

文章编号:1671-1637(2013)05-0105-10

## 网络化动态调控下城市路网交通 拥堵控制技术综述

黄大荣<sup>1</sup>, 宋 军<sup>1</sup>, 李淑庆<sup>2</sup>, 向红艳<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学 信息科学与工程学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074)

**摘 要:**以网络化动态链接交通装备下的城市交通安全监控为应用背景,从路网交通安全性能评估的可靠性评价指标和评价方法出发,分析了城市路网交通拥堵控制技术的国内外研究现状,指出了路网交通拥堵控制技术研究存在的问题和进一步研究方向。分析结果表明:由于网络化动态调控下交通信息资源存在传输时延、数据丢包与数据异常等缺陷,当前路网交通拥堵控制技术存在整体协调能力不强、多维动态模式研究欠缺以及出行者与交通系统之间的协调控制能力偏弱等缺陷;通过网络链接动态调配资源,实现路网交通拥堵状态下的联动控制,不仅需要考虑传统的交通畅通因素,还需要综合考虑信息传输机制、信道容量大小等与信息资源密切相关的因素;提出路网拥堵控制的关键子模型,并集成子模型构建了一种基于模型化方法的路网交通拥堵控制技术体系框架,框架的核心是交通数据库的建设;城市路网交通拥堵的分布式智能控制方法、自适应智能控制方法与集成型智能控制方法是未来重点关注的研究方向。

**关键词:**交通控制;信息技术;城市路网;拥堵控制;动态调控;可靠性分析

**中图分类号:**U491.54

**文献标志码:**A

## Control technology review of traffic congestion in urban road network under networked dynamic scheduling and control

HUANG Da-rong<sup>1</sup>, SONG Jun<sup>1</sup>, LI Shu-qing<sup>2</sup>, XIANG Hong-yan<sup>2</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** With the application of urban traffic security supervision under networked dynamic-link transportation equipment, the present domestic and overseas researches of traffic congestion control technology for urban road network were summarized based on the road network traffic safety performances including reliability evaluation indexes and evaluation methods. The problems and further development of recent researches were pointed. Analysis result shows that because of transmitting delay, data packet loss, and data exception of traffic information in networked dynamic scheduling and control, the traditional traffic congestion control technologies and methods of road network have the lack of global coordination ability, multi-dimension dynamic mode, and coordination ability between traveler and traffic performance. The arrangement of networked dynamic-link resource can be used for the implementation of linkage control at traffic congestion status, but the traditional factors for unimpeded transportation and

收稿日期:2013-04-25

基金项目:国家自然科学基金项目(61004118);重庆市教委科学技术研究项目(KJ120422);重庆交通大学(桥梁)结构工程重点实验室开放基金项目(CQSLBF-Y11-5)

作者简介:黄大荣(1978-),男,湖北建始人,重庆交通大学教授,工学博士,从事路网交通安全与可靠性研究。

the factors relating to information resources, such as information transmitting mechanism and channel capacity etc., have to be comprehensively considered. The key sub-control models for the traffic congestion control of road network are proposed. These sub-models are further integrated to establish a systematic-model based on the framework of traffic congestion control technology. It is pointed out that the core content of the model-based frame is the construction of traffic state database. The future development trend and research focus of traffic congestion control technology are distributed intelligent control, adaptive intelligent control, and integrated intelligent control. 1 fig, 61 refs.

**Key words:** traffic control; information technology; urban road network; congestion control; dynamic scheduling and control; reliability analysis

**Author resume:** HUANG Da-rong(1978-), male, professor, PhD, +86-23-62652751, hex1978@163.com.

## 0 引 言

智能交通系统(Intelligent Transportation System, ITS)的发展趋势之一是通过网络链接集成路网中信号灯、控制器、摄像头、检测器等多种不同交通装备,并搭建集底层控制、加工调度、运营管理、总体优化等为一体的多任务、多功能的控制和决策的交通网络化指挥系统,从而利用网络化指挥控制技术实现城市路网交通安全的全天候监控。由于不同交通装备可通过通信网络链接构成反馈控制闭环通道,传感器和控制器、控制器和执行机构、传感器和传感器、执行机构和执行机构之间的交通信息传递均通过网络实现,与传统点对点的信息传输相比,更易实现交通资源信息的共享,因此,受到了城市路网交通管理部门的极大关注,并已成为城市管理部门提升路网交通管理信息化水平的发展趋势之一。

然而,由于城市路网交通控制中不同设备有其特定的信息指示能力,具有一定的局限性,导致交通信息与路网空间信息的匹配和融合问题依然严峻<sup>[1]</sup>。特别是在一些以特殊地形地貌为主的城市,由于道路窄,弯急,坡陡,交通网络连通性差,路网结构不合理,交通流的空间分布均衡能力和次干道、支路的交通疏导能力差,在异常事件造成路网些微拥堵的情况下,大量的实时路况信息往往难以得到有效应用,因此,容易导致路网交通的通行能力预估不准确,路网区域的某个路段距离完全“堵塞”剩余时间随机性严重等问题<sup>[2]</sup>。那么如何在现有基础上将存在些微拥堵的路网可靠性和交通畅通控制更有效地结合起来,实现路网交通的无缝链接控制,便成为网络化动态调控下城市路网交通控制技术发展的关键问题。

目前,网络化控制技术虽然在信息技术领域占有重要地位,但在城市路网交通拥堵控制领域的研究成果较少,尚未形成一套系统的理论体系支撑该技术的应用。与此同时,受到 ITS 中各设备功能局限性的影响,现有路网交通的网络化控制技术框架与预期效果还存在一定差距,因此,在研制和发展过程中,城市路网交通控制管理中亟需解决的关键问题之一是找到一种动态协调控制方法,能够融合、集成大量不确定和不完整的多源信息,进行路网系统的可靠性评定,并能够基于 ITS 装备的信息传输资源,实现信息提供下出行者与交通性能之间的动态协调控制。本文分析并评价了现有的基于网络化动态调控下的城市路网交通拥堵控制技术,并在此基础上提出了该领域未来的研究方向。

## 1 网络化动态调控下路网拥堵控制国外研究现状

路网交通安全性能的综合评估是交通拥堵控制的基础环节,其核心是可靠性评价指标和评价方法。特别是在 ITS 装备普及程度越来越高的后交通时代,车流、人流、ITS 装备构成了城市路网交通拥堵控制中不可缺少的因素,如何将存在些微拥堵的路网交通安全性能和畅通控制有效地结合起来,实现路网交通的无缝链接控制,近年来已经引起了国内外交通工作者的极大关注,并取得了一系列研究成果。该领域自 20 世纪 90 年代以来得到了迅猛发展。截止至 2013 年 9 月底,关于交通路网系统可靠性研究方面的国际会议分别于 1999、2001、2004、2007、2010 年共召开了 5 次,有力地推动了交通路网可靠性研究的发展。

连通可靠性<sup>[3]</sup>、运行时间可靠性与路网容量可靠性<sup>[4]</sup>是交通网络可靠性研究目前最为集中的3个方面。在这3个概念框架内,学者们基于不同的条件分别提出了旅行时间可靠性、出行费用可靠性、出行时间预算与脆弱点可靠性、交通流衰退可靠性以及需求满意度可靠性等概念<sup>[5-10]</sup>,并针对不同交通模式进行模拟仿真,取得了良好的效果。但是,这些指标的设置均为基于某一特定交通状况的综合评价而作出的,不具有通用性,而且,上述可靠性分析计算是从路网整体角度出发,以交通系统真实模拟为基础进行宏观评价,并不能凸现道路单元和系统可靠度之间的显性关系,与此同时,由于路段的通行能力是随机变化的,出行者会根据通行能力的变化不断调整出行行为,并根据承受风险能力的大小进行路径选择来保证出行的畅通性,出行者个人偏好的差异也会影响畅通效果,因此,基于这样假定的可靠性分析,可能会带来对路网交通安全性能的错误评价。

1996年,Asakura等将运行时间可靠度模型定义为阻塞状态运行时间与畅通状态运行时间之比的函数,一定程度上弥补了上述缺陷。特别是在交通流量变化剧烈的情况下,这种方法对于路网运行状况的整体评价很有效。可如果因为随机因素干扰使得交通路网不确定性增加,而造成这个函数值趋于无穷大时,出行者极有可能因为某条关键路段严重堵塞而不能到达目的地。显然,这种可靠性评价方法也存在弊端。为保证交通条件恶化情况下交通路网的畅通,美国犹他州州立大学Chen等重点分析不同随机因素与路网容量下降程度差异的关系,以此为基础构建随机约束规划模型<sup>[11-12]</sup>与随机效用理论模型<sup>[13]</sup>,以保证交通条件恶化情况下交通路网的畅通。这种方法既考虑了路网容量限制问题,又考虑了出行者的路线选择行为,弥补了连通可靠度的一些缺陷,适用于基于动态路况的路网性能评价。

近年来,随着ITS在交通管理中的广泛应用,交通信息服务对交通需求和供给的影响也越来越大,影响路网系统交通安全的不确定性因素也越来越多,因此,紧密结合路网安全性能综合评估的2个核心内容:可靠性基础概念和动态信息诱导,研究出行行为规则与网络条件变动之间的交互关系受到越来越多的关注。Basu等指出在智能交通系统和信息诱导技术联系越来越紧密的过程中,为了使路网交通的安全性能达到期望目标,工程师和路政管理部门需要依靠有力的科学工具和模型来对路网的某

些部位进行改进,使路网的整体性能保持在一个期望的可靠性水平上<sup>[14-17]</sup>。在信息与自动化技术不断发展的情况下,在评价越来越信息化的城市路网交通的安全性时,传统的可靠性指标存在较多弊端,需要以传统的可靠性评价方法和指标为基础,结合ITS的信息传输资源,研究路网整体的拥堵控制问题。这里有2个问题需要解决。

(1)交通路网哪些地方需要改进。

(2)路网改进需要达到的标准,或者说需要采用什么样的拥堵控制措施优化现有资源,从而保证路网在不同的服务水平上都能达到最大的可靠性。

针对第1个问题,Taylor提出通过挖掘交通网络的脆弱性来解决,主要是通过定量评价找出路网的脆弱路段,分析这些路段在各种条件下的变化规律以及所产生的影响,使得交通规划人员能够认清交通系统的脆弱环节,进而针对性地采取措施进行改进和整合<sup>[18]</sup>,这对于实现后交通时代的城市交通畅通,具有较好的现实意义。

近几年来,关于路网脆弱性的研究逐渐增多<sup>[19]</sup>,但对路网脆弱性并没有一个明确、统一的概念。Chen等结合路网脆弱性和风险的概率和后果,更精确地解释路网脆弱性,认为路网的脆弱性、可靠性及风险是紧密相连的概念<sup>[20]</sup>。基于上述假设,2008年,Bell等利用博弈论方法分析了路网脆弱性问题<sup>[21]</sup>;2009年,Erath等基于瑞士路网脆弱性的研究,将路网路段的脆弱性定义为危险情况下路段失效的概率与中断所造成的直接和间接后果之和的乘积<sup>[22]</sup>,即

$$R_i = P_{Ei}(H_i + G_i)$$

式中: $R_i$ 为路段*i*的脆弱性; $P_{Ei}$ 为危险情况下路段*i*失效的概率; $H_i$ 为路段*i*直接的经济后果; $G_i$ 为路段*i*间接的与运输相关的经济后果。

上述假设说明,路网脆弱性是由路网中断的概率和后果两部分组成的,不是一个概率值,是从系统整体的角度来分析运输网络,更加关注网络的薄弱环节和网络失效的后果,而脆弱并不一定意味着不可靠,可靠也并不意味着不脆弱,因此,将路网的脆弱性和可靠性结合起来,不仅能对路网交通安全可靠性作出更加客观公正的评估,而且能有效促进路网整体性能的改进。特别是在道路存在些微拥堵的情况下,脆弱性分析可以找出网络拓扑结构中使网络易于失效或者退化的薄弱环节,从而更加有效地评估路网可靠性,并采取合理的控制措施改进路网整体性能。与此相对应的是,在进行交通网络脆弱

性评估时,哪种结构的交通网络具有较好的自恢复能力,即较好的弹性,这对于存在些微拥堵情况下的城市交通网络来说,是个非常重要的问题<sup>[23]</sup>。Wang 等对交通网络易碎性和弹复度进行了概述和讨论<sup>[24-25]</sup>,但对于交通网络脆弱性状态下路网的畅通控制几乎没有涉及;2011 年,葡萄牙的 Simoes 等在脆弱性框架下研究了城市路网拥堵状态的红绿灯最佳分配问题,提出了拥堵状态下交通畅通控制的最佳绿灯分配方案<sup>[26]</sup>;2012 年,美国的 Bier 和挪威的 Hausken 两位教授将路网节点间道路简化为弧度,对节点间两弧度的交通畅通控制方法进行了初步探讨,假定突发事件造成交通拥堵状态的路段为黑箱,在拥堵状态下通过分配弧度让路网参与者达到效用最大化和旅行时间最小化<sup>[27]</sup>,但由于路网节点间往往为多路段相连,因此,需要在此基础上进一步研究;Jenelius 等从路网区域毁坏的角度,用网格覆盖概念对路网脆弱性进行分析,并以瑞典路网系统为例进行了验证,得到了较好的效果<sup>[28]</sup>;Chen 等在考虑交通需求不确定性的基础上,对大规模拥堵网络的脆弱性进行了分析<sup>[29]</sup>;Taylor 等基于社会经济影响的角度,以可达性和偏远性概念刻画区域路网脆弱性状态下的路网拥堵控制行为,并以澳大利亚东南部的道路网络为例进行了验证分析,取得了较好的效果<sup>[30]</sup>。

针对第 2 个需要解决的问题,2010 年,伊朗的 Shariat-Mohaymany 等对存在性能退化的城市交通网络的可靠性进行综合评估,首先在假定每个链路的容量是随机变化的基础上,基于链路性能可靠性计算了网络连通性的可靠性,之后采用集成非线性规划模型对现有资源进行优化配置,使得路网性能可靠性能在不同的水平上取得最大化,使交通运输网络达到期望的可靠性水平<sup>[31]</sup>;2011 年,Rehborn 等基于所测交通流数据对美国、德国及英国的交通拥堵特性进行了实证对比分析<sup>[32]</sup>;同年,法国 Midenet 等提出根据出行者在交叉路口等待车辆通过拥堵区域持续时间,结合视频传感器实施不同交通信号控制策略,以保证路网的畅通<sup>[33]</sup>;美国 Kurzhanskiy 等将高速路与主干道组成的道路网络分割为不同的链路,基于细胞传输模型对道路网络的交通状态进行了预测,并利用链路的交通流量控制来实现整体的反馈控制,取得了良好的效果<sup>[34]</sup>;智利 Gunther 等提出在交叉口堵塞时,通过竞争车辆流绕行其他未充分利用车道,消除拥堵队列或延缓其增加,从而保证路网整体容量的均衡,提高路网

的服务水平<sup>[35]</sup>;Davis 采用经典三相交通理论研究了匝道拥堵状态下的疏导策略<sup>[36]</sup>;瑞士的 Haddad 等从信息模式的角度设计了状态反馈控制策略,保证了拥堵状态下路网交通的稳定性<sup>[37]</sup>,进而基于宏观基本图分析交通拥堵状态和网络规模、结构大小之间的关系<sup>[38]</sup>,为拥堵状态下畅通控制策略的构建提供一定的基准。

## 2 网络化动态调控下路网拥堵控制国内研究现状

网络化动态调控城市路网拥堵控制技术是随着信息技术发展起来的一种新技术,近年来引起了中国交通工作者的重视。虽然由于中国在这方面的研究起步较晚,与发达国家的差距较大,在技术推广应用和产品化方面的差距更大,但是,中国的有关部门十分重视。2005 年,北京交通发展研究中心关于路网可靠性的专项研究课题获得科技部的立项资助;同年 12 月,北京交通发展研究中心邀请 11 位路网可靠性领域的国际知名专家,举办了第一届全国路网可靠性技术研讨会,在中国迈出了路网可靠性研究和应用领域非常重要的一步。

目前,国内主要的研究成果集中在基于传统的连可靠、运行时间可靠性、路网容量可靠性三方面的路网拥堵控制方法,以及在此基础上的拓展研究。北京工业大学陈艳艳教授研究团队提出了畅通可靠度<sup>[39]</sup>、畅通恢复可靠度等概念<sup>[40]</sup>,指出在 ITS 装配日益普及的情况下,路网可靠度主要取决于恢复时间上限  $T_0$  的限定以及 ITS 的装配率衔接程度,但存在的问题是路网恢复度模型的构建没有一个合理的标准。为了解决这个问题,2010 年该团队基于神经网络技术构建了交通恢复度时间预测模型<sup>[41]</sup>,但存在事故的分布函数不确定,仿真和试验存在差异以及路网拓扑结构对交通恢复度的影响不清晰等缺陷。之后,先后有学者基于粒子群算法、复杂网络<sup>[42]</sup>、风险<sup>[43]</sup>等理论构建了交通网络的可靠性分析方法,从提高故障网络恢复能力的角度关注了节点度、网络聚集系数、网络平均距离、介数等指标,分别从路径可靠度、路段可靠度、路网可靠度来进行分析,得到了很好的结果。

在以上研究的基础上,有学者提出了路网拥堵控制的拓展模型:东南大学王伟教授研究团队在深入研究了行程时间分布函数、行程时间可靠度变化及饱和度之间的影响机理后,提出了基于行程时间可靠度的区域交通控制系统评价方法<sup>[44-45]</sup>;哈尔滨

工业大学冷军强等建立了基于服务水平约束的路网容量可靠性双层规划模型,以行程时间增量系数和饱和度系数为约束构成上层规划,结合用户路径选择行为的特点,选用随机用户均衡(SUE)分配模型作为下层规划,提出了蒙特卡洛和遗传算法相结合的拥堵控制方法,并指出路径选择模型是保证路网畅通的关键和核心。

与此同时,北京交通大学高自友教授研究团队重点分析了连通可靠性、出行时间可靠性、能力可靠性、行为可靠性以及潜在可靠性等评价道路网络性能的指标,特别考虑到 ITS 拥堵调控的关键环节是不确定条件下用户的路径选择行为和信息提供条件下交通系统与出行者的交互作用,在可靠性研究可以为 ITS 提供更有效的评判标准和理论依据的前提下,构建了城市公交网络可靠性的双层规划模型,上层模型是整个网络系统可靠且达到最优,下层模型是用户均衡模型<sup>[46]</sup>,并在此基础上,基于出行时间可靠性构建了城市道路网络拥堵调控设计方法<sup>[47]</sup>,但数据难以获取成了最大的瓶颈。之后,高自友团队继续研究了交通事故下临时性车辆禁行的问题,基于突发事故下的交通拥堵状态提出了交通控制的临时性禁行设计的双层规划模型,上层研究车辆禁行的优化问题,下层研究出行者的动态路径选择行为,可采用优化车辆禁行区域割集的方法来控制交通的畅通,数值仿真结果表明,所提出的方法能在一定程度上提升交通网络的总体性能<sup>[48]</sup>,但对于 ITS 环境下突发事故及 ITS 装备作用下出行者行为规划的随机性研究不足。

针对拥堵状态下交通事故数据难以获取的难点,清华大学张雷等采用高阶矩技术、随机摄动法及 Edgeworth 级数研究了交通事故再现分析技术,依靠的基本数据是几何尺寸、车辆参数、人体参数或试验参数<sup>[49]</sup>,主要理由是确定性的数学模型可能会出现偏差,基于数据驱动可以提高事故再现分析的可信度,但是权重的确定是个关键的问题;清华大学自动化系张毅教授团队从城市交通管理控制中宏观交通状态分析的需求出发,基于伪色彩图理论提出了一种新的交通状态观测分析方法,通过图像分割的方式将交通路网划分为畅通区域、边缘拥堵区域及核心拥堵区域 3 部分,可自动发现核心拥堵区域的演化模式,为交通畅通管理控制提供决策支持<sup>[50]</sup>;北京交通发展研究中心全永燊等从道路网运行的基本特性入手,着重分析了路网运行的道路运行随机波动性、递延传导效应及周期规律性,针对路网“负

荷度”评价理论的局限性,结合交通拥堵指数、拥堵里程比例、拥堵持续时间、拥堵路段分布以及行程时间可靠性提出了一套路网的整体实时动态评价理论,解决了无盲区数据采集与处理、路网运行时空动态分析、评价阈值标定等关键技术问题<sup>[51]</sup>;浙江大学王殿海团队根据交通拥堵特性,利用交通波动理论研究了交通拥堵形成的临界条件,确定了形成路网交通通过饱和的临界条件<sup>[52]</sup>,为路网拥堵控制提供一定的理论基础。

中国科学院陆锋教授研究团队在考虑城市路网路口的交通限行及转弯延迟影响的基础上,根据不同时间段城市交通状态的差异性,结合图论中的中介中心性评价方法,提出了一种动态道路分层网络方法<sup>[53]</sup>,可构建与时间相关的城市路网动态中介中心性层级结构,为多用户并发环境下的实时出行路径搜索提供更合理的数据基础,一定程度上缓解了因数据空间范围限制引起的路网层级静态划分方法的局限性,改进了城市道路网络各路段的出行效率;大连交通大学杨忠振教授研究团队为了提高道路网的通行能力和服务水平,提出了单向交通组织的双层规划模型<sup>[54]</sup>,可实现城市道路网的单向交通方案设计,但需要进一步考虑双向交通方案设计;北京交通大学邵春福教授研究团队根据混沌分析中的 G-P 算法,采用时间序列中的自相关函数概念,详细分析了阻塞流状态下城市快速路交通流的时空特性<sup>[55]</sup>,为交通拥堵控制提供理论支撑。

本文课题组基于山地城市所特有的交通属性及路网特征,为实现路网交通拥堵状态下的网络化动态调控,集成 Spring 和 Aglets 实现了交通数据库的远程访问<sup>[56]</sup>,构建了以交巡警平台、交通检测车、线圈、摄像头等为模拟原型的交通网络指挥控制应用平台,简单改进了车用自组织网媒体访问的控制机制<sup>[57]</sup>,实现了车用自组织网节点主动通告跨层的数据传输控制<sup>[58]</sup>。在此基础上,将路网交通“完全拥堵”视为交通系统的故障,从故障诊断和预测的角度出发,引入“亚健康”状态概念,对路网交通的“畅通”、“些微拥堵”、“完全拥堵”状态进行了刻画<sup>[59]</sup>,并在一定的假设条件下,构建了“亚健康”网络的性能退化评估模型<sup>[60]</sup>和网络集群控制下系统的可靠性分析模型<sup>[61]</sup>。但随着交通监控信号的选择机制不同,海量交通数据采集过程中“异变”数据也会发生,因此,需要进一步研究路网系统不同拥堵状态下的畅通失效退化推理模式,改进现有 ITS 装备的核心控制算法,以便更好地与道路交通流特征衔接起

来,保证全路网畅通控制信息的对称与完整。

### 3 存在的问题和未来发展趋势

#### 3.1 现有研究存在的问题

作为智能交通工程未来发展的方向之一,网络化动态调控下城市路网的拥堵控制对于提高交通控制的信息化水平,改善城市路网交通安全监控和管理性具有重要的意义。虽然目前这方面的研究工作已经引起了交通工作者的重视,但受到信息技术和交通系统无缝链接技术瓶颈的限制,这方面的研究还存在诸多不足,有大量的问题需要解决。

##### 3.1.1 交通拥堵疏导方案缺乏整体协调能力

在 ITS 日益普及的情况下,单纯通过依靠道路基础设施的建设增加道路网络容量的方法来解决交通拥堵问题存在不足,因为对于城市路网交通拥堵的网络化动态调控来说,既没有考虑交通供给和交通需求的随机性变化,也没有将路网的拓扑结构和人们的决策行为结合起来,其交通流的时空均匀分布并不平衡,故而交通拥堵疏导方案的效能低下,缺乏系统性,效果不理想。

##### 3.1.2 缺乏交通拥堵控制策略的多维动态模式

现有关于城市路网系统的交通控制方法都具有一定的合理性和科学性,但无论哪种方法在具体实施细节上均存在一定的局限性,如假设条件过于严格,范围规定不确切,考虑因素不全面等。同时,由于城市路网结构本身的复杂性和多样性,特别是在一些具有特殊结构的路网系统中,网络化动态调控下的城市路网拥堵控制策略涉及相互关联、相互制约的多个层次和多种因素,因此,路网的整体性能必然是多维的,无法用单一的指标进行描述,控制策略与其路网结构、出行目的、任务使命、实施环境和方法等密切相关,交通的拥堵控制具有一定前提和条件,条件改变,路网的整体性能可能发生较大变化,相应的动态调控策略也会发生变化,故而需要进一步完善和发展这方面的研究。

##### 3.1.3 出行者与交通系统协调控制效果差

网络化动态调控下城市路网的拥堵控制是集成了各种 ITS 装备、包括车、人等在内的子模块进行综合的动态调控,因此,路网中“故障(完全拥堵)”现象、部位和原因之间的结构关系随着 ITS 装备增多而变得更加复杂和多样化,增加了路网系统不可靠的随机因素,而且由于 ITS 中的各设备有其特定和局限的信息指示能力,如何融合、集成大量不确定和不完整的多源信息来进行路网系统安全的性能演化

推理分析,实现信息提供下出行者与交通系统性能之间的协调控制,这些方面的研究颇为欠缺,需要更深入的研究。

#### 3.2 发展趋势

网络化动态调控下城市路网的交通拥堵控制技术是在路网寿命可预测的条件下,基于网络信息技术实现交通装备的网络化链接,并通过网络链接调配路网资源,从而保证城市路网的畅通。然而,此类技术是随着信息技术的飞速发展而新近发展起来的,影响路网交通畅通的因素除了传统的交通基础设施以外,还包括信息传输机制、信道容量大小和信息资源密切相关的因素,故而路网交通已经从传统的单纯依靠道路基础设施的建设来增加路网容量的方法来保持交通畅通,进化到包括路网物理结构、交通信息资源、交通装备网络链接机制等多学科的综合集成控制。

需要注意的是,网络化动态调控下城市路网交通的拥堵控制是个集底层控制、加工调度、运营管理与总体优化等为一体的多任务、多功能的整体系统,从体系结构整体实现的角度而言,只要不同层次的模型结构清晰,拥堵控制的效果就可以得到保证,因此,未来可针对每个子系统和子模块建立控制模型,用模型化方法进行路网交通拥堵状态下的联动控制,所有的模型构成闭合的模型链,形成图 1 的网络化动态调控下城市路网拥堵控制的模型体系。由图 1 可以看出,网络化动态调控下路网拥堵控制的模型化体系框架核心是交通数据库的建设,作为网络化链接中最底层的资源,所有交通模型随交通数据库的动态变化不断更新,因此,在上述模型框架下,可以通过交通数据库的不断更新学习,保证路网交通的畅通,从而适应城市路网交通分布式、自适应、集成型控制发展的需要,为网络化指挥控制在路网交通拥堵下的疏导、决策提供良好的技术支撑。寻找合适的拥堵控制方法,实现网络和交通设备的无缝链接是非常关键的问题。故而,面对现存的不足和不断变化发展而产生的新要求,结合目前人工智能、信息处理与计算机网络等相关领域的发展技术,网络化动态调控下城市路网拥堵控制方法在未来发展过程中需要重点关注以下问题。

##### 3.2.1 分布式智能控制方法

随着高新技术的不断发展,规模系统的分布式、开放式特性已经成为城市路网交通网络化动态调控模式的核心,这种特性对路网系统各交通装备之间交通信息资源传输的实时性、自动性、开放性以及网

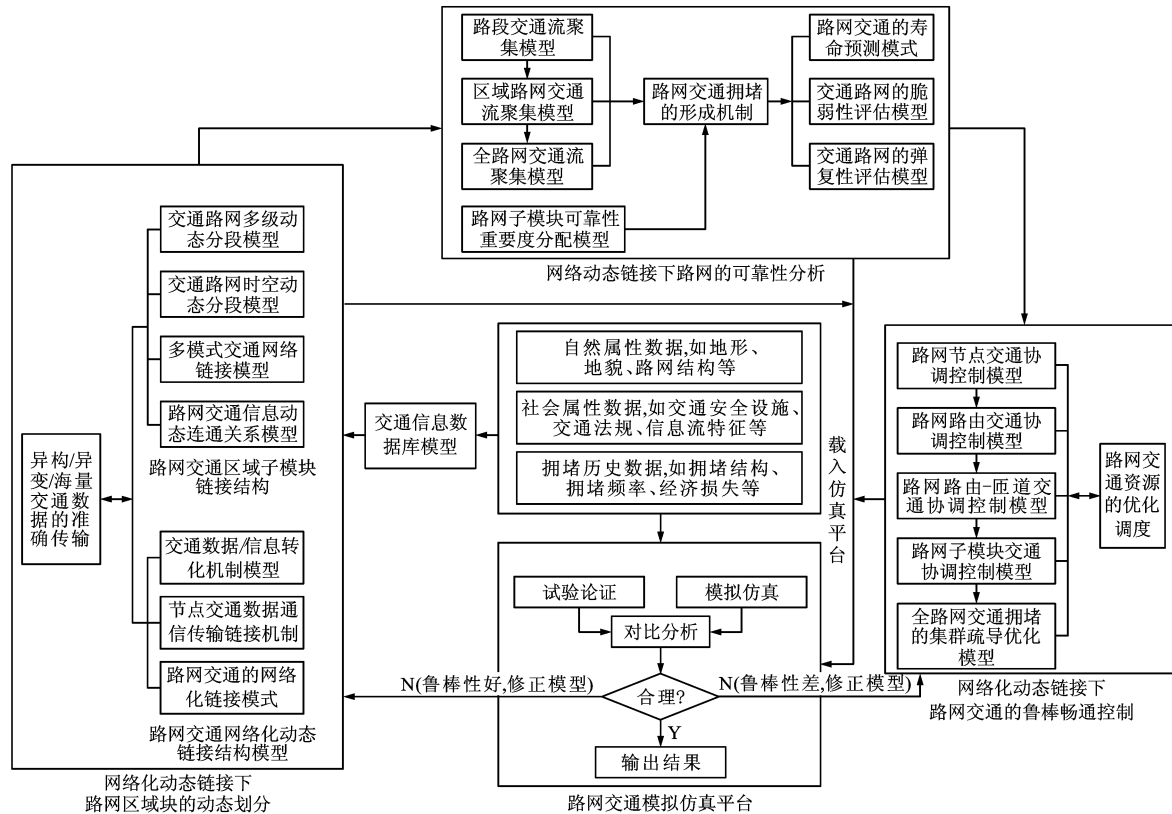


图1 模型化体系框架

Fig. 1 Model-based system framework

络化提出了更高的要求。分布式人工智能技术的发展为网络化动态调控下路网交通拥堵疏导策略提供了一条极具潜力的途径。该技术为解决大规模问题的智能求解而发展起来,通过对该问题的描述、分解及分配,可以构成分散的面向特定问题的相对简单的子系统,并协调子系统并行、相互协作进行问题求解,其思想十分适合城市网络化动态调控下城市路网区域网络交通资源的协调控制。

### 3.2.2 自适应智能控制方法

实现交通畅通的网络化指挥控制,需要依靠城市路网的各种 ITS 装备、车、人等子模块群体协作能力,保证其有效性的关键是不同交通装备之间信息资源的准确传输。但是,受到网络化链接结构的影响,信息技术装备下路网的拥堵控制策略与路网结构、出行目的、任务使命、实施环境和方法有关,其交通拥堵控制效果有一定的前提条件,条件改变,路网的整体性能就可能有很大差异,相应的动态调控策略也会发生变化。从智能系统的发展来看,网络动态链接支撑下路网交通的拥堵控制方法如果具备一定的自适应能力,能够自身不断学习和进化,就能有效适应系统环境和本身结构的不断变化,使得交通信息数据库不断完善更新,更有效地调配交通信

息资源,以保证路网的畅通。

### 3.2.3 集成型智能控制方法

在路网交通设备和通信网络无缝链接执行交通信息资源动态调配的过程中,为保证路网畅通性所需的交通数据监测量极其庞大,而且数据在网络传输的过程中还会存在丢包、时延等现象,因此,合理的时变、异构、海量交通信息的传输机制是城市路网交通拥堵控制的关键。另外,由于交通装备的复杂化和多样性,使得现有城市路网交通安全监控的海量数据有时会发生“异变”,而已有研究表明,这种“异变”并不是单一的随机因素的作用,还包括监控设备状态的失常,路网结构的不合理等内生力的影响,这些相对“负面”的数据一定程度上会影响网络化动态链接下交通路网拥堵控制的正面信息量的可靠性。随着现代控制理论和计算机仿真技术的不断发展,将计算机仿真技术和理论模型结合起来,综合、集成调配路网结构、交通装备、自然属性、社会属性等不同子模块的不完备交通信息资源,以保障路网交通的畅通,是路网交通拥堵状态下网络化指挥控制技术研究的重点。针对不同的路网结构特点,研究能更好模拟专家思维的集成控制方法,这种控制方法具有基于不同表示形式的交通数据到信息的



转换机制以及异构数据的同步优化方案,并能在此基础上开发路网交通的集成型智能网络化控制系统,也是后续研究工作中需要重点解决的问题。

## 4 结 语

网络化动态调控城市路网资源实现交通畅通是交通工程领域 1 个较新的研究热点,是随着信息技术的发展而兴起的。将网络与交通装备进行无缝链接,充分利用交通信息资源,对于提升城市路网交通的可管理性和可测性具有十分重要的意义。目前,该领域主要的研究包括信息采集与传输、路网交通拥堵的评价指标以及可靠性评价等,虽然均产生了一定的成果,但是仍有大量的疑难问题需要解决。另外,由于网络化动态调控的交通信息资源来自于不同的交通装备,使得城市路网交通的网络化指挥控制系统结构复杂,同时由于受到所处不同环境和实施条件的限制,需要寻求一个合适的当量系数,以保证不同装备间交通信息资源的相关性、可比性,将是网络化动态调控下城市路网交通拥堵控制技术发展的关键。

## 参 考 文 献 :

## References :

- [1] 陈传彬,陆 锋,励惠国,等. 城市路网信息融合的关键技术[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(4): 520-525.  
CHEN Chuan-bin, LU Feng, LI Hui-guo, et al. Discussion on information fusion technologies for city road network[J]. Journal of Geo-information Science, 2009, 11(4): 520-525. (in Chinese)
- [2] 王殿海,祁宏生,徐 程. 交通可靠性研究综述[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(5): 12-21.  
WANG Dian-hai, QI Hong-sheng, XU Cheng. Reviewing traffic reliability research[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(5): 12-21. (in Chinese)
- [3] WAKABAYASHI H, IIDA Y. Upper and low bounds of terminal reliability of road networks: an efficient method with Boolean algebra[J]. Journal of Natural Disaster Science, 1992, 14(1): 29-44.
- [4] CHEN A, YANG H, LO H K, et al. A capacity related reliability for transportation networks[J]. Journal of Advanced Transportation, 1999, 33(2): 183-200.
- [5] CHEN A, YANG H, LO H K, et al. Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2002, 36(3): 225-252.
- [6] SANCHEZ-SILVA M, DANIELS M, LLERAS G, et al. A transport network reliability model for the efficient assignment of resources[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2005, 39(1): 47-63.
- [7] CLARK S, WALTING D. Modelling network travel time reliability under stochastic demand[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2005, 39(2): 119-140.
- [8] SCOOT D M, NOVAK D C, AULTMAN-HALL L, et al. Network robustness index: a new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks[J]. Journal of Transport Geography, 2006, 14(3): 215-227.
- [9] LO H K, LUO X W, SIU B W Y. Degradable transport network: travel time budget of travelers with heterogeneous risk aversion[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2006, 40(9): 792-806.
- [10] SIU B W Y, LO H K. Doubly uncertain transportation network: degradable capacity and stochastic demand[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 191(1): 166-181.
- [11] CHEN A, KASIKITWIWAT P, YANG C. Alternate capacity reliability measures for transportation networks[J]. Journal of Advanced Transportation, 2013, 47(1): 79-104.
- [12] RECKER W, CHUNG Y, PARK J, et al. Considering risk-taking behavior in travel time reliability [R]. Berkeley: University of California, 2005.
- [13] CHEN A, OH J S, PARK D, et al. Solving the bicriteria traffic equilibrium problem with variable demand and non-linear path costs[J]. Applied Mathematics and Computation, 2010, 217(7): 3020-3031.
- [14] BASU D, MAITRA B. Valuing attributes of enhanced traffic information: an experience in Kolkata[J]. Transport, 2007, 22(3): 164-173.
- [15] DAUNORAS J, BAGDONAS V, GARGASAS V. City transport monitoring and routes optimal management system[J]. Transport, 2008, 23(2): 144-149.
- [16] CRAINIC T G, GENDREAU M, POTVIN J Y. Intelligent freight-transportation systems: assessment and the contribution of operations research[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2009, 17(6): 541-557.
- [17] FRIESER N, GAHROOEI M R, CHOWDHURY M, et al. Meeting privacy challenges while advancing intelligent transportation systems[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2012, 25(6): 34-45.
- [18] TAYLOR M A P. Critical transport infrastructure in urban areas: impacts of traffic incidents assessed using accessibility-based network vulnerability analysis[J]. Growth and Change, 2008, 39(4): 593-616.
- [19] JENELIUS E. Network structure and travel patterns: explaining the geographical disparities of road network vulnerability[J]. Journal of Transport Geography, 2009, 17(3): 234-244.
- [20] CHEN A, YANG C, KONGSOMSAKSAKUL S, et al. Network-based accessibility measures for vulnerability analysis of degradable transportation networks[J]. Networks and Spatial



- Economics, 2007, 7(3): 241-256.
- [21] BELL M G H, KANTURSKA U, SCHMOCKER J D, et al. Attacker-defender models and road network vulnerability[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2008, 366(1872): 1893-1906.
- [22] ERATH A, BIRDSALL J, AXHAUSEN K W, et al. Vulnerability assessment methodology for Swiss road network[J]. Transportation Research Record, 2009(2137): 118-126.
- [23] BURSSTEIN E, GOUBAULT-LARRECQ J. A logical framework for evaluating network resilience against faults and attacks[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2007(4846): 212-227.
- [24] WANG Ding-wei, IP W H. Evaluation and analysis of logistic network resilience with application to aircraft servicing[J]. IEEE Systems Journal, 2009, 3(2): 166-173.
- [25] 汪定伟,叶伟雄. 交通网络弹复度与易碎度的测算与分析[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(7): 849-854.
- WANG Ding-wei, YE Wei-xiong. Evaluation and analysis of resilience and frangibility for transportation networks[J]. Control Theory and Applications, 2010, 27(7): 849-854. (in Chinese)
- [26] SIMOES M L, RIBEIRO I M. Global optimization and complementarity for solving a semi-actuated traffic control problem[J]. Pcedia Social and Behavioral Sciences, 2011(20): 390-397.
- [27] BIER V M, HAUSKEN K. Defending and attacking a network of two arcs subject to traffic congestion[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2013(112): 214-224.
- [28] JENELIUS E, MATTSSON L G. Road network vulnerability analysis of area-covering disruptions: a grid-based approach with case study[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2012, 46(5): 746-760.
- [29] CHEN B Y, LAM W H K, SUMALEE A, et al. Vulnerability analysis for large-scale and congested road networks with demand uncertainty[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2012, 46(3): 501-516.
- [30] TAYLOR M A P, SUSILAWATI S. Remoteness and accessibility in the vulnerability analysis of regional road networks[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2012, 46(5): 761-771.
- [31] SHARIAT-MOHAYMANY A, BABAEI M. An approximate reliability evaluation method for improving transportation network performance[J]. Transport, 2010, 25(2): 193-202.
- [32] REHBORN H, KLENOV S L, PALMER J. An empirical study of common traffic congestion features based on traffic data measured in the USA, the UK, and Germany[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2011, 390(23/24): 4466-4485.
- [33] MIDENET S, SAUNIER N, BOILLLOT F. Exposure to lateral collision in signalized intersections with protected left turn under different traffic control strategies[J]. Accident Analysis and Prevention, 2011, 43(6): 1968-1978.
- [34] KURZHANSKIY A A, VARAIYA P. Guaranteed prediction and estimation of the state of a road network[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2012, 21(1): 163-180.
- [35] GUNTHER G, COEYMANS J E, MUNOZ J C, et al. Mitigating freeway off-ramp congestion: a surface streets coordinated approach[J]. Transportation Research C: Emerging Technologies, 2012, 20(1): 112-125.
- [36] DAVIS L C. Mitigation of congestion at a traffic bottleneck with diversion and lane restrictions[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2012, 391(4): 1679-1691.
- [37] HADDAD J, GEROLIMINIS N. On the stability of traffic perimeter control in two-region urban cities[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012, 46(9): 1159-1176.
- [38] TSEKERIS T, GEROLIMINIS N. City size, network structure and traffic congestion[J]. Journal of Urban Economics, 2013(76): 1-14.
- [39] 梁颖,陈艳艳,任福田. 不同交通供需分布下的路网畅通可靠度变化规律研究[J]. 公路交通科技, 2007, 24(8): 103-109.
- LIANG Ying, CHEN Yan-yan, REN Fu-tian. Research on unblocked reliability of road network under different traffic demand and supply distribution[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(8): 103-109. (in Chinese)
- [40] 唐夕茹,陈艳艳. 基于 DYNASMART 路网恢复可靠性研究[J]. 交通信息与安全, 2009, 27(4): 97-100.
- TANG Xi-ru, CHEN Yan-yan. Road network recovery reliability based on DYNASMART[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2009, 27(4): 97-100. (in Chinese)
- [41] 高爱霞,陈艳艳. 异常事件下路网恢复可靠性研究[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2010, 34(3): 517-519, 523.
- GAO Ai-xia, CHEN Yan-yan. Study of recovery reliability of road network during incident[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2010, 34(3): 517-519, 523. (in Chinese)
- [42] 王志强,徐瑞华. 基于复杂网络的轨道交通路网可靠性仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(20): 6670-6674.
- WANG Zhi-qiang, XU Rui-hua. Reliability simulation analysis of urban rail transit networks based on complex network[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(20): 6670-6674. (in Chinese)
- [43] 马寿峰,贺正冰,张思伟. 基于风险的交通网络可靠性分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(3): 550-556.
- MA Shou-feng, HE Zheng-bing, ZHANG Si-wei. Approach based on risk for traffic network reliability[J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 2010, 30(3): 550-556. (in Chinese)
- [44] 王英杰,陶世宁,程琳. 交通网络连通可靠性评价方法研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2008, 6(2): 102-106, 112.
- WANG Ying-jie, TAO Shi-ning, CHENG Lin. Research on the estimating connectivity reliability of transport networks[J]. Journal of Transportation Engineering and Information,

- 2008, 6(2): 102-106, 112. (in Chinese)
- [45] 郭志勇, 王 炜. 基于行程时间可靠度的区域交通控制系统评价方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2010, 40(4): 848-851. GUO Zhi-yong, WANG Wei. Area traffic control system evaluation method based on travel time reliability[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(4): 848-851. (in Chinese)
- [46] 许 良. 交通运输网络可靠性研究分析[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(1): 135-140. XU Liang. Analysis and research on transportation network reliability[J]. China Safety Science Journal, 2007, 17(1): 135-140. (in Chinese)
- [47] 许 良, 高自友. 基于出行时间可靠性的城市交通网络设计[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(2): 494-498. XU Liang, GAO Zi-you. Urban transportation network design based on travel time reliability[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(2): 494-498. (in Chinese)
- [48] ZHANG A M H, GAO Zi-you, REN Hua-ling. Incident-based traffic congestion control strategy[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(5): 1338-1344.
- [49] 张 雷, 李一兵. 冗余信息交通事故再现可靠性分析的综合模型法[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(3): 98-102. ZHANG Lei, LI Yi-bing. Comprehensive-model method of reliability analysis for traffic accident reconstruction with redundant information[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(3): 98-102. (in Chinese)
- [50] 段后利, 李志恒, 李 力, 等. 一种基于伪色彩图的网络交通状态观测分析方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9(4): 46-52. DUAN Hou-li, LI Zhi-heng, LI Li, et al. Network-wide traffic state observation and analysis method using pseudo-color map[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2009, 9(4): 46-52. (in Chinese)
- [51] 全永荣, 郭继孚, 温慧敏, 等. 城市道路网运行实时动态评价理论和技术研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(1): 43-48. QUAN Yong-shen, GUO Ji-fu, WEN Hui-min, et al. Real-time dynamic evaluation of urban network[J]. Engineering Science, 2011, 13(1): 43-48. (in Chinese)
- [52] QI Hong-sheng, WANG Dian-hai, SONG Xian-min. On the critical conditions of traffic jams[J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2011, 27(2): 180-184.
- [53] 周 亮, 陆 锋, 张恒才. 基于动态中介中心性的城市道路网实时分层方法[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(3): 292-298. ZHOU Liang, LU Feng, ZHANG Heng-cai. Time-dependent road network hierarchy based on dynamic betweenness centrality[J]. Journal of Geo-information Science, 2012, 14(3): 292-298. (in Chinese)
- [54] 杨忠振, 邹珊华, 罗红红, 等. 道路网单向交通优化设计模型[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(5): 72-78. YANG Zhong-zhen, WU Shan-hua, LUO Hong-hong, et al. Optimization design model of one-way traffic for road network[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(5): 72-78. (in Chinese)
- [55] 董春娇, 邵春福, 马壮林, 等. 阻塞流状态下城市快速路交通流时空特性[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(3): 73-79. DONG Chun-jiao, SHAO Chun-fu, MA Zhuang-lin, et al. Temporal-spatial characteristic of urban expressway under jam flow condition[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(3): 73-79. (in Chinese)
- [56] 黄大荣, 黄惠敏. 集成 Spring 和 Aglets 的远程数据库访问技术[J]. 计算机应用, 2011, 31(2): 458-461. HUANG Da-rong, HUANG Hui-min. Access technology of remote database integrated spring and aglets[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(2): 458-461. (in Chinese)
- [57] 李嫒嫒, 宋 军, 黄大荣, 等. 车用自组网媒体访问控制机制改进[J]. 微电子学, 2011, 41(3): 372-376, 380. LI Yuan-yuan, SONG Jun, HUANG Da-rong, et al. Improvement on media access control mechanism of vehicular Ad-Hoc network[J]. Microelectronics, 2011, 41(3): 372-376, 380. (in Chinese)
- [58] 李嫒嫒, 宋 军, 金艳华, 等. 车用自组网节点主动通告跨层数据传输控制[J]. 计算机科学, 2011, 38(6): 153-156. LI Yuan-yuan, SONG Jun, JIN Yan-hua, et al. Cross-layer data transmission control based on active notify of vehicular Ad-Hoc network node[J]. Computer Science, 2011, 38(6): 153-156. (in Chinese)
- [59] 赵 玲, 黄大荣, 宋 军. 路网交通亚健康状态下交通流的分形特性[J]. 控制工程, 2012, 19(4): 583-586. ZHAO Ling, HUANG Da-rong, SONG Jun. Fractal characteristics of mountain cities' traffic flow with sub-health state[J]. Control Engineering of China, 2012, 19(4): 583-586. (in Chinese)
- [60] 黄大荣, 汪 鹏. 网络系统“亚健康”状态的性能退化评估模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(增 1): 60-63. HUANG Da-rong, WANG Peng. Performance degradation evaluation model of subhealth network system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 43(S1): 60-63. (in Chinese)
- [61] 黄大荣, 汪 鹏, 朱 波. 基于信息熵理论的网络化集群系统的可靠性分析[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(2): 177-182. HUANG Da-rong, WANG Peng, ZHU Bo. Reliability of networked-group systems based on information entropy[J]. Control Theory and Applications, 2012, 29(2): 177-182. (in Chinese)