

文章编号:1001-7372(2013)06-0157-12

城市路网交通控制子区动态划分策略

别一鸣¹, 王琳虹², 王殿海², 宋现敏²

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;

2. 吉林大学 交通学院, 吉林 长春 130022)

摘要:为提高交通控制系统自适应水平,阐述了交通控制子区划分的研究现状,从系统性、科学性、快速性3个方面对现有成果进行了剖析;从交通控制系统整体角度出发,研究了子区划分与信号配时方案优化的内在联系,明确了二者所面向的道路环境、交通流环境、信息检测环境;以饱和度为指标将交叉口状态划分为低饱和、中饱和、准饱和、过饱和4个等级,并确定了每个状态等级交叉口的控制目标;根据子区划分与信号配时优化目标一致性的原则,建立了子区划分目标集,确定了各个目标的优先级别;建立了交通控制子区划分原则,提出了关联度模型与划分算法的建立思路;最后从策略层、理论层、算法层3个层面形成了交通控制子区动态划分框架体系。研究成果可以为关联度模型以及子区划分算法的建立提供指导。

关键词:交通工程;动态子区划分;综述;交通控制;划分目标;划分原则;关联度模型;划分算法

中图分类号:U491.54

文献标志码:A

Strategy of Dynamic Traffic Control Subarea Partition in Urban Road Network

BIE Yi-ming¹, WANG Lin-hong², WANG Dian-hai², SONG Xian-min²

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China; 2. School of Traffic, Jilin University, Changchun 130022, Jilin, China)

Abstract: To improve the adaptive level of traffic control system, current research status on subarea partition was firstly introduced. Then it was analyzed from the aspects of systematicness, scientificity and rapidity. Based on the entire traffic signal control system, the internal relation between subarea partition and signal timing algorithm was studied and then the environment of road network, traffic flow and information detection, which they both faced, were determined. The intersection state was divided into four levels according to the saturation degree index: low saturation, middle saturation, quasi-saturation and supersaturation. The optimization objective of each level was determined. According to the consistency of the optimization objective of subarea partition and signal timing, the objective set of subarea partition was brought forward and the priority sequence of the objectives was determined. Moreover, the partition principles and the development ways of correlation degree model and partition algorithm were presented. At last, the framework of dynamic subarea partition was established from three levels, which were strategy, methodology and algorithm. The study in this paper can provide guidance for further development of correlation degree model and subarea partition algorithm.

收稿日期:2013-03-09

基金项目:国家自然科学基金项目(61304198);中国博士后科学基金项目(2013M530159)

作者简介:别一鸣(1986-),男,河南遂平人,讲师,工学博士,博士后, E-mail: yimingbie@126.com。

Key words: traffic engineering; dynamic subarea partition; review; traffic control; partition objective; partition principle; correlation degree model; partition algorithm

0 引言

在对一个包含数百甚至上千个交叉口的路网进行信号控制时,经常将路网划分成若干个相互独立的区域,每个区域包含 1 个或者相邻的多个信号交叉口,这样的区域叫做“交通控制子区”。根据形态的不同,可以将交通控制子区分为 3 类:①只包含 1 个信号交叉口的孤立子区;②包含若干个位于同一道路连线上的相邻信号交叉口的一维线控子区;③包含若干个位于同一道路平面上的相邻信号交叉口的二维面控子区。显然,孤立子区、线控子区、面控子区将分别运行单点控制、干线协调控制和区域协调控制方案。

交通控制子区划分具有 2 个方面的意义:①提高交通控制系统的稳定性;②确定每个交叉口的最佳控制方式,提高交通控制效益。控制系统以子区形态为依据确定交叉口最佳控制方式,对孤立子区、线控子区、面控子区分别执行单点控制、干线协调控制和区域协调控制。尤其在线控及面控子区内,通过运行公共周期、合理设置相位差的方式把内部交叉口有机协调起来,可以有效降低车流延误。

以路网内交通控制子区划分方案是否随交通状态变化为判断依据,可以将交通控制子区划分技术分为 2 类:①静态子区划分技术。根据历史交通流数据划分子区,子区方案形成后即固定下来,不再随交通状态的变化而变化。②动态子区划分技术。以路网内实时检测到的交通流数据为基础,根据交通状态的动态变化对子区规模进行调整,以维持最佳的子区划分方案,使联系紧密的交叉口始终划入同一子区,保证交叉口执行最佳控制方式。

在城市交通出行日益活跃的现代社会,路网交通流随机动态变化特性更加显著。即使同一交叉口,其前、后 2 个相邻时段或者每天相同时段到达的流量、车流形式也均不相同,所以静态子区划分技术已经难以适应这种交通形势。只有采用动态子区划分技术,才能在交通状态变化的情况下划出最佳子区方案,这对于提高路网整体效益和交通控制系统的自适应水平具有重要意义。

因此,本文中以交通控制子区动态划分策略为研究对象,详细分析了现有研究存在的不足,对动态子区划分的适用环境、划分目标、划分原则、与信号

配时的内在联系等多个方面进行研究,剖析子区划分的内涵,形成动态子区划分的框架体系,为动态子区划分理论与算法的后续研究提供指导。

1 交通控制子区划分研究现状

下文分别从静态子区划分、动态子区划分 2 个方面对交通控制子区划分的研究现状进行简要介绍,并对当前研究存在的问题进行系统分析。

1.1 静态交通控制子区划分

子区划分随着计算机化交通控制系统的出现而出现^[1-5]。在英国 1969 年开发成功的 TRANSYT 系统中就采用了静态子区划分技术^[6],该系统首先考虑城市中自然及行政区划等因素将路网划分成不同区域,然后在每个区域内考虑交叉口连线长度、交通流量大小、交通拥堵状态、交通流产生源及终止点等因素将每个区域划分成不同的控制子区。在 1979 年开发成功的 SCOOT 系统中仍采用了类似的静态子区划分技术^[7]。

Walinchus^[1]明确提出了子区划分的概念,他以交通流特性是否显著变化作为子区划分的标准,交通子区划分需要考虑相位差误差、交叉口饱和度、道路物理特性显著变化等因素的影响。在美国联邦公路局出版的《统一交通控制设施手册》(MUTCD)中建议不要将间距超过 0.5 英里(约 800 m)的 2 个交叉口划入同一子区执行协调控制^[4]。Pline^[5]建议在子区划分时应该考虑交叉口间距、车流速度、信号配时、流量、车队离散以及路中干扰等因素。

上述研究大多依靠交通工程师的经验分析各种因素对子区划分的影响。经过长期的经验积累,基本确定了交通控制子区划分的 3 个原则:①周期原则,即同一子区内的交叉口周期时长相差不能过大,周期相近代表交通状态相似;②距离原则,相邻的 2 个交叉口间距不能过大,否则车队离散程度较大,难以协调;③流量原则,协调相位之间的流量相近代表 2 个协调相位状态相似、联系紧密。

静态子区划分技术缺乏对影响因素的量化分析,而实际路网交通状态千变万化,交通工程师很难精确分析各因素对子区划分的影响程度,自然也就无法保证划分出最佳的子区方案。

1.2 动态交通控制子区划分

在 20 世纪 70 年代,国外学者就已经开始对动

态子区划分技术进行研究,并取得了丰富的成果。从已有的研究来看,动态子区划分技术包括相邻交叉口合并/关联度指标的计算以及子区划分算法2个关键环节。

1.2.1 相邻交叉口合并/关联度指标计算

合并指标或者关联度指标计算是动态子区划分的理论核心,用来量化表达相邻交叉口划入同一子区的适宜程度。国外在这方面的研究起步较早^[8-12]。Yagoda等^[8]提出了相邻2个信号交叉口的合并指标 I ,该指标与2个交叉口之间的交通流量 V 成正比,与交叉口间距 L 成反比,即 $I=V/L$, I 越大,代表2个交叉口越适合划入同一子区。Chang^[9]考虑上游协调相位流量、交叉口间距、路段车道数、下游交叉口进口道数以及流量等因素,建立了交叉口合并期望指标的计算模型,当该指标大于0.35时,可以将2个相邻交叉口划入同一子区。Lin等^[10-11]分别建立了交叉口拥挤度、交叉口间距、交通运行连续性3个指标对协调效益影响的量化模型以及划分阈值。Park^[12]建立了以分布式车-路协同信息为基础的自适应交通控制系统理论,选择服务水平最差的交叉口作为中心交叉口,之后计算一定时间间隔内其他交叉口与中心交叉口之间的路径流量,当路径流量大于给定阈值时,将2个交叉口之间的关联度设为1,否则设为0,该阈值根据专家经验设定。

中国在2000年之后才逐渐开始交通控制子区划分方面的研究,并且在2007年之后达到高潮,涌现出了大量成果^[13-23]。例如陈晓明^[14]以相位通行能力变化率与延误时间变化率相等为临界条件,确定了划入同一子区交叉口的周期时长最大增加范围,之后考虑流量、距离因素,基于交通波理论建立了排队最远点模型,以排队上溯至上游交叉口作为将2个交叉口划入同一子区的临界条件。高云峰^[15]考虑下游交叉口车辆排队长度因素,对美国《交通控制系统手册》中推荐的关联度模型进行改进,以流经2个相邻交叉口的最大路径流量与各条路径总流量的比值建立了路径关联度指标。马万经等^[16]在高云峰的研究基础上,建立了考虑交叉口信号相位、路径流量不均匀性、交叉口间距和交叉口排队的路径关联度模型指标。段后利等^[17]计算了下游交叉口协调相位绿灯期间到达车辆数与上游交叉口协调相位绿灯期间释放车辆数的比值,以该值与下游协调相位绿信比的比值作为可协调度。卢凯等^[18-19]考虑路段排队车辆数、运行车辆数以及周期

时长等因素,建立了相邻两交叉口关联度与多交叉口组合关联度的计算模型。杨晓光等^[21]研究了过饱和情况下的交叉口关联度确定方法,根据路段排队比确定过饱和交叉口,采用路径流量判别造成该交叉口的流量源头以及下游关联交叉口,将上述交叉口划入同一子区中。笔者^[23]分别研究了相邻交叉口周期时长差异以及车队长度对协调控制效益的影响,在周期时长关联度和车队长度关联度基础上建立了相邻两交叉口综合关联度模型。

1.2.2 交通控制子区划分算法

合并/关联度指标能够量化表达相邻交叉口之间的联系紧密程度,然而子区划分面向的是路网成百上千个状态各异的交叉口,仅用关联度模型并无法将这些交叉口划入不同的子区中,还需要子区划分算法,明确划分顺序以及划分流程^[24-37]。例如Moore等^[24]以流量比作为状态表达指标,采用马氏距离表达交叉口之间的联系紧密程度,基于层次聚类方法建立了子区划分流程。Lin等^[10]将拥挤度最大的交叉口设为初始交叉口,以路径流量最大为原则确定搜索方向,逐步将初始交叉口与其满足关联度阈值的相邻交叉口划入同一子区。莫汉康等^[25-26]分别建立了交通诱导影响下的周期子区、流量子区、距离子区的自动划分及合并算法流程。段后利等^[17]采用Apriori算法搜索路网中的相关交叉口,基于超图知识建立了子区划分算法。卢凯等^[18]通过定义控制子区划分方案的解集空间、约束条件与评价准则,建立了协调控制子区划分模型,并采用子区划分分层扩散算法实现对控制子区划分方案的分析评价,给出了一套完备的控制子区划分流程。陈宁宁^[20]以流量原则、距离原则、信号周期原则和协调控制目标原则为基础,提出了根据路段关联度指标从大到小遍历考察所有路段的路网搜索算法,用于子区初始划分,之后考虑交通流的状态变化和信号控制效果,建立了子区动态调整流程。马莹莹等^[36]将子区划分转化为一个多目标、多约束的NP问题,以相邻交叉口之间的关联度作为划分依据,分别提出了平均法、按均值划分及按距离划分3种自动划分方法。卢凯等^[37]针对最佳控制子区划分方案求解过程中可能面临的维数灾难问题,提出利用降维处理与遗传算法2种方法进行子区划分方案的快速寻优,并给出了一套协调控制子区快速动态划分流程。

1.3 研究现状评述

在过去的几十年里,各国学者对交通控制子区

划分技术的研究从早期的静态划分发展到动态划分,在影响因素分析、交叉口关联度模型、子区划分算法方面取得了丰硕的成果,逐渐形成了较为完整的算法体系,更加适应交通控制系统的实时性需要。然而现有研究还存在几点不足:

(1)交通控制子区划分与交通控制系统算法体系相脱离。一般来讲,城市交通控制系统的核心理论算法体系包括交通流数据处理、交通控制子区划分、信号配时方案优化,三者密切相关。动态子区划分技术需要实时交通流数据以及信号配时方案为依托,只有明确了交通控制系统的数据获取方法和数据形式、不同控制目标对应的信号配时算法,才能进行子区划分中的关联度计算,评价关联度模型的有效性。

一种子区划分算法只有在特定的交通控制环境中才能生效,显然 SCATS 系统的子区划分算法并不能应用至 OPAC 系统。然而现有的研究大多忽略了这一点,子区划分与交通数据处理、交通配时方案优化相脱离,无法确定所提出的子区划分技术的适用环境。

此外,交叉口执行的控制算法随着交通状态变化而变化。根据交通状态的不同,一般可将交通信号配时算法分为以下 4 类:①低饱和状态以提高绿灯利用效率、避免绿灯空放为目标的控制算法;②中饱和状态以减少车流延误为目标的控制算法;③准饱和状态以增大通行能力为目标的控制算法;④过饱和状态以缩短排队长度为目标的控制算法。

路网中各个交叉口状态千变万化,针对不同状态交叉口,子区划分技术需要根据相应优化目标进行子区划分。比如当 2 个相邻交叉口执行协调控制能避免排队上溯时,那么可以将这 2 个交叉口划入同一子区,否则划入不同子区。常见的绿波协调控制、基于车均延误的协调控制只是针对若干个中饱和状态相邻交叉口所执行的一种控制方式。然而除文献[21]外,目前的研究全部集中在中饱和状态交叉口,以减少车流延误为目标进行子区划分,忽视了其他 3 种状态,研究成果只能应用于中饱和状态交叉口,无法应用于整个路网。

(2)交叉口关联度模型缺乏理论依据。这主要体现在以下 3 点:

第一,关联度模型机理有待明确。现有的研究大多依据工程经验选取影响子区划分的各种因素,在此基础上建立影响因素与交叉口关联度之间的关系模型。首先,各个因素之间是否相互独立,是否能

够全面表达子区划分影响因素并未被有效阐述。其次,现有研究并未量化分析或推导关联度指标与各影响因素之间的变化关系,而是直接根据经验给出二者之间的线性或者非线性模型,无法有效解释模型结构、模型参数的建立过程。

第二,关联度阈值的确定没有理论支持。关联度模型只是表达 2 个交叉口之间的相关程度,而关联度阈值则直接决定 2 个交叉口是否可以划入同一子区。然而现有研究均是根据工程经验确定关联度阈值,确定方法缺乏理论依据,无法保证划分出最佳子区方案。

第三,大多研究忽视了对多交叉口关联度模型。两交叉口关联度模型只是多交叉口关联度模型的一种特殊形式,许多情况下控制子区包括多个相邻交叉口。以图 1 为例,从左至右 6 个交叉口的周期时长分别为 120,110,100,90,80,70 s。假设只考虑周期时长因素,2 个相邻交叉口周期时长相差不大于 10 s 时可以划入同一子区,那么图 1 中的相邻交叉口均可以划入同一子区,然而实际上这 6 个交叉口并不适合划入同一子区;而且现有的研究并未分析交叉口数量增加对交叉口关联度的影响,只有文献[18]中根据经验建立了多交叉口组合关联度模型。

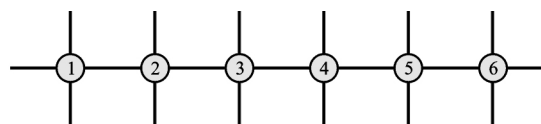


图 1 多交叉口连线路网

Fig. 1 Network with Multiple Nodes

(3)交通控制子区划分算法缺乏系统性。这也体现为 3 点:

第一,现有子区划分算法只考虑信号交叉口。子区划分算法应该综合考虑路网内的所有不同类型的交叉口,然而在现有的子区划分算法中,并未涉及环岛、无信号交叉口。虽然这些交叉口无需计算关联度,但是会对算法流程产生重要影响。

第二,现有子区划分算法只考虑基于车流延误的信号协调。减少车流延误不是子区划分的唯一目标,针对不同状态的交叉口,子区划分还应考虑如何优化通行能力、排队长度,建立一套科学的子区划分算法体系。

第三,现有子区划分算法只考虑初始划分,未考虑动态调整。现有的研究多基于动态聚类、神经网络等建立交通控制子区划分算法,将路网划分成不同类型的子区。然而路网交通状态具有实时变化

性,经过一段时间后需要重新对子区规模进行调整,保证将相关性较强的交叉口始终划入同一子区。路网一般包括成百上千个交叉口,如果重新划分子区,必将产生极大的工作量,而交通状态前后时段具有相关性,且短时间内一般不会大范围剧烈变化,此时可以建立相应的动态调整算法,对子区规模进行快速优化,保证子区划分的实时性。

由以上分析可知,目前交通控制子区划分方法在系统性、科学性、快速性等方面还存在一些问题,缺乏系统的理论框架以及科学的建模方法,过多地依靠工程经验,难以推广应用。因此,急需建立一种系统、科学的交通控制子区动态划分方法,为提高自适应交通控制系统的实时性以及路网整体控制效益服务。

2 控制子区动态划分策略

子区动态划分策略能明确子区划分所依托的路网环境、信息环境、信号配时算法以及子区划分的目标与原则,对划分模型与算法的建立提供指导,对于形成系统、科学的子区划分体系具有重要意义。

2.1 适用环境

(1) 交通控制系统类型

根据交通控制方案优化的实时性,可以将现有的交通控制系统划分为3代^[38]。第1代:定时式交通控制系统。这类系统通过分析历史交通流数据的波动特性,将一天划分为多个时段,如早高峰、上午平峰、下午高峰等。之后采用离线优化方法生成每个时段的交通信号控制方案,并存储在控制系统中。方案优化的参数包括周期时长、绿灯时间、相位差以及相位相序等。在实际运行时,控制系统随时间变化执行相应时段的配时方案。由于在每个时段内的配时方案固定不变,所以称为“定时式交通控制”。第2代:实时交通控制系统。这类控制系统大多依靠布设在路网中的线圈检测器实时检测交通需求,基于交通数据预测在线优化信号配时方案,控制方案一般每隔若干分钟优化一次,控制方案参数仍包括周期时长、绿灯时间、相位差以及相位相序。与第1代系统不同,这类系统不必事先存储控制方案,而是实时生成。目前世界上广泛应用的SCOOT^[39-40]、SCATS^[41]以及中国自主开发的Hi-Con系统^[42-43]等均属于此类。第3代:全需求响应式实时信号控制系统。这类控制系统的特点是每隔一定较短间隔(如5s)即根据实时交通流信息更新一次配时方案。配时方案优化不再是调整传统的周

期时长、相位差、绿信比等参数,而是决策在本间隔末尾是否结束当前绿灯相位,并选择下个应该显示绿灯的相位。由于本类系统对交通需求的反应更加迅速,所以叫做全需求响应式实时信号控制系统。美国的OPAC^[38]属于此类系统。

由于第3代控制系统已经没有周期时长、相位差的概念,交叉口的控制方式不会因交通状态的改变而发生变化,所以不再需要子区划分技术。然而在第1和第2代控制系统中,交叉口的控制方式包括单点控制、干线协调控制、区域协调控制3种,与孤立子区、线控子区、面控子区3类子区形态对应;尤其在执行协调控制时为了取得更好的控制效果,需要将相邻交叉口统筹运行公共周期、相位差,此时这些相邻交叉口便组成了一个子区。子区划分技术适用于第1代和第2代交通控制系统。

(2) 交通信息检测类型

交通控制系统检测的交通流信息是子区划分和信号配时方案优化的基础。在统一的交通控制系统框架内,子区划分与信号配时方案优化具有相同的数据来源,共享路网交通流信息。

交通流信息检测方式有多种,如感应线圈检测器、视频检测器、GPS移动检测器等,但是受检测精度、应用环境以及经济成本等多种因素的影响,目前的交通控制系统仍主要依赖感应线圈检测器。然而各个控制系统在信息检测类型、信息采集间隔等方面存在差异,如SCOOT系统以分钟为间隔统计道路断面流量,而SCATS系统以秒为间隔统计线圈被占据的时间,从而来计算“综合饱和度”。因此在子区划分之前,需要明确交通控制系统的信息检测方式、信息采集间隔、获取的信息类型,因为这直接决定着能够建立什么样的子区划分模型与算法。

(3) 道路交通流环境

虽然控制对象多样,但是当前城市交通系统仍以机动车流为主体。机动车流占据较多的道路空间以及时间资源,是引发城市交通拥堵、安全问题的主要因素。因此目前的交通控制系统也以机动车流为主要控制对象,以路网中的机动车流量、速度、占有率信息为基础优化交叉口配时方案。虽然近年一些学者提出了专门针对公交车、非机动车的信号优先算法,但这些算法只是对以机动车流为主体的信号控制体系的完善和补充,机动车流运行状态仍然对信号配时方案优化具有决定性的影响。

此外,子区划分的实质是判断相邻交叉口是否适合划入同一子区执行协调控制。如在以减少延误

为目标的信号协调控制算法中,只有交通流在连接 2 个相邻交叉口的路段上具有车队聚集特性时才能取得较好的协调效果。而一些特殊机动车流(如公交车)在路段上流量非常少,难以组成车队,非机动车、行人虽然具有集群特性,但是目前的交通控制系统并无有效检测非机动车、行人速度、流量数据的检测器,所以无法针对这些交通流实现自适应协调控制,只能以机动车流为主体进行控制。这也是本文中子区划分技术只选择以机动车流为研究对象的另一个原因。

在道路环境方面,虽然无需建立理论模型计算无信号交叉口、环岛与信号交叉口之间的联系紧密程度,但是在以整个路网为对象进行子区划分时,无信号交叉口、环岛必然会对子区的划分过程造成影响,所以子区划分需要考虑不同类型的交叉口。

2.2 子区划分目标集

交通信号控制的主要目的是提高车流运行效益。然而路网交通状态具有时空二维波动性,不同地点、不同时刻的交通状态表现出较大的差异,且在不同的交通状态下,交通流运行也呈现出不同的特征。由此可见,在不同交通状态下控制系统需要实现不同的控制目标,并建立不同的信号配时算法。子区划分与信号配时算法均为路网配时方案优化服务,所以二者应具有目标的统一性,即子区划分目标与信号配时算法目标相同。

一般来讲,以饱和度作为划分指标可将交叉口状态划分为低饱和、中饱和、准饱和、过饱和 4 个等级。在低饱和状态下,到达流量较少,控制系统应以提高绿灯利用效率、避免绿灯空放为控制目标;在中饱和状态下,到达车流增加,控制系统可以利用车流在时间、空间上的关联性执行优化控制,以减少车流延误为控制目标;在准饱和状态下,交叉口即将过饱和,控制系统此时应以增大通行能力为目标,避免出现过饱和现象;而在过饱和状态下,交叉口到达车流无法完全释放,出现排队累积,该交叉口成为整个区域的瓶颈,控制系统以缩短排队长度为目标,以避免排队上溯引发多米诺效应。

交通控制系统为了适应复杂多变的交通状态,一般建立了多种信号控制算法。每种控制算法具有一个控制目标,并对应于一种特定的交通状态。因此,可以分析每种控制算法的适应环境,进而以控制目标为桥梁,确定 4 个状态等级的划分指标阈值。

因此,信号配时与子区划分的目标集包括绿灯利用效率最大、延误时间最小、通行能力最大、排队

长度最短 4 个目标,分别与交叉口 4 种状态对应。

然而,路网中各个相邻交叉口之间的状态差异会对子区划分产生重要影响。以图 2 为例,交叉口 1 为过饱和交叉口,交叉口 2 和交叉口 3 均为中饱和交叉口。如果将交叉口 2 与 3 划入同一子区执行基于延误的协调控制,能够减少车流延误;如果把交叉口 2 与 1 划入同一子区,能够避免排队上溯。此时由于优化目标的不同,使得子区划分产生冲突。

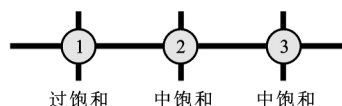


图 2 不同状态相邻交叉口

Fig. 2 Adjacent Nodes with Different States

为了避免上述冲突现象的发生,从路网整体角度出发,对子区划分的多个目标进行排列,赋予不同的优先级,从高至低分别为:排队长度最小、通行能力最大、延误时间最小、绿灯效率最大。其中过饱和状态下执行以排队长度最小为目标的控制方式级别最高,这是因为如果排队过长,极有可能造成排队上溯,引发路网多米诺效应,致使局部路网交通功能丧失,所以应该优先考虑过饱和控制。以提高绿灯效率为目标的低饱和控制优先级最低,因为低饱和状态下交叉口通行能力存在富余,交通运行状态最好。

有了上述控制目标优先级排序后,就可以解决图 2 所示的冲突现象,即将交叉口 2 与交叉口 1 划入同一个子区。

2.3 子区划分与信号配时的内在联系

2.3.1 子区划分指标内涵

在分析各国研究现状时可知,多数学者在进行子区划分时均建立了一个表征 2 个交叉口之间合并程度的关联度指标 C_1 。该指标值越大,代表 2 个交叉口越适合划入到同一子区中。

实质上,确定 2 个交叉口是否适合划入同一子区的最直观方式是对比控制效益,即

$$P_1 = \hat{D} - D \quad (1)$$

式中: \hat{D} 为相邻交叉口执行协调控制时的控制效益; D 为相邻交叉口分别执行单点控制时的控制效益; P_1 为相邻交叉口执行协调控制相对于执行单点控制取得的控制效益。

这里的控制效益根据交叉口状态确定。当交叉口处于过饱和状态时,控制效益指排队长度;当交叉口处于中饱和状态时,控制效益指延误时间。

当 $P_1 > 0$ 时这些交叉口适合划入同一子区,否

则需要分别执行单点控制。然而城市路网包括成百上千个信号交叉口,采用这种直观方法需要不断计算相邻两交叉口、多交叉口划入同一子区前后的最佳协调配时方案、单点配时方案,然后对比2种控制方式的控制效益。计算过程将产生巨大计算量,直接影响子区划分的实时性、快速性。

单点配时方案及其对应的控制效益比较容易计算得到(如采用韦伯斯特信号配时模型、HCM车流延误公式),而协调控制由于涉及到多个交叉口之间车流运动状态的建模和相位差优化,所以计算量比较大,但是经验分析发现,协调控制效益与交叉口周期时长、交叉口间距、流量等存在密切关系,如果能在考虑这些影响因素的情况下建立一个反映协调控制效益变化的指标,那么就可以避开协调配时方案的反复优化过程而直接得到协调控制效益。这个指标即是本文中提到的“关联度”,用来计算关联度的数学模型叫做“关联度模型”。

由此可见, C_1 是一个间接反映协调控制相对于单点控制效益优劣的指标。建立该指标是为了在子区划分时避免大规模的数学运算,达到快速、实时的目的。 C_1 需要满足以下2个特点:①能够较好地类比 P_1 ,即交通参数变化对 P_1 与对 C_1 的影响趋势基本相同甚至完全相同,只有这种情况下 C_1 才能代表 P_1 ;②计算形式简洁,能够根据交通参数方便计算得到,便于提高子区划分的实时性、快速性。

2.3.2 先后顺序的确定

子区划分算法与信号配时算法均为控制方案优化服务,而二者在方案优化过程中又相互作用:子区划分算法可以明确每个交叉口应该采用的信号配时算法,为信号配时算法提供具体实施环境;而信号配时算法可以量化交叉口之间的关联度,促进子区划分算法体系的形成。那么到底先有子区划分还是先有信号配时算法?下文针对这个问题进行研究。

图3为交通信号控制系统中信号控制算法与信号控制方案生成之间的关系。图3中两口子区代表

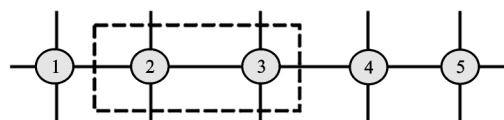


图3 信号控制算法与信号控制方案生成之间的关系

Fig. 3 Relation Between Signal Control Algorithm and Signal Timing Plan Optimization

包含2个信号交叉口的控制子区,多口子区代表信号交叉口数量大于2个的控制子区。在交通控制系统运行之前,需要建立交通流数据处理算法、信号控

制算法、控制子区划分算法,作为必需技术在控制系统中存储;这些算法将道路因素如交通流量、交叉口间距、饱和流量等全部变量表达。信号配时算法直接决定了子区划分算法,因为只有建立了单点控制、协调控制算法之后才能够准确地分析子区划分的影响因素,建立量化路网控制效益的关联度指标。因此从交通信号控制算法角度来讲,先有信号配时算法,后有子区划分算法。

在交通控制方案优化方面,城市交通需求在信号控制、管理、组织等方案的影响下演化成不同状态的交通流,交通流演化的每种状态都可由交通流量、速度、时间占有率等参数表现出来,交通信息处理算法通过对检测参数的统计、数据融合为子区划分、信号配时方案优化提供数据支持。控制系统根据子区划分算法将路网划分成多个不同形态的控制子区;对于包含多个交叉口的子区,子区划分还输出该子区在执行协调控制时的协调相位、协调方式。根据子区形态,控制系统决定每个子区应该执行的最佳信号配时算法,并优化生成信号配时方案,包括将要下发参数(运行的周期时长、绿信比、相位差等)。因此从交通控制方案优化的角度,先应用子区划分算法进行子区划分,后应用信号配时算法进行配时方案优化。

综上所述,在交通信号控制算法体系中,先建立信号配时算法,之后才能建立子区划分算法。当应用信号控制算法生成控制方案优化的过程中,先应用子区划分算法进行子区划分,输出子区形态;之后在子区形态基础上应用信号配时算法进行配时方案优化,形成单点控制方案、协调控制方案。

2.4 子区划分要求

子区划分作为自适应交通信号控制系统的一项重要技术,需要满足以下要求:

(1)准确。准确是指子区划分算法能准确地将关联度最大的相邻交叉口划入同一子区,对最终形成的各子区进行信号控制能得到最佳控制效果。面对具有成百上千个交叉口的城市路网,子区划分不仅需要计算相邻两交叉口的关联度,还需要计算多个交叉口关联度、不同组合交叉口之间的关联度。因此,子区划分算法需要具有高度准确性,保证路网交通信号控制效果。

(2)快速。快速是指子区划分算法能在最短时间内根据路网交通参数划分出最佳子区,以保证路网配时方案的及时下发、执行。如果子区划分算法消耗较长的时间,那么将严重影响配时方案的及时

更新。

(3)动态。动态是指子区方案能随着路网交通流参数的变化而动态调整,以维持最优子区划分方案。城市交通流状态实时动态变化,前一个时间间隔划分出的子区方案不一定适用于下一个时间间隔,因此需要对划分方案进行动态调整。子区划分算法的动态性是体现信号控制系统实时性的重要指标之一。

2.5 关联度模型

交叉口关联度是表征相邻信号交叉口之间联系紧密程度的重要指标,是子区划分技术的关键。

2.5.1 不同控制目标下的关联度模型

在前文已经分析过,路网内各个信号交叉口之间的状态存在差异。采用饱和度作为判别指标,可以将交叉口状态分为过饱和、准饱和、中饱和、低饱和 4 种类型。每种类型交叉口均对应一个控制目标。由于关联度指标 C_1 间接反映每种控制目标指导下协调控制效益相对于单点控制效益的优劣程度,因此本文中根据控制目标对关联度进行命名。如反映相邻交叉口排队长度变化的关联度称作“排队长度关联度”,反映延误时间变化的关联度称作“延误时间关联度”。交叉口状态、控制目标与关联度指标之间的联系如图 4 所示。

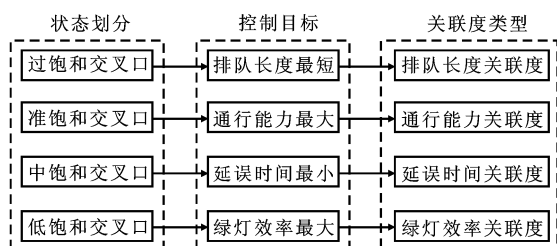


图 4 交叉口状态、控制目标与关联度指标之间的对应关系

Fig. 4 Relation Among Intersection States, Control Objectives and Correlation Degree Indexes

由图 4 可见:与交叉口状态的划分一致,本文中的关联度指标也被分为 4 种类型。在进行子区划分时,需要首先建立上述 4 种类型关联度计算模型。

2.5.2 关联度模型分类

现有的关联度模型大多只涉及相邻 2 个交叉口,两交叉口关联度模型是最简单、最基础的关联度计算形式。然而在实际子区划分中,控制系统需要将子区形态由 2 个交叉口扩展至更多交叉口,并判断多个交叉口之间的关联度,以确定是否适合执行协调控制。图 5 所示路网包括 5 个交叉口,设交叉口 3 为关键交叉口,控制系统首先需要判断交叉口 3 分别与交叉口 2、4 之间的关联度。若交叉口 2、3

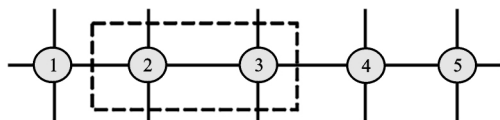


图 5 多个相邻交叉口路网

Fig. 5 Network with Multiple Adjacent Nodes

之间的关联度较大,则将交叉口 2 与 3 划入同一子区,然后分别判断该子区与交叉口 1、4 的关联度,此时即涉及到多个交叉口之间的关联度计算。已有的两交叉口双向关联度模型无法满足这种计算需求,还需要建立多个交叉口之间的双向关联度模型。因此从影响范围来讲,关联度模型可以分为两交叉口、多交叉口关联度模型 2 类。

此外,关联度指标 C_1 表征相邻交叉口执行协调控制相对于单点控制取得的效益。然而协调控制也可以分为单向协调控制、双向协调控制 2 类,当相邻交叉口执行不同的协调控制算法时取得的控制效益肯定不同。因此,从协调控制方式来讲,关联度模型可以分为单向、双向关联度模型 2 类。

2.5.3 关联度模型建立方法

为了建立 C_1 的计算模型,必须首先分析影响 C_1 的关键因素。影响因素的分析可以借助式(1)。在式(1)中 D 代表相邻交叉口分别执行单点控制时的效益,具体效益只与交叉口自身有关,不受各交叉口之间联系紧密程度的影响,因此 C_1 或者 P_1 指标只与协调控制效益 \hat{D} 相关。影响相邻交叉口协调控制效益的因素也同样影响关联度指标。

在获取各影响因素之后,下一步需要建立各个影响因素与 C_1 的关系模型,同时分析各因素之间是否相互独立,以确定关联度模型结构。关系模型的建立一般有 2 种方法:①理论推导方法,即将影响因素用变量表达,然后根据交通流理论、交通信号控制模型等推导影响因素与 C_1 的普遍关系式;②数学回归方法,即通过大量的模拟试验获取各因素与 C_1 之间的关系数据,然后采用线性或者非线性回归方法确定二者之间的关系式。

在建立 C_1 计算模型之后,需要确定相邻两交叉口、多交叉口可以划入同一子区的 C_1 阈值。由于 C_1 、 P_1 具有相同的数学性质(同为正数或者负数),所以采用 0 作为阈值。当 $C_1 > 0$ 时相邻交叉口可以划入同一子区,否则需要划至不同子区。

2.6 子区划分算法

2.6.1 划分算法的必要性

子区划分算法的目的是在关联度模型基础之

上,通过制定科学、完整的划分流程,将城市路网划分成若干个紧密联系的控制子区。子区划分算法是实现子区划分的最后一个环节。

关联度模型虽然能计算相邻交叉口的关联度,但是并无法保证划分结果的准确性。如图6所示,交叉口2周期时长最大,被定为关键交叉口,交叉口2与1,3的关联度均大于0,与4的关联度小于0,因此将交叉口1,2,3划入同一子区。剩余的2个交叉口中交叉口5为关键交叉口,且交叉口5,4关联度大于0,二者组成一个子区。然而交叉口3与5的关联度也大于0,且大于与交叉口2的关联度,此时如果将交叉口3划入以交叉口5为核心的子区更有利于提高路网控制效益。为了避免出现上述不合理现象,需要建立科学的子区划分算法,制定合理的划分顺序。

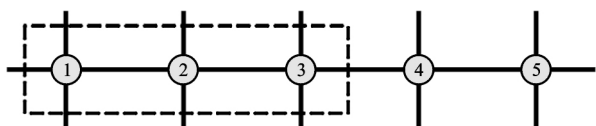


图6 相邻多信号交叉口示意

Fig. 6 Illustration of Multiple Adjacent Nodes

此外,子区划分过程需要不断地计算、对比以确定最优子区方案,而城市路网一般包括成百上千个交叉口,必将产生较大的计算量以及较长的计算时间。科学的子区划分算法能快速地计算交叉口之间的关联度,确定子区划分顺序,减少计算量,从而提高子区划分的实时性。

2.6.2 关联度计算对划分算法的影响

关联度模型与划分算法虽然是子区划分理论的2个不同部分,但是二者前后联系,关联度模型的计算对子区划分算法具有重要影响,甚至直接决定了子区划分流程。如 Moore 等^[24]以流量比作为状态表达指标,采用动态聚类算法进行子区划分,只要相邻交叉口的流量比相近就可以划入同一子区。如果关联度计算考虑子区内非关键交叉口与关键交叉口的周期时长差异时,必须首先确定子区的关键交叉口,然后逐步将与关键交叉口相邻、且符合条件的交叉口划入子区中。此时的子区划分流程与 Moore 等^[24]的划分流程存在显著差异。因此多交叉口关联度计算方法决定了控制子区的划分流程。

2.6.3 划分算法分类

根据划分时机的不同,可将子区划分算法分为2类,即初始划分和动态调整。

在夜间交通流低峰状态(如 00:00~05:00)交叉口到达流量非常少,根据经验可以确定交叉口一般执行感应控制或者单点优化控制,在此期间为了减少控制系统负荷可以不必进行子区划分。由于路网流量较小,虽然工程经验与子区划分结果会存在一些差异,但对路网交通运行的影响非常有限。当低峰状态结束时,路网内各个交叉口到达交通流逐渐增多,开始出现不同的控制策略。此时需要结束由经验确定交叉口控制方式的状态,转而通过子区划分确定各个交叉口的最佳控制方式。由于此次子区划分为当天的第1次,所以称为初始划分。

控制系统在初始划分确定的子区方案基础上进行配时方案优化。随着时间的推移,路网交通状态发生变化,进而影响交叉口之间的关联度。初始子区方案已经不再适用,所以需要重新优化。子区划分过程产生大量计算量,如果此时再执行初始划分流程,将给控制系统带来较大负担。分析发现:城市交通状态的改变是一种渐变过程,一般短时间内变化幅度较小;且前、后相邻时段交通状态具有关联性。因此可以每隔一段时间即对子区方案进行微观调整,使子区方案与路网交通状态相适应,同时避免了初始划分的大规模计算。这种微观调整过程即为动态调整。该算法包括2个关键点,即动态调整时间间隔和动态调整流程。

动态调整能在满足实时性的情况下优化子区方案,然而不可避免地会存在一定的误差,即调整结果与最优结果之间存在差异;而且随着调整次数的增加,这种误差有可能累积,进而影响路网整体控制效益,而每天的初始划分可以对该误差进行“清零”,避免误差的累积。

2.7 划分框架

在前文分析基础之上建立交通控制子区划分技术的框架,形成一个规范、系统、科学的子区划分技术体系(图7)。该框架包括交通控制子区划分策略、划分理论、划分算法3个层面。

交通控制子区划分策略主要从宏观层面上研究子区划分所依托的交通流环境及信息检测方法、应遵循的划分目标、原则、技术要求,研究子区划分算法与信号配时算法之间的关系,为划分理论、划分算法的建立提供指导,这也是本文的主要内容。

交通控制子区划分理论是子区划分算法的核心。首先分析影响子区划分的路网因素,在此基础上建立不同目标引导下的相邻两交叉口、多交叉口关联度模型,并确定可将相邻交叉口划入同一子区

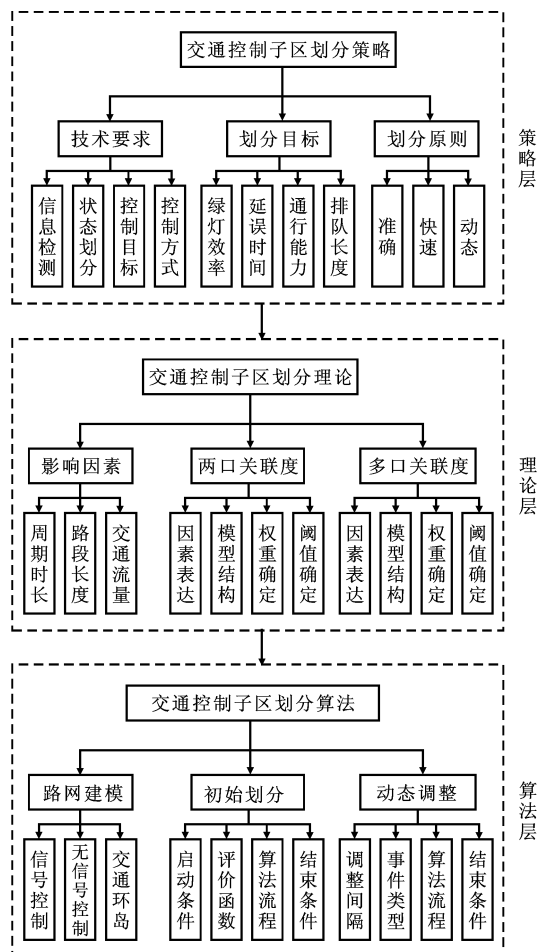


图7 交通控制子区动态划分框架体系

Fig. 7 Framework of Dynamic Traffic Control Subarea Partition

的关联度阈值。

交通控制子区划分算法是在划分理论的基础上最终实现子区划分策略。子区划分算法面向整个路网,在交叉口类型方面不仅包括信号交叉口,也包括环岛、无信号交叉口;在交叉口状态方面不仅包括中饱和状态交叉口,也包括低饱和、准饱和、过饱和交叉口。通过建立路网拓扑结构的表达模型以及初始划分算法、动态调整算法,优化子区划分方案的最佳调整时间间隔,形成系统的子区划分算法。

3 结 语

(1)分析了交通控制子区划分方面的研究现状,从系统性、科学性、快速性等方面详细剖析了现有研究存在的不足。根据交通控制系统技术水平的发展特点,从城市路网全局角度出发,建立了交通控制子区划分目标集、划分原则,解析了关联度模型与划分算法内涵,最终形成了交通控制子区划分策略体系。

(2)下一步研究应在本文划分策略的基础上,分析影响子区划分的关键因素,建立相邻交叉口之间的关联度计算模型以及面向整个路网的子区划分算法,最终形成完整的交通控制子区动态划分技术体系。

参考文献:

References:

- [1] WALINCHUS R J. Real-time Network Decomposition and Subnetwork Interfacing[J]. Highway Research Record, 1971, 366: 20-28.
- [2] STOCKFISH C R. Guidelines for Computer Signal System Selection in Urban Areas[J]. Traffic Engineering, Inst Traffic Engr, 1972, 43(3): 30-39, 62-63.
- [3] PINNELL C, DESHAZO J J J, WILSHIRE R L. Areawide Traffic Control Systems[J]. Traffic Engineering & Control, 1975, 16(4): 16-21.
- [4] Federal Highway Administration. Manual on Uniform Traffic Control Devices[M]. Washington DC: Federal Highway Administration, 1978.
- [5] PLINE J L. Traffic Engineering Handbook[M]. 4th ed. Washington DC: ITE, 1992.
- [6] ROBERTSON D I. TRANSYT: A Traffic Network Study Tool[R]. Berks: Road Research Laboratory, 1969.
- [7] HUNT P B, ROBERTSON D I, BRETHERTON R D. The SCOOT On-line Traffic Signal Optimisation Technique[J]. Traffic Engineering & Control, 1982, 23(4): 190-192.
- [8] YAGODA N H, PRINCIPE E H, VICK C E, et al. Subdivision of Signal Systems into Control Areas[J]. Traffic Engineering, Inst Traffic Engr, 1973, 43(12): 42-45.
- [9] CHANG E C P. How to Decide the Interconnection of Isolated Traffic Signals[C]//ACM. Proceedings of the 17th Conference on Winter Simulation. New York: ACM, 1985: 445-453.
- [10] LIN L T, TSAO S M. A System Approach on Signal Grouping for Areawide Control of Computerized Traffic System[C]//TRB. Proceedings of the 79th TRB Annual Meeting. Washington DC: TRB, 2002: 1-21.
- [11] LIN L T, HUANG H J. A Linear Model for Determining Coordination of Two Adjacent Signalized Intersections[J]. Journal of Modelling in Management, 2009, 4(2): 162-173.
- [12] PARK J Y. Network-wide Signal Control with Dis-

- tributed Real-time Travel Data[D]. Irvine: University of California, 2009.
- [13] 杨庆芳, 陈林. 交通控制子区动态划分方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(增2): 139-142.
YANG Qing-fang, CHEN Lin. Division Approach of Traffic Control Work Zone[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2006, 36(S2): 139-142.
- [14] 陈晓明. 交通控制子区动态划分指标研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
CHEN Xiao-ming. Research on Performance Index of Dynamic Division About Traffic Control Sub-area [D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [15] 高云峰. 动态交叉口群协调控制基础问题研究[D]. 上海: 同济大学, 2007
GAO Yun-feng. Fundamental Research on the Theory of Coordinated Control of Dynamic Intersections Group[D]. Shanghai: Tongji University, 2007
- [16] 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.
MA Wan-jing, LI Xiao-dan, YANG Xiao-guang. Incidence Degree Model of Signalized Intersection Group Based on Routes[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(11): 1462-1466.
- [17] 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(增2): 13-18.
DUAN Hou-li, LI Zhi-heng, ZHANG Yi, et al. Dynamic Subdivision of Road Network into Coordinated Control Regions[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(S2): 13-18.
- [18] 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.
LU Kai, XU Jian-min, LI Yi-shun. Division Method of Coordinated Control Subareas Based on Correlation Degree Analysis[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 37(7): 6-9, 20.
- [19] 卢凯. 交通信号协调控制基础理论与关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
LU Kai. Research on the Foundational Theory and Key Techniques of Coordinate Signal Control in Urban Traffic Network[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [20] 陈宁宁. 信号控制子区动态划分及区域自适应协调控制研究[D]. 广州: 中山大学, 2010.
CHEN Ning-ning. Research on Sub-area Dynamic Division and Adaptive Coordinated Signal Control[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2010.
- [21] 杨晓光, 黄玮, 马万经. 过饱和状态下交通控制小区动态划分方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(10): 1450-1457.
YANG Xiao-guang, HUANG Wei, MA Wan-jing. Method of Delimiting Urban Traffic Signal Coordinate Control Subarea Under Oversaturated Condition [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(10): 1450-1457.
- [22] 首艳芳. 基于群决策理论的交通区域协调控制理论与方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
SHOU Yan-fang. Theory and Method Research of Wide-area Traffic Signal Coordinated Based on Group Decision-making[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [23] BIE Y M, WANG D H, WEI Q, et al. Development of Correlation Degree Model Between Adjacent Signal Intersections for Subarea Partition[C]//ASCE. Proceedings of 11th International Conference of Chinese Transportation Professionals. Reston: ASCE, 2011: 1170-1180.
- [24] MOORE J E, JOVANIS P P. Statistical Designation of Traffic Control Subareas[J]. Journal of Transportation Engineering, 1985, 111(3): 208-223.
- [25] 莫汉康, 彭国雄, 云美萍. 诱导条件下交通控制子区自动划分[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(2): 67-72.
MO Han-kang, PENG Guo-xiong, YUN Mei-ping. Automatic Division of Traffic Control Sub-area Under Condition of Route Guidance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(2): 67-72.
- [26] 彭国雄, 莫汉康. 诱导条件下交通控制子区自动划分研究[J]. 道路交通与安全, 2001, 1(5): 23-28.
PENG Guo-xiong, MO Han-kang. Automatic Division of Traffic Control Subarea Under Condition of Route Guidance[J]. Road Traffic and Safety, 2001, 1(5): 23-28.
- [27] YUN M P, YANG X G. An Optimization Model of Road Networks Subarea Districting for Incident Management Systems [C]//IEEE. Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. New York: IEEE, 2003: 437-441.
- [28] 于泉. 城市交通信号控制系统动态协调关键问题研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2005.
YU Quan. Study on Key Issues of Dynamic Coordina-

- tion of Urban Traffic Signal Control System[D]. Beijing; Beijing University of Technology, 2005.
- [29] JIANG N, YANG X, TANG S. Delimitation of Traffic Coordinated Control Sub-area for the Road Network Containing Freeway[C]//IEEE. Proceeding of the 2008 Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System. New York; IEEE, 2008: 72-76.
- [30] MA Y Y, YANG X G. Traffic Sub-area Division Expert System for Urban Traffic Control[C]//IEEE. Proceedings of the 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. New York; IEEE, 2008: 589-593.
- [31] GUO J J, XIONG Q P, CHEN S. Division Approach of Traffic Signal Control Sub-area[C]//IEEE. Proceedings of the 2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science. New York; IEEE, 2009: 1-4.
- [32] 李晓丹. 城市道路网络交通小区动态划分理论与方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- LI Xiao-dan. Methodology and Method of Urban Road Network Traffic Sub-area Division[D]. Shanghai; Tongji University, 2009.
- [33] 李晓丹, 杨晓光, 陈华杰. 城市道路网络交通小区划分方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(5): 19-22.
- LI Xiao-dan, YANG Xiao-guang, CHEN Hua-jie. Study on Traffic Zone Division Based on Spatial Clustering Analysis[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(5): 19-22.
- [34] GUI Y F, ZONG Q M, WU X Q, et al. A Traffic Partition Method Based on Unsupervised Classification[C]//IEEE. Proceedings of the 2010 International Conference on Computer Design and Applications. New York; IEEE, 2010: 445-449.
- [35] LI C G, XIE Y, ZHANG H L, et al. Dynamic Division About Traffic Control Sub-area Based on Back Propagation Neural Network[C]//IEEE. Proceedings the 2010 2nd International Conference on Intelligent Human-machine Systems and Cybernetics. New York; IEEE, 2010: 22-25.
- [36] 马莹莹, 杨晓光, 曾 滢. 基于谱方法的都市交通信号控制网络小区划分方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(12): 2290-2296.
- MA Ying-ying, YANG Xiao-guang, ZENG Ying. Urban Traffic Signal Control Network Partitioning Using Spectral Method[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2010, 30(12): 2290-2296.
- [37] 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.
- LU Kai, XU Jian-min, ZHENG Shu-jian, et al. Research on Fast Dynamic Division Method of Coordinated Control Subarea[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(2): 279-287.
- [38] GARTNER N H, KALTENBACH M H, MIYAMOTO M M. Demand-responsive Decentralized Urban Traffic Control Part 2: Network Extensions [R]. Lowell; University of Lowell, 1983.
- [39] WALMSLEY J. The Practical Implementation of SCOOT Traffic Control Systems[J]. Traffic Engineering & Control, 1982, 23(4): 196-199.
- [40] ROBERTSON D I, BRETHERTON R D. Optimizing Networks of Traffic Signals in Real Time - The SCOOT Method[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1991, 40(1): 11-15.
- [41] SIMS A G, DOBINSON K W. The Sydney Coordinated Adaptive Traffic (SCAT) System: Philosophy and Benefits [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1980, 29(2): 130-137.
- [42] 朱 中, 管德永. 海信 HiCon 交通信号控制系统[J]. 中国交通信息产业, 2004, 6(10): 52-55.
- ZHU Zhong, GUAN De-yong. Hisense HiCon Traffic Signal Control System[J]. China ITS Journal, 2004, 6(10): 52-55.
- [43] 栗红强. 城市交通控制信号配时参数优化方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- LI Hong-qiang. Study on the Optimization Methods of Signal Timing Parameters of Urban Traffic Control[D]. Changchun; Jilin University, 2004.