的选择上存在一定差异。

需要注意的是，在每次选出流量（或总流量）较大的路径链后，均需判断是否与协调路径集内的已有路径链存在包含关系，若不存在，才能纳入协调路径集。

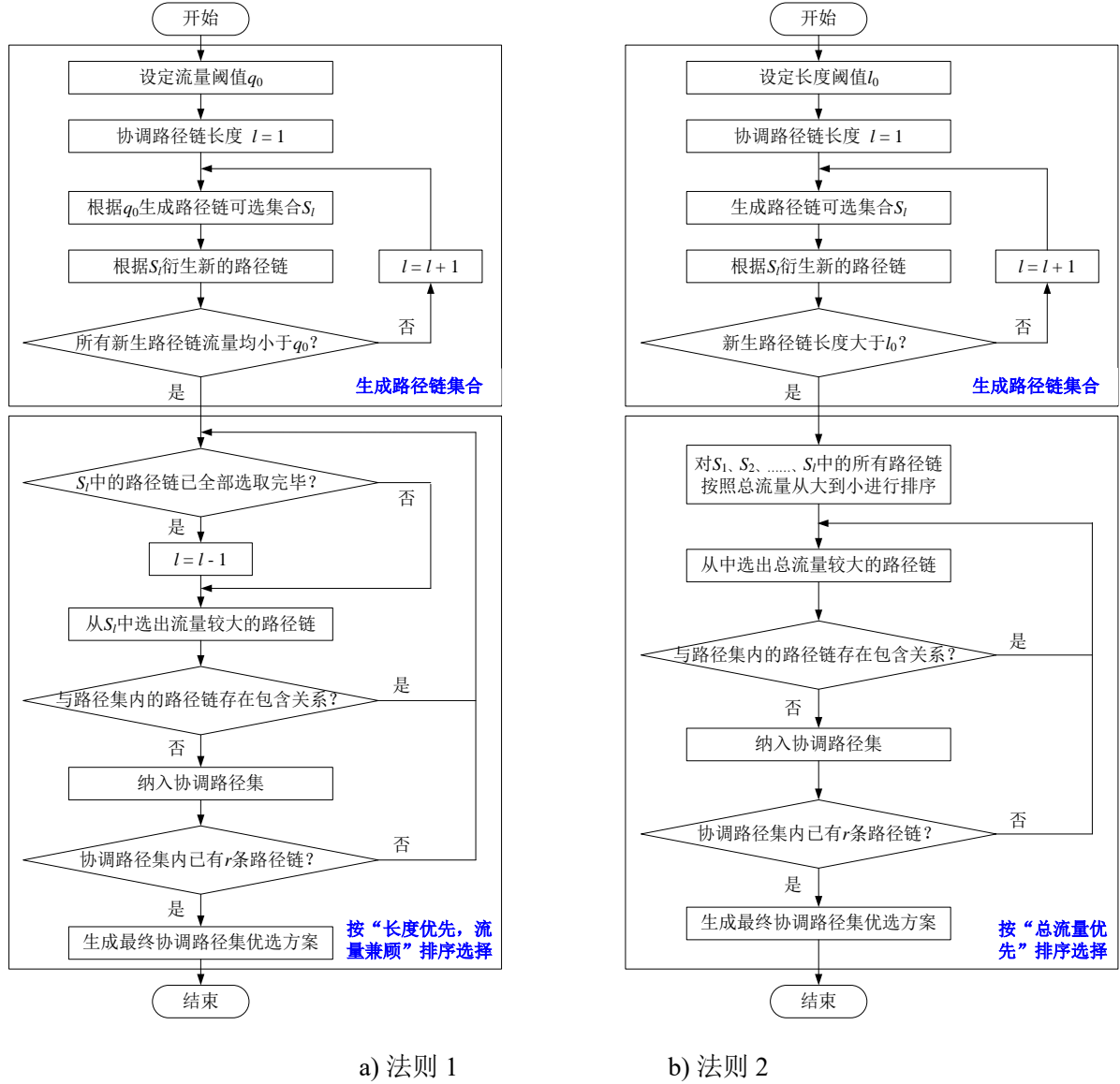


图 3-3 协调路径集优选流程

### 3.2 协调路径集优选方案

以 2.3.2 节的四横四纵的路网为例，其路网结构如图 2-18 所示，路网边界驶入交通流量及各交叉口交通流量转向比例，如表 2-3 和表 2-4 所示。利用 Matlab 对 Vissim 进行二次开发，通过调用 com 接口输入路网边界驶入交通流量，输出车辆轨迹数据，再利用 Matlab 对车辆行驶轨迹进行整理，将流向相同的轨迹线进行合并汇总，形成行驶路径链示意图，如图 3-4 所示。

从图中可以粗略看出路径链  $L_{(4,2 \rightarrow 3, * \rightarrow 2, * \rightarrow 6, * \rightarrow 10, * \rightarrow 14, 3)}$ 、 $L_{(8,2 \rightarrow 7, * \rightarrow 6, * \rightarrow 5, 4)}$ 、 $L_{(12,2 \rightarrow 11, * \rightarrow 10, * \rightarrow 9, 4)}$ 、 $L_{(1,4 \rightarrow 2, * \rightarrow 3, * \rightarrow 4, 2)}$ 、 $L_{(5,4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 8, 2)}$ 、 $L_{(13,4 \rightarrow 14, * \rightarrow 15, * \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1)}$ 、 $L_{(13,3 \rightarrow 9, *$

$\rightarrow 5, * \rightarrow 1, 1) \setminus L(14, 3 \rightarrow 10, * \rightarrow 6, * \rightarrow 2, 1) \setminus L(15, 3 \rightarrow 11, * \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 1) \setminus L(1, 1 \rightarrow 5, * \rightarrow 9, * \rightarrow 10, * \rightarrow 11, * \rightarrow 12, 2) \setminus L(4, 1 \rightarrow 8, * \rightarrow 12, * \rightarrow 16, 2)$  等具有较大的路径流量，如图中红色带箭头的线段所示。

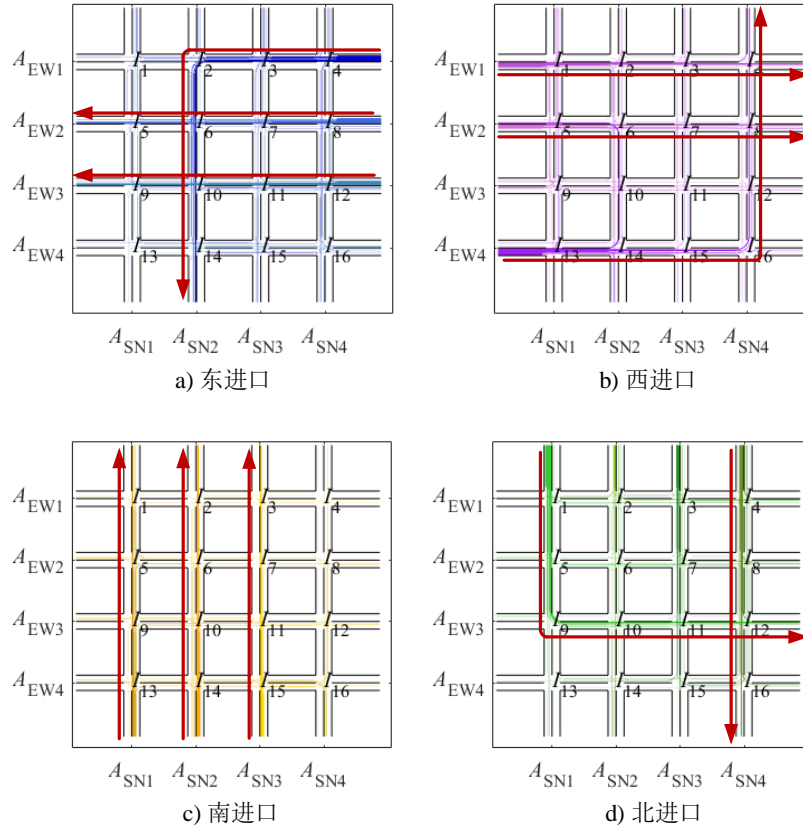


图 3-4 行驶路径流量示意图

根据路网结构与车辆行驶轨迹数据，分别遵循法则 1 与法则 2，通过 Matlab 编程求解协调路径集优选结果。编程求解过程包括：1) 遍历轨迹数据，根据车辆 ID 与时空属性进行排序，获取各个车辆经过的路段 ID 数据矩阵；2) 以路网中所有路径作为父路径，通过不断向下游衍生子路径，产生满足约束条件的新路径链；3) 当不能再产生满足约束条件的路径链时，形成可选路径链集合；4) 对可选路径链集合中的路径链进行排序，得到协调路径集优选方案。

### 3.2.1 法则 1

利用法则 1，编程求解得到不同流量阈值下的协调路径集优选结果，如图 3-5 所示。

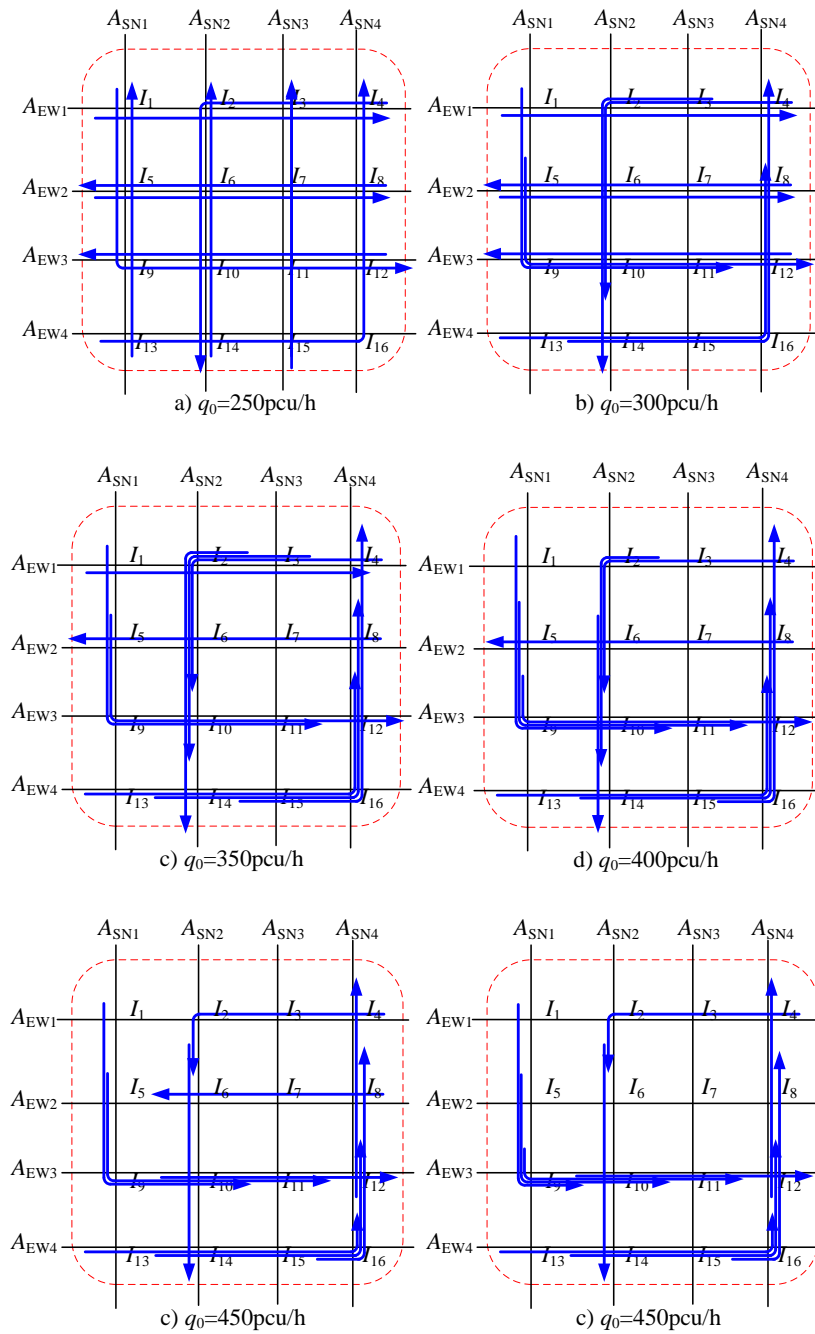


图 3-5 不同流量阈值下的协调路径集优选结果

从图 3-5 可以看出，当流量阈值较大时，选取出来的协调路径链之间将存在较多的重复路径，不利于找到更多具有相对独立性的协调线路；随着流量阈值的减小，协调路径链的长度将逐渐增长，此时存在重复路径的路径链也将逐渐减少；当流量阈值减小到一定程度后，协调路径集的优选结果将基本稳定，但流量阈值也不能取值过小，否则可能将过小流量的较长协调路径链也纳入路径集，这样将不利用整个路网取得较大的协调控制效益。从图 3-5 也可以看到，不同流量阈值下的协调路径集优选结果与图



3-4 中的较大流量路径链基本对应。

### 3.2.2 法则 2

利用法则 2，编程求解得到不同长度阈值下的协调路径集优选结果，如图 3-6 所示。

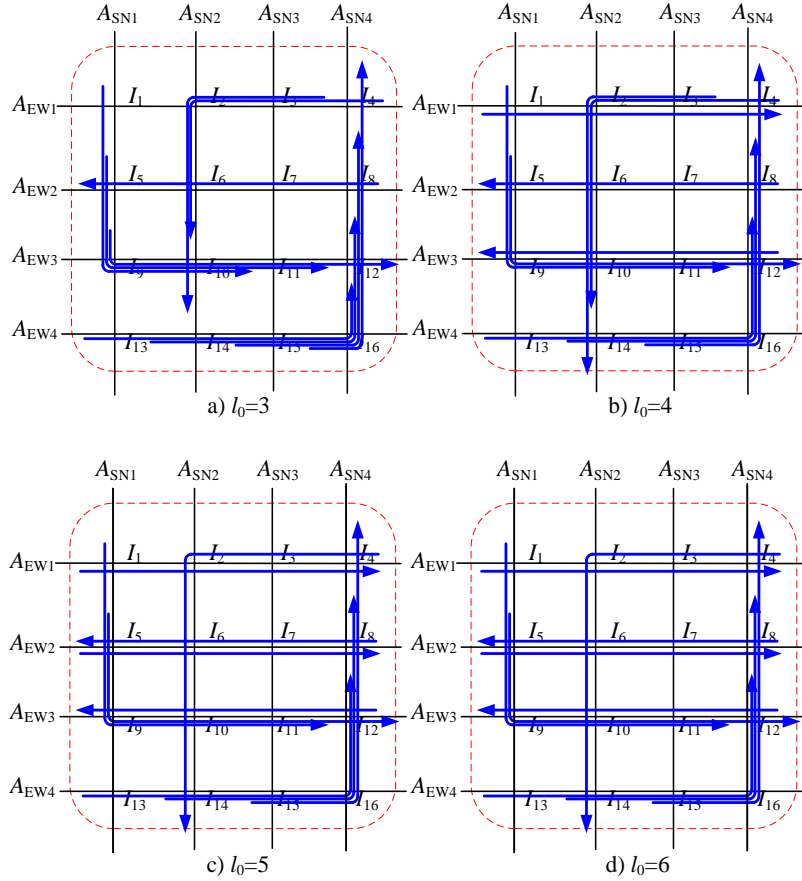


图 3-6 不同长度阈值下的协调路径集优选结果

从图 3-6 可以看出，不同长度阈值下的协调路径集优选结果与图 3-4 中的较大流量路径链也基本对应。随着长度阈值的增加，所选协调路径链的长度将逐渐增长，存在重复路径的路径链将逐渐减少，当长度阈值增加到一定程度后，协调路径集的优选结果将基本稳定，如图 3-6 c)与 d)所示。

与法则 1 相比，由于法则 2 需要对所有路径链的总流量进行排序，因此其运算所需时间更长，且随着长度阈值的增加法则 2 的运算量将明显增大；但由于长度阈值的确定较为容易，往往可以根据控制区域规模或可协调交叉口数量直接进行取值，因此法则 2 的筛选规则更加清晰明确，易于接受与操作。此外，通过对比法则 1 与法则 2 的优选结果可以发现，随着流量阈值的减小，法则 1 可以得到完全不重叠的协调路径集，但对于法则 2，无论如何调节长度阈值，可能也难以得到完全不重叠的协调路径集。

综上所述，上述两种优选方法均能够有效地选出路网中流量较大的路径链，其中流量约束下基于路径链长度最大的路径集优选方法具有计算量小、实时性好等特点，能够最大限度地选取互不重叠的较长协调路径链；长度约束下基于路径链总流量最大的路径集优选方法则具有规则简明、算法简单等特点，能够选取出总流量最大的协调路径链，协调控制效果将更容易得以保障。

### 3.3 敏感性分析

考虑到实际路网中交通流量变化的波动特性，设定区域边界驶入流量分别在 5%、10%、20%、40% 的波动范围内随机上下波动，分别通过 10 次模拟实验得到流量随机波动下的排名情况，分析两个法则的对流量波动的敏感性。

#### 3.3.1 法则 1

分别对流量阈值取 250pcu/h、300pcu/h、350pcu/h、400pcu/h 的情况下，分析流量波动对法则 1 优选结果的影响，如图 3-7-图 3-10 所示。图中，颜色越深表示路径链排名越靠前。

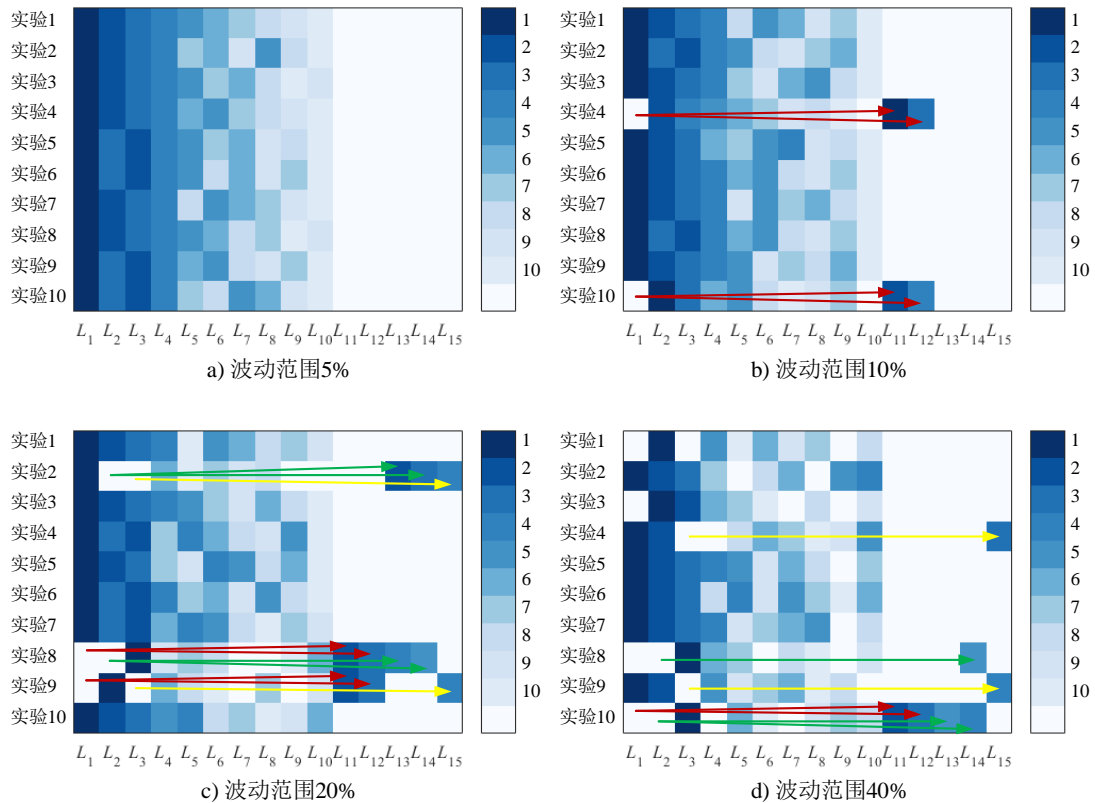


图 3-7 不同波动范围下的法则 1 优选结果 ( $q_0=250$  pcu/h)

其中,  $L_1=L_{(13,4 \rightarrow 14,* \rightarrow 15,* \rightarrow 16,* \rightarrow 12,* \rightarrow 8,* \rightarrow 4,1)}$ ,  $L_2=L_{(1,1 \rightarrow 5,* \rightarrow 9,* \rightarrow 10,* \rightarrow 11,* \rightarrow 12,2)}$ ,  $L_3=L_{(4,2 \rightarrow 3,* \rightarrow 2,* \rightarrow 6,* \rightarrow 10,* \rightarrow 14,3)}$ ,  $L_4=L_{(8,2 \rightarrow 7,* \rightarrow 6,* \rightarrow 5,4)}$ ,  $L_5=L_{(1,4 \rightarrow 2,* \rightarrow 3,* \rightarrow 4,2)}$ ,  $L_6=L_{(12,2 \rightarrow 11,* \rightarrow 10,* \rightarrow 9,4)}$ ,  $L_7=L_{(5,4 \rightarrow 6,* \rightarrow 7,* \rightarrow 8,2)}$ ,  $L_8=L_{(14,3 \rightarrow 10,* \rightarrow 6,* \rightarrow 2,1)}$ ,  $L_9=L_{(15,3 \rightarrow 11,* \rightarrow 7,* \rightarrow 3,1)}$ ,  $L_{10}=L_{(13,3 \rightarrow 9,* \rightarrow 5,* \rightarrow 1,1)}$ ,  $L_{11}=L_{(13,4 \rightarrow 14,* \rightarrow 15,* \rightarrow 16,* \rightarrow 12,* \rightarrow 8,1)}$ ,  $L_{12}=L_{(14,4 \rightarrow 15,* \rightarrow 16,* \rightarrow 12,* \rightarrow 8,* \rightarrow 4,1)}$ ,  $L_{13}=L_{(1,1 \rightarrow 5,* \rightarrow 9,* \rightarrow 10,* \rightarrow 11,2)}$ ,  $L_{14}=L_{(5,1 \rightarrow 9,* \rightarrow 10,* \rightarrow 11,* \rightarrow 12,2)}$ ,  $L_{15}=L_{(4,2 \rightarrow 3,* \rightarrow 2,* \rightarrow 6,* \rightarrow 10,3)}$ 。

从图 3-7 可以看出, 在本文算例  $q_0=250\text{pcu/h}$  中当交通流量在 5% 的范围内波动时, 法则 1 生成的协调路径集一直保持不变, 但协调路径链排名有局部变化, 如图 3-7 a) 所示; 当波动范围扩大到 10% 时, 有 2 次实验的协调路径集发生略微变化, 其表现为协调路径链  $L_1$  因无法达到流量阈值, 被拆分为长度略短的协调路径链  $L_{11}$  与  $L_{12}$ , 如图 3-7 b) 中的实验 4 与实验 10; 当波动范围扩大到 20% 时, 有 3 次实验的协调路径集发生变化, 其表现为协调路径链  $L_1$  被拆分为  $L_{11}$  与  $L_{12}$ , 协调路径链  $L_2$  被拆分为  $L_{13}$  与  $L_{14}$ , 协调路径链  $L_3$  被替换为  $L_{15}$ , 如图 3-7 c) 所示; 当波动范围扩大到 40% 时, 则有 7 次实验的协调路径集发生变化, 如图 3-7 d) 所示。

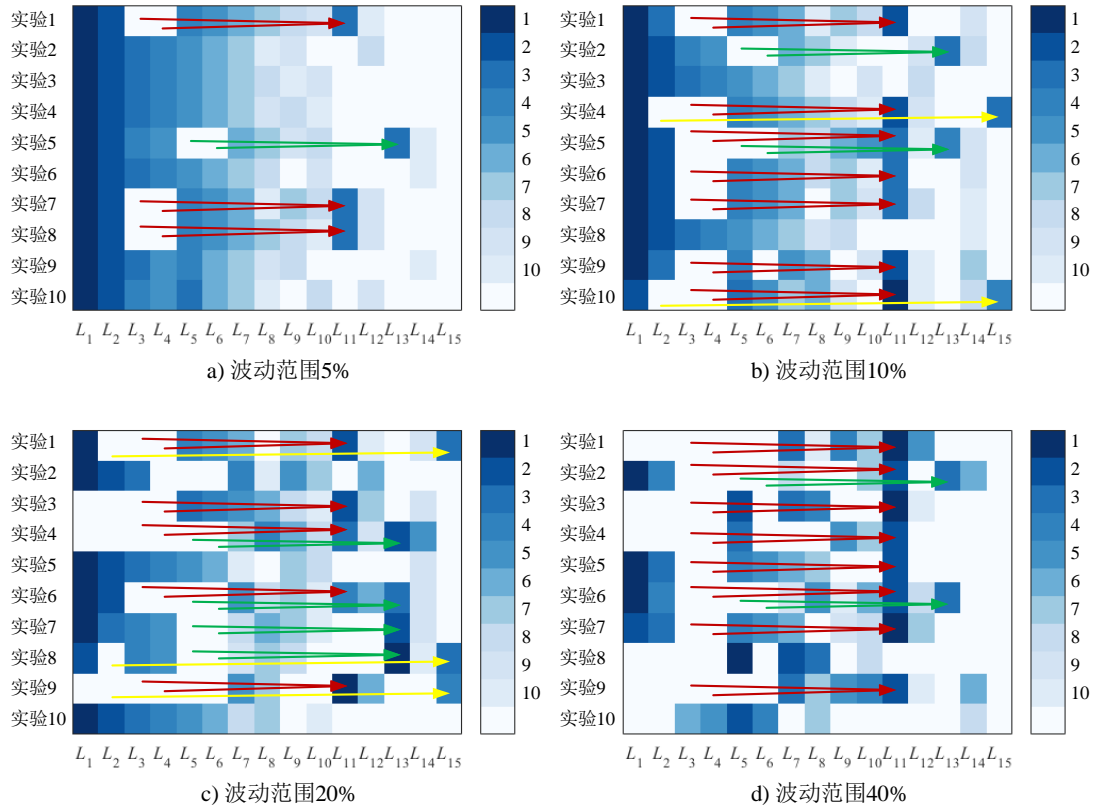


图 3-8 不同波动范围下的法则 1 优选结果 ( $q_0=300\text{ pcu/h}$ )

其中,  $L_1=L_{(13,4 \rightarrow 14,* \rightarrow 15,* \rightarrow 16,* \rightarrow 12,* \rightarrow 8,1)}$ ,  $L_2=L_{(14,4 \rightarrow 15,* \rightarrow 16,* \rightarrow 12,* \rightarrow 8,* \rightarrow 4,1)}$ ,  $L_3=L_{(1,1 \rightarrow 5,* \rightarrow 9,* \rightarrow 10,* \rightarrow 11,2)}$ ,  $L_4=L_{(5,1 \rightarrow 9,* \rightarrow 10,* \rightarrow 11,* \rightarrow 12,2)}$ ,  $L_5=L_{(4,2 \rightarrow 3,* \rightarrow 2,* \rightarrow 6,* \rightarrow 10,3)}$ ,  $L_6=L_{(3,2 \rightarrow 2,* \rightarrow 5,* \rightarrow 9,* \rightarrow 10,* \rightarrow 11,2)}$ ,  $L_7=L_{(5,1 \rightarrow 9,* \rightarrow 10,* \rightarrow 11,* \rightarrow 12,2)}$ ,  $L_8=L_{(4,2 \rightarrow 3,* \rightarrow 2,* \rightarrow 6,* \rightarrow 10,3)}$ ,  $L_9=L_{(3,2 \rightarrow 2,* \rightarrow 5,* \rightarrow 9,* \rightarrow 10,* \rightarrow 11,2)}$ ,  $L_{10}=L_{(1,1 \rightarrow 5,* \rightarrow 9,* \rightarrow 10,* \rightarrow 11,2)}$ ,  $L_{11}=L_{(13,4 \rightarrow 14,* \rightarrow 15,* \rightarrow 16,* \rightarrow 12,* \rightarrow 8,1)}$ ,  $L_{12}=L_{(14,4 \rightarrow 15,* \rightarrow 16,* \rightarrow 12,* \rightarrow 8,* \rightarrow 4,1)}$ ,  $L_{13}=L_{(1,1 \rightarrow 5,* \rightarrow 9,* \rightarrow 10,* \rightarrow 11,2)}$ ,  $L_{14}=L_{(5,1 \rightarrow 9,* \rightarrow 10,* \rightarrow 11,* \rightarrow 12,2)}$ ,  $L_{15}=L_{(4,2 \rightarrow 3,* \rightarrow 2,* \rightarrow 6,* \rightarrow 10,3)}$ 。

$\rightarrow 6, * \rightarrow 10, * \rightarrow 14, 3)$ ,  $L_7 = L(8, 2 \rightarrow 7, * \rightarrow 6, * \rightarrow 5, 4)$ ,  $L_8 = L(1, 4 \rightarrow 2, * \rightarrow 3, * \rightarrow 4, 2)$ ,  $L_9 = L(12, 2 \rightarrow 11, * \rightarrow 10, * \rightarrow 9, 4)$ ,  $L_{10} = L(5, 4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 8, 2)$ ,  $L_{11} = L(1, 1 \rightarrow 5, * \rightarrow 9, * \rightarrow 10, * \rightarrow 11, * \rightarrow 12, 2)$ ,  $L_{12} = L(14, 3 \rightarrow 10, * \rightarrow 6, * \rightarrow 2, 1)$ ,  $L_{13} = L(4, 2 \rightarrow 3, * \rightarrow 2, * \rightarrow 6, * \rightarrow 10, * \rightarrow 14, 3)$ ,  $L_{14} = L(15, 3 \rightarrow 11, * \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 1)$ ,  $L_{15} = L(15, 4 \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1) \circ$

从图 3-8 可以看出, 在本文算例  $q_0=300\text{pcu/h}$  中当交通流量在 5% 的范围内波动时, 法则 1 生成的协调路径集就开始发生变化, 其中有 8 次实验的协调路径集均发生变化, 其表现为协调路径链  $L_{11}$ 、 $L_{13}$  因流量波动达到流量阈值, 而替换长度略短的协调路径链  $L_3$ 、 $L_4$ 、 $L_5$ 、 $L_6$  成为新的协调路径, 如图 3-8 a) 中的实验 1 与实验 5; 当波动范围扩大到 10% 时, 所有实验的协调路径集均发生变化, 新增协调路径链  $L_2$  被替换为  $L_{15}$ , 如图 3-8 b) 中的实验 4; 当波动范围逐渐扩大时, 协调路径集优选结果变化愈加多样, 如图 3-8 c)、d)。

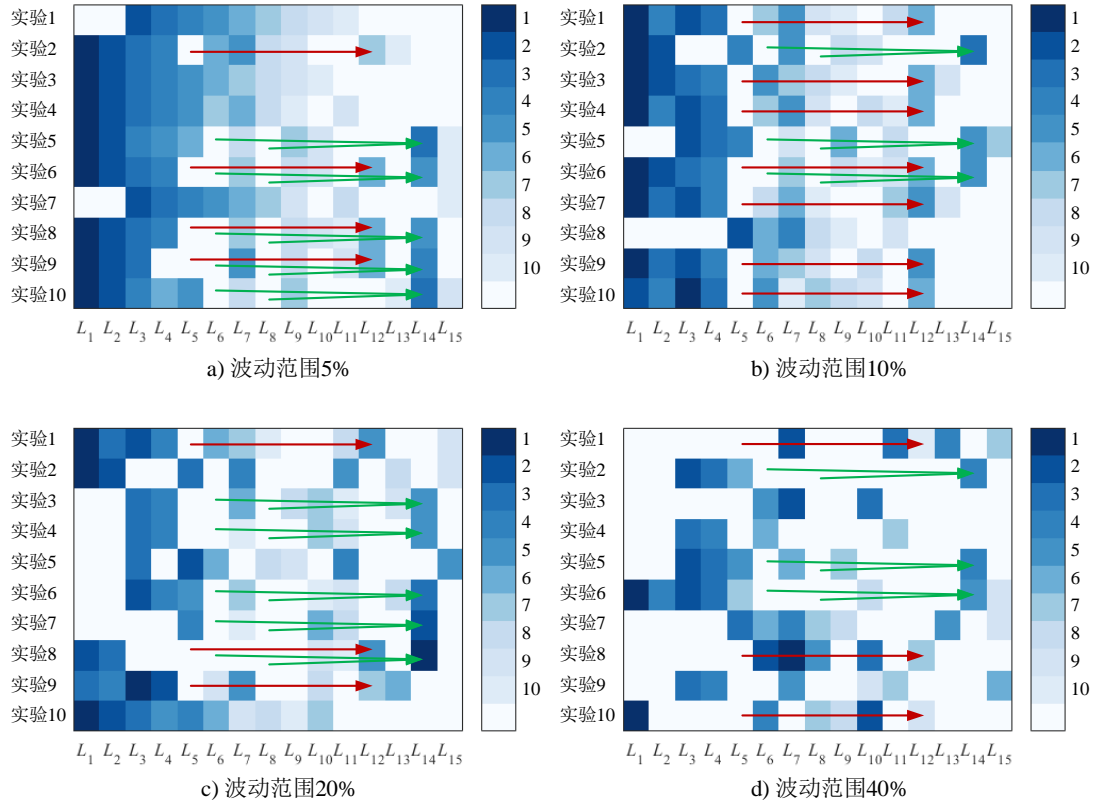


图 3-9 不同波动范围下的法则 1 优选结果 ( $q_0=350 \text{ pcu/h}$ )

其中,  $L_1 = L(13, 4 \rightarrow 14, * \rightarrow 15, * \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, 1)$ ,  $L_2 = L(14, 4 \rightarrow 15, * \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1)$ ,  $L_3 = L(1, 1 \rightarrow 5, * \rightarrow 9, * \rightarrow 10, * \rightarrow 11, 2)$ ,  $L_4 = L(5, 1 \rightarrow 9, * \rightarrow 10, * \rightarrow 11, * \rightarrow 12, 2)$ ,  $L_5 = L(15, 4 \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1)$ ,  $L_6 = L(4, 2 \rightarrow 3, * \rightarrow 2, * \rightarrow 6, 3)$ ,  $L_7 = L(8, 2 \rightarrow 7, * \rightarrow 6, * \rightarrow 5, 4)$ ,  $L_8 = L(3, 2 \rightarrow 2, * \rightarrow 6, * \rightarrow 10, 3)$ ,  $L_9 = L(2, 2 \rightarrow 6, * \rightarrow 10, * \rightarrow 14, 3)$ ,  $L_{10} = L(1, 4 \rightarrow 2, * \rightarrow 3, * \rightarrow 4, 2)$ ,  $L_{11} = L(12, 2 \rightarrow 11, * \rightarrow 10, * \rightarrow 9, 4)$ ,  $L_{12} = L(16, 4 \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1)$ ,  $L_{13} = L(14, 3 \rightarrow 10, * \rightarrow 6, * \rightarrow 2, 1)$ ,  $L_{14} = L(4, 2 \rightarrow 3, * \rightarrow 2, * \rightarrow 6, * \rightarrow 10, 3)$ ,  $L_{15} = L(5, 4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 8, 2) \circ$

从图 3-9 可以看出, 在本文算例  $q_0=350\text{pcu/h}$  中当交通流量在 5% 的范围内波动时, 法则 1 生成的协调路径集就开始发生变化, 其中有 9 次实验的协调路径集均发生变化, 其表现为协调路径链  $L_5$  因流量波动未达到流量阈值, 被拆分为长度略短的协调路径链  $L_{12}$ , 协调路径链  $L_{14}$  因流量波动达到流量阈值, 而替换长度略短的协调路径链  $L_6$ 、 $L_8$  成为新的协调路径, 如图 3-9 a) 中的实验 2 与实验 5; 当波动范围扩大到 10% 时, 所有实验的协调路径集均发生变化, 如图 3-9 b); 当波动范围逐渐扩大时, 协调路径集优选结果变化愈加多样, 如图 3-9 c)、d)。

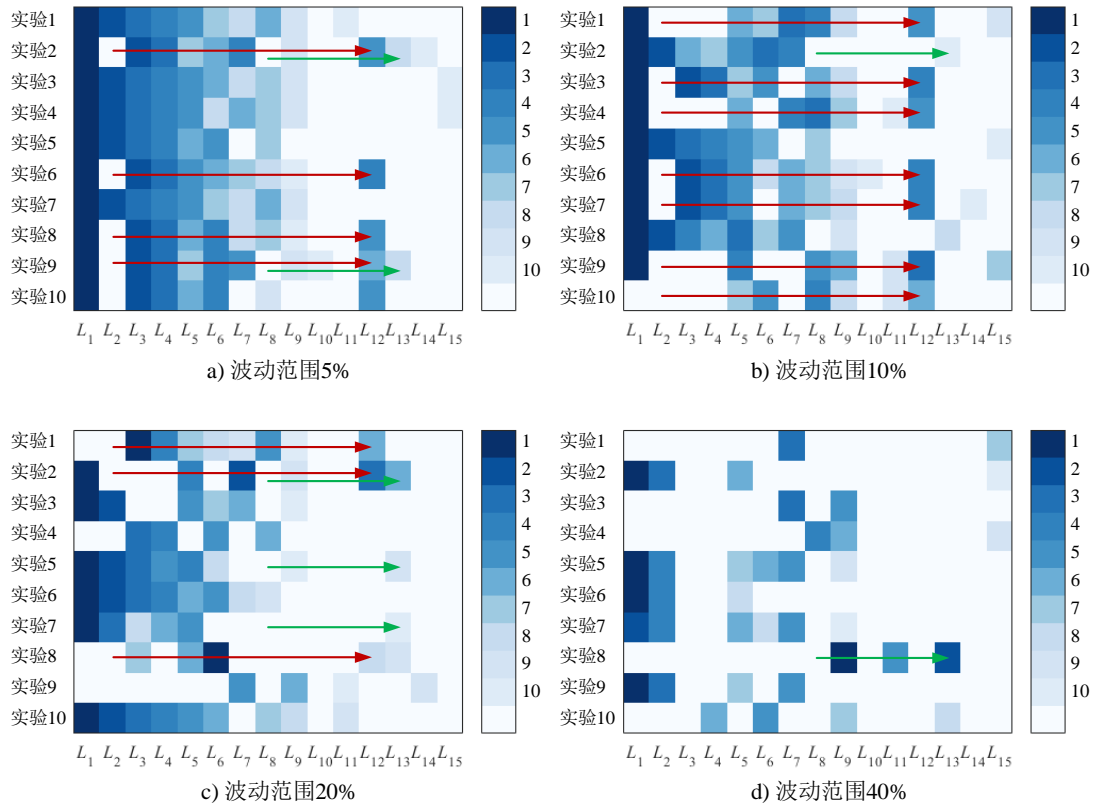


图 3-10 不同波动范围下的法则 1 优选结果 ( $q_0=400 \text{ pcu/h}$ )

其中,  $L_1 = L_{(13,4 \rightarrow 14,* \rightarrow 15,* \rightarrow 16,* \rightarrow 12,1)}$ ,  $L_2 = L_{(14,4 \rightarrow 15,* \rightarrow 16,* \rightarrow 12,* \rightarrow 8,1)}$ ,  $L_3 = L_{(1,1 \rightarrow 5,* \rightarrow 9,* \rightarrow 10,2)}$ ,  $L_4 = L_{(5,1 \rightarrow 9,* \rightarrow 10,* \rightarrow 11,2)}$ ,  $L_5 = L_{(16,4,* \rightarrow 12,* \rightarrow 8,* \rightarrow 4,1)}$ ,  $L_6 = L_{(4,2 \rightarrow 3,* \rightarrow 2,* \rightarrow 6,3)}$ ,  $L_7 = L_{(8,2 \rightarrow 7,* \rightarrow 6,* \rightarrow 5,4)}$ ,  $L_8 = L_{(9,1 \rightarrow 10,* \rightarrow 11,* \rightarrow 12,2)}$ ,  $L_9 = L_{(6,1 \rightarrow 10,* \rightarrow 14,3)}$ ,  $L_{10} = L_{(2,2 \rightarrow 6,* \rightarrow 10,3)}$ ,  $L_{11} = L_{(1,4 \rightarrow 2,* \rightarrow 3,2)}$ ,  $L_{12} = L_{(15,4 \rightarrow 16,* \rightarrow 12,* \rightarrow 8,1)}$ ,  $L_{13} = L_{(10,4 \rightarrow 11,* \rightarrow 12,2)}$ ,  $L_{14} = L_{(10,3 \rightarrow 6,* \rightarrow 2,1)}$ ,  $L_{15} = L_{(6,4 \rightarrow 7,* \rightarrow 8,2)}$ 。

从图 3-10 可以看出, 在本文算例  $q_0=400\text{pcu/h}$  中当交通流量在 5% 的范围内波动时, 法则 1 生成的协调路径集就开始发生变化, 并且 10 次实验的协调路径集均发生变化, 其表现为协调路径链  $L_2$  因流量波动未达到流量阈值, 被拆分为长度略短的协调路径链

$L_{12}$ , 协调路径链  $L_8$  被拆分为协调路径链  $L_{13}$ , 如图 3-10 a) 中的实验 2 与实验 10; 随着波动范围扩大, 协调路径集优选结果变化愈加多样, 如图 3-10 b)、c)、d)。

对比图 3-7-图 3-10 发现, 在同一波动等级上法则 1 的流量阈值的取值越小, 所选取的协调路径集变化幅度越小, 因此流量阈值取值小的法则 1 将具有更强的稳定性。

### 3.3.2 法则 2

分别对长度阈值取 3、4、5 的情况下, 分析流量波动对法则 2 优选结果的影响, 如图 3-11-图 3-13 所示。图中, 颜色越深表示路径链排名越靠前。

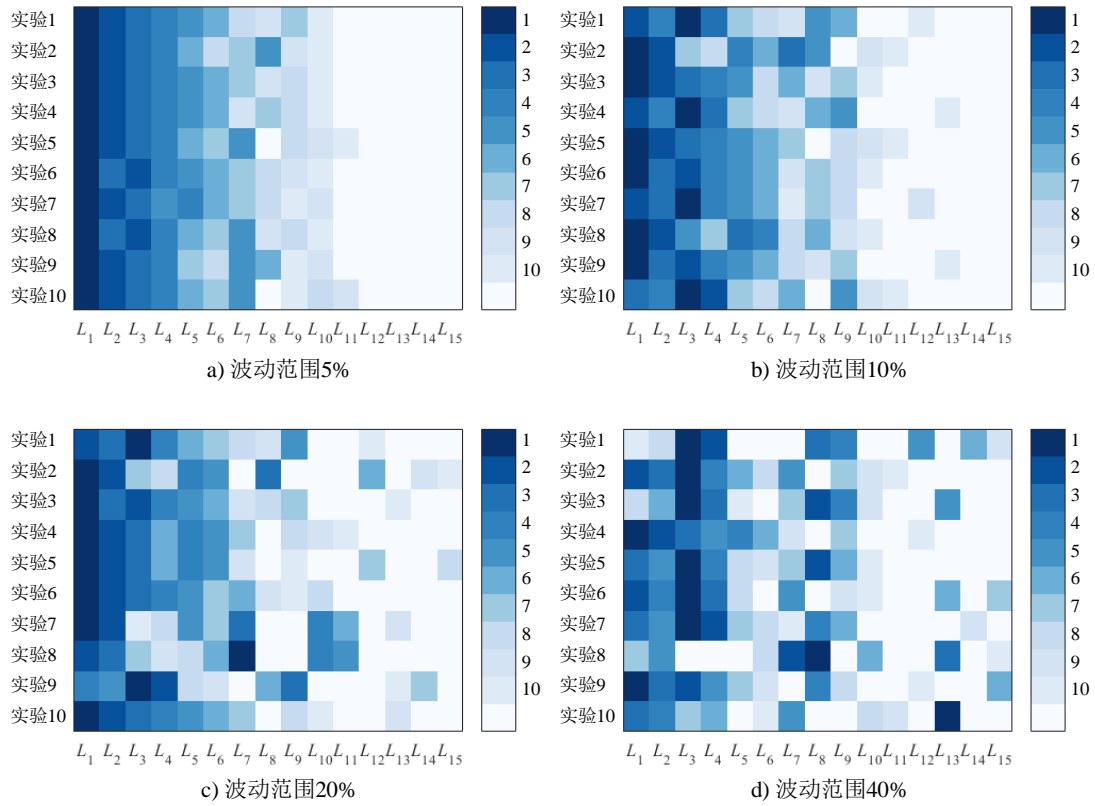


图 3-11 不同波动范围下的法则 2 优选结果 ( $l_0=3$ )

其中,  $L_1 = L(13,4 \rightarrow 14,* \rightarrow 15,* \rightarrow 16,1)$ ,  $L_2 = L(14,4 \rightarrow 15,* \rightarrow 16,* \rightarrow 12,1)$ ,  $L_3 = L(5,1 \rightarrow 9,* \rightarrow 10,* \rightarrow 11,2)$ ,  $L_4 = L(9,1 \rightarrow 10,* \rightarrow 11,* \rightarrow 12,2)$ ,  $L_5 = L(15,4 \rightarrow 16,* \rightarrow 12,* \rightarrow 8,1)$ ,  $L_6 = L(16,4 \rightarrow 12,* \rightarrow 8,* \rightarrow 4,1)$ ,  $L_7 = L(4,2 \rightarrow 3,* \rightarrow 2,* \rightarrow 6,3)$ ,  $L_8 = L(8,2 \rightarrow 7,* \rightarrow 6,* \rightarrow 5,4)$ ,  $L_9 = L(9,1 \rightarrow 10,* \rightarrow 11,* \rightarrow 12,2)$ ,  $L_{10} = L(3,2 \rightarrow 2,* \rightarrow 6,* \rightarrow 10,3)$ ,  $L_{11} = L(2,2 \rightarrow 6,* \rightarrow 10,* \rightarrow 14,3)$ ,  $L_{12} = L(12,2 \rightarrow 11,* \rightarrow 10,* \rightarrow 9,4)$ ,  $L_{13} = L(1,4 \rightarrow 2,* \rightarrow 3,* \rightarrow 4,2)$ ,  $L_{14} = L(14,3 \rightarrow 10,* \rightarrow 6,* \rightarrow 2,1)$ ,  $L_{15} = L(5,4 \rightarrow 6,* \rightarrow 7,* \rightarrow 8,2)$ 。

从图 3-11 可以看出, 在本文算例  $l_0=3$  中当交通流量在 5% 的范围内波动时, 法则 2 生成的协调路径集就开始发生变化, 其中有 2 次实验的协调路径集发生变化, 表现为协

调路径链  $L_8$  被协调路径链  $L_{11}$  替代，如图 3-11 a) 实验 5 所示。随着交通流量波动范围的逐步增大，协调路径集及其内部路径链排名的变化概率逐渐增大，但未出现协调路径链被拆分或者合并的情况，如图 3-11 b)、c)、d) 所示。

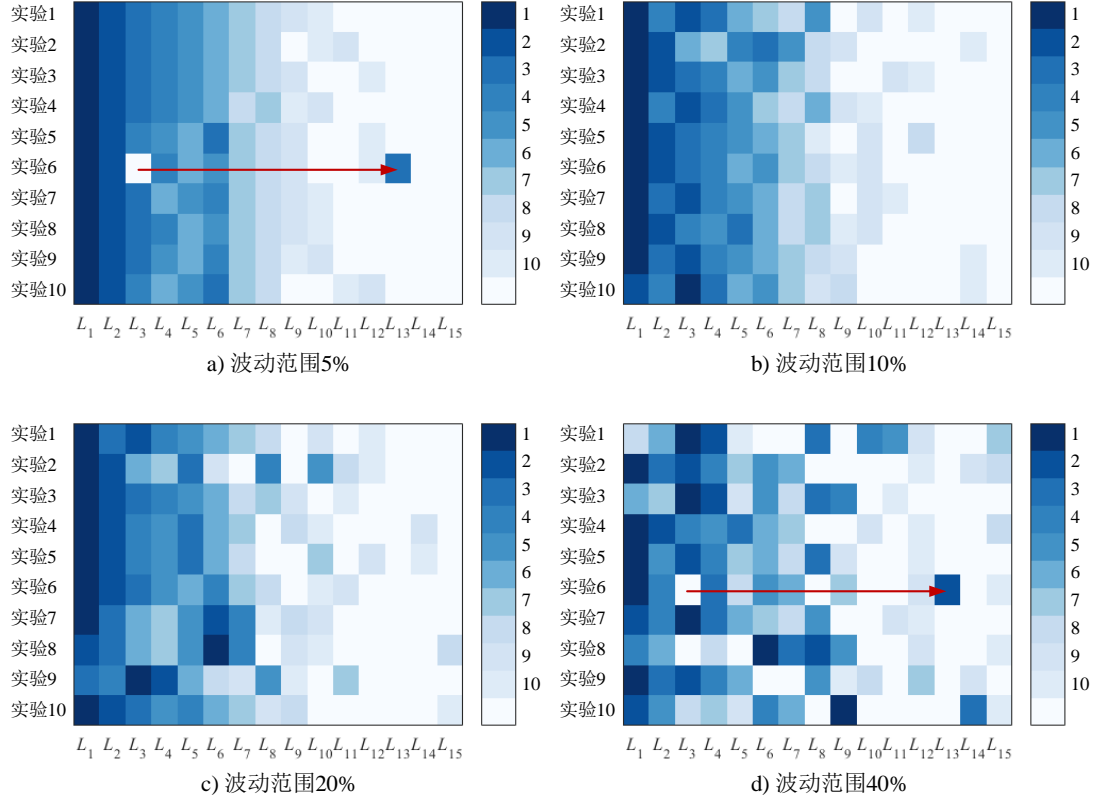
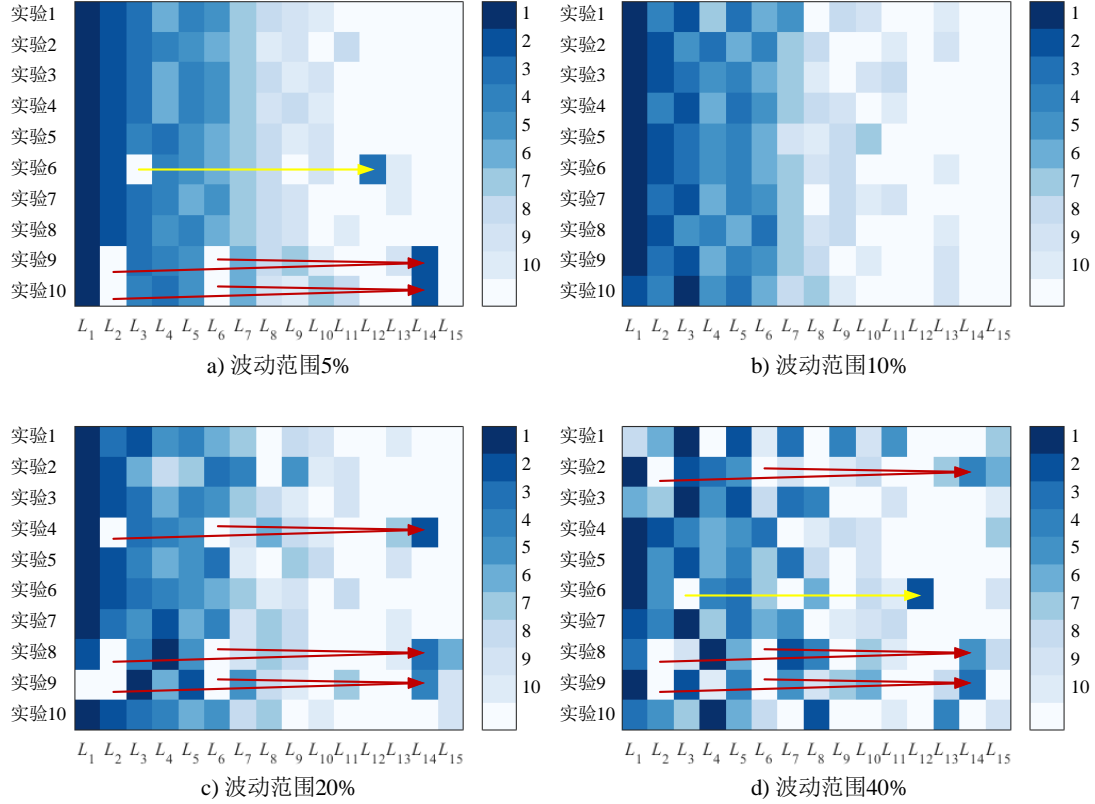


图 3-12 不同波动范围下的法则 2 优选结果 ( $l_0=4$ )

其中,  $L_1 = L_{(13,4 \rightarrow 14,* \rightarrow 15,* \rightarrow 16,* \rightarrow 12,1)}$ ,  $L_2 = L_{(14,4 \rightarrow 15,* \rightarrow 16,* \rightarrow 12,* \rightarrow 8,1)}$ ,  $L_3 = L_{(1,1 \rightarrow 5,* \rightarrow 9,* \rightarrow 10,* \rightarrow 11,2)}$ ,  $L_4 = L_{(5,1 \rightarrow 9,* \rightarrow 10,* \rightarrow 11,* \rightarrow 12,2)}$ ,  $L_5 = L_{(15,4 \rightarrow 16,* \rightarrow 12,* \rightarrow 8,* \rightarrow 4,1)}$ ,  $L_6 = L_{(4,2 \rightarrow 3,* \rightarrow 2,* \rightarrow 6,* \rightarrow 10,3)}$ ,  $L_7 = L_{(3,2 \rightarrow 2,* \rightarrow 6,* \rightarrow 10,* \rightarrow 14,3)}$ ,  $L_8 = L_{(8,2 \rightarrow 7,* \rightarrow 6,* \rightarrow 5,4)}$ ,  $L_9 = L_{(1,4 \rightarrow 2,* \rightarrow 3,* \rightarrow 4,2)}$ ,  $L_{10} = L_{(12,2 \rightarrow 11,* \rightarrow 10,* \rightarrow 9,4)}$ ,  $L_{11} = L_{(14,3 \rightarrow 10,* \rightarrow 6,* \rightarrow 2,1)}$ ,  $L_{12} = L_{(5,4 \rightarrow 6,* \rightarrow 7,* \rightarrow 8,2)}$ ,  $L_{13} = L_{(1,1 \rightarrow 5,* \rightarrow 9,* \rightarrow 10,2)}$ ,  $L_{14} = L_{(15,3 \rightarrow 11,* \rightarrow 7,* \rightarrow 3,1)}$ ,  $L_{15} = L_{(13,3 \rightarrow 9,* \rightarrow 5,* \rightarrow 1,1)}$ 。

从图 3-12 可以看出，在本文算例  $l_0=4$  中当交通流量在 5% 的范围内波动时，法则 2 生成的协调路径集就开始发生变化，其中有 5 次实验的协调路径集发生变化，其表现为协调路径链  $L_3$  因流量波动未达到流量阈值，被拆分为长度略短的协调路径链  $L_{13}$ ，如图 3-12 a) 所示。随着交通流量波动范围的逐步增大，协调路径集及其内部路径链排名的变化概率逐渐增大，如图 3-12 b)、c)、d) 所示。


 图 3-13 不同波动范围下的法则 2 优选结果 ( $l_0=5$ )

其中,  $L_1=L(13,4 \rightarrow 14,* \rightarrow 15,* \rightarrow 16,* \rightarrow 12,1)$ ,  $L_2=L(14,4 \rightarrow 15,* \rightarrow 16,* \rightarrow 12,* \rightarrow 8,1)$ ,  $L_3=L(1,1 \rightarrow 5,* \rightarrow 9,* \rightarrow 10,* \rightarrow 11,2)$ ,  $L_4=L(4,2 \rightarrow 3,* \rightarrow 2,* \rightarrow 6,* \rightarrow 10,* \rightarrow 14,3)$ ,  $L_5=L(5,1 \rightarrow 9,* \rightarrow 10,* \rightarrow 11,* \rightarrow 12,2)$ ,  $L_6=L(15,4 \rightarrow 16,* \rightarrow 12,* \rightarrow 8,* \rightarrow 4,1)$ ,  $L_7=L(8,2 \rightarrow 7,* \rightarrow 6,* \rightarrow 5,4)$ ,  $L_8=L(1,4 \rightarrow 2,* \rightarrow 3,* \rightarrow 4,2)$ ,  $L_9=L(12,2 \rightarrow 11,* \rightarrow 10,* \rightarrow 9,4)$ ,  $L_{10}=L(5,4 \rightarrow 6,* \rightarrow 7,* \rightarrow 8,2)$ ,  $L_{11}=L(14,3 \rightarrow 10,* \rightarrow 6,* \rightarrow 2,1)$ ,  $L_{12}=L(1,1 \rightarrow 5,* \rightarrow 9,* \rightarrow 10,2)$ ,  $L_{13}=L(15,3 \rightarrow 11,* \rightarrow 7,* \rightarrow 3,1)$ ,  $L_{14}=L(14,4 \rightarrow 15,* \rightarrow 16,* \rightarrow 12,* \rightarrow 8,* \rightarrow 4,1)$ ,  $L_{15}=L(13,3 \rightarrow 9,* \rightarrow 5,* \rightarrow 1,1)$ 。

从图 3-13 可以看出, 在本文算例  $l_0=5$  中当交通流量在 5% 的范围内波动时, 法则 2 生成的协调路径集就开始发生变化, 其中有 6 次实验的协调路径集发生变化, 如图 3-13 a) 所示。随着交通流量波动范围的逐步增大, 协调路径集及其内部路径链排名的变化概率逐渐增大, 且由于法则 2 规定协调路径集内任意两条协调路径链之间不存在包含关系, 因此出现了两条较短协调路径链合并形成一条总流量更大的较长协调路径链的情况, 如图 3-13 a)、c)、d) 所示。

长度阈值  $l_0=6$  时的协调路径集选取结果与  $l_0=5$  时完全一致。由此可见, 当长度阈值增加到一定数值的时候, 所选协调路径集不再因长度阈值的增加而变化, 敏感度也不再发生变化。

对比图 3-11-图 3-13 发现, 在同一波动等级上法则 2 的长度阈值的取值越小, 所选



取的协调路径集变化幅度越小，因此长度阈值取值小的法则 2 将具有更强的稳定性

在使用法则 1 进行协调路径集优选时，为了能够选出尽可能长的协调路径链，将流量阈值设置较小（ $q_0=250$ ），因此在流量未发生波动时选出的协调路径链均是较长路径链（如 11 a)所示），所以当流量发生波动时，仅出现路径链一分为二的情况。在使用法则 2 进行协调路径集优选时，为了能够选出总流量尽可能大的协调路径链，将长度阈值设置较大（ $l_0=5$ ），因此在流量未发生波动时选择了未达到长度阈值的路径链（如 12 c)中的  $L_2$ 、 $L_6$ ），所以当流量发生波动时，容易出现选择更长路径链的情况，即表现为路径链合二为一。

对比图 3-7 与图 3-13 可以发现，在同一波动等级上利用法则 1 优选得到的协调路径链排名变化幅度比法则 2 更小，表现出更好的稳定性。其原因在于，法则 1 是将流量大小作为路径集优选的约束条件，因此其路径链排名对于流量波动的敏感性较弱；而法则 2 是将流量大小直接纳入目标函数值计算，因此流量波动对其路径链排名将产生较大影响。

综上所述，上述两种优选方法均能够有效地选出路网中流量较大的路径链，其中流量约束下基于路径链长度最大的路径集优选方法具有计算量小、实时性好、稳定性强等特点，能够最大限度地选取互不重叠的较长协调路径链；而长度约束下基于路径链总流量最大的路径集优选方法则具有规则简明、算法简单等特点，能够选取出总流量最大的协调路径链，协调控制效果将更容易得以保障。

### 3.4 本章小结

考虑到现有的交通控制子区划分方法无法反映控制区域内交叉口之间的方向性协调控制需求，提出了基于路径链长度及其交通量大小的协调路径集优选方法，并分析了路网流量波动对协调路径集优选结果的影响。算例分析结果表明，本文方法能够根据拟协调的交叉口数量和行驶路径流量，选出控制区域内流量较大的主要路径链，能够更加细致地考虑交叉口之间的方向性协调需求，可满足城市区域交通信号协调控制的需要，进一步丰富控制子区与交叉口群的划分理论。

## 第四章 面向区域协调路径集的信号控制模型

基于路径链长度及其交通量大小的协调路径集优选方法仅考虑各协调路径流量，但协调交叉口关联性不仅与流量有关，还受交叉口分布几何关系、周期等因素影响。通常协调交叉口间距不能过大，主要原因是适中的间距利于车队的保持。为进一步考虑交叉口间距与周期等因素，在从基于路径链长度及其交通量大小的协调路径集优选方法初步优选出协调路径集后，再从协调效果角度进行进一步优选，同时进行绿波协调控制。

### 4.1 相位结构

在 2.1.1 节中对协调路径链的节点交叉口所需满足的相位约束条件进行了阐述，通过在交叉节点设置相应约束条件，从而实现协调路径链之间的共同优化。

目前针对相位的定义，主要有两种：国内学者<sup>[90-93]</sup>认为相位是一个流向或者若干个无冲突车流的组合流向所获得的一段连续时间的通行权，即一个完整的信号周期可以由若干个相位组成；而国外学者普遍采用美国电气制造商协会 NEMA TS-2 标准<sup>[94]</sup>则认为相位是一个周期内，分配给任意一个独立交通流的绿灯时间。

可以看出，国内采用基于信号灯组的控制方式的定义是将一股或若干股无冲突的车流的放行认为是一个相位，而 NEMA 则采用基于信号灯色的控制方式，将两个简单相位的叠加而成一个复合相位，两个 NEMA 复合相位称为一个阶段（Stage）。

NEMA 定义了一种针对于十字交叉口的双环（Dual-Ring）八相位结构，如图 4-1 所示。

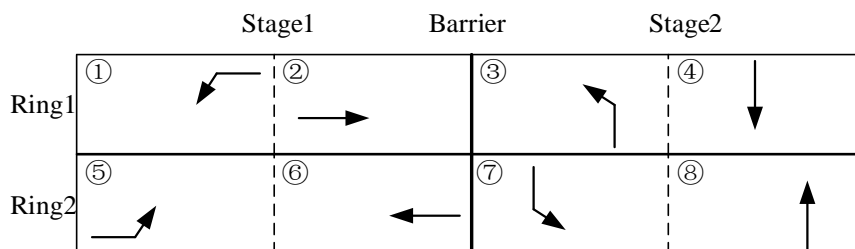


图 4-1 NEMA 双环相位结构

双环结构有两个分别对应东西方向和南北方向的相位组（Stage），即相位①、②、⑤、⑥组成的相位组 1 与相位③、④、⑦、⑧组成的相位组 2。相位组间有隔离线

(Barrier)，两侧的相位均不能跨越隔离线，即相位组 1 的环 1 和环 2 必须同时结束，相位组 2 的环 1 和环 2 必须同时获得通行权。相位①、②、③、④属于一个环 (Ring)，相位⑤、⑥、⑦、⑧属于一个环。在一个相位组中，在遇到分隔线以前两个环的相位分别独立控制，相位①和②、③和④、⑤和⑥、⑦和⑧可互换位置。

NEMA 将一股及以上的交通流在绿灯及清空时间内跨越了两个或两个以上的相位的现象称为相位搭接 (Overlap)。在图 4-2 中，环 1 的相位①和环 2 的相位⑥在阴影区域形成了搭接相位。

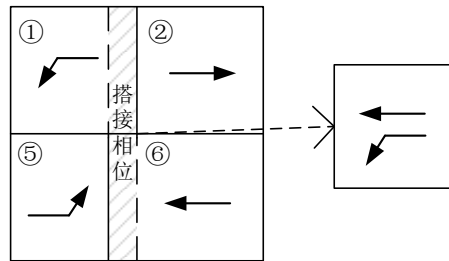


图 4-2 搭接相位示意图

相序 (Phase Sequence) 是相位的运行顺序，通常为车流获得通行权的顺序。以图 4-1 的双环结构为例，所有可能的相位组合如图 4-3 所示。从中可见，一个相位组有 6 种可能的相位组合，一个信号周期有 36 种可能的相位组合。

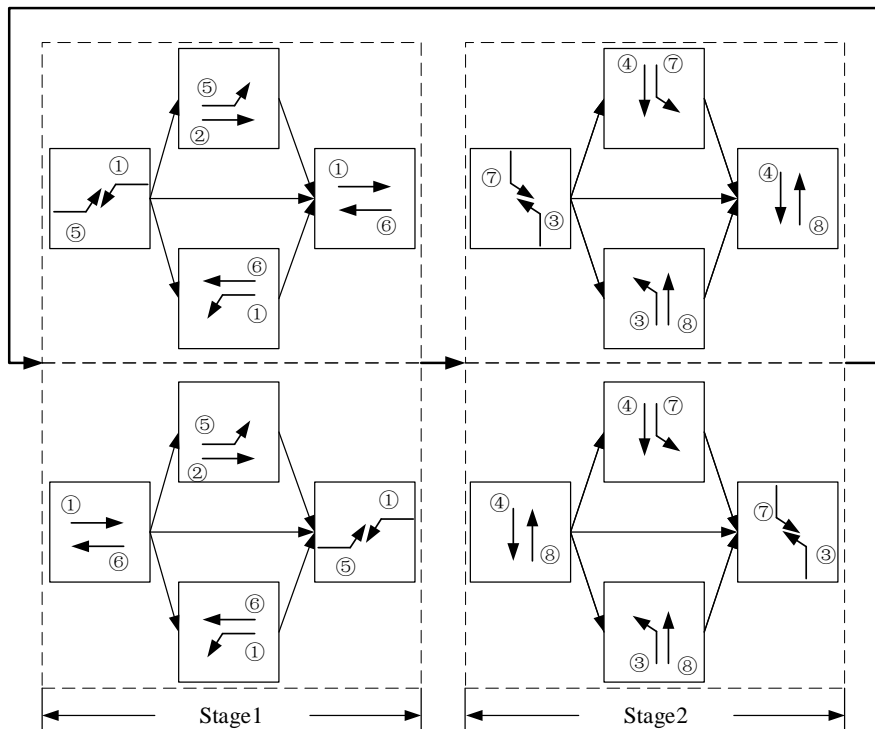


图 4-3 双环结构所有可能相位组合

综上所述，NEMA 双环相位结构灵活多变，涵盖单口、对称以及搭接等多种放行方式，因此本章将在 NEMA 双环相位结构的基础上建立面向协调路径集的信号控制模型。

## 4.2 模型建立

假设城市道路网中有  $n_l$  条协调路径链，则协调路径集  $S = \{L_1, L_2, \dots, L_{n_l}\}$ ，若协调路径链  $L_l$  由  $m_l$  条协调路径、 $m_l + 1$  个交叉口构成，按协调路径链的方向依次为协调路径及交叉口进行编号，则协调路径链  $L_l = \{P_{(l,1)}, P_{(l,2)}, \dots, P_{(l,m_l)}\}$ 。协调路径  $P_{(l,p)}$  依次经过交叉口  $I_{(l,p)}$  和交叉口  $I_{(l,p+1)}$ ，将车辆从上游交叉口  $I_{(l,p)}$  到下游交叉口  $I_{(l,p+1)}$  的行驶时间记为  $t_{(l,p)}$ 。交叉口  $I_{(l,p)}$  的东、南、西、北四个方向的左转相位和直行相位中心时刻分别记为  $T_{EL(l,p)}$ 、 $T_{ET(l,p)}$ 、 $T_{SL(l,p)}$ 、 $T_{ST(l,p)}$ 、 $T_{WL(l,p)}$ 、 $T_{WT(l,p)}$ 、 $T_{NL(l,p)}$ 、 $T_{NT(l,p)}$ ，相位时间分别记为  $t_{EL(l,p)}$ 、 $t_{ET(l,p)}$ 、 $t_{SL(l,p)}$ 、 $t_{ST(l,p)}$ 、 $t_{WL(l,p)}$ 、 $t_{WT(l,p)}$ 、 $t_{NL(l,p)}$ 、 $t_{NT(l,p)}$ 。图 4-4 中交叉口  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_5$ 、 $I_7$ 、 $I_8$  均为交叉节点，以交叉口  $I_1$  为例，交叉口  $I_1$  可以表示  $I_{(1,1)}$  或  $I_{(3,1)}$ 。

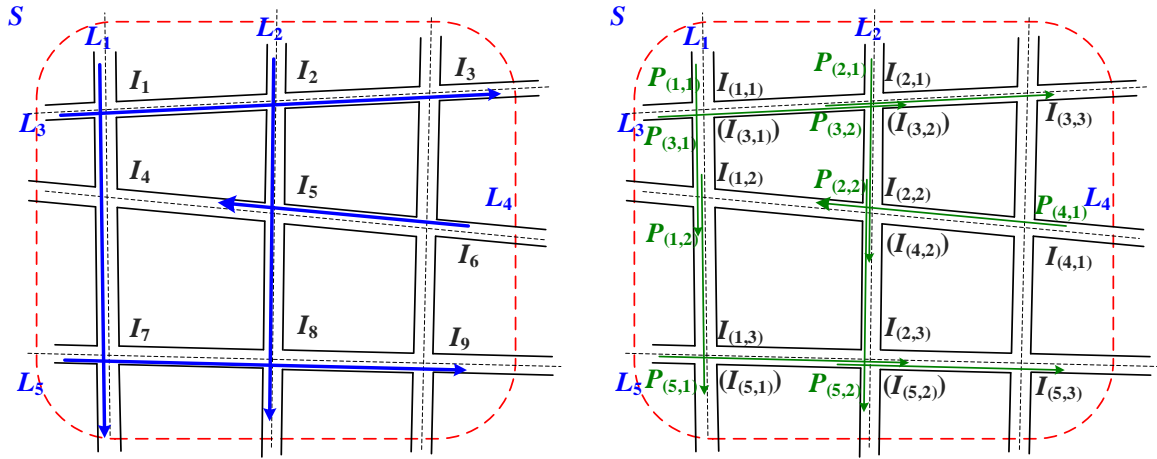


图 4-4 路网协调路径集示意图

### 4.2.1 约束条件

#### 1、公共信号周期

在进行区域协调控制时，为保证协调效果通常要求控制范围内的各交叉口执行相

等的周期时长，即公共信号周期。假设交叉口  $I_{(l,p)}$  的信号周期允许取值范围是  $[C_{\min(l,p)}, C_{\max(l,p)}]$ ，则区域协调控制公共信号周期  $C$  的约束表达式如式（4-1）所示：

$$\max\{C_{\min(1,1)}, \dots, C_{\min(l,p)}, \dots, C_{\min(n_l, m_l)}\} \leq C \leq \min\{C_{\max(1,1)}, \dots, C_{\max(l,p)}, \dots, C_{\max(n_l, m_l)}\} \quad (4-1)$$

## 2、相位时间

为简化公式，以  $AB$  代表交叉口的 8 股车流，其中  $A$  代表进口方向东（E）、南（S）、西（W）、北（N）， $B$  代表行驶方向左转（L）、直行（T）。为了满足车辆最小通行需求，相位时间  $t_{AB(l,p)}$  不得小于相应的最短相位时间  $t_{AB\min(l,p)}$ ，即最短绿灯时间  $t_{GAB\min(l,p)}$ 、黄灯时间  $t_{YAB(l,p)}$  及红灯清场时间  $t_{RAB(l,p)}$  之和，故交叉口  $I_{(l,p)}$  相位时间的约束表达式如式（4-2）所示的：

$$t_{AB(l,p)} \geq t_{AB\min(l,p)} = t_{GAB\min(l,p)} + t_{YAB(l,p)} + t_{RAB(l,p)} \quad (4-2)$$

## 3、相位相序

1) 由于相位组被分隔线严格分开，同一相位组中环 1 和环 2 的相位时间必须相等。即相位①、②的相位时间之和与相位⑤、⑥的相位时间之和相等，相位③、④的相位时间之和与相位⑦、⑧的相位时间之和相等，约束条件如式（4-3）所示的：

$$\begin{aligned} t_{EL(l,p)} + t_{WT(l,p)} &= t_{WL(l,p)} + t_{ET(l,p)} \\ t_{SL(l,p)} + t_{NT(l,p)} &= t_{NL(l,p)} + t_{ST(l,p)} \end{aligned} \quad (4-3)$$

2) 环 1 和环 2 分别构成一个完整周期，环 1 和环 2 的持续时间均为周期时长  $C$ ，约束条件如式（4-4）所示的：

$$t_{EL(l,p)} + t_{WT(l,p)} + t_{SL(l,p)} + t_{NT(l,p)} = C \quad (4-4)$$

3) 相位组 1 的环 1 和环 2 必须同时获得通行权，即环 1 和环 2 在相位组 1 的起始时刻相等，约束条件如式（4-5）所示的：

$$\min\left(T_{EL(l,p)} - \frac{1}{2}t_{EL(l,p)}, T_{WT(l,p)} - \frac{1}{2}t_{WT(l,p)}\right) = \min\left(T_{WL(l,p)} - \frac{1}{2}t_{WL(l,p)}, T_{ET(l,p)} - \frac{1}{2}t_{ET(l,p)}\right) \quad (4-5)$$

4) 相位组 1 结束的同时，相位组 2 获得通行权，即相位组 2 的起始时刻与相位组 1 的终止时刻重合，约束条件如式（4-6）所示的：

$$\max\left(T_{EL(l,p)} + \frac{1}{2}t_{EL(l,p)}, T_{WT(l,p)} + \frac{1}{2}t_{WT(l,p)}\right) = \min\left(T_{SL(l,p)} - \frac{1}{2}t_{SL(l,p)}, T_{NT(l,p)} - \frac{1}{2}t_{NT(l,p)}\right)$$

$$\max\left(T_{WL(l,p)} + \frac{1}{2}t_{WL(l,p)}, T_{ET(l,p)} + \frac{1}{2}t_{ET(l,p)}\right) = \min\left(T_{NL(l,p)} - \frac{1}{2}t_{NL(l,p)}, T_{ST(l,p)} - \frac{1}{2}t_{ST(l,p)}\right) \quad (4-6)$$

5) 在 NEMA 双环相位结构中, 同一相位组各相邻相位间没有空隙, 即前一相位终止时刻与下一相位起始时刻相等, 即相位①的终止点和相位②的起始点重合, 相位③的终止点和相位④的起始点重合, 相位⑤的终止点和相位⑥的起始点重合, 相位⑦的终止点和相位⑧的起始点重合, 如公式 (4-7) 所示:

$$\begin{aligned} \max(T_{EL(l,p)}, T_{WT(l,p)}) - \min(T_{EL(l,p)}, T_{WT(l,p)}) &= \frac{1}{2}(t_{EL(l,p)} + t_{WT(l,p)}) \\ \max(T_{SL(l,p)}, T_{NT(l,p)}) - \min(T_{SL(l,p)}, T_{NT(l,p)}) &= \frac{1}{2}(t_{SL(l,p)} + t_{NT(l,p)}) \\ \max(T_{WL(l,p)}, T_{ET(l,p)}) - \min(T_{WL(l,p)}, T_{ET(l,p)}) &= \frac{1}{2}(t_{WL(l,p)} + t_{ET(l,p)}) \\ \max(T_{NL(l,p)}, T_{ST(l,p)}) - \min(T_{NL(l,p)}, T_{ST(l,p)}) &= \frac{1}{2}(t_{NL(l,p)} + t_{ST(l,p)}) \end{aligned} \quad (4-7)$$

6) 交叉口的每个相位中心时刻点需在公共信号周期内赋值, 因此交叉口  $I_{(l,p)}$  的相位中心点应满足式 (4-8):

$$0 \leq T_{AB(l,p)} \leq C \quad (A \in \{E, S, W, N\}, B \in \{L, T\}) \quad (4-8)$$

7) 同一交叉节点的相位中心时刻点、相位时间相等。若交叉口  $I_{(l_1, p_1)}$  和  $I_{(l_2, p_2)}$  为同一交叉节点, 则  $T_{AB(l_1, p_1)} = T_{AB(l_2, p_2)}$ ,  $t_{AB(l_1, p_1)} = t_{AB(l_2, p_2)}$ 。

#### 4、相位差

协调路径链上各交叉口间相位差的合理设置对绿波协调效果起着至关重要的作用。若相邻交叉口的相位差设置值过大, 易使上游交叉口先行驶至下游交叉口的车辆停车而增加停车次数; 若是相位差设置值过小, 只能保证上游交叉口行驶的部分车辆顺利通过, 而另一部分则需等待较长时间的红灯而造成大量停车延误。只有根据实际道路交通情况, 将相位差合理设置, 才能使车流连续通过多个交叉口, 达到优化协调控制的效果。

对于绿波协调控制设计而言, 当车辆连续行驶轨迹线同时穿越上、下游交叉口的绿灯中心时刻点时, 上、下游交叉口之间的绿波带宽将达到最大, 协调控制效果将达到最佳。而各交叉口实际相位中心时刻点与相位中心时刻线的时间差将确定绿波协调

控制效果。因此，为将协调控制效果控制在一个较佳的范围内，设置交叉口相位中心时刻点最大允许偏移时间  $\varepsilon$ ，当交叉口实际相位中心时刻点偏离相位中心时刻线小于  $\varepsilon$  时，认为协调效果较佳。

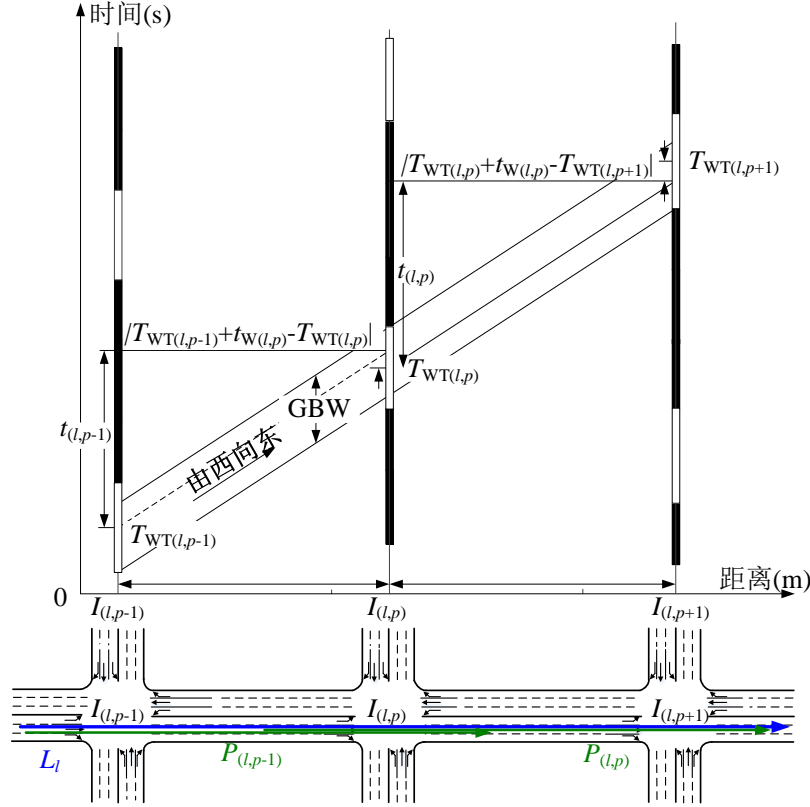


图 4-5 绿波协调控制示例分析

例如，在图4-5中，协调路径链  $L_l$  由路径  $P_{(l,p-1)}$  和路径  $P_{(l,p)}$  组成，经过交叉口  $I_{(l,p-1)}$ 、 $I_{(l,p)}$  和  $I_{(l,p+1)}$ 。若使协调路径  $P_{(l,p-1)}$  达到较佳的绿波协调控制效果，则交叉口  $I_{(l,p-1)}$  的西进口直行相位中心时刻点  $T_{WT(l,p-1)}$  与交叉口  $I_{(l,p)}$  的西进口直行相位中心时刻点  $T_{WT(l,p)}$  需满足约束条件  $|T_{WT(l,p)} - T_{WT(l,p-1)} - t_{(l,p-1)} - w_{(l,p-1)} \cdot C| \leq \varepsilon$ ，其中  $t_{(l,p-1)}$  是车辆从协调路径  $P_{(l,p-1)}$  上游交叉口  $I_{(l,p-1)}$  到下游交叉口  $I_{(l,p)}$  的通行时间， $w_{(l,p-1)}$  为整数；同理协调路径  $P_{(l,p)}$  也需满足约束条件  $|T_{WT(l,p+1)} - T_{WT(l,p)} - t_{(l,p)} - w_{(l,p)} \cdot C| \leq \varepsilon$ ，其中  $t_{(l,p)}$  是车辆从协调路径  $P_{(l,p)}$  上游交叉口  $I_{(l,p)}$  到下游交叉口  $I_{(l,p+1)}$  的通行时间， $w_{(l,p)}$  为整数。但若初步优选出的协调路径集中所有路径均需要满足绿波协调控制条件，未必能有可行解。因此，引入路径链协调决策变量  $x_{(l,p)}$ ，其定义为  $x_{(l,p)} = \begin{cases} 1, & \text{选择协调路径 } P_{(l,p)} \text{ 进行协调} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ ，使交叉

口  $I_{(l,p-1)}$ 、 $I_{(l,p)}$  和  $I_{(l,p+1)}$  西进口直行相位中心时刻点的满足约束条件

$$\begin{cases} \left| T_{\text{WT}(l,p)} - T_{\text{WT}(l,p-1)} - t_{(l,p-1)} - w_{(l,p-1)} \cdot C \right| \cdot x_{(l,p-1)} \leq \varepsilon \\ \left| T_{\text{WT}(l,p+1)} - T_{\text{WT}(l,p)} - t_{(l,p)} - w_{(l,p)} \cdot C \right| \cdot x_{(l,p)} \leq \varepsilon \end{cases}, \text{ 以实现路径链 } L_l \text{ 的协调控制。}$$

对于协调路径  $P_{(l,p)}$ ，将其上游交叉口  $I_{(l,p)}$  协调相位的中心时刻点记为  $T_{AB(l,p)}^*$ ，下游交叉口  $I_{(l,p+1)}$  协调相位的中心时刻点记为  $T_{AB(l,p+1)}^*$ ，将上游交叉口  $I_{(l,p)}$  到达下游交叉口  $I_{(l,p+1)}$  的通行时间记为  $t_{(l,p+1)}$ ，则对于协调路径  $P_{(l,p)}$  需满足

$$\left| T_{AB(l,p+1)}^* - T_{AB(l,p)}^* - t_{(l,p+1)} - w_{(l,p+1)} \cdot C \right| \cdot x_{(l,p+1)} \leq \varepsilon \quad (4-9)$$

#### 4.2.2 目标函数

对于区域绿波控制设计，其目的在于使尽可能多的车辆可以不停车的连续通过多个交叉口，减少停车次数与车辆延误。因此，可以将选择进行协调控制的协调路径的总流量作为协调控制评价指标  $Q$ ，其表达式为：

$$Q = \sum_{l=1}^{n_l} \sum_{p=1}^{m_l} x_{(l,p)} q_{(l,p)} \quad (4-10)$$

其中， $x_{(l,p)}$  为路径  $P_{(l,p)}$  协调决策变量， $q_{(l,p)}$  为路径  $P_{(l,p)}$  的流量。

$Q$  值越大，表示协调路径集中能够不停车的连续通过下游交叉口的车辆中越多，区域的整体协调效果越好。为使整个控制区域内路网的绿波协调控制达到最佳，目标函数是最大化协调路径选择的总流量，即

$$\max \sum_{l=1}^{n_l} \sum_{p=1}^{m_l} x_{(l,p)} q_{(l,p)} \quad (4-11)$$

综上所述，面向协调路径集的双环区域绿波协调控制模型如式（4-12）所示：



$$\left\{ \begin{array}{l}
 Q = \max \left( Q = \sum_{l=1}^{n_l} \sum_{p=1}^{m_l} x_{(l,p)} q_{(l,p)} \right) \\
 \text{s.t. } \left| T_{AB(l,p+1)}^* - T_{AB(l,p)}^* - t_{(l,p+1)} - w_{(l,p+1)} \cdot C \right| \cdot x_{(l,p+1)} \leq \varepsilon \\
 t_{\text{EL}(l,p)} + t_{\text{WT}(l,p)} = t_{\text{WL}(l,p)} + t_{\text{ET}(l,p)} \\
 t_{\text{SL}(l,p)} + t_{\text{NT}(l,p)} = t_{\text{NL}(l,p)} + t_{\text{ST}(l,p)} \\
 t_{\text{EL}(l,p)} + t_{\text{WT}(l,p)} + t_{\text{SL}(l,p)} + t_{\text{NT}(l,p)} = C \\
 \min \left( T_{\text{EL}(l,p)} - \frac{1}{2} t_{\text{EL}(l,p)}, T_{\text{WT}(l,p)} - \frac{1}{2} t_{\text{WT}(l,p)} \right) = \min \left( T_{\text{WL}(l,p)} - \frac{1}{2} t_{\text{WL}(l,p)}, T_{\text{ET}(l,p)} - \frac{1}{2} t_{\text{ET}(l,p)} \right) \\
 \max \left( T_{\text{EL}(l,p)} + \frac{1}{2} t_{\text{EL}(l,p)}, T_{\text{WT}(l,p)} + \frac{1}{2} t_{\text{WT}(l,p)} \right) = \min \left( T_{\text{SL}(l,p)} - \frac{1}{2} t_{\text{SL}(l,p)}, T_{\text{NT}(l,p)} - \frac{1}{2} t_{\text{NT}(l,p)} \right) \\
 \max \left( T_{\text{WL}(l,p)} + \frac{1}{2} t_{\text{WL}(l,p)}, T_{\text{ET}(l,p)} + \frac{1}{2} t_{\text{ET}(l,p)} \right) = \min \left( T_{\text{NL}(l,p)} - \frac{1}{2} t_{\text{NL}(l,p)}, T_{\text{ST}(l,p)} - \frac{1}{2} t_{\text{ST}(l,p)} \right) \\
 \max \left( T_{\text{EL}(l,p)}, T_{\text{WT}(l,p)} \right) - \min \left( T_{\text{EL}(l,p)}, T_{\text{WT}(l,p)} \right) = \frac{1}{2} (t_{\text{EL}(l,p)} + t_{\text{WT}(l,p)}) \\
 \max \left( T_{\text{SL}(l,p)}, T_{\text{NT}(l,p)} \right) - \min \left( T_{\text{SL}(l,p)}, T_{\text{NT}(l,p)} \right) = \frac{1}{2} (t_{\text{SL}(l,p)} + t_{\text{NT}(l,p)}) \\
 \max \left( T_{\text{WL}(l,p)}, T_{\text{ET}(l,p)} \right) - \min \left( T_{\text{WL}(l,p)}, T_{\text{ET}(l,p)} \right) = \frac{1}{2} (t_{\text{WL}(l,p)} + t_{\text{ET}(l,p)}) \\
 \max \left( T_{\text{NL}(l,p)}, T_{\text{ST}(l,p)} \right) - \min \left( T_{\text{NL}(l,p)}, T_{\text{ST}(l,p)} \right) = \frac{1}{2} (t_{\text{NL}(l,p)} + t_{\text{ST}(l,p)}) \\
 T_{AB(l,p)} \in [0, C] \quad (A \in \{E, S, W, N\}, B \in \{L, T\}) \\
 t_{AB(l,p)} \geq t_{AB \min(l,p)} \\
 C \in [C_{\min}, C_{\max}] \\
 T_{AB(l_1, p_1)} = T_{AB(l_2, p_2)} \quad (I_{(l_1, p_1)} = I_{(l_2, p_2)}) \\
 t_{AB(l_1, p_1)} = t_{AB(l_2, p_2)}
 \end{array} \right. \quad (4-12)$$

### 4.3 算例分析

#### 4.3.1 基础数据

以 2.3.2 节的四横四纵路网为例，路网结构及相邻交叉口之间的路段距离如图 4-6 所示，路网边界驶入交通流量及各交叉口交通流量转向比例，如表 2-3 和表 2-4 所示。已知假定所有路段上的绿波设计行驶速度均为 11m/s，公共信号周期的取值范围为

[100,120]s, 各交叉口均处于未饱和交通状态, 且设定各进口方向的最短相位时间依据流量进行取值, 设置交叉口相位中心时刻点最大允许偏移时间  $\varepsilon = 5\text{s}$ 。

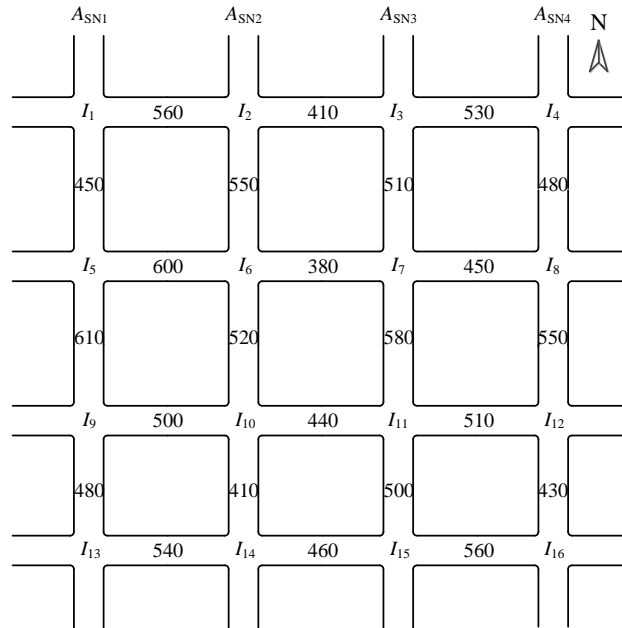


图 4-6 路网结构图

根据路网结构、路网边界驶入交通流量及各交叉口交通流量转向比例, 利用 Vissim 绘制区域路网, 输入路网边界驶入交通流量, 通过行驶路径决策, 仿真获取车辆轨迹数据, 再利用 Matlab 从路径链经过的交叉口数量 (路径链长度) 的角度选取协调路径集 (具体方法见第 3.1 节), 协调路径集优选结果如图 3-5、图 3-6 所示。为提高整体路网的绿波协调效果, 将尽可能多的协调路径链进行协调, 分别选择法则 1 流量阈值  $q_0 = 250\text{pcu/h}$  的优选结果和法则 2 长度阈值  $l_0 = 5$  的优选结果作为协调路径集的初选结果, 如图 4-7 所示, 各协调路径链流量如表 4-1 所示。

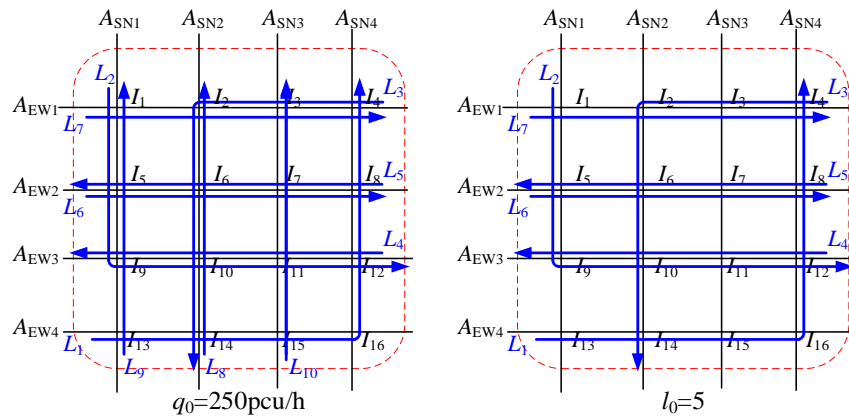


图 4-7 协调路径集初步优选结果

表 4-1 协调路径集初步优选结果

编号	协调路径链	$q(\text{puc/h})$
$L_1$	$L_{(13,4 \rightarrow 14, * \rightarrow 15, * \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1)}$	256
$L_2$	$L_{(1,1 \rightarrow 5, * \rightarrow 9, * \rightarrow 10, * \rightarrow 11, * \rightarrow 12, 2)}$	278
$L_3$	$L_{(4,2 \rightarrow 3, * \rightarrow 2, * \rightarrow 6, * \rightarrow 10, * \rightarrow 14, 3)}$	261
$L_4$	$L_{(12,2 \rightarrow 11, * \rightarrow 10, * \rightarrow 9, 4)}$	416
$L_5$	$L_{(8,2 \rightarrow 7, * \rightarrow 6, * \rightarrow 5, 4)}$	409
$L_6$	$L_{(5,4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 8, 2)}$	384
$L_7$	$L_{(1,4 \rightarrow 2, * \rightarrow 3, * \rightarrow 4, 2)}$	368
$L_8$	$L_{(14,3 \rightarrow 10, * \rightarrow 6, * \rightarrow 2, 1)}$	339
$L_9$	$L_{(13,3 \rightarrow 9, * \rightarrow 5, * \rightarrow 1, 1)}$	318
$L_{10}$	$L_{(15,3 \rightarrow 11, * \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 1)}$	299

### 4.3.2 模型求解

#### (1) 法则 1

根据路网数据和法则 1 初选的协调路径集，利用最优化问题求解工具 LINGO 软件对模型进行编程求解，如图 4-8 所示，代码见附录 1)。计算得到总的协调控制评价指标  $Q=23088$ （最大值 25250），最佳协调控制方案的公共信号周期  $C=120\text{s}$ ，协调路径集最终选择结果用红色线段表示，如图 4-9 所示，各交叉口各进口方向的绿灯中心时刻及信号相序如表 4-2 所示，相位时间分配如表 4-3 所示。

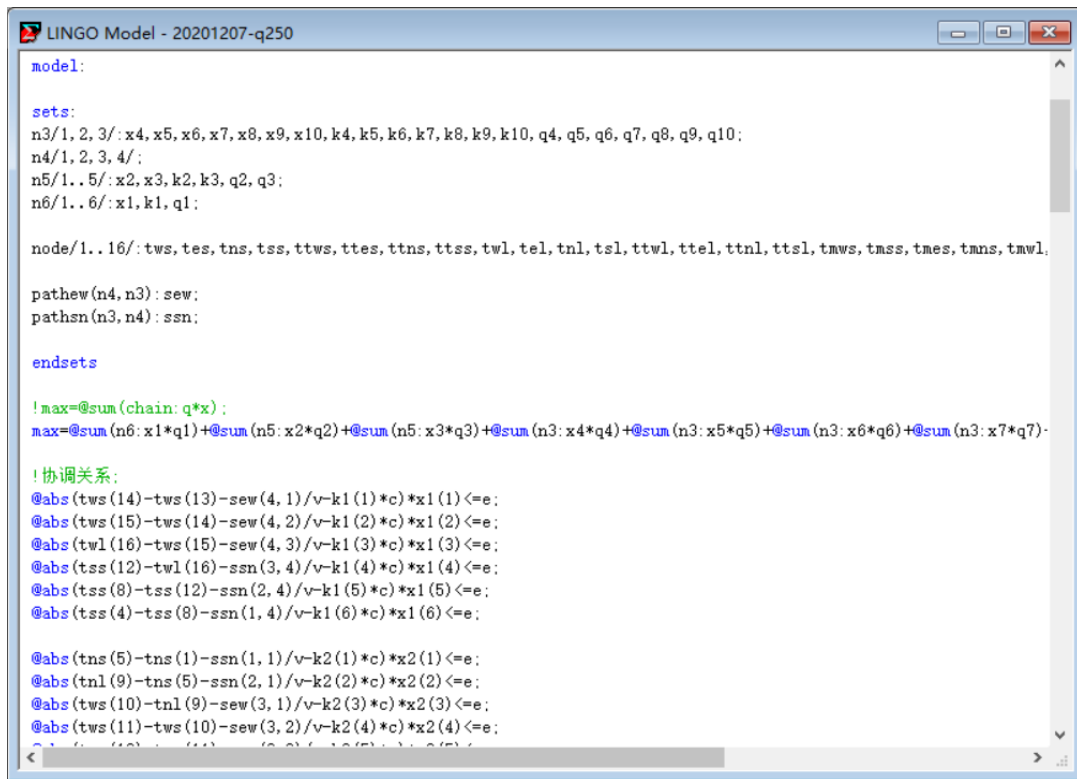


图 4-8 LINGO 软件程序界面

对比图 4-7 和图 4-9 发现，有 7 条路径链 ( $L_{(13,4 \rightarrow 14,* \rightarrow 15,* \rightarrow 16,* \rightarrow 12,* \rightarrow 8,* \rightarrow 4,1)}$ 、 $L_{(8,2 \rightarrow 7,* \rightarrow 6,* \rightarrow 5,4)}$ 、 $L_{(5,4 \rightarrow 6,* \rightarrow 7,* \rightarrow 8,2)}$ 、 $L_{(12,2 \rightarrow 11,* \rightarrow 10,* \rightarrow 9,4)}$ 、 $L_{(13,3 \rightarrow 9,* \rightarrow 5,* \rightarrow 1,1)}$ 、 $L_{(14,3 \rightarrow 10,* \rightarrow 6,* \rightarrow 2,1)}$ 、 $L_{(15,3 \rightarrow 11,* \rightarrow 7,* \rightarrow 3,1)}$ ) 全部纳入协调路径集；有 1 条路径链 ( $L_{(1,1 \rightarrow 5,* \rightarrow 9,* \rightarrow 10,* \rightarrow 11,* \rightarrow 12,2)}$ 、 $L_{(1,4 \rightarrow 2,* \rightarrow 3,* \rightarrow 4,2)}$ ) 从中间被打断，分成两条新的路径链；有 1 条路径链 ( $L_{(4,2 \rightarrow 3,* \rightarrow 2,* \rightarrow 6,* \rightarrow 10,* \rightarrow 14,3)}$ ) 选取了其中部分路径。

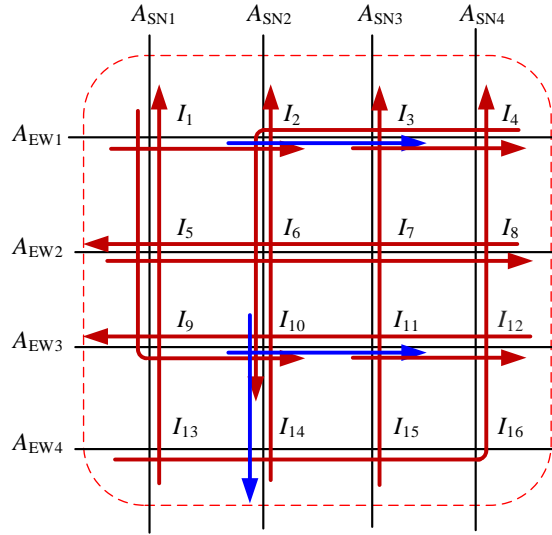


图 4-9 协调路径集最终优选结果（法则 1）

表 4-2 相位中心时刻及信号相序优化结果（法则 1）

交叉口	绿灯中心时刻/s								信号相序	
	$T_{WS}$	$T_{ES}$	$T_{NS}$	$T_{SS}$	$T_{WL}$	$T_{EL}$	$T_{NL}$	$T_{SL}$	东西	南北
$I_1$	82	103	18	7	78	107	43	54	搭接	搭接
$I_2$	8	8	63	63	101	101	30	30	对称	对称
$I_3$	84	69	42	42	109	4	22	22	搭接	对称
$I_4$	12	16	72	84	108	104	52	40	搭接	搭接
$I_5$	4	7	64	81	104	101	44	27	搭接	搭接
$I_6$	62	78	35	18	115	99	41	12	搭接	搭接
$I_7$	92	48	19	117	82	57	23	113	搭接	搭接
$I_8$	7	12	62	45	98	93	71	36	搭接	搭接
$I_9$	61	68	25	31	92	85	114	109	搭接	搭接
$I_{10}$	35	22	82	87	105	118	64	59	搭接	搭接
$I_{11}$	7	106	65	65	27	87	45	45	搭接	对称
$I_{12}$	49	55	109	120	30	23	86	74	搭接	搭接
$I_{13}$	66	83	24	112	56	93	24	111	搭接	搭接
$I_{14}$	0	32	81	54	0	32	82	53	单口	搭接
$I_{15}$	40	58	117	14	33	65	99	82	搭接	搭接
$I_{16}$	86	110	43	62	86	110	26	7	单口	搭接

表 4-3 交叉口各进口相位时间分配/s (法则 1)

交叉口	$t_{WS}$	$t_{ES}$	$t_{NS}$	$t_{SS}$	$t_{WL}$	$t_{EL}$	$t_{NL}$	$t_{SL}$
$I_1$	32	25	45	23	24	17	48	26
$I_2$	26	26	49	49	28	28	17	17
$I_3$	62	31	23	23	49	18	17	17
$I_4$	39	32	47	24	24	17	40	17
$I_5$	29	23	57	23	23	17	51	17
$I_6$	26	57	29	29	17	48	17	17
$I_7$	26	24	34	25	45	43	26	17
$I_8$	41	32	34	34	37	28	17	17
$I_9$	17	31	55	44	17	31	28	17
$I_{10}$	32	57	29	20	17	42	26	17
$I_{11}$	59	62	22	22	19	22	17	17
$I_{12}$	34	21	52	29	30	17	40	17
$I_{13}$	37	38	48	19	17	18	46	17
$I_{14}$	38	25	40	19	38	25	38	17
$I_{15}$	33	32	53	19	18	17	51	17
$I_{16}$	30	17	56	17	30	17	56	17

根据表 4-2 各交叉口的相位中心时刻点和表 4-3 各进口相位时间, 确定各交叉口的信号相位相序, 得到路网中各交叉口的相位结构如图 4-10 所示, 相位结构灵活多变, 包含单口放行、对称放行与搭接放行, 可见本文模型求解信号配时方案可以实现多种放行方式自由组合。

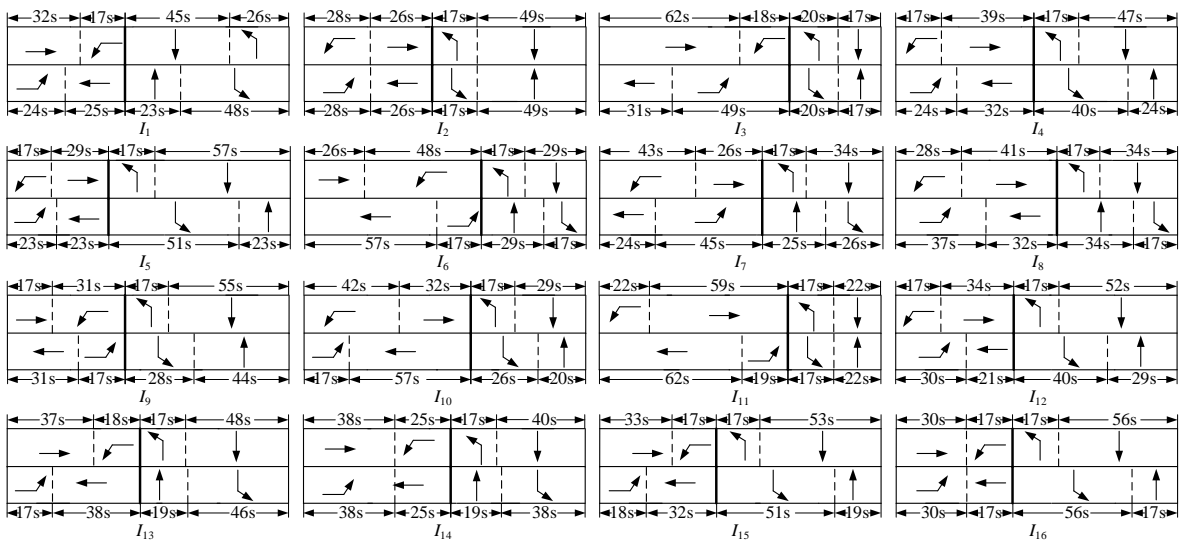


图 4-10 路网中各交叉口的相位结构 (法则 1)

根据确定好的公共信号周期、各交叉口相位中心时刻点以及相位时间, 分别算出协调路径链及所包含协调路径的绿波带宽, 如表 4-4 所示, 表中  $P_{(l,p)}$  表示协调路径链  $L_l$  的第  $p$  条协调路径。同时, 画出路网中协调路径集的绿波空间时距图, 如图 4-11 所示。

表 4-4 协调路径链的绿波带宽/s (法则 1)

协调路径链	路径链 带宽/s	协调路径带宽/s					
		$P_{(l,1)}$	$P_{(l,2)}$	$P_{(l,3)}$	$P_{(l,4)}$	$P_{(l,5)}$	$P_{(l,6)}$
$L_{(13,4 \rightarrow 14, * \rightarrow 15, * \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1)}$	8	32	33	26	25	26	24
$L_{(1,1 \rightarrow 5, * \rightarrow 9, * \rightarrow 10, 2)}$	26	46	28	26	-	-	-
$L_{(11,4 \rightarrow 12, 2)}$	34	34	-	-	-	-	-
$L_{(4,2 \rightarrow 3, * \rightarrow 2, * \rightarrow 6, * \rightarrow 10, 3)}$	24	27	25	25	28	-	-
$L_{(12,2 \rightarrow 11, * \rightarrow 10, * \rightarrow 9, 4)}$	21	21	56	30	-	-	-
$L_{(8,2 \rightarrow 7, * \rightarrow 6, * \rightarrow 5, 4)}$	13	23	24	23	-	-	-
$L_{(5,4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 8, 2)}$	21	25	21	26	-	-	-
$L_{(1,4 \rightarrow 2, 2)}$	23	23	-	-	-	-	-
$L_{(3,4 \rightarrow 4, 2)}$	39	39	-	-	-	-	-
$L_{(14,3 \rightarrow 10, * \rightarrow 6, * \rightarrow 2, 1)}$	16	16	20	29	-	-	-
$L_{(13,3 \rightarrow 9, * \rightarrow 5, * \rightarrow 1, 1)}$	12	19	23	19	-	-	-
$L_{(15,3 \rightarrow 11, * \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 1)}$	16	16	22	22	-	-	-

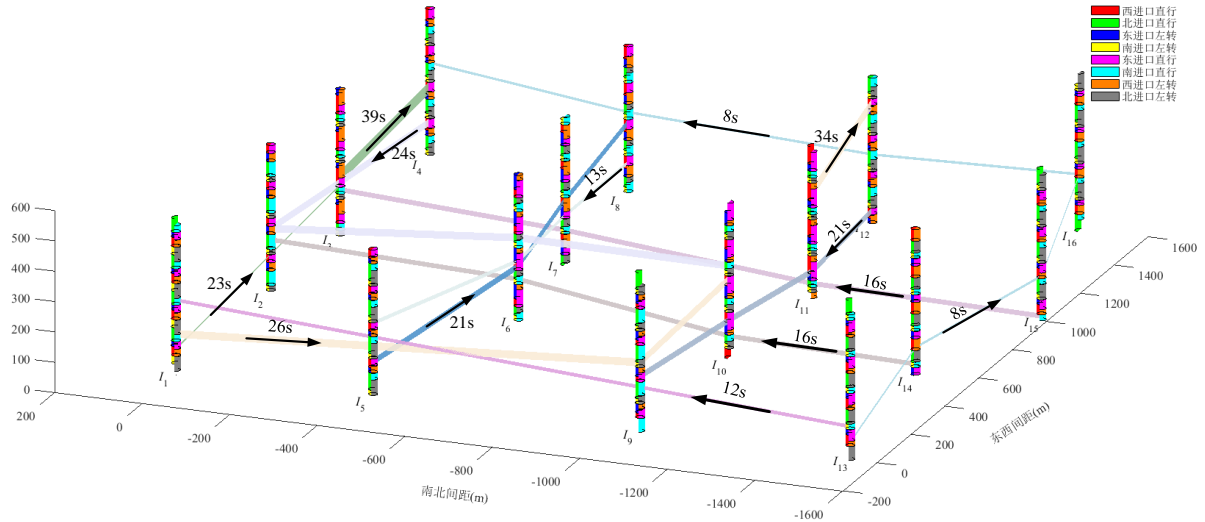


图 4-11 空间时距图 (法则 1)

由表 4-4 可以看到,在此绿波设计方案中,路网中各协调路径带宽均可达到 16s 以上;协调路径链的带宽达到 8s 以上,可见本文模型求解出的信号配时方案对于路径集具有较好的协调控制效果。

根据表 4-4 和表 4-3 计算绿波带宽与瓶颈交叉口绿灯时间的比值,得到协调路径和协调路径链的绿波带宽占比,如表 4-5 所示。

从表 4-5 可以看出,协调路径带宽占比均在 80%以上,12 条协调路径链中有 9 条的带宽占比在 80%以上,由此可见协调路径集绿波协调效果显著。

表 4-5 协调路径链的绿波带宽占比（法则 1）

协调路径链	路径链带宽 占比	协调路径带宽占比					
		$P_{(l,1)}$	$P_{(l,2)}$	$P_{(l,3)}$	$P_{(l,4)}$	$P_{(l,5)}$	$P_{(l,6)}$
$L_{(13,4 \rightarrow 14, * \rightarrow 15, * \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1)}$	33%	86%	100%	87%	86%	90%	100%
$L_{(1,1 \rightarrow 5, * \rightarrow 9, * \rightarrow 10, 2)}$	93%	100%	100%	93%	-	-	-
$L_{(11,4 \rightarrow 12, 2)}$	100%	100%	-	-	-	-	-
$L_{(4,2 \rightarrow 3, * \rightarrow 2, * \rightarrow 6, * \rightarrow 10, 3)}$	86%	87%	89%	89%	97%	-	-
$L_{(12,2 \rightarrow 11, * \rightarrow 10, * \rightarrow 9, 4)}$	100%	100%	98%	97%	-	-	-
$L_{(8,2 \rightarrow 7, * \rightarrow 6, * \rightarrow 5, 4)}$	57%	96%	100%	100%	-	-	-
$L_{(5,4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 8, 2)}$	81%	96%	81%	100%	-	-	-
$L_{(1,4 \rightarrow 2, 2)}$	88%	88%	-	-	-	-	-
$L_{(3,4 \rightarrow 4, 2)}$	100%	100%	-	-	-	-	-
$L_{(14,3 \rightarrow 10, * \rightarrow 6, * \rightarrow 2, 1)}$	84%	84%	100%	100%	-	-	-
$L_{(13,3 \rightarrow 9, * \rightarrow 5, * \rightarrow 1, 1)}$	63%	100%	100%	83%	-	-	-
$L_{(15,3 \rightarrow 11, * \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 1)}$	84%	84%	100%	96%	-	-	-

## （2）法则 2

同理，利用本章模型设计法则 2 优选结果的信号配时方案。经模型求解得到总的协调控制评价指标  $Q=19781$ （最大值 20338），最佳协调控制方案的公共信号周期  $C=120s$ ，协调路径集最终选择结果用红色线段表示，如图 4-12 所示，各交叉口各进口方向的绿灯中心时刻及信号相序如附表 1 所示，相位时间分配如附表 2 所示。根据各交叉口各进口方向的绿灯中心时刻及信号相序绘制空间时距图如图 4-13 所示。

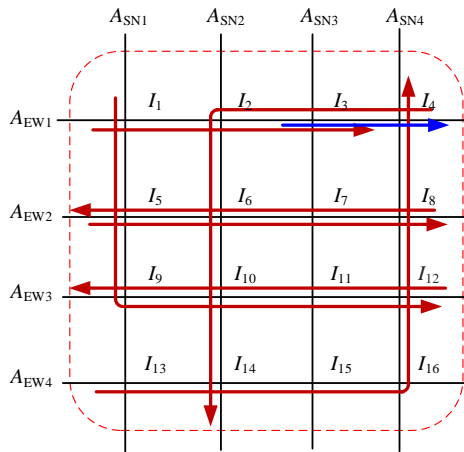


图 4-12 协调路径集最终优选结果（法则 2）

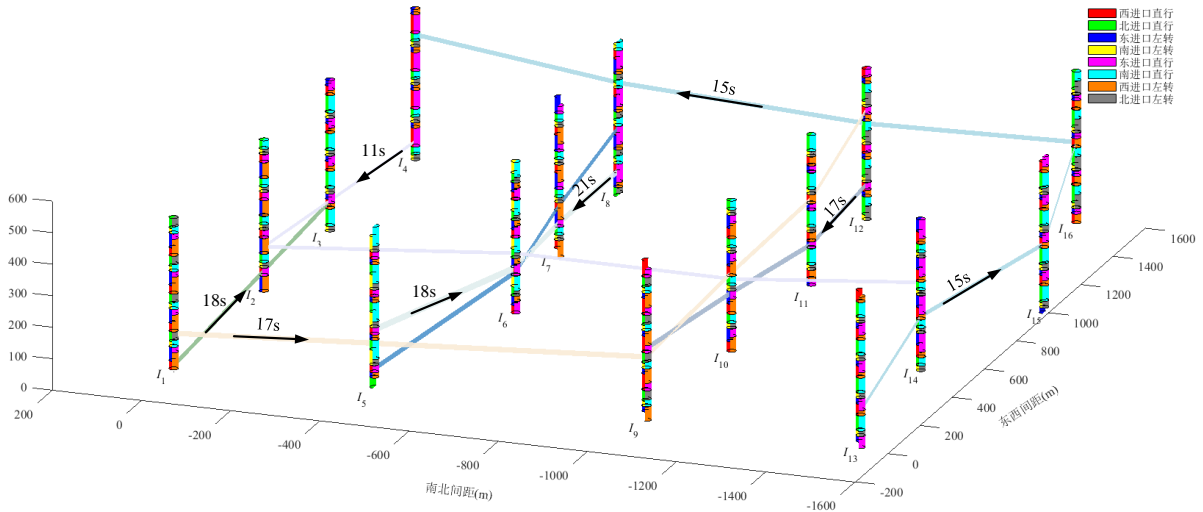


图 4-13 空间时距图（法则 2）

为进一步对比两个方案的控制效果，分别对法则 1 和法则 2 的优选结果的模型求解方案进行 VISSIM 仿真，分别从协调路径集、交叉口及路网整体的角度，对比两个方案的平均延误和停车次数。

#### （1）协调路径集仿真评价

为比较本章模型对法则 1 和法则 2 优选结果的协调控制效果，对初选的协调路径链（集）的车均延误和停车次数进行比较。利用 VISSIM 的行程时间检测器，在各协调路径链的第一个交叉口的停车线后设置起点，在最后一个交叉口的停车线后设置对应终点，对协调路径链（集）的协调效果进行评价，结果如表 4-6 所示。

表 4-6 协调路径集平均延误与停车次数

协调路径链	平均延误时间(s)		平均停车次数	
	法则 1	法则 2	法则 1	法则 2
$L_1$	50.5	28.1	0.88	0.64
$L_2$	64.7	34.3	2.33	1.35
$L_3$	74.7	42.3	1.38	0.88
$L_4$	9.8	14.6	0.33	0.61
$L_5$	17.5	31.5	0.21	0.89
$L_6$	14.6	14.5	0.59	0.28
$L_7$	40.9	32.1	1.98	1.09
$L_8$	11.7	-	0.21	-
$L_9$	9.8	-	0.14	-
$L_{10}$	19.8	-	0.45	-
协调路径集	30.8	28.0	0.84	0.81

结合表 4-8，可以看出对法则 2 初选结果的协调路径集控制效果更好。在协调路径集中，路径链数目越多、长度越长则越有利于扩大协调控制的范围，但与此同时协调



路径的协调相位需满足的约束条件也将增多，从而降低相应协调路线的控制效果。由于法则 1 的优选结果在法则 2 优选结果的基础上多 3 条协调路径链，因此要获得理想的协调控制效果的难度更高，对于协调路径集的协调效果略差。

## （2）交叉口及路网仿真评价

为比较两个方案在不同交叉口的信号控制效果，利用 VISSIM 节点评价对路网 16 个交叉口的车辆平均延误和平均停车次数进行检测，所得结果如表 4-7 所示。

表 4-7 交叉口平均延误与停车次数

交叉口	平均延误时间(s)		平均停车次数	
	法则 1	法则 2	法则 1	法则 2
$I_1$	25.3	38.3	0.57	0.75
$I_2$	14.6	27.5	0.31	0.46
$I_3$	20.8	21.0	0.49	0.57
$I_4$	25.5	26.4	0.58	0.58
$I_5$	19.6	21.0	0.41	0.42
$I_6$	12.2	19.7	0.32	0.41
$I_7$	20.1	29.1	0.37	0.63
$I_8$	29.6	24.7	0.51	0.47
$I_9$	21.3	25.6	0.53	0.55
$I_{10}$	16.1	17.4	0.26	0.42
$I_{11}$	22.1	13.0	0.43	0.37
$I_{12}$	18.7	21.7	0.43	0.36
$I_{13}$	30.4	30.9	0.62	0.67
$I_{14}$	32.4	22.2	0.63	0.47
$I_{15}$	14.1	15.5	0.30	0.36
$I_{16}$	19.5	20.9	0.37	0.37
所有	21.4	23.24	0.45	0.49

结合表 4-7，可以看出法则 1 初选结果的路网整体效果更好。主要原因是法则 1 协调的路径链较法则 2 多，扩大了协调控制的范围，增加了对协调相位的约束条件，因此路网整体效果较好。

### 4.3.3 仿真对比

从表 4-4 和图 4-11 可以看出，对于协调路径集，本章方法具有较好的绿波协调效果。为了更好地对本文模型求解的绿波设计方案控制效果进行评价，一方面，利用韦氏最佳信号周期时长计算方法计算单交叉口最优配时方案，将不考虑协调时的配时方案与本文模型求解的绿波设计方案进行对比；另一方面，本文选取交通信号配时软件 Synchro 求解的信号配时方案与本章模型方案进行对比。Synchro 软件是以干道或路网

的总延误最小为目标，求解公共周期范围内不同周期的最优的相位相序、绿信比、相位差方案，最终通过对比选取最佳公共周期，从而提高各路段的服务水平。目前，许多学者已将 Synchro 软件应用于交通信号控制研究之中<sup>[95-101]</sup>。由此可见 Synchro 软件生成的配时方案具有一定的参考价值。

在 Synchro 软件中绘制算例路网、输入流量等参数，生成相应的信号配时方案。Synchro 配时方案的最佳公共信号周期为 112s，绘制协调路径集上绿波带宽如图 4-14 所示。

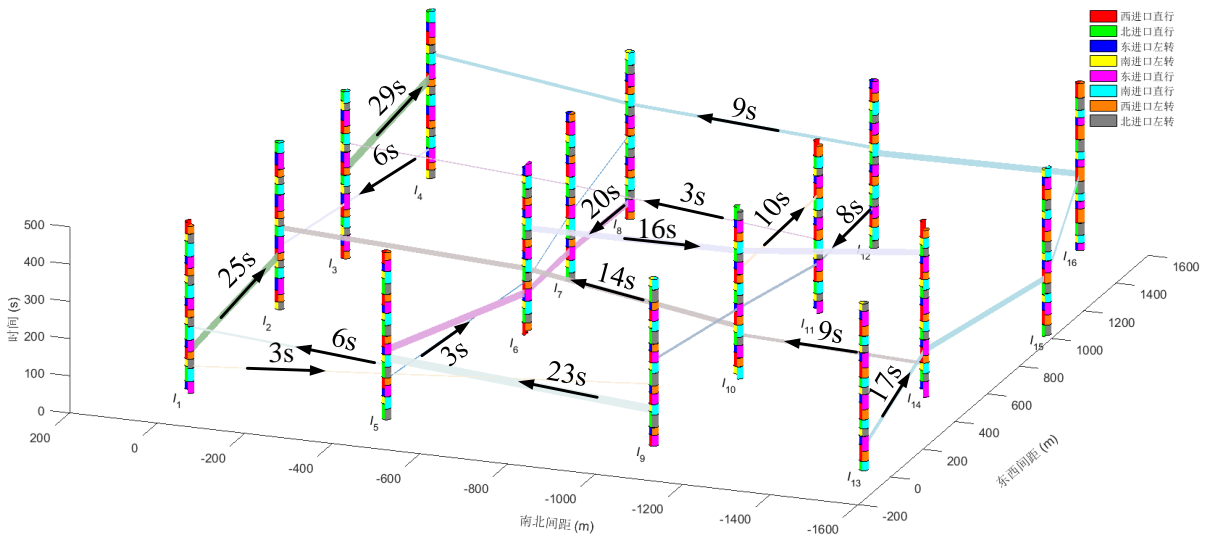


图 4-14 Synchro 求解方案空间时距图

从图 4-14 中可以看出，10 条路径链中，Synchro 求解方案具有完整绿波带的路径链仅有 3 条 ( $L_{(1,4 \rightarrow 2, * \rightarrow 3, * \rightarrow 4, 2)}$ 、 $L_{(5, 4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 8, 2)}$ 、 $L_{(8, 2 \rightarrow 7, * \rightarrow 6, * \rightarrow 5, 4)}$ )。整体来看，Synchro 绿波带宽较小且被打断的路径链更多。

为进一步对比两个方案的控制效果，分别对本章模型方案和 Synchro 信号配时方案进行 VISSIM 仿真，分别从单交叉口、协调路径集和路网整体的角度，对两个方案的平均延误和停车次数进行对比。

#### (1) 协调路径集仿真评价

为更加公平合理的比较本章模型方案与单点最佳方案及 Synchro 方案的控制效果，对初选的协调路径链（集）的车均延误和停车次数进行比较，结果如表 4-8 和图 4-15 所示。

表 4-8 协调路径集平均延误与停车次数

协调路径链	平均延误时间(s)			平均停车次数		
	单点最佳	Synchro	本文模型	单点最佳	Synchro	本文模型
$L_1$	141.6	77.5	50.5	3.74	2.71	0.88
$L_2$	156.5	133.2	64.7	3.75	4.55	2.33
$L_3$	126.4	92.4	74.7	2.92	3.43	1.38
$L_4$	99.6	29.4	9.8	2.16	1.66	0.33
$L_5$	89.8	20.9	17.5	2.05	0.92	0.21
$L_6$	85.1	33.0	14.6	2.24	1.75	0.59
$L_7$	80.7	51.4	40.9	2.01	1.61	1.98
$L_8$	88.8	41.0	11.7	2.09	2	0.21
$L_9$	83.8	111.2	9.8	2.07	1.93	0.14
$L_{10}$	93.6	79.1	19.8	2.18	2.66	0.45
协调路径集	103.3	64.8	30.8	2.49	2.28	0.84

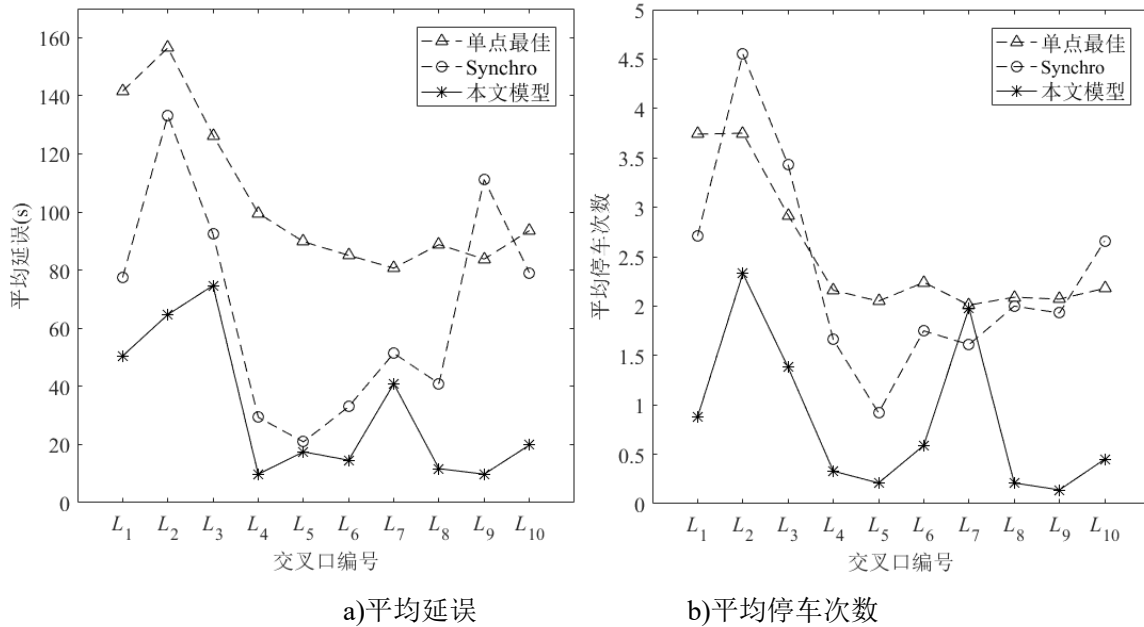


图 4-15 协调路径集评价结果

结合表 4-8 和图 4-15，可以看出本章模型方案与单点最佳方案相比，协调路径集的车均延误可以减少 72.5s，减少 70.2%，交叉口车均停车次数减少 1.65，减少约 66.3%；与 Synchro 方案相比，协调路径集的车均延误可以减少 34.0s，减少 52.5%，交叉口车均停车次数减少 1.44，减少约 63.2%，可见本章模型方案取得了良好的区域绿波协调控制效果，能够较大幅度提高路网的通行效率。特别地，协调路径链  $L_2$ 、 $L_4$ 、 $L_6$ 、 $L_8$ 、 $L_9$ 、 $L_{10}$  的车辆平均延误均提高 50% 以上，协调路径链  $L_1$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 、 $L_5$ 、 $L_6$ 、 $L_8$ 、 $L_9$ 、 $L_{10}$  的车辆平均停车次数均提高 50% 以上。但协调路径链  $L_7$  的车均停车次数比 Synchro 方案多 0.37 次，主要原因是为让路网有尽可能多的路径链进行协调，而未对路径链  $L_{(2,4 \rightarrow 3,2)}$  进行协调，从而导致路径链  $L_7$  的协调效果较差。总体而言，本文模型协调路径集的协

调效果较好。

(2) 单交叉口仿真评价

为比较三个方案在不同交叉口的信号控制效果，利用 VISSIM 节点评价对路网 16 个交叉口的车辆平均延误和平均停车次数进行检测，所得结果如表 4-9 和图 4-16 所示。

表 4-9 交叉口平均延误与停车次数

交叉口	平均延误时间(s)			平均停车次数		
	单点最佳	Synchro	本文模型	单点最佳	Synchro	本文模型
$I_1$	25.3	32.3	25.3	0.63	0.66	0.57
$I_2$	30.8	16.7	14.6	0.67	0.49	0.31
$I_3$	30.3	29.4	20.8	0.65	0.79	0.49
$I_4$	22.5	23.8	25.5	0.65	0.51	0.58
$I_5$	27.3	24.2	19.6	0.68	0.70	0.41
$I_6$	24.7	20.7	12.2	0.63	0.58	0.32
$I_7$	26.4	16.4	20.1	0.67	0.52	0.37
$I_8$	26.1	24.3	29.6	0.66	0.81	0.51
$I_9$	26.5	22.1	21.3	0.64	0.72	0.53
$I_{10}$	30.3	21.1	16.1	0.62	0.55	0.26
$I_{11}$	29.5	23.5	22.1	0.62	0.72	0.43
$I_{12}$	31.3	18.9	18.7	0.65	0.61	0.43
$I_{13}$	23.4	26.7	30.4	0.64	0.66	0.62
$I_{14}$	28.5	19.7	32.4	0.59	0.59	0.63
$I_{15}$	23.4	17.8	14.1	0.62	0.53	0.30
$I_{16}$	23.3	18.8	19.5	0.65	0.50	0.37
所有	26.9	22.3	21.4	0.64	0.63	0.45

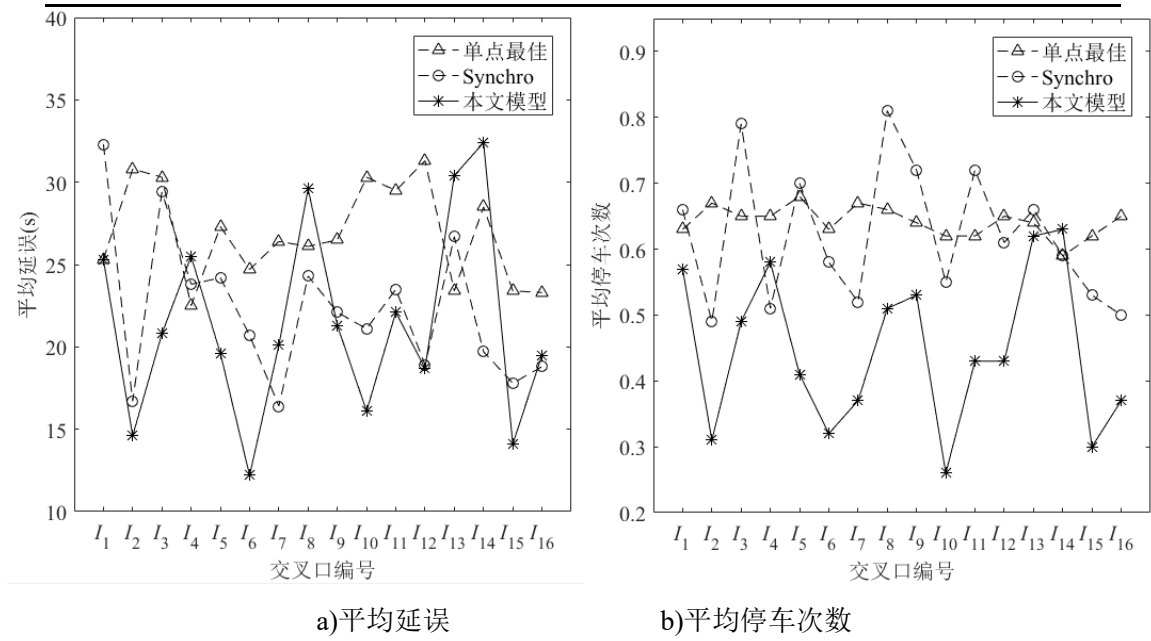


图 4-16 交叉口仿真运行评价结果

结合表 4-9 和图 4-16 可以看出，与单点最佳方案相比，本章模型方案在延误和停

车次数控制方面均有明显效果。有 75% 的交叉口延误优于单点最佳方案，94% 的交叉口停车次数优于单点最佳方案，由此可见，本章模型求解方案相较于未进行协调的单点最佳方案具有明显的控制效果，大大减少了车辆延误和停车次数，提高运行效率；与 Synchro 方案相比，除了交叉口  $I_4$  和  $I_{13}$  外，本章模型的停车次数均明显低于 Synchro 方案，有半数交叉口提升 30% 以上，部分交叉口（如交叉口  $I_5$ 、 $I_6$ 、 $I_{10}$ 、 $I_{11}$ ）甚至提升 40% 以上，由此可以看出相比 Synchro 方案，本章模型求解方案的绿波协调效果较好，可以使尽可能多的车辆不停车通过交叉口。对比两个方案的交叉口延误，本章模型方案仅有略微提升。一方面，由于 Synchro 是以路网的总延误最小为目标进行信号方案设计，因此其方案本身在路网延误方面可以达到较好的控制效果；另一方面，本文模型方案仅着眼于协调路径集的交叉口协调相位控制，在路网整体延误控制上优势不明显。对于协调相位较多的交叉口，如交叉口  $I_1$ 、 $I_5$ 、 $I_6$ 、 $I_{10}$ ，本章模型方案延误较 Synchro 方案小，而对于协调相位较少的交叉口  $I_{13}$ 、 $I_{14}$ 、 $I_{16}$  延误较大。

### （3）路网仿真评价

路网中存在协调路径链和非协调路径链。单从协调路径集的评价结果无法反映整个路网的协调控制效果。为评价路网的协调效益，利用 VISSIM 节点评价获取交叉口平均车均延误和车均停车次数，利用路网评价获取路网车均延误、车均停车次数以及平均车速，结果如表 4-10 所示。

表 4-10 路网仿真评价结果

评价指标	单点最佳	Synchro	本文模型
交叉口车均延误(s)	26.9	22.3	21.4
交叉口车均停车次数	0.64	0.63	0.45
路网车均延误(s)	114.840	96.604	92.462
车均停车次数	2.771	2.678	1.963
平均车速(km/h)	26.981	28.965	29.074

从表 4-10 可以看出，从交叉口的角度，本文模型方案的车均延误比单点最佳方案少 5.5s（约少 20.4%），比 Synchro 方案少 0.9s（约少 4.0%）；车均停车次数比单点最佳方案少 0.19（约少 29.7%），比 Synchro 方案少 0.18（约少 28.6%）。从路网整体角度，本文模型方案的车均延误比单点最佳方案少 22.4s（约少 19.5%），比 Synchro 方案少 4.1s（约少 4.3%）；车均停车次数比单点最佳方案少 0.81（约少 29.2%），比 Synchro 方案少 0.72（约少 26.7%）。因此，本文模型方案的路网整体控制效果相较于单点最佳方案和 Synchro 方案均具有较为显著的优势。

综上所述，本文模型不仅可以极大限度地保证协调路径集的绿色协调效果，同时还能有效提升路网整体控制效果。

#### 4.4 本章小结

考虑控制区域内交叉口之间的方向性协调控制需求，本章将协调路径集进行协调对象，基于 NEMA 双环相位结构实现协调路径集进行进一步优选，以及信号周期、信号相序、相位时间、相位差的综合优化。本文以协调路径的流量总和最大为目标，通过对各交叉口实际相位中心时刻点偏离相位中心时刻线的时间与车辆通行时间之差进行约束，求解最优信号控制方案。相比现有模型算法，由于本文模型将协调路径集作为协调控制对象，故极大限度地保证了协调路径集的优化效果，满足路网中协调控制需求非对称性需求，同时大大提高了求解效率。

## 第五章 协调路径集控制效果的评价方法

为了把握区域协调控制效果及路网交通运行的整体状况与拥堵水平，为城市路网的运行管理、交通控制、后期规划等提供科学依据，亟待建立一套科学合理的城市路网交通运行状况评价指标。

### 5.1 基于路段权重系数的交通运行状态评价方法

近年来，国家及地方相继制定了有关城市交通运行状况评价的规范与标准，其中交通运行指数（Traffic Performance Index, TPI），又称交通拥堵指数，是综合反映城市路网畅通或拥堵的概念性指数值，实现了道路交通拥堵状况的数字化描述。

然而，现有的交通运行状况评价指标及其计算方法主要仅适用于城市道路，例如快速路、主干路、次干路和支路，而对于城市路网交通运行状况评价指标的计算方法尚不明晰，需要科学衡量各路段运行状况对整个路网所造成的影响。虽然已有学者提出利用路段权重系数对路网交通运行状况评价指标进行加权计算，但是对于路段权重系数的构成欠细致分析，通常只考虑到了路段交通流量或路段长度，计算结果所蕴含的物理意义并不明确。

因此，如何科学合理地定义路段权重系数，并建立一种基于路段权重系数的路网交通运行状况评价方法，具有非常重要的现实意义。

#### 5.1.1 路段权重系数

路段的权重系数为该路段上所有车辆总的无阻滞行驶时间与路网中所有车辆总的无阻滞行驶时间的比值，反映某路段在整个路网中所占的权重大小，公式如下：

$$k_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} t_{fij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} t_{fij}} = \frac{q_i \times T \times \bar{t}_{fi}}{\sum_{i=1}^N (q_i \times T \times \bar{t}_{fi})} = \frac{q_i \times \bar{t}_{fi}}{\sum_{i=1}^N (q_i \times \bar{t}_{fi})} \quad (5-1)$$

式中， $k_i$ ——路段 $i$ 的权重系数；

$t_{fij}$ ——第 $j$ 辆车通过路段 $i$ 的无阻滞行驶时间，h；

$N$ ——为路网中的路段数；

$n_i$ ——路段  $i$  上的运行车辆数, veh;

$q_i$ ——为第  $i$  条路段的交通流量, veh/h;

$T$ ——为运行时间, h;

$\bar{t}_{fi}$ ——车辆通过路段  $i$  的平均无阻滞行驶时间, h。

### 5.1.2 路段及路网运行状态评价方法

基于路段权重系数的路网交通运行状况评价方法的流程图如图 5-1 所示。

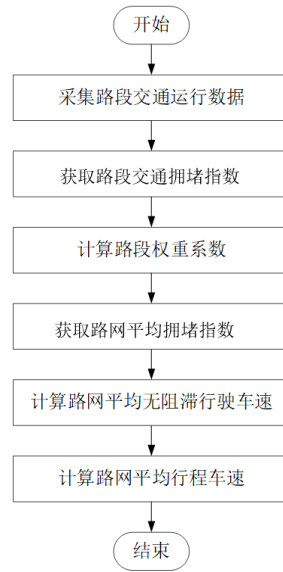


图 5-1 路网交通运行状况评价方法流程图

具体步骤如下:

**Step1:** 获取路网中每个路段的长度、交通流量、无阻滞行驶车速以及各个车辆的行程车速;

**Step2:** 根据各个路段上车辆的平均行程时间与无阻滞行驶时间, 得到路段交通拥堵指数;

路段交通拥堵指数为车辆平均行程时间与无阻滞行驶时间的比值, 是综合反映道路畅通或拥堵的概念性指数值, 公式如下:

$$PI_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} t_{ij}}{\sum_{j=1}^{n_i} t_{fij}} = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} (l_i / v_{ij})}{\sum_{j=1}^{n_i} (l_i / v_{fij})} = \frac{\bar{v}_{fi}}{n_i / \sum_{j=1}^{n_i} (1 / v_{ij})} = \frac{\bar{v}_{fi}}{\bar{v}_{hi}} \quad (5-2)$$



式中： $PI_i$ ——路段*i*的交通拥堵指数；

$n_i$ ——路段*i*上的运行车辆数，veh；

$t_{ij}$ ——第*j*辆车通过路段*i*的行程时间，h；

$l_i$ ——路段*i*的长度，km；

$v_{ij}$ ——第*j*辆车在路段*i*上的平均行程车速，km/h；






$\bar{v}_{fi}$ ——车辆在路段*i*上的平均无阻滞行驶车速，km/h；

$\bar{v}_{hi}$ ——车辆在路段*i*上的调和平均行程车速，km/h。

在未饱和路网中，路段交通拥堵指数可在一定程度上反映车辆在交叉口的延误时间，从而对信号协调控制效果进行评价。

**Step3:** 根据路段交通拥堵指数  $PI$  将路段的运行状态划分为畅通、基本畅通、轻度拥堵、中度拥堵、严重拥堵五个等级<sup>[102]</sup>，如表 5-1 所示，路段交通拥堵指数  $PI_i$  越高则表示该路段交通拥堵状况越严重。

表 5-1 交通拥堵指数分级标准

交通拥堵指数	[1-1.3]	[1.3-1.6]	[1.6-1.9]	[1.9-2.2]	2.2 以上
拥堵等级	畅通	基本畅通	轻度拥堵	中度拥堵	严重拥堵
代表颜色					

**Step4:** 根据各个路段的交通流量与无阻滞行驶时间，得到路网中各路段的权重系数，公式如（5-1）所示。

**Step5:** 利用路段交通拥堵指数与路段权重系数，加权得到路网平均拥堵指数，路网平均拥堵指数越高则表示该路网信号协调控制效果越差；

路网平均拥堵指数  $PI$  为路网中所有车辆总的行程时间与总的无阻滞行驶时间的比值，等于路网中所有路段拥堵指数的加权平均值，公式如下：

$$PI = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} t_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} t_{fij}} = \frac{\sum_{i=1}^N (q_i \times T \times t_{fi} \times PI_i)}{\sum_{i=1}^N (q_i \times T \times t_{fi})} = \sum_{i=1}^N (k_i \times PI_i) \quad (5-3)$$

根据路网平均拥堵指数  $PI$  将区域路网的运行状态划分为畅通、基本畅通、轻度拥堵、中度拥堵、严重拥堵五个等级，如表 5-1 所示，路网平均拥堵指数  $PI$  越高则表示

该路网交通拥堵状况越严重。

**Step6:** 利用路段无阻滞行驶车速与路段权重系数，加权得到路网平均无阻滞行驶车速；

路网平均无阻滞行驶车速  $\bar{V}_f$  为路网中所有车辆总的无阻滞行驶距离与总的无阻滞行驶时间的比值，等于路网中所有路段无阻滞车速的加权平均值，公式如下：

$$\bar{V}_f = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} l_i}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} t_{fij}} = \frac{\sum_{i=1}^N (q_i \times T \times l_i)}{\sum_{i=1}^N (q_i \times T \times t_{fi})} = \frac{\sum_{i=1}^N (q_i \times t_{fi} \times v_{fi})}{\sum_{i=1}^N (q_i \times t_{fi})} = \sum_{i=1}^N (k_i \times v_{fi}) \quad (5-4)$$

**Step7:** 根据路网平均无阻滞行驶车速与路网平均拥堵指数，得到路网平均行程车速。

路网平均行程车速  $\bar{V}$  为路网中所有车辆总的行程距离与总的行程时间的比值，等于路网平均无阻滞行驶车速除以路网平均拥堵指数，公式如下：

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} l_i}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} t_{ij}} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} l_i}{PI \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} t_{fij}} = \frac{\bar{V}_f}{PI} \quad (5-5)$$

## 5.2 协调路径集交通运行状态的评价方法

为评价协调路径集的控制效果，需对协调路径集的交通运行状态进行评定。此时，需将整个路段上的车队细化成分方向的车流，计算位于协调路径链（集）上的车流的交通运行状态及权重系数，从而求的协调路径链（集）的交通运行状态。

### 5.2.1 路径权重系数

为更好地对协调路径链（集）的交通运行状态进行评价，给出路径权重系数的概念，即该路径（路径的概念见 2.1.1 节）上所有车辆从上游交叉口出口到下游交叉口进口停车线总的无阻滞行驶时间与路网中所有车辆总的无阻滞行驶时间的比值，以表示各路径在整个路网中所占的权重，公式如下：

$$k_{(l,p)} = \frac{\sum_{j=1}^{n_{(l,p)}} t_{f(l,p,j)}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} t_{fij}} = \frac{q_{(l,p)} \times T \times \bar{t}_{f(l,p)}}{\sum_{i=1}^N (q_i \times T \times \bar{t}_{fi})} = \frac{q_{(l,p)} \times \bar{t}_{f(l,p)}}{\sum_{i=1}^N (q_i \times \bar{t}_{fi})} \quad (5-6)$$

式中， $k_{(l,p)}$ ——路径链 $L_l$ 第 $p$ 条路径的权重系数；

$t_{f(l,p,j)}$ ——路径链 $L_l$ 第 $p$ 条路径上第 $j$ 辆车通过该路径上游交叉口出口到下游交叉口进口停车线的无阻滞行驶时间，h；

$n_{(l,p)}$ ——路径链 $L_l$ 第 $p$ 条路径的运行车辆数，veh；

$q_{(l,p)}$ ——路段链 $L_l$ 第 $p$ 条路径的交通流量，veh/h；

$\bar{t}_{f(l,p)}$ ——车辆通过路段链 $L_l$ 第 $p$ 条路径上游交叉口出口到下游交叉口进口停车线的平均无阻滞行驶时间，h。

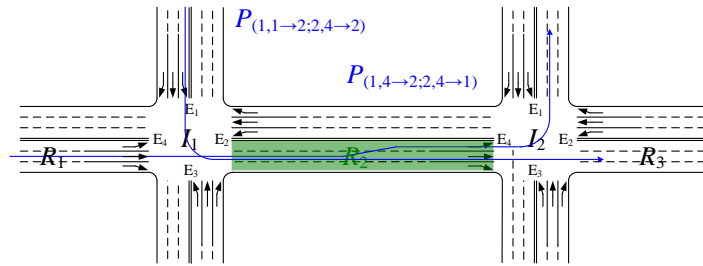


图 5-2 路径-路段示意图

路段权重系数是所有与该路段上游交叉口和下游交叉口一致的路径权重系数之和。例如图 5-2 中，路段 $R_2$ 权重系数等于所有从上游交叉口 $I_1$ 进出口到下游交叉口 $I_2$ 进出口路径的权重系数之和，图中路径 $P_{(1,4 \rightarrow 2; 2, 4 \rightarrow 1)}$ 和路径 $P_{(1, 1 \rightarrow 2; 2, 4 \rightarrow 2)}$ 的权重系数均是路段 $R_2$ 权重系数的一部分。

### 5.2.2 评价步骤

协调路径链（集）的交通运行状态评价方法具体步骤如下：

**Step1:** 获取协调路径集上每个路段的长度、交通流量、无阻滞行驶车速以及各个车辆的行程车速；

**Step2:** 根据协调路径集各个路段上车辆的平均行程时间与无阻滞行驶时间，得到路径交通拥堵指数；

路径交通拥堵指数为某路段上某转向所有车辆平均行程时间与无阻滞行驶时间的比值，是综合反映路径畅通或拥堵的概念性指数值，进一步对该方向的信号控制效果进行评价，公式如下：

$$PI_{(l,p)} = \frac{\sum_{j=1}^{n_{(l,p)}} t_{(l,p,j)}}{\sum_{j=1}^{n_{(l,p)}} t_{f(l,p,j)}} = \frac{\sum_{j=1}^{n_{(l,p)}} (l_{(l,p)} / v_{(l,p,j)})}{\sum_{j=1}^{n_{(l,p)}} (l_{(l,p)} / v_{f(l,p,j)})} = \frac{\bar{v}_{f(l,p)}}{n_{(l,p)} / \sum_{j=1}^{n_{(l,p)}} (1 / v_{(l,p,j)})} = \frac{\bar{v}_{f(l,p)}}{\bar{v}_{h(l,p)}} \quad (5-7)$$

式中：  $PI_{(l,p)}$  ——路径链  $L_l$  第  $p$  条路径的交通拥堵指数；

$t_{(l,p,j)}$  ——路径链  $L_l$  第  $p$  条路径上第  $j$  辆车通过该路径上游交叉口出口到下游交叉口进口停车线的行程时间，h；

$l_{(l,p)}$  ——路径链  $L_l$  第  $p$  条路径上游交叉口出口到下游交叉口进口停车线的长度，km；

$v_{(l,p,j)}$  ——路径链  $L_l$  第  $p$  条路径上第  $j$  辆车在该路径上游交叉口出口到下游交叉口进口停车线的平均行程车速，km/h；

$v_{f(l,p,j)}$  ——路径链  $L_l$  第  $p$  条路径上第  $j$  辆车在该路径上游交叉口出口到下游交叉口进口停车线的平均无阻滞行驶车速，km/h；

$\bar{v}_{f(l,p)}$  ——车辆通过路径链  $L_l$  第  $p$  条路径上游交叉口出口到下游交叉口进口停车线的平均无阻滞行驶车速，km/h；

$\bar{v}_{h(l,p)}$  ——车辆通过路径链  $L_l$  第  $p$  条路径上游交叉口出口到下游交叉口进口停车线的调和平均行程车速，km/h。

根据路径交通拥堵指数  $PI$  将路径的运行状态划分为畅通、基本畅通、轻度拥堵、中度拥堵、严重拥堵五个等级，如表 5-1 所示，路径交通拥堵指数  $PI_{(l,p)}$  越高则表示该路径交通拥堵状况越严重。

**Step3:** 根据各个路径的交通流量与无阻滞行驶时间，得到路网中各路径权重系数，公式如（5-6）所示。

**Step4:** 利用路径交通拥堵指数与路径权重系数，加权得到协调路径链（集）平均拥堵指数，协调路径链（集）平均拥堵指数越高则表示该协调路径链（集）信号协调

控制效果越差；

协调路径链（集）平均拥堵指数  $PI_{L_t}$ （ $PI_s$ ）为协调路径链（集）中所有车辆总的行程时间与总的无阻滞行驶时间的比值，等于协调路径链（集）中所有路径拥堵指数的加权平均值，公式如下：

$$PI_{L_t} = \frac{\sum_{p=1}^{N_{L_t}} \sum_{j=1}^{n_{(l,p)}} t_{(l,p,j)}}{\sum_{p=1}^{N_{L_t}} \sum_{j=1}^{n_{(l,p)}} t_{f(l,p,j)}} = \frac{\sum_{p=1}^{N_{L_t}} (q_{(l,p)} \times T \times \bar{t}_{f(l,p)} \times PI_{l,p})}{\sum_{p=1}^{N_{L_t}} (q_{(l,p)} \times T \times \bar{t}_{f(l,p)})} = \frac{\sum_{p=1}^{N_{L_t}} (k_{(l,p)} \times PI_{(l,p)})}{\sum_{p=1}^{N_{L_t}} k_{(l,p)}} \quad (5-8)$$

其中， $N_{L_t}$  表示协调路径链包含的路径数量。

根据协调路径链（集）平均拥堵指数  $PI_{L_t}$ （ $PI_s$ ）将协调路径链（集）的运行状态划分为畅通、基本畅通、轻度拥堵、中度拥堵、严重拥堵五个等级，如表 5-1 所示，协调路径链（集）平均拥堵指数  $PI_{(l,p)}$  越高则表示该协调路径链（集）交通拥堵状况越严重。

**Step5:** 利用路径无阻滞行驶车速与路段权重系数，加权得到协调路径链（集）平均无阻滞行驶车速；

协调路径链（集）平均无阻滞行驶车速  $\bar{V}_{fL_t}$ （ $\bar{V}_{fs}$ ）为协调路径链（集）中所有车辆总的无阻滞行驶距离与总的无阻滞行驶时间的比值，等于协调路径链（集）中所有路段无阻滞车速的加权平均值，公式如下：

$$\bar{V}_{fL_t} = \frac{\sum_{p=1}^{N_{L_t}} \sum_{j=1}^{n_{(l,p)}} l_{(l,p)}}{\sum_{p=1}^{N_{L_t}} \sum_{j=1}^{n_{(l,p)}} t_{f(l,p,j)}} = \frac{\sum_{p=1}^{N_{L_t}} (q_{(l,p)} \times T \times l_{(l,p)})}{\sum_{p=1}^{N_{L_t}} (q_{(l,p)} \times T \times \bar{t}_{f(l,p)})} = \frac{\sum_{p=1}^{N_{L_t}} (q_{(l,p)} \times t_{f(l,p)} \times v_{f(l,p)})}{\sum_{p=1}^{N_{L_t}} (q_{(l,p)} \times t_{f(l,p)})} = \sum_{p=1}^{N_{L_t}} (k_{(l,p)} \times v_{f(l,p)}) \quad (5-9)$$

**Step6:** 根据协调路径链（集）平均无阻滞行驶车速与路网平均拥堵指数，得到协调路径链（集）平均行程车速。

协调路径链（集）平均行程车速  $\bar{V}_{L_t}$ （ $\bar{V}_s$ ）为协调路径链（集）中所有车辆总的行程距离与总的行程时间的比值，等于路网平均无阻滞行驶车速除以路网平均拥堵指数，公式如下：

$$\bar{V}_{L_l} = \frac{\sum_{p=1}^{N_{L_l}} \sum_{j=1}^{n_{(l,p)}} l_{(l,p)}}{\sum_{p=1}^{N_{L_l}} \sum_{j=1}^{n_{(l,p)}} t_{(l,p,j)}} = \frac{\sum_{p=1}^{N_{L_l}} \sum_{j=1}^{n_{(l,p)}} l_{(l,p)}}{PI_{L_l} \times \sum_{p=1}^{N_{L_l}} \sum_{j=1}^{n_{(l,p)}} t_{f(l,p,j)}} = \frac{\bar{V}_{fL_l}}{PI_{L_l}} \quad (5-10)$$

## 5.3 算例分析

### 5.3.1 路段交通运行状态评价

以 4.3.1 中引用的路网为例, 将 4.3.2 在法则 1 优选结果基础上求解的模型方案和 4.3.3 中的 Synchro 方案进行仿真, 获取车辆轨迹数据。使用 Matlab 进行编程, 遍历轨迹数据, 统计各路段的车流量、车辆总行程时间、车辆通过路段的总无阻滞行驶时间, 利用式 (5-1)、(5-2) 计算路段权重系数和路段交通运行指数, Synchro 方案的各路段交通运行状态评价结果如表 5-2、表 5-3 所示, 对法则 1 优选结果进行模型求解方案的各路段交通运行状态评价结果如表 5-4、表 5-5, 表中路段编号与图 2-18 对应。

#### (1) Synchro 方案

表 5-2 路段交通运行状态评价 (东西)

路段 编号	$q$		$PI$		$k$	
	E→W	W→E	E→W	W→E	E→W	W→E
1	355	945	1.000	1.581	0.002	0.016
2	505	1095	1.382	1.220	0.007	0.016
3	1323	1158	1.437	2.354	0.014	0.012
4	1393	1183	1.532	1.224	0.020	0.016
5	1345	1215	1.499	1.002	0.020	0.007
6	1140	860	1.002	1.675	0.005	0.014
7	1123	1015	1.291	1.395	0.018	0.017
8	1083	1015	1.334	1.395	0.010	0.009
9	1148	1010	1.294	1.450	0.013	0.012
10	1135	1243	1.803	1.001	0.016	0.006
11	1015	653	1.001	1.434	0.005	0.010
12	1075	1590	1.371	1.931	0.014	0.021
13	1023	1533	1.156	1.716	0.011	0.018
14	1013	1353	1.263	1.421	0.013	0.018
15	953	1280	2.268	1.001	0.012	0.007
16	440	1498	1.001	1.465	0.002	0.026
17	765	1583	1.364	1.299	0.011	0.024
18	1015	1483	1.561	1.594	0.012	0.019
19	883	1483	1.163	1.184	0.013	0.023
20	420	558	2.110	1.001	0.006	0.004

表 5-3 路段交通运行状态评价（北南）

路段 编号	$q$		$PI$		$k$	
	N→S	S→N	N→S	S→N	N→S	S→N
21	1488	875	1.595	1.003	0.020	0.008
22	1545	1043	1.843	1.821	0.019	0.011
23	1410	1040	1.235	1.199	0.024	0.016
24	580	1020	1.582	1.555	0.007	0.012
25	635	788	1.001	1.507	0.003	0.010
26	473	838	1.707	1.063	0.006	0.003
27	1318	1008	1.754	1.263	0.020	0.014
28	1348	995	1.296	1.399	0.019	0.014
29	1343	928	1.424	1.625	0.014	0.010
30	1620	818	1.008	1.767	0.007	0.012
31	695	1130	2.036	1.001	0.008	0.004
32	868	1300	1.275	1.296	0.011	0.017
33	975	1268	1.328	1.401	0.015	0.020
34	940	985	1.221	1.816	0.012	0.013
35	693	835	1.001	1.814	0.003	0.012
36	953	1120	1.841	1.002	0.010	0.004
37	1005	1253	1.699	1.753	0.013	0.016
38	935	1383	1.134	1.400	0.013	0.021
39	933	1348	1.355	1.424	0.010	0.016
40	653	555	1.000	2.040	0.006	0.007

利用表 5-2 和表 5-3 的路段交通拥堵指数绘制路段交通运行状况图，如图 5-3 所示。

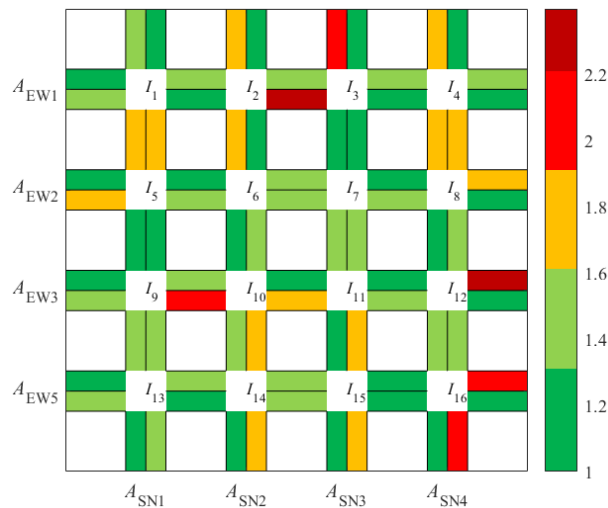


图 5-3 路段交通运行状况（Synchro 方案）

从图 5-3 中可以看出，在非边界路段中，有 12 条路段处于畅通状态，25 条路段处于基本畅通状态，9 条路段处于轻度拥堵状态，2 条处于中度拥堵状态及以上。可见 Synchro 方案控制下，大多数路段处于基本畅通状态。

## （2）协调路径集信号控制模型

表 5-4 路段交通运行状态评价（东西）

路段 编号	$q$		$PI$		$k$	
	E→W	W→E	E→W	W→E	E→W	W→E
1	470	968	1.000	1.619	0.003	0.017
2	510	1095	1.472	1.295	0.007	0.017
3	1223	1110	1.423	1.461	0.013	0.012
4	1425	1165	1.246	1.287	0.020	0.017
5	1068	1160	1.757	1.002	0.015	0.007
6	1068	950	1.002	1.654	0.005	0.016
7	1070	1040	1.473	1.433	0.018	0.019
8	933	1050	1.287	1.117	0.009	0.010
9	1158	1063	1.341	1.266	0.012	0.013
10	1140	1195	1.950	1.000	0.015	0.006
11	978	485	1.023	1.803	0.005	0.008
12	930	1253	1.336	1.462	0.012	0.018
13	860	1293	1.132	2.091	0.010	0.015
14	890	1263	1.104	1.366	0.012	0.018
15	775	1300	2.703	1.016	0.008	0.011
16	460	1575	1.001	1.665	0.002	0.028
17	765	1628	1.247	1.189	0.012	0.024
18	995	1495	1.851	1.195	0.012	0.019
19	955	1523	1.141	1.149	0.015	0.024
20	425	635	2.358	1.000	0.006	0.006

表 5-5 路段交通运行状态评价（北南）

路段 编号	$q$		$PI$		$k$	
	N→S	S→N	N→S	S→N	N→S	S→N
21	1245	798	1.560	1.076	0.019	0.009
22	1155	988	1.235	1.474	0.014	0.011
23	1120	990	1.341	1.177	0.018	0.008
24	440	1015	1.201	1.471	0.014	0.011
25	573	780	1.002	1.597	0.019	0.016
26	368	830	1.682	1.002	0.006	0.012
27	1418	993	1.237	1.133	0.003	0.010
28	1383	1048	1.251	1.131	0.005	0.003
29	1270	1008	2.552	1.788	0.021	0.015
30	1605	910	1.003	2.050	0.020	0.015
31	650	968	2.354	1.014	0.014	0.011
32	853	1178	2.303	1.432	0.007	0.014
33	973	1238	1.538	1.306	0.008	0.004
34	935	1078	1.166	1.380	0.012	0.017
35	705	880	1.002	1.920	0.016	0.020
36	858	1170	1.636	1.047	0.013	0.015
37	988	1188	2.483	1.518	0.003	0.014
38	1000	1293	1.222	1.317	0.010	0.005
39	963	1388	1.223	1.387	0.013	0.015
40	650	638	1.002	2.277	0.015	0.020



利用表 5-4 和表 5-5 的路段交通拥堵指数绘制路段交通运行状况图，如图 5-4 所示。

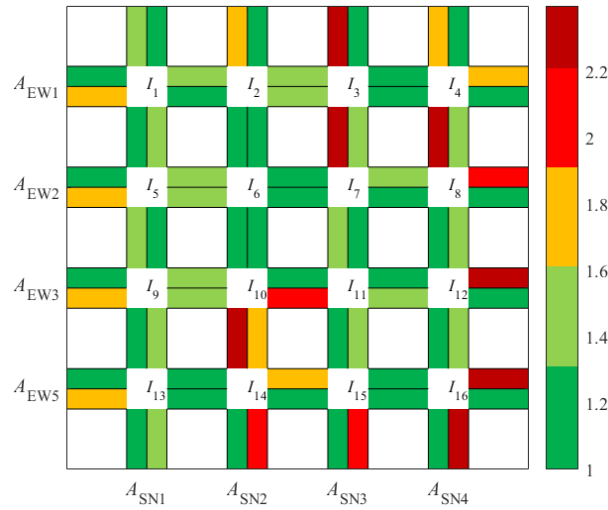


图 5-4 路段交通运行状况（第四章模型方案）

从图 5-4 中可以看出，在非边界路段中，有 23 条路段处于畅通状态，19 条路段处于基本畅通状态，2 条路段处于轻度拥堵状态，4 条处于中度拥堵状态及以上。可见第四章模型方案控制下，大多数路段处于畅通状态。对比图 5-4 和图 4-9 发现，有 5 条处于不同程度拥堵状态的路段均为未协调路段。可见，第四章模型对于协调路径集内的路段控制效果较好。

对比图 5-3 和图 5-4 发现，在非边界路段中，第四章模型方案控制后的处于畅通状态的路段更多，处于拥堵状态的路段更少，可见第四章模型方案控制效果优于 Synchro 方案。

为进一步比较两个方案的路网整体控制效果，需对路网交通运行指标进行计算。根据表 5-2、表 5-3、表 5-4 和表 5-5 的路段权重系数和路段交通拥堵指数，利用式（5-3）、式（5-4）、式（5-5）分别计算路网交通拥堵指数、路网平均无阻滞行驶车速和路网平均行程车速，结果如表 5-6 所示。

表 5-6 路网交通运行指数

	$PI$		$v_f$		$v$	
	Synchro	第四章模型	Synchro	第四章模型	Synchro	第四章模型
路网	1.463	1.453	42.992	42.999	29.385	29.596

从表 5-6 可以看出，第四章模型方案的路网交通拥堵指数较 Synchro 方案小，路网平均行程车速较 Synchro 方案大，可见第四章模型方案整体控制效果优于 Synchro 方案。根据表 4-10 可知，Synchro 方案和第四章模型方法通过 VISSIM 仿真的路网评价获得的路网平均行程车速分别为 28.965km/h 和 29.074km/h。计算使用本章方法得到的路网平

均行程车速与仿真评价获取的路网行程车速的绝对平均百分比误差如下：

(1) Synchro 方案

$$MAPE = \frac{|28.965 - 29.385|}{28.965} \times 100\% = 1.450\% \quad (5-11)$$

(2) 第四章模型方案

$$MAPE = \frac{|29.074 - 29.596|}{29.074} \times 100\% = 1.795\% \quad (5-12)$$

从式 (5-11) 和 (5-12) 中可以看出，本章方法得到的路网平均行程车速与仿真评价获取的路网行程车速比较接近，Synchro 方案和第四章模型方案的路网行程车速的绝对平均百分比误差均在 2% 以内，由此可见本文方法计算的路网行程车速准确性较好，本文方法具有较好的适用性。

### 5.3.2 协调路径集交通运行状态评价

使用 Matlab 进行编程，遍历轨迹数据，统计协调路径集内各路径的流量、车辆总行程时间、车辆通过路段的总无阻滞行驶时间，利用式 (5-6)、(5-7)、(5-8) 计算 Synchro 方案和第四章模型方案的协调路径链（集）平均拥堵指数如表 5-7 所示，协调路径路段权重系数及交通拥堵指数如附表 3-附表 6 所示。

表 5-7 协调路径链（集）交通运行状态评价

协调路径链	Synchro 方案	第四章模型方案
$L_{(13,4 \rightarrow 14, * \rightarrow 15, * \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1)}$	1.385	1.169
$L_{(1, 1 \rightarrow 5, * \rightarrow 9, * \rightarrow 10, * \rightarrow 11, * \rightarrow 12, 2)}$	1.722	1.394
$L_{(4, 2 \rightarrow 3, * \rightarrow 2, * \rightarrow 6, * \rightarrow 10, * \rightarrow 14, 3)}$	1.504	1.472
$L_{(12, 2 \rightarrow 11, * \rightarrow 10, * \rightarrow 9, 4)}$	1.232	1.116
$L_{(8, 2 \rightarrow 7, * \rightarrow 6, * \rightarrow 5, 4)}$	1.187	1.199
$L_{(5, 4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 8, 2)}$	1.269	1.137
$L_{(1, 4 \rightarrow 2, * \rightarrow 3, * \rightarrow 4, 2)}$	1.511	1.374
$L_{(14, 3 \rightarrow 10, * \rightarrow 6, * \rightarrow 2, 1)}$	1.440	1.122
$L_{(13, 3 \rightarrow 9, * \rightarrow 5, * \rightarrow 1, 1)}$	1.792	1.109
$L_{(15, 3 \rightarrow 11, * \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 1)}$	1.628	1.134
协调路径集	1.487	1.256

从表 5-7 中可以看出，第四章模型方案控制下的协调路径集平均拥堵指数较 Synchro 方案小，第四章模型方案的协调路径集处于畅通状态，优于 Synchro 方案的基本畅通状态。并且，在第四章模型方案的控制下，90% 的协调路径链的交通拥堵指数较 Synchro 方案小。

根据表 5-7 和表 4-6，绘制协调路径链评价平均拥堵指数与平均延误的散点图，并进行曲线拟合，如图 5-5 所示。

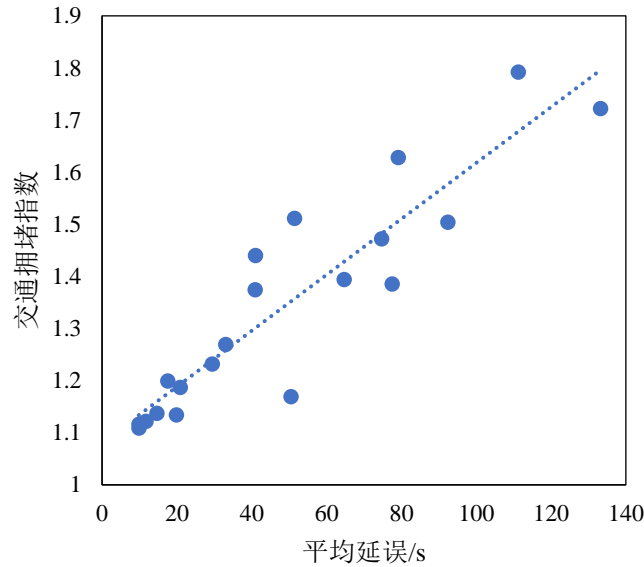


图 5-5 交通拥堵指数与延误散点图

由图 5-5 可以看出，路径链的平均拥堵指数与平均延误呈正相关。一般来说，延误越大，交通拥堵指数越大。但由于路径链的延误与路径链所经过的交叉口数量有关，因此一般不同长度路径链的延误没有可比性。但交通拥堵指数可以很好地解决这一问题。例如，路径链  $L_{(13,4 \rightarrow 14, * \rightarrow 15, * \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1)}$  的延误是 50.5s，路径链  $L_{(1,4 \rightarrow 2, * \rightarrow 3, * \rightarrow 4, 2)}$  的延误是 40.9，就延误而言，路径链  $L_{(13,4 \rightarrow 14, * \rightarrow 15, * \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1)}$  是优于  $L_{(1,4 \rightarrow 2, * \rightarrow 3, * \rightarrow 4, 2)}$ ，但事实上，路径链  $L_{(13,4 \rightarrow 14, * \rightarrow 15, * \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1)}$  有完整的绿波带，而  $L_{(2,4 \rightarrow 3, 2)}$  却未进行协调，因此理论上路径链  $L_{(13,4 \rightarrow 14, * \rightarrow 15, * \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1)}$  的协调效果应更好，但从延误上却难以看出这一点。而从交通拥堵指数来看，路径链  $L_{(13,4 \rightarrow 14, * \rightarrow 15, * \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1)}$  的交通拥堵指数是 1.169，而路径链  $L_{(1,4 \rightarrow 2, * \rightarrow 3, * \rightarrow 4, 2)}$  的交通拥堵指数是 1.374，可以看出路径链  $L_{(13,4 \rightarrow 14, * \rightarrow 15, * \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1)}$  的协调效果优于路径链  $L_{(1,4 \rightarrow 2, * \rightarrow 3, * \rightarrow 4, 2)}$ 。由此可见，协调路径链的交通拥堵指数对于评价协调相位设计效果更加科学合理。

## 5.4 本章小结

本章提出了一种基于路段权重系数的路网交通运行状况评价方法，通过定义权重系数，量化各个路段交通运行状况在整个路网中的权重大小，建立起路段交通拥堵指数与协调路径链交通拥堵指数、协调路径集交通拥堵指数和路网交通拥堵指数的联系，

最后以第四章模型求解信号控制方案为例，对控制效果进行评价。实验表明，本章方法能更加科学合理地对当前协调路径集交通状态进行判别，为协调路径集控制效果提供了一种新的评价方法。

## 结论和展望

### 主要结论和创新点

本文总结了城市区域协调控制理论，针对当前研究的不足之处和区域绿波协调控制需求，以协调路径集作为研究对象，从协调对象的选取、协调模型的建立以及控制方案的优化等方面展开相关科学研究。本文研究取得的主要结论、创新点以及今后需要进一步深入研究的工作总结如下：

#### 一、主要结论

1) 考虑到现有的交通控制子区划分方法无法反映控制区域内交叉口之间的方向性协调控制需求，通过对协调对象进行分解细化，给出了协调路径（包括父路径、子路径）、协调路径链、协调路径集的概念，提出了基于路径链长度及其交通量大小的协调路径集优选方法，从而可以更加细致地考虑交叉口之间的方向性协调需求，为区域协调控制对象的选取提供了一套新方法。

2) 考虑控制区域内交叉口之间的方向性协调控制需求，将协调路径集进行协调对象，基于 NEMA 双环相位结构实现协调路径集进一步优选，以及信号周期、信号相序、相位时间、相位差的综合优化。通过算例表明，本文模型可以极大地保证了协调路径集的优化效果，满足路网中协调控制需求非对称性需求，同时在路网整体控制方面也具有不错的效果。

3) 考虑路段交通运行状态与路网交通运行状态的联系，提出了一种基于路段权重系数的路网交通运行状况评价方法，通过定义路段权重系数，量化各个路段交通运行状况在整个路网中的权重大小，从而实现路网交通运行状态；并通过举一反三，定义路径权重系数，提出针对协调路径集控制效果评价方法。最后以第四章模型求解信号控制方案为例，对控制效果进行评价。实验表明，本章方法能更加科学合理地对当前协调路径集交通状态进行判别，为协调路径集控制效果提供了一种新的评价方法。

#### 二、创新点

1) 建立了协调路径（父路径、子路径）、协调路径链、协调路径集这一组概念体系，提出了基于路径链长度及其交通量大小的协调路径集优选方法，为区域协调控制对象的选取提供了一套新方法；

2) 建立了面向协调路径集的信号控制模型，以协调路径的流量总和最大为目标，

通过对各交叉口协调相位中心时刻点进行约束,实现协调路径集的进一步优选,以及信号周期、信号相序、相位时间、相位差的综合优化,为区域协调控制的构建了一种新模型。

3) 提出了一种协调路径集控制效果的评价方法,通过定义路段权重系数,衡量各路段交通运行状态在路网中的占比,实现路网和协调路径集的交通运行状态评价,为交通运行状态研判提供一种新思路。

## 研究展望

本文从道路交通的方向性协调控制需求出发,给出了协调路径(包括父路径、子路径)、协调路径链、协调路径集的概念,提出了基于路径链长度及其交通量大小的协调路径集优选方法,建立了面向协调路径集的区域协调控制方法以及面向非协调路径集的区域信号控制方法,取得了一定的研究成果,但由于受限于研究时间、实验条件及本人自身水平等,在一些方面还需要开展进一步研究,总结如下:

1) 路网中存在异质车流,如何在协调路径集优选时考虑不同车型车流的影响,是本文后续需要研究的重要问题;

2) 如何对非协调路径集上的交叉口进行信号优化,进一步建立更加完整的区域交通绿波协调优化模型,是本文后续需要研究的重要问题。

3) 在建立模型的同时,如何进一步提升模型的求解速度,是本文后续研究所需解决的重要问题。

4) 如何利用路网协调路径集控制效果的综合评价,在实现对协调路径集选取与路网信号协调设计的综合评价的同时,进一步修正和标定控制模型的结构与参数,是本文后续需要研究的重要问题。

## 参考文献

- [1] 王凤伟. 车辆轨迹数据质量评价方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [2] 成亚雄. 车辆轨迹的数据分析与研究[D]. 武汉理工大学, 2015.
- [3] 卢凯明, 郭斌, 蔡晓禹, 等. 基于多源轨迹数据的信号交叉口运行评价研究[J]. 公路与汽运, 2019, 192(03): 28-36.
- [4] 唐克双, 谈超鹏, 周楠. 基于轨迹数据的交叉口相位切换期间危险驾驶行为实证分析[J]. 中国公路学报, 2018, v.31; No.176(04): 88-97.
- [5] Comert G. Queue length estimation from probe vehicles at isolated intersections: Estimators for primary parameters[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 252(2): 502-521.
- [6] Nie C , Wei H , Shi J , et al. Optimizing actuated traffic signal control using license plate recognition data: Methods for modeling and algorithm development[J]. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 2021, 9(11): 100319.
- [7] 邬群勇, 邹智杰, 邱端昇, 苏克云. 结合出租车轨迹数据的城市道路拥堵时空分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2018, 46(05): 724-731.
- [8] Goodall N J, Smith B L, Park B B. Microscopic estimation of freeway vehicle positions from the behavior of connected vehicles[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2016, 20(1): 45-54.
- [9] Yin J , Chen P , Tang K , et al. Queue Intensity Adaptive Signal Control for Isolated Intersection Based on Vehicle Trajectory Data[J]. Journal of Advanced Transportation, 2021, 2021(6): 1-16.
- [10] Guler SI, Menendez M, Meier L. Using connected vehicle technology to improve the efficiency of intersections[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technology, 2014, 46: 121-131.
- [11] Day CM, Li H, Richardson L M. Detector-free optimization of traffic signal offsets with connected vehicle data[J]. Transportation Research Record, 2017, 2620(1): 54-68.
- [12] Tiaprasert K, Zhang Y, Wang X B. Queue length estimation using connected vehicle technology for adaptive signal control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(4): 2129-2140.

- [13] He X, Liu H X, Liu X. Optimal vehicle speed trajectory on a signalized arterial with consideration of queue[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 61: 106-120.
- [14] Walinchus R J. Real-time network decomposition and subnetwork interfacing[J]. Highway Research Record, 1971, 366: 20-28.
- [15] Turner I F, Shannon G F. Micro master - the co-ordination of small groups of intersections[J]. Institute of Transportation Engineers, 1978, 19(4): 171-173.
- [16] Yagoda H N, Principe E H, Vick C E, et al. Subdivision of signal systems into control areas[J]. Traffic Engineering, 1973, 43(12): 42-45.
- [17] Federal Highway Administration. Manual on uniform traffic control devices[M]. Washington DC: Federal Highway Administration, 1978.
- [18] 李岩, 杨洁, 过秀成, 等. 基于小波变换的关联交叉口群关键路径识别方法[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 135-140.
- [19] Ji Y, Geroliminis N. On the spatial partitioning of urban transportation networks[J]. Transportation Research Part B, 2012, 46(10): 1639-1656.
- [20] 卢凯, 徐建闽, 李轶舜. 基于关联度分析的协调控制子区划分方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, 37(7): 6-9+20.
- [21] 卢凯, 徐建闽, 郑淑鉴. 相邻交叉口关联度分析及其应用[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, 37(11): 41-46.
- [22] 马万经, 李晓丹, 杨晓光. 基于路径的信号控制交叉口关联度计算模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(11): 1462-1466.
- [23] Hu Y, Wang Y, Zhang J, et al. Correlation degree analysis of arterial adjacent intersections for coordinated control subunit partition[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(1): 168781401774874.
- [24] 徐建闽, 鄢小文, 荆彬彬, 等. 考虑交叉口不同饱和度的路网动态分区方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(4): 145-152.
- [25] 马万经, 李晓丹, 杨晓光. 基于路径的信号控制交叉口关联度计算模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(11): 1462-1466.
- [26] 卢凯, 徐建闽, 郑淑鉴, 等. 协调控制子区快速动态划分方法研究[J]. 自动化学报,



- 2012, 38(2): 279-287.
- [27] Shen G, Yang Y. A dynamic signal coordination control method for urban arterial roads and its application[J]. Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering, 2016, 17(9): 70-81.
- [28] 田秀娟, 于德新, 周户星, 等. 基于改进 Newman 算法的动态控制子区划分[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(5): 137-143+167.
- [29] 刘端阳, 潘策. 基于 Ncut 的城市路网交通子区划分方法[J]. 浙江工业大学学报, 2019, 47(04): 436-441.
- [30] 李岩, 过秀成, 杨洁, 等. 基于小波变换和频谱分析的交叉口群路径分级方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(001):168-172.
- [31] 卢守峰, 陶黎明, 江勇东. 考虑连接性的路网划分算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(5): 99-106.
- [32] 曲大义, 贾彦峰, 刘冬梅, 等. 考虑多特性因素的路网交叉口群动态划分方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(5): 1478-1483.
- [33] 段后利, 李志恒, 张毅, 等. 交通控制子区动态划分模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(sup2): 13-18.
- [34] 别一鸣, 王琳虹, 王殿海, 等. 城市路网交通控制子区动态划分策略[J]. 中国公路学报, 2013, 26(6): 157-168.
- [35] 王殿海, 杨希锐, 宋现敏. 交通信号干线协调控制经典数值计算法的改进[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 01: 29-34.
- [36] 卢凯, 徐建闽, 李轶舜. 进口单独放行方式下的干道双向绿波协调控制数解算法[J]. 中国公路学报, 2010, 23(03):95-101.
- [37] 卢凯, 刘永洋, 吴焕, 黄江辉. 非对称通行条件下的双向绿波协调控制数解算法[J]. 中国公路学报, 2015, 28(06):95-103.
- [38] 卢凯, 徐广辉, 林观荣, 首艳芳, 徐建闽. 绿灯终点型双向绿波协调控制数解算法[J]. 中国公路学报, 2019, 32(11):202-211.
- [39] 卢凯, 徐建闽, 叶瑞敏, 等. 经典干道协调控制信号配时数解算法的改进[J]. 公路交通科技, 2009, 26(1):120-124.
- [40] 李林, 徐建闽, 卢凯. 进口单独放行的改进绿波数解法[J]. 交通信息与安全, 2009(03):64-67.

- [41] 荆彬彬, 鄢小文, 吴焕,等. 基于双向最大绿波带宽的通用干道协调控制数解算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(02):76-82.
- [42] Morgan J T, Little J D C. Synchronizing traffic signals for maximal bandwidth [J]. Operations Research, 1964, 12(6):896 -912.
- [43] Little J D C. The synchronization of traffic signals by mixed-integer linear programming[J]. Operations Research, 1966, 14(4):568 -594.
- [44] Little J D C, Kelson M D, Gartner N H. Maxband:a versatile program for setting signals on arteries and triangular networks[J]. Transportation Research Record, 1981(795):40 -46.
- [45] Gartner N H, Assmann S F, Lasaga F, et al. Multiband: a variable bandwidth arterial progression scheme [J]. Transportation Research Record, 1990(1287):212 -222.
- [46] Gartner N H, Assmann S F, Lasaga F, et al. A multi-band approach to arterial traffic signal optimization[J]. Transportation Research Part B, 1991, 25(1):55 -74.
- [47] Stamatiadis C, Gartner N H. Multiband-96: a program for variable bandwidth progression optimization of multi-arterial traffic networks[J]. Transportation Research Record, 1996(1554):9-17.
- [48] Gartner N H, Stamatiadis C. Arterial-based control of traffic flow in urban grid networks[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2002, 35(5):657-671.
- [49] Gartner N H, Stamatiadis C. Progression optimization featuring arterial- and route- based priority signal networks[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning and Operations, 2004, 8(2):77-86.
- [50] Ma W J, Zou L, An k, et al. A partition-enabled multi-mode band approach to arterial traffic signal optimization[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(1):313-322.
- [51] 卢凯, 徐建闽, 陈思溢,等. 通用干道双向绿波协调控制模型及其优化求解[J]. 控制理论与应用, 2011(04):551-555.
- [52] 卢凯, 郑淑鉴, 徐建闽,等. 面向双向不同带宽需求的绿波协调控制优化模型[J]. 交通运输工程学报, 2011(5):101-108.
- [53] Yang X, Cheng Y, Chang G L. A Multi-Path progression model for synchronization of

- p>arterial traffic signals[J].
- Transportation Research Part C*
- , 2015, 53:93-111.
- [54] Zhang C, Xie Y, Gartner N H, et al. AM-Band: An asymmetrical Multi-Band model for arterial traffic signal coordination[J]. *Transportation Research Part C*, 2015, 58:515-531.
- [55] Shirvani M J, Maleki H R. Enhanced variable bandwidth progression optimisation model in arterial traffic signal control[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2016, 10(6):396-405.
- [56] Arsava T, Xie Y, Gartner N H. Arterial progression optimization using OD-BAND[J]. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2016, 2558:1-10.
- [57] Chang E C P, Cohen S L, Liu C C, et al. Maxband-86: program for optimizing left turn phase sequence in multi-arterial closed networks[J]. *Transportation Research Record*, 1988, 61: 1181- 1188.
- [58] Gartner N H, Stamatiadis C. Progression optimization featuring arterial and route-based priority signal networks[J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2004, 8(2): 77-86.
- [59] 王昊, 姚东成. 约束可松弛的网络绿波模型[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(3):184.
- [60] Yan H, He F, Lin X, et al. Network-level multiband signal coordination scheme based on vehicle trajectory data[J]. *Transportation research*, 2019, 107(10):266-286.
- [61] 徐建闽, 首艳芳, 卢凯. 基于双层规划模型的交通信号区域协调控制[J]. *华南理工大学学报:自然科学版*, 2011(03):99-104+110.
- [62] 魏永涛, 高原, 孙文义,等. 交通流动态扰动下的区域交通信号协调控制[J]. *自动化学报*, 2019, 45(10).
- [63] Lu K, Hu J, Huang, et al. Optimisation model for network progression coordinated control under the signal design mode of split phasing[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2017, 11(8):459-466.
- [64] Schrank D, Lomax T. 2001 Urban Mobility Report[M]. Texas Transportation Institute, 2001.
- [65] Schrank D L, Turner S M, Lomax T J. Trends in Urban Roadway Congestion: 1982-1991[R]. Annual Report 1131-6. Texas, Texas Department of Transportation, 1994.
- [66] 饭田恭敬. 交通工程学[M]. 人民交通出版社, 1993:151~152.

- [67] Terry B, Matt E, Chris V, Leon W. Travel time performance program: a step toward congestion Management system[C]. IPENZ Transportation Conference. 2006.
- [68] 姜桂艳.道路交通状态判别技术与应用[M].北京.人民交通出版社.2004.11.
- [69] Meeumber M, Cushman K. System performance report: central puget sound congestion management system[R]. Puget Sound Regional Council, 2001.
- [70] 公安部交通管理局,建设部城市建设司.城市道路交通管理评价体系[R].北京:公安部交通管理局,建设部城市建设司.2002.
- [71] DB11/T 785-2011,城市道路交通运行评价指标体系[S].北京:北京市质量技术监督局, 2011.
- [72] Palmieri F, Fiore U. A nonlinear recurrence based approach to traffic classification[J]. Computer Networks, 2009, 53(6): 761-773.
- [73] 李清泉, 高德荃, 杨必胜. 基于模糊支持向量机的城市道路交通状态分类[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39:131-134.
- [74] 韦伟, 毛保华, 陈绍宽, 等. 基于时空自相关的道路交通状态聚类方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(2): 57-63.
- [75] Washburn S S, Kirschner D S. Rural freeway level of service based on traveler perception[M]. Transportation Research Board, 2006.
- [76] D'Este G M, Rocco Z, Taylor M. Using GPS to measure traffic system performance[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 1999, 14(4): 255-265.
- [77] Lomax T. Quantifying Congestion[M]. USA: National Academy Press, 1997.
- [78] 达庆东, 姜学锋. 基于流量-占有率检测数据的交通状态划分[J].道路交通与安全,2002, (3): 29-31.
- [79] 董春娇, 邵春福, 熊志华. 基于优化 SVM 的城市快速路网交通流状态判别[J]. 北京交通大学学报, 2011, 35(6): 13-16, 22.
- [80] 皮晓亮, 王正, 韩晦, 等. 基于环形线圈检测器采集信息的交通状态分类方法应用研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(4): 115-119.
- [81] 任其亮, 谢小淞. 基于遗传动态模糊聚类的道路交通状态判定方法[J]. 交通运输工程与信息学报, 2007, 5(3): 12-15, 25.
- [82] 于荣, 王国样, 郑继媛等. 基于支持向量机的城市道路交通状态模式识别研究[J]. 交

- 通运输系统工程与信息, 2013, 13(1): 130-136.
- [83] 黄艳国, 宋二猛, 钟建新. 城市区域路网交通状态分析与评价方法[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2017, 36(12): 91-96.
- [84] 韦清波, 何兆成, 郑喜双, 等. 考虑多因素的城市道路交通拥堵指数预测研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(1): 74-81.
- [85] 李泽钧, 邸小建, 翁剑成, 等. 基于拥堵时空特征的区域分类与评价方法研究[J]. 公路交通科技, 2019, 036(002):121-127.
- [86] Sarvi M, Ryota Horiguchi, Kuwahara M. A methodology to identify traffic condition using intelligent probe vehicles[C]. The 10th ITS World Congress. Madrid, 2003:17-21.
- [87] Mekky, A. Measuring congestion in the greater toronto area[J]. Journal of Positive Behavior Interventions, 2004, 17(4): 88-93.
- [88] Porikli, F., Xiaokun Li. Traffic congestion estimation using HMM models without vehicle tracking[C].//Intelligent Vehicles Symposium, 2004 IEEE. 2004:188-193.
- [89] 于德新, 高鹏, 杨兆升. 基于遗传神经网络的区域交通控制效果评价[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(04):490-494.
- [90] X. Zhang, Z. Yuan. The GPS trajectory data research based on the intelligent traffic big data analysis platform[J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, Vol. 17, No.3, pp.423-4309 2017.
- [91] 霍润平, 周巧梅. 道路交通控制原理及应用[M], 中国人民公安大学出版社, 2002.
- [92] 徐建闽. 交通管理与控制[M]. 人民交通出版社, 2007.
- [93] 徐吉谦, 陈学武. 交通工程总论[M]. 人民交通出版社, 2008.
- [94] NEMA TS 2-2016, Traffic Controller Assemblies with NTCIP Requirements (Version 03.07)[S].
- [95] 邹志云, 陈绍宽, 郭谨一, 基于 Synchro 系统的典型信号交叉口配时优化研究[J]. 北京交通大学学报, 2004, 28(6): 61-65.
- [96] 刘洋, 基于 Synchro 的多交叉口交通信号控制研究[J]. 交通信息与安全, 2005, 23(6): 35-38.
- [97] Park B, Yun, I. Evaluation of stochastic optimization methods of traffic signal control settings for coordinated actuated signal systems[C]. Transportation Research Board

- Meeting, 2006.
- [98] 孙超, 徐建闽, 基于 Synchro 的单点交叉口信号配时优化研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(11): 117-121.
- [99] 沈坚锋, 白雁, 沈宇鹏, 基于 Synchro 的干线交通信号配时优化[J]. 计算机仿真, 2012, 29(10): 318-322.
- [100] 卢火平, 罗典, 许伟立. 基于 Synchro-VISSIM 的干道绿波协调控制仿真研究[J]. 交通与运输(学术版), 2013, H12: 33-36.
- [101] 曹凌峰, 基于 Synchro 的绿波协调控制仿真研究[J]. 内蒙古公路与运输, 2017, 1: 52-54.
- [102] 张溪, 刘建军, 周天, 等. 基于行程时间比指数的街道级交通运行特征研究[J]. 交通工程, 2018, 18(06):8-15.

## 附录

### 1) 第四章案例分析 LINGO 代码:

model:

sets:

n3/1,2,3/:x4,x5,x6,x7,x8,x9,x10,k4,k5,k6,k7,k8,k9,k10,q4,q5,q6,q7,q8,q9,q10;

n4/1,2,3,4/;

n5/1..5/:x2,x3,k2,k3,q2,q3;

n6/1..6/:x1,k1,q1;

node/1..16/:tws,tes,tns,tss,ttws,ttws,ttss,tss,twl,tel,tnl,tsl,ttwl,ttel,ttnl,ttsl,tmws,tmss,tmes,tmns,  
tmwl,tmsl,tmel,tmnl;

pathew(n4,n3):sew;

pathsn(n3,n4):ssn;

endsets

!目标函数

max=@sum(n6:x1\*q1)+@sum(n5:x2\*q2)+@sum(n5:x3\*q3)+@sum(n3:x4\*q4)+@sum(n3:x  
5\*q5)+@sum(n3:x6\*q6)+@sum(n3:x7\*q7)+@sum(n3:x8\*q8)+@sum(n3:x9\*q9)+@sum(n3:  
x10\*q10);

!协调关系;

@abs(tws(14)-tws(13)-sew(4,1)/v-k1(1)\*c)\*x1(1)<=e;

@abs(tws(15)-tws(14)-sew(4,2)/v-k1(2)\*c)\*x1(2)<=e;

@abs(twl(16)-tws(15)-sew(4,3)/v-k1(3)\*c)\*x1(3)<=e;

@abs(tss(12)-twl(16)-ssn(3,4)/v-k1(4)\*c)\*x1(4)<=e;

@abs(tss(8)-tss(12)-ssn(2,4)/v-k1(5)\*c)\*x1(5)<=e;

@abs(tss(4)-tss(8)-ssn(1,4)/v-k1(6)\*c)\*x1(6)<=e;

@abs(tns(5)-tns(1)-ssn(1,1)/v-k2(1)\*c)\*x2(1)<=e;

$$@abs(tnl(9)-tns(5)-ssn(2,1)/v-k2(2)*c)*x2(2)<=e;$$

$$@abs(tws(10)-tnl(9)-sew(3,1)/v-k2(3)*c)*x2(3)<=e;$$

$$@abs(tws(11)-tws(10)-sew(3,2)/v-k2(4)*c)*x2(4)<=e;$$

$$@abs(tws(12)-tws(11)-sew(3,3)/v-k2(5)*c)*x2(5)<=e;$$

$$@abs(tes(3)-tes(4)-sew(1,3)/v-k3(1)*c)*x3(1)<=e;$$

$$@abs(tel(2)-tes(3)-sew(1,2)/v-k3(2)*c)*x3(2)<=e;$$

$$@abs(tns(6)-tel(2)-ssn(1,2)/v-k3(3)*c)*x3(3)<=e;$$

$$@abs(tns(10)-tns(6)-ssn(2,2)/v-k3(4)*c)*x3(4)<=e;$$

$$@abs(tns(14)-tns(10)-ssn(3,2)/v-k3(5)*c)*x3(5)<=e;$$

$$@abs(tes(11)-tes(12)-sew(3,3)/v-k4(1)*c)*x4(1)<=e;$$

$$@abs(tes(10)-tes(11)-sew(3,2)/v-k4(2)*c)*x4(2)<=e;$$

$$@abs(tes(9)-tes(10)-sew(3,1)/v-k4(3)*c)*x4(3)<=e;$$

$$@abs(tes(7)-tes(8)-sew(2,3)/v-k5(1)*c)*x5(1)<=e;$$

$$@abs(tes(6)-tes(7)-sew(2,2)/v-k5(2)*c)*x5(2)<=e;$$

$$@abs(tes(5)-tes(6)-sew(2,1)/v-k5(3)*c)*x5(3)<=e;$$

$$@abs(tws(6)-tws(5)-sew(2,1)/v-k6(1)*c)*x6(1)<=e;$$

$$@abs(tws(7)-tws(6)-sew(2,2)/v-k6(2)*c)*x6(2)<=e;$$

$$@abs(tws(8)-tws(7)-sew(2,3)/v-k6(3)*c)*x6(3)<=e;$$

$$@abs(tws(2)-tws(1)-sew(1,1)/v-k7(1)*c)*x7(1)<=e;$$

$$@abs(tws(3)-tws(2)-sew(1,2)/v-k7(2)*c)*x7(2)<=e;$$

$$@abs(tws(4)-tws(3)-sew(1,3)/v-k7(3)*c)*x7(3)<=e;$$

$$@abs(tss(10)-tss(14)-ssn(3,2)/v-k8(1)*c)*x8(1)<=e;$$

$$@abs(tss(6)-tss(10)-ssn(2,2)/v-k8(2)*c)*x8(2)<=e;$$



@abs(tss(2)-tss(6)-ssn(1,2)/v-k8(3)\*c)\*x8(3)<=e;

@abs(tss(9)-tss(13)-ssn(3,1)/v-k9(1)\*c)\*x9(1)<=e;

@abs(tss(5)-tss(9)-ssn(2,1)/v-k9(2)\*c)\*x9(2)<=e;

@abs(tss(1)-tss(5)-ssn(1,1)/v-k9(3)\*c)\*x9(3)<=e;

@abs(tss(11)-tss(15)-ssn(3,3)/v-k10(1)\*c)\*x10(1)<=e;

@abs(tss(7)-tss(11)-ssn(2,3)/v-k10(2)\*c)\*x10(2)<=e;

@abs(tss(3)-tss(7)-ssn(1,3)/v-k10(3)\*c)\*x10(3)<=e;

!周期约束;

c>=100;

c<=130;

!相位约束;

@for(node:ttel+ttws=ttwl+ttes);

@for(node:ttsl+ttns=tnl+ttss);

@for(node:ttel+ttws+ttsl+ttns=c);

@for(node:@smin(tel-ttel/2, tws-ttws/2)=@smin(twl-ttwl/2, tes-ttes/2));

@for(node:@smax(tel, tws)-@smin(tel, tws)=(ttel+ttws)/2);

@for(node:@smax(twl, tes)-@smin(twl, tes)=(ttwl+ttes)/2);

@for(node:@smax(tsl, tns)-@smin(tsl, tns)=(ttsl+ttns)/2);

@for(node:@smax(tnl, tss)-@smin(tnl, tss)=(tnl+ttss)/2);

@for(node:@smax(tel+ttel/2, tws+ttws/2)=@smin(tsl-ttsl/2, tns-ttns/2));

@for(node:@smax(twl+ttwl/2, tes+ttes/2)=@smin(tnl-ttnl/2, tss-ttss/2));

@for(node:ttws>=tmws);

@for(node:ttss>=tmss);

@for(node:ttes>=tmes);

@for(node:ttns>=tmns);

@for(node:ttwl>=tmwl);

@for(node:ttsl>=tmssl);

---

```
@for(node:ttl>=tmel);  
@for(node:ttnl>=tmnl);  
@for(node:twl<=2*c);  
@for(node:tss<=2*c);  
@for(node:tes<=2*c);  
@for(node:tns<=2*c);  
@for(node:twl<=2*c);  
@for(node:tsl<=2*c);  
@for(node:tel<=2*c);  
@for(node:tnl<=2*c);
```

!系数约束;

```
@for(n6:@bin(x1));  
@for(n5:@bin(x2));  
@for(n5:@bin(x3));  
@for(n3:@bin(x4));  
@for(n3:@bin(x5));  
@for(n3:@bin(x6));  
@for(n3:@bin(x7));  
@for(n3:@bin(x8));  
@for(n3:@bin(x9));  
@for(n3:@bin(x10));  
@for(n6:@gin(k1));  
@for(n5:@gin(k2));  
@for(n5:@gin(k3));  
@for(n3:@gin(k4));  
@for(n3:@gin(k5));  
@for(n3:@gin(k6));  
@for(n3:@gin(k7));
```

```

@for(n3:@gin(k8));
@for(n3:@gin(k9));
@for(n3:@gin(k10));
@for(n6:@free(k1));
@for(n5:@free(k2));
@for(n5:@free(k3));
@for(n3:@free(k4));
@for(n3:@free(k5));
@for(n3:@free(k6));
@for(n3:@free(k7));
@for(n3:@free(k8));
@for(n3:@free(k9));
@for(n3:@free(k10));
End

```

## 2) 第四章案例分析

附表 1 相位中心时刻及信号相序优化结果（法则 2）

交叉口	绿灯中心时刻/s								信号相序	
	$T_{WS}$	$T_{ES}$	$T_{NS}$	$T_{SS}$	$T_{WL}$	$T_{EL}$	$T_{NL}$	$T_{SL}$	东西	南北
$I_1$	25	75	116	95	39	61	119	92	搭接	搭接
$I_2$	71	71	115	115	33	33	93	93	对称	对称
$I_3$	103	1	61	61	97	7	25	25	搭接	对称
$I_4$	78	78	35	36	116	116	14	14	对称	搭接
$I_5$	87	87	42	28	67	67	108	2	对称	搭接
$I_6$	23	30	80	107	57	51	74	113	搭接	搭接
$I_7$	53	0	96	96	39	14	75	75	搭接	对称
$I_8$	89	74	14	117	37	51	20	112	搭接	搭接
$I_9$	23	8	100	77	43	58	102	75	搭接	搭接
$I_{10}$	33	78	2	2	41	70	99	99	搭接	对称
$I_{11}$	68	43	6	6	68	43	92	92	搭接	对称
$I_{12}$	110	112	50	64	89	87	27	13	搭接	搭接
$I_{13}$	13	30	90	90	3	40	58	58	搭接	搭接
$I_{14}$	67	95	35	35	56	105	13	13	搭接	搭接
$I_{15}$	104	1	61	63	96	9	28	26	搭接	搭接
$I_{16}$	29	53	107	120	29	53	84	70	对称	搭接

附表 2 交叉口各进口相位时间分配/s (法则 2)

交叉口	$t_{WS}$	$t_{ES}$	$t_{NS}$	$t_{SS}$	$t_{WL}$	$t_{EL}$	$t_{NL}$	$t_{SL}$
$I_1$	26	17	32	23	54	45	26	17
$I_2$	26	26	27	27	50	50	17	17
$I_3$	30	31	55	55	17	18	17	17
$I_4$	60	60	26	24	17	17	19	17
$I_5$	23	23	32	61	17	17	19	48
$I_6$	26	38	29	48	17	29	17	36
$I_7$	26	24	25	25	54	52	17	17
$I_8$	28	58	28	28	17	47	17	17
$I_9$	53	24	33	22	46	17	28	17
$I_{10}$	32	26	29	29	48	42	17	17
$I_{11}$	30	21	52	52	30	21	17	17
$I_{12}$	29	25	57	29	21	17	45	17
$I_{13}$	37	38	48	48	17	18	17	17
$I_{14}$	38	60	26	26	17	39	17	17
$I_{15}$	33	32	53	48	18	17	22	17
$I_{16}$	30	17	56	29	30	17	44	17

## 3) 第五章案例分析：路径交通运行指数计算结果

附表 3 协调路径交通运行状态评价 (Synchro)

协调路径链	路径链交通	协调路径交通拥堵指数					
	拥堵指数	$P_{(l,1)}$	$P_{(l,2)}$	$P_{(l,3)}$	$P_{(l,4)}$	$P_{(l,5)}$	$P_{(l,6)}$
$L_{(13,4 \rightarrow 14, * \rightarrow 15, * \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1)}$	1.385	1.16	1.46	1.11	1.30	1.47	1.95
$L_{(1,1 \rightarrow 5, * \rightarrow 9, * \rightarrow 10, * \rightarrow 11, * \rightarrow 12, 2)}$	1.722	1.90	1.22	2.32	1.88	1.45	-
$L_{(4,2 \rightarrow 3, * \rightarrow 2, * \rightarrow 6, * \rightarrow 10, * \rightarrow 14, 3)}$	1.504	1.51	1.37	1.92	1.14	1.50	-
$L_{(12,2 \rightarrow 11, * \rightarrow 10, * \rightarrow 9, 4)}$	1.232	1.24	1.09	1.33	-	-	-
$L_{(8,2 \rightarrow 7, * \rightarrow 6, * \rightarrow 5, 4)}$	1.187	1.10	1.17	1.25	-	-	-
$L_{(5,4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 8, 2)}$	1.269	1.04	1.67	1.34	-	-	-
$L_{(1,4 \rightarrow 2, * \rightarrow 3, * \rightarrow 4, 2)}$	1.511	1.16	2.59	1.09	-	-	-
$L_{(14,3 \rightarrow 10, * \rightarrow 6, * \rightarrow 2, 1)}$	1.440	1.65	1.45	1.32	-	-	-
$L_{(13,3 \rightarrow 9, * \rightarrow 5, * \rightarrow 1, 1)}$	1.792	2.08	1.05	2.53	-	-	-
$L_{(15,3 \rightarrow 11, * \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 1)}$	1.628	2.33	1.55	1.22	-	-	-

附表 4 协调路径权重系数 (Synchro)

协调路径链	协调路径链 权重系数	协调路径权重系数					
		$P_{(l,1)}$	$P_{(l,2)}$	$P_{(l,3)}$	$P_{(l,4)}$	$P_{(l,5)}$	$P_{(l,6)}$
$L_{(13,4 \rightarrow 14, * \rightarrow 15, * \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1)}$	0.0768	0.0143	0.0131	0.0138	0.0116	0.0136	0.0104
$L_{(1, 1 \rightarrow 5, * \rightarrow 9, * \rightarrow 10, * \rightarrow 11, * \rightarrow 12, 2)}$	0.0650	0.0112	0.0170	0.0134	0.0114	0.0119	-
$L_{(4, 2 \rightarrow 3, * \rightarrow 2, * \rightarrow 6, * \rightarrow 10, * \rightarrow 14, 3)}$	0.0523	0.0100	0.0080	0.0130	0.0117	0.0096	-
$L_{(12, 2 \rightarrow 11, * \rightarrow 10, * \rightarrow 9, 4)}$	0.0210	0.0072	0.0059	0.0079	-	-	-
$L_{(8, 2 \rightarrow 7, * \rightarrow 6, * \rightarrow 5, 4)}$	0.0272	0.0082	0.0065	0.0125	-	-	-
$L_{(5, 4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 8, 2)}$	0.0186	0.0088	0.0041	0.0057	-	-	-
$L_{(1, 4 \rightarrow 2, * \rightarrow 3, * \rightarrow 4, 2)}$	0.0269	0.0091	0.0071	0.0106	-	-	-
$L_{(14, 3 \rightarrow 10, * \rightarrow 6, * \rightarrow 2, 1)}$	0.0233	0.0049	0.0087	0.0098	-	-	-
$L_{(13, 3 \rightarrow 9, * \rightarrow 5, * \rightarrow 1, 1)}$	0.0183	0.0055	0.0075	0.0053	-	-	-
$L_{(15, 3 \rightarrow 11, * \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 1)}$	0.0283	0.0072	0.0107	0.0103	-	-	-

附表 5 协调路径交通运行状态评价 (本章模型)

协调路径链	路径链交通 拥堵指数	协调路径交通拥堵指数					
		$P_{(l,1)}$	$P_{(l,2)}$	$P_{(l,3)}$	$P_{(l,4)}$	$P_{(l,5)}$	$P_{(l,6)}$
$L_{(13,4 \rightarrow 14, * \rightarrow 15, * \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1)}$	1.169	1.18	1.13	1.10	1.19	1.04	1.43
$L_{(1, 1 \rightarrow 5, * \rightarrow 9, * \rightarrow 10, * \rightarrow 11, * \rightarrow 12, 2)}$	1.394	1.13	1.19	1.11	2.26	1.30	-
$L_{(4, 2 \rightarrow 3, * \rightarrow 2, * \rightarrow 6, * \rightarrow 10, * \rightarrow 14, 3)}$	1.472	1.19	1.29	1.12	1.08	2.81	-
$L_{(12, 2 \rightarrow 11, * \rightarrow 10, * \rightarrow 9, 4)}$	1.116	1.07	1.07	1.19	-	-	-
$L_{(8, 2 \rightarrow 7, * \rightarrow 6, * \rightarrow 5, 4)}$	1.199	1.25	1.08	1.23	-	-	-
$L_{(5, 4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 8, 2)}$	1.137	1.15	1.23	1.04	-	-	-
$L_{(1, 4 \rightarrow 2, * \rightarrow 3, * \rightarrow 4, 2)}$	1.374	1.13	1.69	1.36	-	-	-
$L_{(14, 3 \rightarrow 10, * \rightarrow 6, * \rightarrow 2, 1)}$	1.122	1.43	1.06	1.02	-	-	-
$L_{(13, 3 \rightarrow 9, * \rightarrow 5, * \rightarrow 1, 1)}$	1.109	1.06	1.11	1.15	-	-	-
$L_{(15, 3 \rightarrow 11, * \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 1)}$	1.134	1.15	1.12	1.13	-	-	-

附表 6 协调路径权重系数 (本章模型)

协调路径链	协调路径链 权重系数	协调路径权重系数					
		$P_{(l,1)}$	$P_{(l,2)}$	$P_{(l,3)}$	$P_{(l,4)}$	$P_{(l,5)}$	$P_{(l,6)}$
$L_{(13,4 \rightarrow 14, * \rightarrow 15, * \rightarrow 16, * \rightarrow 12, * \rightarrow 8, * \rightarrow 4, 1)}$	0.0725	0.0153	0.0124	0.0138	0.0098	0.0115	0.0096
$L_{(1, 1 \rightarrow 5, * \rightarrow 9, * \rightarrow 10, * \rightarrow 11, * \rightarrow 12, 2)}$	0.0510	0.0085	0.0112	0.0102	0.0097	0.0113	-
$L_{(4, 2 \rightarrow 3, * \rightarrow 2, * \rightarrow 6, * \rightarrow 10, * \rightarrow 14, 3)}$	0.0535	0.0103	0.0082	0.0120	0.0129	0.0102	-
$L_{(12, 2 \rightarrow 11, * \rightarrow 10, * \rightarrow 9, 4)}$	0.0182	0.0059	0.0053	0.0070	-	-	-
$L_{(8, 2 \rightarrow 7, * \rightarrow 6, * \rightarrow 5, 4)}$	0.0227	0.0067	0.0052	0.0108	-	-	-
$L_{(5, 4 \rightarrow 6, * \rightarrow 7, * \rightarrow 8, 2)}$	0.0225	0.0105	0.0051	0.0069	-	-	-
$L_{(1, 4 \rightarrow 2, * \rightarrow 3, * \rightarrow 4, 2)}$	0.0268	0.0091	0.0074	0.0102	-	-	-
$L_{(14, 3 \rightarrow 10, * \rightarrow 6, * \rightarrow 2, 1)}$	0.0231	0.0049	0.0088	0.0095	-	-	-
$L_{(13, 3 \rightarrow 9, * \rightarrow 5, * \rightarrow 1, 1)}$	0.0170	0.0048	0.0078	0.0044	-	-	-
$L_{(15, 3 \rightarrow 11, * \rightarrow 7, * \rightarrow 3, 1)}$	0.0288	0.0077	0.0116	0.0095	-	-	-

## 攻读硕士学位期间取得的研究成果

一、已发表（包括已接受待发表）的论文，以及已投稿、或已成文打算投稿、或拟成文投稿的论文情况。

序号	作者（全体作者，按顺序排列）	题目	发表或投稿刊物名称、级别	发表的卷期、年月、页码	相当于学位论文的哪一部分（章、节）	被索引收录情况
1	卢凯 吴蔚 邓兴栋 汪丽	控制子区内协调路径集的构成及优选方法	华南理工大学学报（自然科学报）	外审中	第二、三章	EI
2	卢凯 吴蔚 林观荣 田鑫 徐建闽	基于 k 近邻回归的区域聚集人数组合预测方法	吉林大学学报（工学版）	网络优先出版	-	EI
3	卢凯 汪丽 吴蔚 邓兴栋	信号控制下路段交通承载能力计算及交叉口配时优化模型	东南大学学报（自然科学报）	第 51 卷 第 2 期、 2021 年 3 月、333-341	-	EI
4	卢凯 吴蔚	基于协调路径集优选的区域交通协调控制方法		已完成， 拟投稿	第四章	

二、已发表（包括已接受待发表）的论文，以及已投稿、或已成文打算投稿、或拟成文投稿的论文情况。

序号	作者（全体作者，按顺序排列）	题目	类型	受理、授权或获奖情况	专利号
1	卢凯, 吴蔚, 田鑫, 汪丽, 林永杰	一种基于路段权重系数的路网交通运行状况评价方法	发明专利	已受理, 实审状态	201911338802.2
2	卢凯, 吴蔚, 林观荣, 夏小龙, 首艳芳	基于 kNN 算法的客运枢纽区域驻留人数变化趋势短时预测方法	发明专利	已授权	201811474704.7
3	卢凯, 林观荣, 吴蔚, 田鑫, 首艳芳	基于数值和趋势 k 近邻的客运枢纽区域驻留人数组合预测方法	发明专利	已受理, 实审状态	201811474742.2
4	黄玲, 游峰, 吴蔚, 林启恒, 庞崇浩, 罗积银	一种应用无人机监测的目标人员识别追踪方法	发明专利	已授权	201611010433.0

## 致 谢

时光匆匆如流水，转眼四年即将过去。当看到报刊亭卖着色彩斑斓的花束和气球，看到隔壁华农激动地拍着毕业照，听着周围同学商量着毕业旅行，这一刻，我清晰地意识到我的研究生生涯已经到了最后的篇章。

回首三年硕士时光，首先我要感谢我的指导老师卢凯老师。本论文是在卢凯老师的悉心指导和严格要求下完成的，从课题选取、建模到调试，无一不凝聚着卢老师的心血和汗水。老师渊博的专业知识，诲人不倦的高尚师德，平易近人的人格魅力对我影响深远。一次次的研究讨论，深感卢老师的治学严谨，精益求精，这种勤奋进取的精神潜移默化感染了我。在此论文完成之际，谨向老师表达崇高的敬意和由衷的感谢。

感谢我的父母，你们无微不至的包容、关爱和鼓励，是我全身心投入学习和研究的基础和动力。

感谢本科班主任黄玲副教授的精心栽培，感谢徐建闽教授、许伦辉教授、翁小雄教授、刘伟铭教授、林培群教授、游峰副教授、马莹莹副教授等老师毫无保留地传授丰富的知识，热情地帮助我解决学习上的困难，让我在研究生三年里收获颇丰。同时，感谢老师们对本次论文撰写工作过程中的给予的指导与支持。

感谢课题组的林观荣、徐广辉、田鑫、夏小龙师兄，同窗汪丽、张杰华，以及江书妍、周志洁、赵世杰、吴瑶婷、赵一鸣、尹帅帅、裴晟辉等师弟师妹的帮助。感谢三年室友陈晨同学、朱贵莹同学及好友夏雨、臧鹏给予我的和热心的照顾，让我在一个充满温馨的环境中完成了毕业论文。感谢硕士二班全体伙伴和419实验室的所有兄弟姐妹在研究生期间的关心和照顾，缘分让我们欢聚一堂，互相在彼此大学生涯里留下浓墨重彩的一笔。毕业后各奔东西，愿情常在意长存。

最后，感谢参与本次论文评审和出席本次论文答辩的各位专家评委们，你们的意见和建议会是我今后工作和学习中最为珍视的财富。

毕业在即，在今后的学习和生活中，我会铭记师长们的教诲，继续不懈努力和追求，来报答所有支持和帮忙过我的人！

吴 蔚

2021年4月于广州



### 3.答辩委员会对论文的评语

(主要内容包括: 1.对论文的综合评价; 2.对论文主要工作和创造性成果的简要介绍; 3.对作者掌握基础理论、专业知识程度、独立从事科研工作能力以及在答辩中表现的评价; 4.存在的不足之处和建议; 5.答辩委员会结论意见等)

根据控制子区内的方向性协调控制需求, 论文对区域协调路径集的优选方法与信号控制模型进行研究, 选题合理, 研究工作具有重要的理论意义与实用价值。

首先, 该论文建立了协调路径、路径链、路径集的概念体系, 解析了协调路径链的形成原理, 制定了协调路径集的优选法则与流程; 然后, 建立一套面向协调路径集的交通信号协调控制模型算法, 以满足协调路径集的协调控制需求; 最后, 通过定义路段权重系数, 对路网及协调路径集交通运行状态进行分析评价, 为信号协调控制方案优化提供了决策依据。论文研究成果对于实现区域信号控制整体最优和提高协调路径集通行效率具有重要意义。

论文研究立意新颖、思路清晰、方法合理、逻辑严密, 论文结构完整、表述准确、撰写规范, 研究成果对于区域交通信号协调控制研究重要支撑作用。论文表明作者掌握了本学科坚实的基础理论和系统的专业知识, 具备了较强的从事科学研究工作的能力。答辩过程中, 表述清楚, 回答问题准确。答辩委员会经无记名投票表决, 一致同意吴蔚通过论文答辩, 并建议授予其工学硕士学位。

论文答辩日期: 2021 年 6 月 6 日

答辩委员会委员 5 人

表决票数: 同意毕业及授予学位 ( 35 票



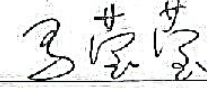
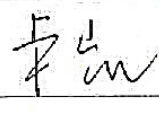

同意毕业, 但不同意授予学位 ( ) 票

不同意毕业 ( ) 票

表决结果 (打“√”): 同意毕业及授予学位 ( √

同意毕业, 但不同意授予学位 ( )

不同意毕业 ( )

答辩成员 签名	 (主席) 张晓明	 刘伟铭  马蒙蒙	 Fan
答辩秘书 签名	 Fan		