

2-19-2020

Optimization Model and Method of Urban Road Traffic Signal Control under Rainfall Environment

Shaohu Tang

1. *Beijing Union University, Beijing 100101, China;*

Zhou Jin

1. *Beijing Union University, Beijing 100101, China;*

Chunlin Shang

2. *North China University of Technology, Beijing 100144, China;*

Guorong Zheng

2. *North China University of Technology, Beijing 100144, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Optimization Model and Method of Urban Road Traffic Signal Control under Rainfall Environment

Abstract

Abstract: The efficiency of urban road traffic operation fell obviously during a rain, and the existing road traffic signal control has not yet established a relevant signal optimization scheme. Considering the traffic operation scenario under the influence of rainfall and road water, *an urban road traffic cyber physical systems* is designed, a framework of *urban road traffic control based on cyber physical systems* is built, *an optimization model of traffic signal control* is established, and further more, *the solution method of the model* is designed by using BP neural network. Building a traffic simulation model of the example intersection, comparing the delay time and other indicators under the three schemes, the analysis results proved the effectiveness of this method in improving the traffic operation efficiency of the intersection under the rainfall scenario.

Keywords

rainfall scenario, traffic signal control, cyber physical system, BP neural network

Recommended Citation

Tang Shaohu, Zhou Jin, Shang Chunlin, Zheng Guorong. Optimization Model and Method of Urban Road Traffic Signal Control under Rainfall Environment[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(2): 149-156.

降雨情景下城市道路交通信号控制优化模型与方法

唐少虎¹, 周进^{1*}, 尚春琳², 郑国荣²

(1. 北京联合大学, 北京 100101; 2. 北方工业大学, 北京 100144)

摘要: 降雨天气导致城市道路交通运行效率明显下降, 现有道路交通信号控制一般尚未建立针对性的信号优化方案。考虑降雨天气降水量、道路积水等因素影响下的交通运行情景, 设计了面向交通控制的城市道路交通信息物理系统体系, 搭建了基于信息物理系统的城市道路交通控制框架, 并建立了交通信号控制优化模型, 进一步利用 BP 神经网络方法设计了模型求解方法。通过搭建实例路口交通仿真模型, 对比 3 种方案下延误时间等多个指标, 分析结果表明本文方法在改善降雨情景下交叉口交通运行效率等方面的有效性。

关键词: 降雨情景; 交通信号控制; 信息物理系统; BP 神经网络

中图分类号: U491.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2020) 02-0149-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0675

Optimization Model and Method of Urban Road Traffic Signal Control under Rainfall Environment

Tang Shaohu¹, Zhou Jin^{1*}, Shang Chunlin², Zheng Guorong²

(1. Beijing Union University, Beijing 100101, China; 2. North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: The efficiency of urban road traffic operation fell obviously during a rain, and the existing road traffic signal control has not yet established a relevant signal optimization scheme. Considering the traffic operation scenario under the influence of rainfall and road water, an urban road traffic cyber physical systems is designed, a framework of urban road traffic control based on cyber physical systems is built, an optimization model of traffic signal control is established, and further more, the solution method of the model is designed by using BP neural network. Building a traffic simulation model of the example intersection, comparing the delay time and other indicators under the three schemes, the analysis results proved the effectiveness of this method in improving the traffic operation efficiency of the intersection under the rainfall scenario.

Keywords: rainfall scenario; traffic signal control; cyber physical system; BP neural network

引言

降雨天气严重影响城市道路交通运行效率, 将

导致包括道路交通通行能力、车辆行驶速度以及交通饱和流率等交通运行参量遭受不同程度折减。研究表明, 降雨事件会降低路段的通行能力, 其范围在 4%~30%之间^[1], 在大雨天气下交通运行速度降低 5%~17%, 最大流率降低 14%~15%^[2]。目前, 受限于交通运行环境感知能力不足、数据信息融合不够以及通信实时性较差等原因, 城市道路交通信号控制方案一般制定在正常天气下, 对于降雨条件



收稿日期: 2019-12-24 修回日期: 2019-12-27;
基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0809900), 北京市自然科学基金(8184070), “天诚汇智”创新促教基金(2018A01012);

作者简介: 唐少虎(1986-), 男, 山东, 博士, 讲师, 研究方向为城市交通管理与控制; 周进(通讯作者 1970-), 女, 江苏, 硕士, 副教授, 研究方向为交通工程。

<http://www.china-simulation.com>

下道路交通运行参数特性欠缺考虑,尚未形成完善的降雨情景下城市道路交通信号控制方法。由此,因降雨引发道路交通运行效率下降,甚至交通安全事件等问题。为此,结合降雨条件下城市交通运行特点,建立面向降雨情景的交通信号控制,对于提高城市道路交通信号控制系统应对降雨天气下的道路交通控制能力,具有重要的实践意义和应用价值。

国内外学者已针对降雨天气下城市道路交通特性和管控展开较多研究。Bernardin 等建立了针对不良天气优化信号配时实例方案,分析表明总出行时间和交叉口车辆平均延误分别降低 13%和 23%^[3]。Martin 等用 Synchro 软件优化了信号配时方案,发现新方案在车均延误和车均停车次数方面得到改进^[4]。Perrin 等调查了恶劣天气对于交通流参数的影响,研究表明饱和流率降低 20%、平均速度降低 30%、起动损失时间增加 23%,并给出了恶劣天气条件下信号配时参数改变的推荐值^[5]。Mohan 等提出如果没有针对天气变化建立相应的交通信号配时方案,会增加信号控制交叉口冲突区域的碰撞几率,造成交通安全事件隐患^[6]。蒋贤才等分析了因天气和路面环境改变导致的以经典信号控制理论为优化基础的信号配时方案演变情况,与仍采用良好天气情况下的信号配时方案相比,调整后的信号配时方案能有效降低车辆在信号交叉口的停车次数和延误,提高交叉口的通行效率^[7]。胡明伟提出不良天气对交叉口信号配时的绩效将产生明显的负面影响,针对不良天气专门制定的配时优化方案将改善交通状况、减少延误和提高车速^[8]。李岩等分析了降雨天气对饱和流率等交通信号控制参数的影响,建立了基于模拟退火算法的优化模型,通过仿真测试表明改进的方案能够降低车均延误,增强了交通控制的鲁棒性^[9]。武丽佳提出了不良天气交通分级标准及对应的单点信号控制优化策略,通过仿真分析验证了交通信号控制优化方案和策略的有效性^[10]。但是,上述研究一般只是对降雨等恶劣天气进行等级分类,建立相应的离

线调整控制方案,由于不能准确感知现场真实的交通运行情景,实际交通运行情景以及交通流特性与离线方案采用的控制参数和适用场景并不能保证一致性。

随着信息物理系统(Cyber Physical Systems, CPS)技术的不断发展,能够在精确情景感知的基础上,通过 3C 技术(Computing, Communication, Control),使得物理世界和信息世界深度融合,实现对物理世界的综合感知、动态控制和信息服务,从而使物理系统更可靠、高效、实时协同^[11-12]。将其应用到城市道路交通控制与管理,为有效解决交通场景感知、低时延通信、多源异构数据融合与交通动态反馈控制等提供了有力的解决思路和工具。

1 问题分析

降水天气对城市道路交通运行效率产生较大影响,随着降雨强度持续增加,车辆行驶速度下降,车辆饱和和车头时距降低和起动损失时间增加,使得信号交叉口通行能力降低,进而导致交叉口路段交通量的减小,可能造成交叉口排队等待车辆增多和延误时间增加^[13]。此时,如果道路积水无法及时排除,甚至会造成车辆熄火、人员受困等安全问题。面对上述问题,城市道路交通控制系统因为直接作用于道路交通运行秩序,其交通控制方案是否能够准确有效匹配降雨天气交通运行特点,将对交通运行效率产生直接影响。

城市道路交通控制系统一般是在交通数据采集的基础上,通过交通控制模型计算得出交叉口信号控制方案。这种方式主要存在 2 方面的问题:第一,交通控制模型一般只考虑交通流的变化情况,通过感应或者自适应控制调整交叉口配时方案,对于道路通行环境变化导致模型适用性不足欠缺完善,比如降雨天气和道路积水导致车辆速度、交通饱和和流率等参数变化,如果忽视这种变化将降低模型所得方案的运行效果;第二,由于不同数据检测系统存在孤岛现象,导致系统之间数据无法共享,造成单一系统效益局限的问题,特别是面向不

同应用对象的系统, 一般存在接口标准不一、共享数据困难的问题, 如城市道路交通控制系统较难获取城市降雨与道路积水监测系统的降雨量和道路积水等数据信息, 使得交通控制系统较难准确感知真实的道路交通运行情景, 使得交通控制系统无法有效应对降雨天气对交通的影响。

信息物理系统是解决上述问题的重要途径, 如建立面向交通控制的城市道路交通信息物理系统, 如图 1 所示分层体系, 通过不同形式通信网络接入各种物理检测器、传感器等终端, 不仅能够获得交通运行状态, 及时感知道路交通所处情景^[14], 实现物理设备联网和数据信息融合, 而且借助物理系统联网联控和信息系计算优化, 将不同情景的最优控制方案实时下发交通控制器, 从而使得交通控制系统能够精准感知环境, 达成高效控制的目标。

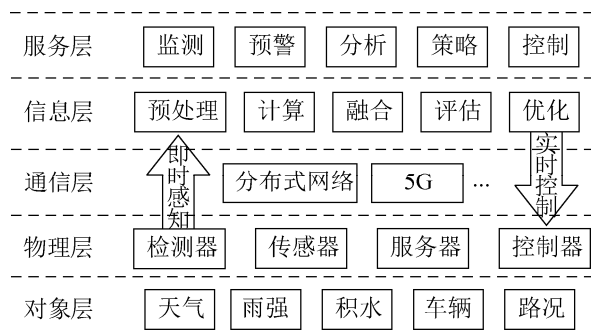


图 1 面向交通控制的城市道路交通 CPS 体系
Fig. 1 CPS system of urban road traffic for traffic control

2 模型构建与优化方法

2.1 模型框架

结合 CPS 原理和城市道路交通控制特点, 城市道路交通控制信息物理系统(Traffic Control Cyber Physical System, TC-CPS)主要由 3 个组成模块: 物理模块、信息模块以及服务模块。如图 2 所示为基于 CPS 的城市道路交通控制框架。

物理模块实现对象感知、通信传输以及应用执行等作用。其中, 对象感知位于系统最底层, 由可感知各种目标场景的检测器、传感器等单元组成, 比如视频、雷达等车辆检测器、雨量传感器以及道

路积水检测水尺等。通信传输在对象感知之后, 负责各类检测数据、控制指令等信息的上传下递, 为实现低延迟、高带宽等目的, 其组成由多种网络构成, 包括以太网、卫星通信、5G 等。应用执行主要是对信号控制交叉口所运行配时方案的执行, 组成包括交通信号控制器、交通信号灯组等。

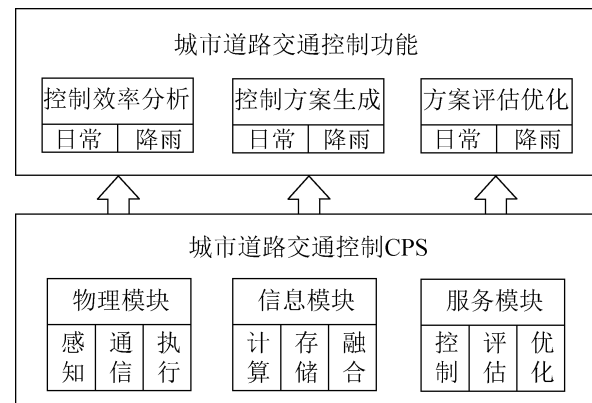


图 2 基于 CPS 的城市道路交通控制框架
Fig. 2 Urban road traffic control framework based on CPS

信息模块包括计算实验、信息融合以及数据存储等内容。其中, 计算实验结合物理系统检测数据, 基于交通控制模型和智能优化算法, 对各种可能适用于当前情景的控制方案进行计算分析。信息融合应用数据融合算法, 对于感知的多源异构数据进行分析融合, 在保证各类数据特征信息的前提下, 完成交通数据、情景数据等的信息融合。数据存储用于管理系统各类数据信息, 形成结构化、非结构化情景数据信息中心, 为日常、降雨等交通运行场景控制方案评估和优化提供数据支撑。

服务模块对应于用户需求, 包括交通信号控制、控制效率评估以及控制方案优化等。交通信号控制在准确感知交通状态和运行情景的基础上, 基于对各类交通运行情景的最优控制方案的计算实验分析, 建立面向不同情景(日常、降雨等)的单品控制、干线控制以及区域控制。控制效率评估一方面是对实际运行的配时方案进行有效性分析, 另一方面可利用仿真手段对提出的控制优化方案展开适用性评估, 并将最有效的优化方案下发现场控制

器。控制方案优化是在效率评估的基础上,为克服控制模型求解困难,利用机器学习、智能算法等结合现场环境感知信息,针对不同交通运行情景提出控制优化方案。

2.2 模型搭建

城市道路交通控制信息物理系统构建了全流程闭环反馈框架,如图 3 所示,按照数据信息流向形成了基于 CPS 的城市道路交通控制优化模型。首先,TC-CPS 物理系统主要面向现场数据采集和方案执行,包括雨量、积水、车速、流量等各种状态量数据检测,以及交通控制方案实施等。其次,各类采集数据通过多模式通信网络上传信息中心或分布式子中心,数据将在清理、归纳、转换、融合等预处理过程,形成结构化或分类关联数据等,建立面向各种情景感知的数据信息存储。第三,在交通情景感知、信息融合的基础上,通过仿真等方式对当前运行控制方案的效率进行分析评价。此外,结合交通控制与优化模型,利用大数据、智能算法等方法和技术,求解最适合当前情景的交通控制优化方案,并再次评估分析与改进。最后,利用实时通信网络将最优控制方案下发现场交通控制器,从而实现 TC-CPS 在不同交通运行情景下面向交通控制优化的目的。

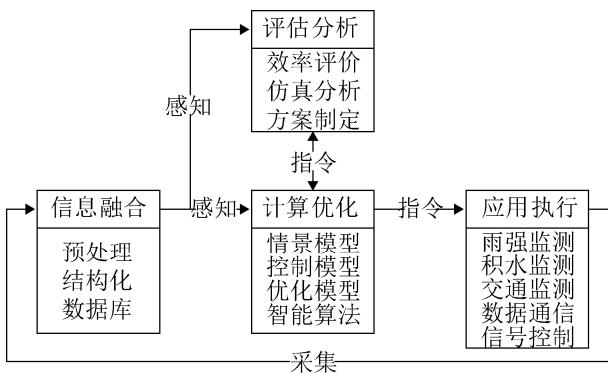


图 3 基于 CPS 的城市道路交通控制优化模型

Fig. 3 Model of urban road traffic control information physical system

基于上述思路,结合道路路段交通流状态建立如下数学模型:

$$N_j(t+1) = N_j(t) + Q_{j_in}(t) - Q_{j_out}(t) \quad (1)$$

$$Q_{j_in}(t) = \sum_{i_q \in V_j^I} \alpha_{i_q j} \eta_{i_q}(t) N_{i_q}(t) \quad (2)$$

$$Q_{j_out}(t) = \sum_{k_q \in V_j^D} \alpha_{j k_q} \eta_{j k_q}(t) N_j(t) \quad (3)$$

式中: $N_j(t)$ 为路段 j 在时间 t 内的车辆数; $Q_{j_in}(t)$ 为路段 j 在时间 t 内的输入车辆数; $Q_{j_out}(t)$ 为路段 j 在时间 t 内的输出车辆数; α 为交通流从上游路段到下游路段的转向比例; $\sum_{k_q \in V_j^D} \alpha_{j k_q} = 1$, η_i 为路段 i 上交通流的消散比例, $\eta_i \triangleq Q_{i_out}(t) / N_i(t)$, V_j^I 和 V_j^D 分别为路段 j 的上游路段集合以及下游路段集合。

η_i 可转化为交通控制参数,数学模型为:

$$\eta_i = \frac{\sum_{j \in V_i^D} s_{ij} g_{ij}(t)}{N_i(t)} = \frac{s_i g_i(t)}{N_i(t)} \quad (4)$$

式中: s_{ij} 为路段 i 到下游路段 j 的饱和交通流率; g_{ij} 为路段 i 到下游路段 j 的有效绿灯相位时间, $j \in V_i^D$; g_i 为路段 i 的周期有效绿灯相位时间, $g_{ij} = \beta_{ij} g_i$; β_{ij} 为路段 i 到下游路段 j 的有效绿时比例因子, $\sum_{j \in V_i^D} \beta_{ij} = 1$, 定义 s_i 为路段 i 的周期交通流率, $s_i \triangleq \sum_{j \in V_i^D} s_{ij} \beta_{ij}$, 此处假设路段 i 到路段 j 为饱和交通流率, 下游路段 j 没有发生车辆溢出现象并有空余路段容纳由路段 i 流入的车辆。

模型控制目标为:

$$\min f(x) = \frac{\sum_{i=1}^2 \beta d_i(t) q_i(t) + (1 - \beta) h_i(t) q_i(t)}{\sum_i q_i(t)} \quad (5)$$

式中: $f(x)$ 为交叉口综合效益; d_i 为第 i 相位的车辆平均延误; h_i 为第 i 相位的车辆平均停车次数; q_i 为第 i 相位的交通量; β 为加权系数。

随着降雨量增加,道路交通饱和流率也将出现下降趋势,文献[15]给出了降雨量和车道饱和流率回归分析方程:

$$s = -0.015r^3 + 1.376r^2 - 40.9r + 1631 \quad (6)$$

式中: s 为车道饱和流率, veh/h; r 为小时降雨量, mm/h。

此外,随着降雨量持续增加,如果不能及时排

除路面雨水, 道路积水增长将影响车辆行驶速度。当路面无积水或者积水较少时, 降雨是影响行车速度的主导因素; 积水深度达到 5 cm 后, 路面积水将成为影响车速的主导因素^[16]。行车速度随积水深度衰减模型表达式如下:

$$v = \frac{v_0}{2} \tanh\left(\frac{-x+a}{b}\right) + \frac{v_0}{2} \quad (7)$$

式中: v 为行车速度; v_0 为该路段设计车速; x 为积水区最大积水深度; a 为车辆滞停的临界积水深度的中值; b 为衰减系数, 一般取 3~5, 值越小衰减越快。

此时, 根据道路通行能力计算方法^[17], 车速与饱和流率的数学方程如下:

$$s = \frac{3600}{\lambda C} \left(t_g - \frac{v}{2a}\right) / t_h \quad (8)$$

式中: s 为车道饱和流率; λ 为有效绿灯时间; C 为信号周期时间; t_g 为相位绿灯时长; v 为行车速度; a 为车辆加速度; t_h 为车头时距。

2.3 优化方法

BP 神经网络(Backpropagation Neural Network)主要特点是信号前向传递, 误差反向传播^[18]。在实际的工作中, 一些复杂的问题可能参杂着各种没有任何联系的信息, 如降雨量、交通流量、行车速度等, 想要使用线性方法去针对这些复杂问题建立模型显得很困难, 但是通过 BP 神经网络去求解这些非线性系统, 可以更好的解决复杂系统的问题。如图 4 所示, 建立基于 BP 神经网络的道路交通信号优化结构模型, 其输入 I_a 为感知状态量 $s_i, i=1, \dots, n$, $s_i = [q_i(t), r_i(t), x_i(t)]$, 其中: $q(t)$ 为交通流量; $r(t)$ 为降水量; $x(t)$ 为积水深度; 输出 T_n 为交通运行评价指标 $u_j, j=1, \dots, m$, $u_j = [delay_j, stops_j, \eta_j(t)]$ 其中, $delay$ 为延误时间, $stops$ 为停车次数, $\eta(t)$ 为信号控制参数。

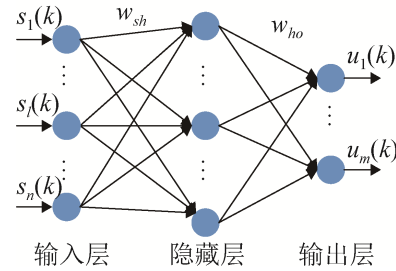


图 4 基于 BP 神经网络的道路交通信号优化结构图

Fig. 4 Road traffic signal optimization structure based on BP neural network

在利用 BP 神经网络进行优化求解前, 首先需要对网络进行学习训练以到达对运行环境进行准确感知的目的。当训练结果符合误差标准时, 即可利用学习后的网络结合现场实时感知信息, 快速优化求解控制模型, 得到最优交通信号控制参数。基于 BP 神经网络的道路交通信号优化流程如图 5 所示, 求解过程步骤如下:

step 1: 初始化网络参数。确定神经元节点数 n , 输出神经元节点数 m , 中间隐含层节点数 z , 各连接权值随机赋值 $\omega \in (-1, 1)$, 给定计算精度 ε 和最大学习次数 K 等。

step 2: 计算隐含层神经元 i 输出 H_i 。计算表达式为:

$$H_i = f\left(\sum_{j=1}^n w_{jh} - b_i\right) \quad (9)$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

step 3: 计算输出层神经元 l 输出 O_l 。计算表达式为:

$$O_l = \sum_{j=1}^p w_{lj} H_j - b_o \quad (10)$$

step 4: 计算误差 e 。根据 2.2 节控制模型可得交通控制参数, 通过交通仿真模型^[19]进行分析可得到该方案下的交通运行效率, 选取车辆延误时间 $delay$ 和停车次数 $stops$ 作为方案评价指标, 据此建立如下误差指标函数表达式为:

$$e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m [(F_{delay}(i) - O_{delay}(i)) + (F_{stops}(i) - O_{stops}(i))]^2 \quad (11)$$

step 5: 更新输出层与隐含层连接权值 w_{ho} 。

$$w_{ho}(k+1) = w_{ho}(k) - \gamma \frac{\partial e}{\partial w_{ho}} + \alpha(w_{ho}(k) - w_{ho}(k-1)) \quad (12)$$

式中： γ 为学习率， $\gamma \in [0,1]$ ； α 为调节因子， $\alpha \in [0,1]$ 。

step 6: 更新隐含层与输入层连接权值 w_{sh} 。

$$w_{sh}(k+1) = w_{sh}(k) - \gamma \frac{\partial e}{\partial w_{sh}} + \alpha(w_{sh}(k) - w_{sh}(k-1)) \quad (13)$$

step 7: 判断输出结果的误差是否满足需求。当输出结果误差满足要求，或者训练次数达到预先设定的次数时结束算法。否则，选取新的学习样本和输出返回 step 2，再次进入学习。

step 8: 信号控制优化方案求解。输入新的感知状态量，利用训练后神经网络优化求解信号控制方案。

step 9: 输出信号控制优化方案。

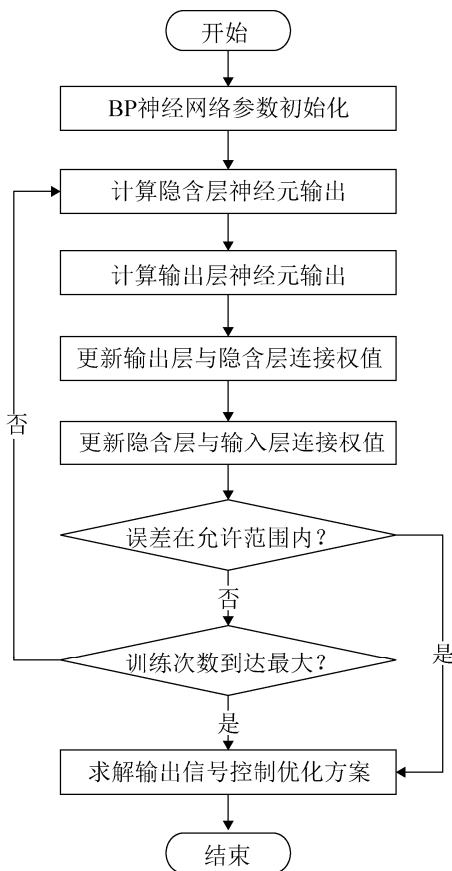


图 5 基于 BP 神经网络的道路交通信号控制优化流程
Fig. 5 Optimization flow chart of road traffic signal control based on BP neural network

3 仿真分析

以北京市望京北路和广顺北大街交叉口为例，搭建 VISSIM 仿真模型，如图 6 所示。该交叉口进口车道渠化基本信息如表 1，现状交通信号配时方案如表 2 所示。选取 2016/07/20 晚高峰 17:30-18:00 时段运行交通数据，根据此时气象降水数据，此时段雨强为大雨。

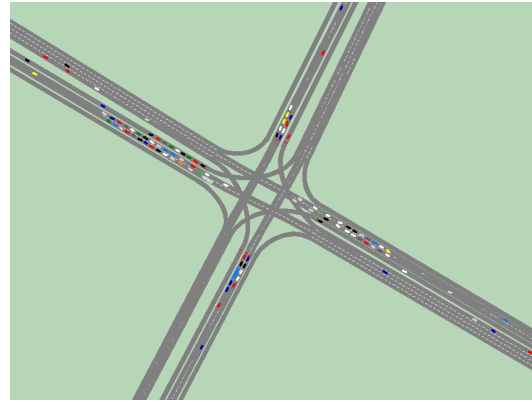


图 6 望京北路和广顺北大街交叉口 VISSIM 仿真模型
Fig. 6 VISSIM simulation model of intersection of Wangjing North Road and Guangshun North Street

表 1 进口车道渠化信息

Tab. 1 Channelization information of entrance lane				
车道	东进口	西进口	南进口	北进口
直行	2	2	2	2
左转	1	1	1	1
右转	1	1	1	1

表 2 信号配时方案

Tab. 2 Signal timing schemes /s				
信号灯色	第一相位	第二相位	第三相位	第四相位
	东西直行	东西左转	南北直行	南北左转
绿灯	36	22	28	18
黄灯	4	4	4	4
全红	2	2	2	2

结合交叉口物理渠化现状和当前时段交通运行情景，利用本文所提方法对此实例交叉口交通信号控制方案进行仿真优化分析，优化方案如表 3 所示。针对正常天气、降雨天气下的控制方案和优化方案交通控制效果情况，对正常天气下信号控制方案、降雨天气仍采用正常天气控制方案以及降雨

后采用优化控制方案的交叉口交通延误时间、停车次数以及交通流量进行对比分析。每种方案分别采用不同的仿真种子进行 10 次仿真, 分别统计 3 个指标的算术平均值, 对比分析结果如图 7~9 所示。

表 3 优化后信号配时方案
Tab. 3 Optimized signal timing scheme /s

信号灯色	第一相位	第二相位	第三相位	第四相位
	东西直行	东西左转	南北直行	南北左转
绿灯	40	25	32	22
黄灯	4	4	4	4
全红	2	2	2	2

从图 7~9 三个指标对比图中可以得出, 降雨后仍采用原有正常天气方案, 随着时间的增加, 交叉口交通的平均延误时间、平均停车次数对比正常天气方案均持续增长, 对比交通流量也有一定程度下降。此外, 虽然优化后信号周期增加, 但因信号配时方案更适应降雨环境的交通流运行特征, 相同仿真时长对比降雨后仍采用正常天气方案, 能有效地降低车辆在信号交叉口的停车次数, 平均下降比例(所有仿真时长下指标变化的均值, 下同)为 10.33%, 同时降低了平均延误, 平均比例为 7.39%, 并提高了交叉口的交通流量, 平均提升比例为 4.13%。通过 3 个指标变化分析, 可以得出通过建立降雨环境下的交通信号优化控制方案, 能够有效降低车辆延误时间和停车次数, 有助于提高交叉口的交通流量, 从而在一定程度上改善交叉口的通行效率。

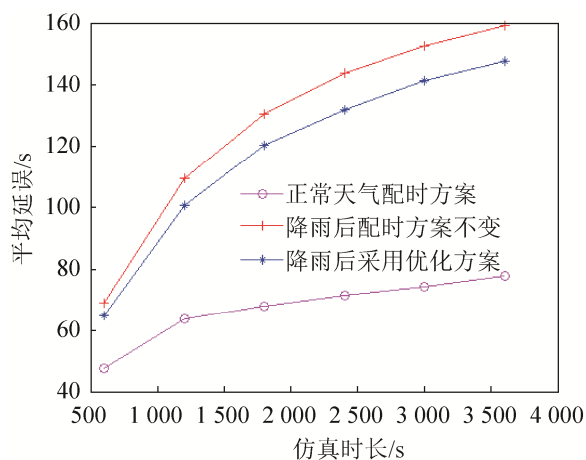


图 7 3 种方案下平均延误对比
Fig. 7 Comparison of average delay of three schemes

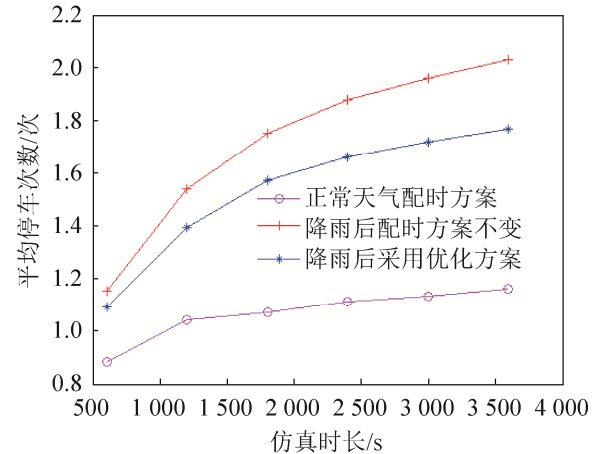


图 8 3 种方案下平均停车次数对比
Fig. 8 Comparison of average stops of three schemes

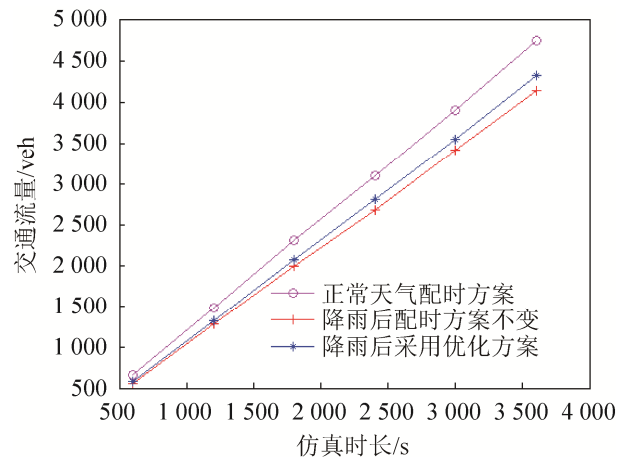


图 9 3 种方案下平均交通流量对比
Fig. 9 Comparison of average traffic flow of three schemes

4 结论

针对如何改善降雨天气城市道路交叉口交通运行效率, 为克服现有道路交通信号控制系统的不足和局限, 结合信息物理系统原理优势和特点, 在对交通运行情景感知的基础上, 本文建立了面向降雨情景的道路交通信号控制信息物理系统, 设计了系统分层体系和基本框架, 搭建了优化控制模型, 进一步采用 BP 神经网络提出了模型求解方法和步骤。最后, 通过建立实例仿真模型, 对本文方法进行验证分析, 结果表明本方法能够适应降雨环境的交叉口交通信号控制, 在延误时间、停车次数等指标上均有明显改善, 有助于提高交叉口交通运行效率, 进而缓解交通拥堵等问题。下一步工作将对本

文方法改进的基础上, 结合降雨环境下多个交叉口的干线交通信号控制展开进一步研究。

参考文献:

- [1] Transportation Research Board. Highway capacity manual[M]. Washington. DC: National Research Council, 2000.
- [2] Bernardin L, Associates. Anchorage signal system upgrade-final report[R]. Municipality of Anchorage, Alaska, 1995.
- [3] Martin P, Perrin J, Hansen B, et al. Inclement Weather Signal Timings[R]. Fiber Optics, 2000.
- [4] Perrin H, Martin P, Hansen B. Modifying Signal Timing During Inclement Weather[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (S0361-1981), 2001, 1748: 66-71.
- [5] Mohan M, Chandra S. Queue clearance rate method for estimating passenger car equivalents at signalized intersections[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) (S2095-7564), 2017, 4(5): 487-495.
- [6] 蒋贤才, 汪贝, 曾永松. 不良天气和路面环境对交通信号配时方案的影响[J]. 公路交通科技, 2014, 31(7): 135-142.
- Jiang Xiancai, Wang Bei, Zeng Yongsong. Influence of Inclement Weather and Poor Road Condition on Traffic Signal Timing Scheme[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(7): 135-142.
- [7] 胡明伟. 不良天气对交通信号配时的影响分析[J]. 交通运输研究, 2007(9): 156-160.
- Hu Mingwei. Analysis on Adverse Weather on Traffic Signal Timing[J]. Transport Research, 2007 (9): 156-160.
- [8] 李岩, 南斯睿, 马静, 等. 降雨天气单点交叉口交通信号控制优化方法[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(5): 189-198.
- Li Yan, Nan Sirui, Ma Jing, et al. Optimization method for traffic signal control of isolated intersection under rainy weather[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(5): 189-198.
- [9] 武丽佳. 不良天气下交叉口交通流特征及其单点信号控制策略[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- Wu Lijia. Traffic flow characteristic and signal control strategy of single intersection under adverse weather[D]. Ningjing: Southeast University, 2018.
- [10] 温景容, 武穆清, 宿景芳. 信息物理融合系统[J]. 自动化学报, 2012, 38(4): 507-517.
- Wen Jingrong, Wu Muqing, Su Jingfang. Cyber-physical System[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(4): 507-517.
- [11] Rajkumar R R, Lee I, Sha L, et al. Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution[C]// Proceedings of the 47th Design Automation Conference, DAC 2010. Anaheim, CA, USA. 2010.
- [12] 乔国梁. 不利天气条件下城市路段交通流特征参数研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- Qiao Guoliang. Research on traffic flow characteristic parameters of urban road section in adverse weather conditions[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014.
- [13] 童波. 基于情景感知的 CPS 体系架构研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2015.
- Tong Bo. Research on architecture of CPS system based on context-aware[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2015.
- [14] 刘力力. 不利天气条件下城市交叉口交通流特征参数研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
- Liu Lili. Research on traffic flow characteristic parameters of city intersection in adverse weather condition[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013.
- [15] 范一丁. 降雨内涝情景下城市路网脆弱性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- Fan Yiding. Research on vulnerability of road network under urban waterlogging[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [16] 张起森, 张亚平. 道路通行能力分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- Zhang Qisen, Zhang Yaping. Highway Capacity Analysis[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [17] Rumelhart D E, McClelland J L. Parallel distributed processing: explorations in the microstructure of cognition[M]. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1986.
- [18] 唐少虎, 刘小明. 基于 IAGSO 算法的 VISSIM 模型校正研究与实现[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(5): 74-80.
- Tang Shaohu, Liu Xiaoming. VISSIM Model Calibration Based on IAGSO Algorithm[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(5): 74-80.