

过饱和单交叉口信号配时控制算法的研究

张 龙 余发山 康 洪 王要东

(河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000)

摘要: 随着城市交通需求的不断增长,城市交通拥堵日益加剧,交叉口过饱和状态出现的次数也愈来愈频繁,造成的经济损失越来越大。针对这种情况,提出了以迭代学习和模糊控制相结合的方法,采用排队长度均衡的控制思想,用模糊控制方法处理交通系统输入的不确定性扰动,迭代学习使得信号配时随交通流的不断变化而变化,以达到相位排队长度均衡的控制目标,从而实现绿灯信号的合理配时。仿真结果验证了算法的有效性。

关键词: 交叉口;过饱和;信号配时;排队均衡

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Study on method of signal timing at one over-saturation intersection

Zhang Long Yu Fashan Kang hong Wang Yaodong

(School of Electrical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, china)

Abstract: With the increasing of transportation demand, the traffic congestion is rising, the state of oversaturated intersection become more and more frequent, and the economic loss are also more and more serious. In view of this situation, The paper introduces the idea of the interactive learning and fuzzy logic to design traffic signal controller. According to the concept of queue length balanced controlling, this control strategy can handle the uncertainty by fuzzy logic, also can adapt itself to the changing traffic flow by interactive learning, and achieve the equilibrium of queue length and make full use of green time at last. The simulation results show the effectiveness of this method.

Keywords: the road intersection; oversaturated; signal timing; equilibrium of queue length

1 引 言

目前对交通信号控制研究中,绝大多数控制理论与方法的研究均面向非饱和和交通流状态展开,对于饱和与过饱和状态下的交叉口信号控制和网络协调控制研究较少^[1]。而随着城市内机动车数量的不断增加,交通拥堵情况越来越严重,尤其是交通高峰时段,极易导致交叉口出现过饱和现象,甚至引发大面积的交通瘫痪。因此,研究交通流在过饱和和情况下如何有效调节具有重要意义。

围绕过饱和和交通流的控制问题,国内外学者已开始对其研究,钱喆等^[2]利用线圈检测数据,并运用交通波理论从交叉口绿灯结束滞留排队长度及下游交叉口溢流两个方面来判别过饱和和交通状态;雷磊等^[3]基于系统工程的思路和方法,构建了由过饱和和交叉口子系统构成的过饱和和交叉口群系统模型;杨文臣等^[4]提出一种两级组合模糊控制器,并引入滑动时间窗思想,能够在线优化控制器隶属度函数和控制规则参数;卢凯等^[5]利用交叉口进口道的车辆到达驶离图,根据行驶车队头车到达下游交叉口进口道的不同

时刻,对过饱和交通状态下行驶车队通过协调信号控制交叉路口的停车延误进行了分析研究;柳祚满等^[6]以疏散过饱和和城市干道的拥挤交通为目标,利用排队长度界定协调控制转换条件,提出了针对过饱和和干道交通的信号协调控制方法;国外学者 Tubaishat 等^[7-8]认为可以利用现代智能交通系统中的无线传感网络检测得到的数据判别交通状态;近年来,迭代学习作为一种基于数据驱动控制理论的方法已应用于交通信号控制中,闫飞等^[9]将迭代学习控制策略用于城市区域交通信号,给出交叉口信号的优化配时方法;郑一辰等^[10]基于迭代学习的核心思想,设计基于数据驱动的信号交叉口自适应控制器,均使交叉口的通行能力也得到显著提升。

通过对现有控制方法的分析,运用迭代学习与模糊控制相结合的方法,以交叉口相位排队长度均衡为性能指标,设计基于迭代学习的自适应控制器,用模糊控制方法处理交通系统输入的不确定性扰动,迭代学习控制使得信号配时随交通流的变化而变化,避免了对交通系统的建模,实现了根据交叉口车流分布情况合理配时。

2 问题描述

2.1 两相位交叉口模型

本文以两相位单交叉口为例进行说明,即相位 1 东西直行,相位 2 南北直行,如图 1 所示。

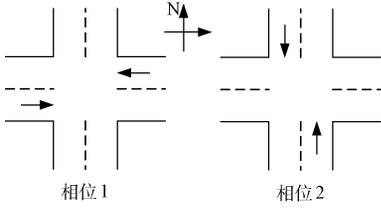


图 1 两相位交叉口模型

各相位的排队长度定义如下,相位 1 为东西直行,东向西、西向东直行的排队长度分别定义为 $x_{3,1}(k)$, $x_{1,3}(k)$; 相位 2 南向北、北向南直行的排队长度分别定义为 $x_{2,4}(k)$, $x_{4,2}(k)$; 为方便控制系统分析和设计,这里选择相向而行的两个行驶方向中排队长度较大者作为相位排队长度变量 $x_i(k)$, 并定义:

$$x_i(k) = \max\{x_{i,i+2}(k), x_{i+2,i}(k)\}, i = 1, 2$$

根据存储转发建模方法^[11]及排队长度非负特点,两相位交叉口动态描述如下:

$$x_i(k+1) = \max(x_i(k) + T[d_i(k) - v_i(k)], 0), i = 1, 2$$

式中: $i = 1, 2$ 表示 2 个相位, T 表示采样时间间隔(s), 一般要求不小于交叉口信号周期 C , $d_i(k)$ 表示车辆在 $[kT, (k+1)T]$ 到达率(veh/s), $v_i(k)$ 表示车辆在 $[kT, (k+1)T]$ 时间内的消散率(veh/s)。

本文考虑 $T = C$ 的情况,当交叉口处于过饱和状态时,车辆消散率表示如下:

$$v_i(k) = s_i g_i(k) / C$$

式中: s_i 为相位 i 的饱和流率(veh/s), $g_i(k)$ 为相位 i 的绿灯时间(s), 整理得两相位单交叉口动态模型如下^[11]:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + Cd_i(k+1) - s_i g_i(k)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} g_{i,\min} \leq g_i(k) \leq g_{i,\max} \\ \sum_{i=1}^2 g_i(k) = C - L \end{cases}$$

式中: $g_{i,\min}$ 为最小绿灯时间, $g_{i,\max}$ 为最大绿灯时间, L 为损失时间,包括整个信号周期红灯时间、黄灯时间及黄灯末绿灯初的损失时间。

2.2 排队均衡思想

根据 Little 定理可知,路网车辆的平均延误与排队长度成正比,在过饱和和交叉口中,经常会出现某一相位排队长度远大于令一相位排队长度的现象,因此,调整各相位的车辆排队均衡可有效降低车辆延误,增强过饱和和交叉口的通行效率。本文就是依据排队长度的相关参数来设计过饱和和交叉口配时策略,路网排队长度的均衡思想^[12-13]可以认为

是通过合理调整绿灯相位的配时时间,使得各相位道路车辆排队长度趋于均衡,各相位车辆排队长度之差趋于最小。根据排队均衡控制思想,这里定义相位 i 和相位 j 的排队长度差值等于交叉口相位 i 和相位 j 的排队长度之差,即: $y_{i,j}(k) = x_i(k) - x_j(k)$; 其中, i, j 分别为交叉口相位, $y_{i,j}(k)$ 为交叉口相位 i 与相位 j 的排队长度差值。

3 交叉口信号配时控制策略

3.1 算法原理

过饱和和交叉口的控制工作原理如图 2 所示,整个系统由参数整合、控制率优化两个部分组成。在原理图中, g_i 为当前绿灯相位的配时方案, Δx_i 为当前绿灯相位与迭代初始绿灯相位的排队长度之差, Δd_i 为当前绿灯相位的车辆到达率与初始到达率之差, δ 当前绿灯相位需要改进的优化参数。参数整合是由根据得到的交通数据进行处理分析,控制率优化模块以各相位排队长度均衡为目标,主要根据 Δx_i 和 Δd_i 得到合适的参数 δ , 从而改变绿灯相位的配时时间,从而适应交通流的不断变化,使交通的通行效率最大化。

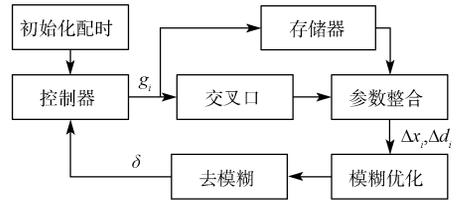


图 2 算法工作原理

3.2 算法流程

本文的控制目标是在满足绿灯时间约束的情况下找出最优绿灯相位配时 g_i , 实现过饱和和交叉口的各相位车辆排队均衡,得以最大减少交通延误。整个控制系统主要可分为交通参数提取、优化配时两个部分。

交通参数提取中,主要是根据交叉口的交通状态,通过检测器检测得到各相位交通流的相关数据^[10], 经过相关计算以方便迭代优化的正确实施。优化配时部分主要采取迭代的核心思想,并加入模糊环节,使得其适应交通流易变的特点,增强迭代的适应性。

以下详细分析优化配时部分的实施步骤。

1) 迭代控制律优化模块

迭代算法应用于交通控制时应满足如下两个条件:

一是每次迭代初始排队长度相同,即

$$x_n(0) = x_0(0) \tag{1}$$

二是车辆到达率在各个周期内是严格重复的,即

$$d_n(k) = d_0(k) \tag{2}$$

此时基于 ILC 单交叉口均衡控制对应的控制律^[11]可表示如下:

$$\bar{g}_{n+1}(k) = \bar{g}_n(k) + \gamma_{ic} (y_d - y_n(k+1)) \tag{3}$$

式中： $\bar{g}_n(k)$ 是第 n 次迭代第 k 个信号周期结束时产生的绿灯时间， γ_{dc} 是学习增益，且 $\gamma_{dc} < 0$ ， y_d 是期望排队长度之差，当交叉口各相位排队长度趋于均衡时，可认为 $y_d = 0$ ；

然而，在实际交通运行中，交通流往往不能满足式(1)、(2)两个条件，因此均衡控制的控制律不再适应交叉口绿灯相位合理配时，控制效果也大大下降，为使其更合理分配绿灯配时，本文对绿灯进行增加参数 δ ，如下所示：

$$g'_1(k) = \begin{cases} g_1(k) + \delta \cdot (g_{\max} - g_1(k)), & \delta \geq 0 \\ g_1(k) + \delta \cdot (g_1(k) - g_{\min}), & \delta < 0 \end{cases} \quad (4)$$

且 $g'_2(k) = C - L - g'_1(k)$

式中： $g'_1(k)$ 表示修正后第 k 周期相位绿灯时长， $g'_2(k)$ 表示修正后第 k 周期相位 2 的绿灯时长；

2) 模糊优化模块

为克服传统的迭代学习算法鲁棒性较差、容易受到输入扰动的影响，本文采用模糊控制思想^[4,14]，加入优化参数 δ 变量，参数 δ 随输入扰动的变化而变化，其主要受到每次迭代前绿灯相位实际的排队长度及车辆到达率的影响，因此，参数 δ 的设计对绿灯相位合理配时起着关键作用。

输入变量：第 k 周期结束时前相位 1 与相位 2 的实际排队长度之差 e_x ，第 k 周期结束时相位 1 与相位 2 实际到达率之差 e_d ，即： $e_x = x_1(k) - x_2(k)$ ， $e_d = d_1(k) - d_2(k)$ 。

输出变量：参数 δ 。

模糊控制方法： e_x 值越大， e_d 值越大，参数 δ 值越大；反之 e_x 值越小， e_d 值越小，参数 δ 值越小，模糊控制规则如表 1 所示。

表 1 迭代律参数优化模块模糊规则表

δ	e_x				
	很小	小	适中	大	很大
很小	小	小	小	中	中
小	小	小	小	中	中
e_d 适中	小	小	中	大	大
大	中	中	大	大	大
很大	中	中	大	大	大

隶属度函数^[15-16]取双边高斯型，其曲线变化较缓，更符合交通系统实际，且稳定性较好。

3) 过饱和交叉口优化配时实施步骤。

两相位交叉口模型如图 1 所示，其实施步骤如下。

①初始化过程中，设定过饱和交叉口最小绿灯时间 g_{\min} 和最大绿灯时间 g_{\max} ，及每次迭代初始化排队长度 $x_n(0) = x_0(0)$ ，车辆到达率在各个周期内严格重复 $d_n(k) = d_0(k)$ ；预设拥有通行权的绿灯相位 i 的绿灯配时为 $t = g_i$ ，得到各配时时间 $g_1(k), g_2(k)$ 。

②在步骤(a)绿灯配时开始时，根据检测器检测到的各

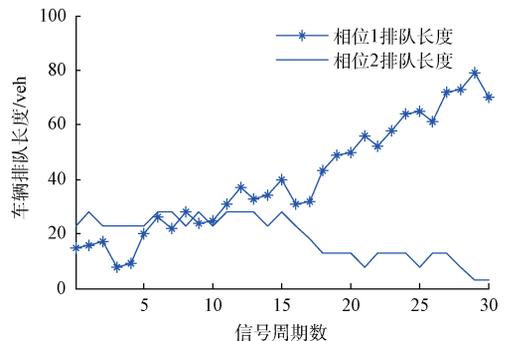
相位实际车辆排队长度 x'_n 及实际车辆到达率 d'_n ，计算出 e_x, e_d 。

③根据步骤(2)得到的 e_x, e_d ，经模糊决策处理得到当前相位优化参数 δ ，得到此周期实应分配的绿灯时间 $g'_1(k), g'_2(k)$ 。在执行过程中，迭代控制律受以下条件约束： $g_{\min} \leq \bar{g}_{n+1}(k) \leq g_{\max}$ ，若 $\bar{g}_{n+1}(k) \leq g_{\min}$ ，令 $\bar{g}_{n+1}(k) = g_{\min}$ ；若 $\bar{g}_{n+1}(k) \geq g_{\max}$ ，令 $\bar{g}_{n+1}(k) = g_{\max}$ 。

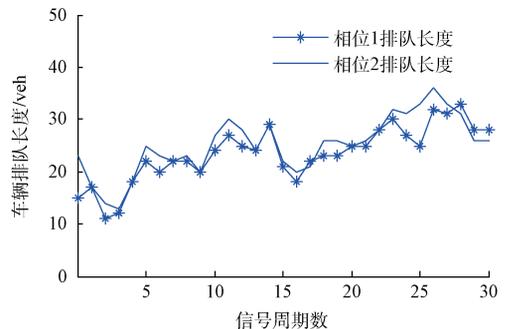
3.3 仿真分析

为简化仿真模型，本文针对两相位交叉口即饱和相位和非饱和相位进行分析，设南北直行为非饱和相位，东西直行为饱和相位。为验证算法的有效性，对本文的方法进行仿真，仿真时间为 30 个信号周期，设计仿真信号周期 $c = 50$ s，损失时间为 2 s，各信号初始配时为 $g_1 = g_2 = 28$ s；最小绿灯时间 $g_{\min} = 8$ s，最大绿灯时间 $g_{\max} = 40$ s；非饱和相位和饱和相位的初始排队长度分别为 $x_1(0) = 15$ ， $x_2(0) = 23$ ；饱和流率分别取 $s_1 = s_2 = 0.5$ ；相位 1 的车辆到达率由计算机在 $0 \sim 0.6$ veh/s 随机产生，相位 2 车辆到达率由计算机在 $0 \sim 0.4$ veh/s 随机产生， e_x 论域取 $[-20, 20]$ ， e_d 论域取 $[-0.6, 0.6]$ ，学习增益 $\gamma_{dc} = -0.31$ ， δ 论域取 $[-1, 1]$ 。

仿真结果如下图所示，其中图 3 分别是固定配时策略、基于排队均衡控制策略的各相位排队长度变化曲线，可以看出，在固定信号配时策略下，非饱和相位 2 排队长度逐渐减小，其平均排队长度 18.8 veh，而饱和相位排队长度保持持续增长趋势，平均排队长度为 40.3 veh，绿灯时间没得到合理利用；基于本文方法的信号控制策略中，每周期各相位



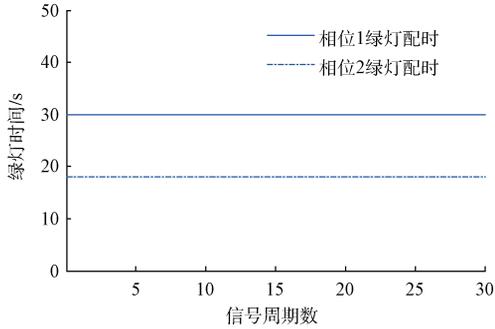
(a) 固定信号配时方案



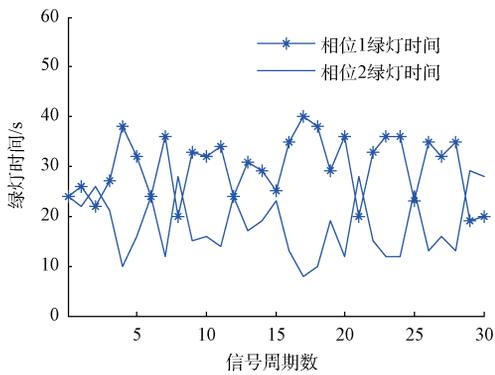
(b) 基于相位排队均衡的信号配时方案

图 3 各相位排队长度曲线

排队长度消散程度基本相同,饱和相位与非饱和相位平均排队分别为 25.09 veh 与 23.45 veh,绿灯时间得到了充分利用,实现了本文均衡控制目标;图 4 是基于固定配时策略及本文基于排队长度均衡的信号配时策略的各相位绿灯时间曲线,对比图 3、图 4 中的本文信号配时策略中排队长度和绿灯配时关系,可知当某相位排队长度交大时,相应绿灯时间会增加,排队长度下降时,相应绿灯时间会下降,实现了绿灯配时随车辆排队的变化而变化的目标。



(a) 固定信号配时方案



(b) 基于相位排队均衡的信号配时方案

图 4 各相位绿灯时间曲线

4 结 论

本文提出了一种基于排队均衡的交叉口信号配时方法,以迭代学习和模糊控制相结合的方式,用模糊控制方法处理交通系统输入的不确定性扰动,迭代学习控制使得信号配时随交通流的不断变化而变化,克服了定时控制不能随交通流变化的缺点,同时,该方法避免了交通系统输入的不确定性扰动,提高了信号配时的自适应能力,仿真结果验证了算法的有效性。

参考文献

- [1] 李瑞敏. 过饱和和交叉口交通信号控制研究现状与展望[J]. 交通运输工程学报, 2013(6): 119-126.
- [2] 钱喆,徐建闽. 基于线圈检测的过饱和和交通状态判别[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2013(8): 93-98.
- [3] 雷磊,吴洋,刘昱岗. 过饱和交叉口群系统建模及优化模型[J]. 计算机工程与应用, 2010(4): 26-28.

- [4] 杨文臣,张轮,何兆成. 城市单路口交通信号两级模糊优化控制与仿真[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2012,51(6): 41-47.
- [5] 卢凯,徐建闽,李林. 过饱和和交通状态下的停车延误调控模型[J]. 控制理论与应用, 2010(12): 1623-1630.
- [6] 柳祚满,洛晨,张军锋. 过饱和和干道交通信号协调控制方法研究[J]. 现代交通技术, 2014(2): 60-63,96.
- [7] TUBAISHAT M, PENG Z, QI Q, et al. Wireless sensor networks in intelligent transportation systems[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2009,9(3):287-302.
- [8] TACCONI D, MIORANDI D, CARRERAS I, et al. Using wireless sensor networks to support intelligent transportation systems[J]. AdHoc Networks, 2010, 8(5): 462-473.
- [9] 闫飞,田福礼,史忠科. 城市区域交通信号迭代学习控制策略[J]. 控制与决策, 2015, 30(8): 1411-1416.
- [10] 郑一辰,张毅,胡坚明. 一种基于迭代学习的自适应交通信号控制方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(6): 34-40.
- [11] 郝建根. 数据驱动控制方法在交通控制中的应用研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [12] 赵欢. 单信号交叉口绿灯时间无模型自适应控制[D]. 北京:北京交通大学,2009.
- [13] 郝建根,侯忠生,柳向斌. 基于多参数规划的单交叉口排队长度均衡控制[J]. 控制与决策, 2013(4): 595-599.
- [14] 唐益明,岳峰,吴玺,等. 面向 RR 算子的异蕴涵模糊控制器[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(8): 735-743.
- [15] 毕翔,韩江洪,刘征宇. 基于多特征相似性融合的隶属度函数研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(10): 835-841.
- [16] 石欣,李艳萍,高鹏,等. 基于隶属度的二次求精矢量跳距定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11): 2615-2621.

作者简介

张龙,毕业于河南理工大学,现为河南理工大学硕士研究生,主要研究方向为自动化与工业过程控制。

E-mail:laopige@126.com.

余发山,现任河南理工大学教授,博士生导师,主要研究方向为自动化与工业过程控制方向等。

康洪,毕业于河南城建学院,现为河南理工大学硕士研究生,目前主要研究方向为自动化工业过程控制。

王要东,毕业于河南理工大学,现为河南理工大学硕士研究生,目前主要研究方向为电力系统自动化。