

车流随机性对协调系统控制效果的影响

李媛^{1,2}, 龚晓芳³, 程延秋¹, 刘大鹏⁴, 黄新志²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 江西农业大学 园林与艺术学院, 江西 南昌 330045;

3. 盐城工学院 土木工程学院, 江苏 盐城 224051; 4. 江苏建筑职业技术学院 建筑工程管理学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:为了提高协调系统运行的稳定性及控制效果, 针对车流随机特性, 采用理论分析和仿真计算相结合的方式, 探讨车流速度波动和车流到达率波动 2 个因素对协调系统控制效果的影响机理。理论分析中, 将变动的车流速度转化为区间数形式, 根据单向协调相位差求取公式, 得到理想相位差的变动区间; 根据相位清空可靠度计算公式, 得到车流到达率波动与最佳周期、协调相位绿灯时间、车均延误时间、最大排队长度等的解析关系, 并进一步借助双向协调系统中求取相位差的数解法, 得到关于车流到达率波动方差的相位绿时差。仿真分析中, 利用 MATLAB 与 VISSIM 搭建仿真平台, 选取 2 个几何线形规则的信号交叉口, 制定模拟协调控制方案, 选取仅改变车流速度、仅改变车流到达率、同时改变车流速度和到达率这 3 种情况进行仿真, 以车均停车时间、平均排队长度、车均停车次数、车均延误时间为指标, 评价其对协调系统控制效果的影响。研究表明: 车流速度波动方差、车流到达率波动方差与控制效果均呈正相关关系, 车流速度波动的影响大于车流到达率波动的影响, 两者同时波动时不是简单的叠加关系, 而是相互抵消影响, 其控制效果介于 2 种情况之间; 仅车流到达率波动的情况下, 协调相位双侧车流到达率波动时, 控制效果优于单侧车流到达率波动; 车流处于自由流与拥挤流之间切换状态时, 控制效果优于拥挤流状态, 劣于自由流状态。

关键词: 交通工程; 协调系统; 车流随机性; 车流速度波动; 车流到达率波动

中图分类号: U491

文献标志码: A

Influence of traffic randomness on control effect of coordination system

LI Yuan^{1,2}, GONG Xiao-fang³, CHENG Yan-qiu¹, LIU Da-peng⁴, HUANG Xin-zhi²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Gardening Landscape Design, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China; 3. Civil Engineering Department, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, Jiangsu, China; 4. College of Construction Management, Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: In order to improve stability and control effect of coordination system, the influence mechanisms of traffic speed fluctuations and traffic arrival rate fluctuations on control effect of coordination system were discussed, aiming at traffic randomness through theoretical analysis and simulation calculation. In theoretical analysis, fluctuant traffic speed was transformed into interval numbers, change interval of idea phase difference was obtained based on calculation formula of one-way coordination phase difference. Analytical relationships among traffic arrival

rate fluctuation and optimal cycle, coordination phase green time, average traffic delay time, maximum queue length were gained based on calculation formula of phase empty reliability. Furthermore, based on numerical method of two-way coordination system phase difference, the phase green time-difference with respect to traffic arrival rate fluctuation variance was obtained. In simulation analysis, simulation platform was established by MATLAB and VISSIM. Two signal intersections with regular geometric alignment were chosen, and simulation scheme of coordination control was made. With the indexes consisted of average traffic parking time, average queue length, average traffic stops, average traffic delay time, influences of control effect of coordination system were evaluated in three situations that considering traffic speed fluctuations only, considering traffic arrival rate fluctuations only and considering both of which to make simulation. The results show that control effect is positively related to variance of traffic speed fluctuation and variance of traffic arrival rate fluctuation. The effect of traffic speed fluctuation is greater than that of traffic arrival rate fluctuation, both simultaneous fluctuation is not a simple superimposition relationship, but offset each other, so that control effect is between the two cases. In the case of only traffic arrival rate fluctuation, control effect of coordination phase bilateral traffic arrival rate fluctuation is better than that of unilateral traffic arrival rate fluctuation. When traffic flow is in the state of switch between free flow and congested flow, control effect is superior to the congested flow state, and inferior to the free flow state. 1 tab, 10 figs, 26 refs.

Key words: traffic engineering; coordination system; traffic randomness; traffic speed fluctuation; traffic arrival rate fluctuation

0 引言

城市交通拥堵现象已经成为当下关注热点,协调控制可以有效缓解此现象,然而协调系统的控制效果受到车流随机性的影响,探究其影响机理可为提高协调系统运行的稳定性及控制效果提供支持。

杨佩昆等探究了城市车流在路段中行驶的离散模型,分析了车流速度与流量的关系,并对公路车流进行了仿真模拟,得到了车流模型^[1-2];邵长桥等分析了信号交叉口车头时距分布与车流到达分布之间的对应关系,探讨了车流到达规律^[3-7];吕斌等针对信号控制交叉口车流到达率的随机特性,引入相位清空可靠度概念,并基于概率论研究了相位清空可靠度与周期时长、相位绿灯时间的定量关系^[8];Bie等分析了车流的离散特性,并借助多智能体进行了信号协调控制^[9];卢凯等针对实际行驶过程中车速的不确定性,分析了行驶车速变化对交通信号绿波协调控制方案实际效果的影响,确定了行驶速度的正常变化区间^[10];刘灿齐等运用流体动力学理论,模拟分析了信号灯交叉口车流排队的变化特性,并利用密度分布模型推导、构建了离散车队末尾在下游信号灯被拦截车辆的表达式^[11-12];王殿海等利用

交通调查数据,分析并改进了经典车队模型,进而构建了基于无变换正态分布的车队离散模型^[13];卢凯等还对协调控制系统进行了相位优化设计,构建了一种新型道路协调控制相位差模型,并利用 MATLAB 进行仿真计算,实现了相位差的优化^[14];魏朗等提出交叉口信号状态位差概念,设计了信号系统控制的比例信号相位差方案,同时构建了信号周期及有效绿信比优化的设计模型^[15]。

综上所述,目前关于车流随机性对协调系统控制效果的研究较少,已有研究仅考虑车流速度或车流到达率波动单一因素对单点交叉口控制效果的影响,且停留在理论阶段。鉴于此,本文针对车流随机特性,采用理论分析和仿真计算相结合的方式,分别探讨车流速度波动、车流到达率波动对协调系统协调控制效果的影响。理论分析中,通过引入区间数概念分析车流速度波动在单向协调系统对理想相位差的影响,借助相位清空可靠度指标,分析车流到达率波动方差与信号最佳周期、协调相位绿灯时间、车均延误时间、最大排队长度的关系,以及在数解法中对双向协调系统相位差的影响。仿真计算中,借助 MATLAB 与 VISSIM 搭建仿真平台,选取干线协调系统,分 3 种情形揭示了车流速度波动、车流到

达率波动对协调控制效果影响的变化规律。

1 理论分析

车流随机性主要表现为车流速度、车流到达率的不确定性,对于协调系统而言,两者只能在较小范围内波动^[16-17]。

1.1 速度分析

协调系统中车流速度 v 波动较小,通过长期数据统计可以确定其波动范围。借助区间数来表述覆盖 80% 的车流速度 $v = [v_{\min}, v_{\max}]$, 其中 $v_{\min}$ 、 $v_{\max}$ 分别为速度区间下限和上限。则协调系统单向协调时的理想相位差 o 为

$$o = \frac{l - l_p}{v} = \frac{l - l_p}{[v_{\min}, v_{\max}]} = [o_{\min}, o_{\max}] \quad (1)$$

式中: $o_{\min}$ 、 $o_{\max}$ 分别为相对理想相位差的最小值、最大值(m); l 为交叉口间同向停车线距离(m); l_p 为上周期滞留车流排队长度(m)。

由式(1)可知,在理想条件下,相邻信号交叉路口的相对相位差是一个区间数,即随车流速度变化而实时变化才能达到理论最佳控制效果。

1.2 流量分析

协调系统中的端点交叉口控制着车流进入协调系统,车流到达率的变化是协调系统中车流变化的关键因素。信号交叉口某相位绿灯时间能够放行本周期内到达车流的概率,可由相位清空可靠度 α_i (i 为相位, $i=1, 2, \dots, m, \dots, n$) 确定。

设某协调系统端点交叉口相位 i , q_i 、 s_i 、 g_i 分别为协调方向关键进口道车流到达率(pcu/s)、饱和流率(pcu/s)与绿灯时间(s); C 为交叉口信号理论最佳周期时长(s)。端点交叉口协调相位清空概率 $p(\cdot)$ (协调相位的绿灯时间能够放行所有该周期内到达交通流的概率)为^[18]

$$p(Cq_i \leq g_i s_i) = \alpha_i \quad (2)$$

$$C = \sum_{i=1}^n g_i + L \quad (3)$$

$$L = \sum_{i=1}^n (H - I_i - A) \quad (4)$$

$$\bar{d} = \frac{s_i (C - g_i)^2}{2C(s_i - q_i)} + \frac{C(q_i/s_i)^2}{2q_i(1 - q_i/s_i)} \quad (5)$$

$$l_{\max} = \frac{q_i C (1 - g_i/C) (1 + k/k_j)}{k_j} \quad (6)$$

式中: L 为每周期总损失时间(s); A 为每相位黄灯时长(s); I_i 为相位 i 的绿灯间隔时长(s); H 为每相位启动损失时间(s); $\bar{d}$ 为相位 i 进口道的平均车延误时长(s); k_j 为每相位上游的车流阻塞密度

(pcu/km); k 为每相位上游车流到达率对应的车流密度(pcu/km); $l_{\max}$ 为协调相位 i 方向交叉口红灯期间内最大排队长度(m)。

车流到达率是随机变量,相关研究表明其近似服从 (μ_i, σ_i^2) 正态分布 (μ_i 、 σ_i^2 分别为车流到达率的均值和方差),则式(2)变为

$$p\left(\frac{q_i - \mu_i}{\sigma_i} \leq \frac{g_i s_i / C - \mu_i}{\sigma_i}\right) = \alpha_i \quad (7)$$

式中: $\frac{q_i - \mu_i}{\sigma_i} \sim N(0, 1)$, 即服从标准正态分布。

根据标准正态分布表得到 $\alpha_i \in [0, 1]$ 时

$$C = \frac{g_i s_i}{\mu_i + \sigma_i \Phi^{-1}(\alpha_i)} \quad (8)$$

式中: $\Phi^{-1}(\alpha_i)$ 为标准正态分布函数 $\Phi(\alpha_i)$ 的反函数。

将式(8)代入式(3),可得

$$\sum_{i=1}^n g_i - \frac{g_i s_i}{\mu_i + \sigma_i \Phi^{-1}(\alpha_i)} = -L \quad (9)$$

令 $B_i = \frac{s_i}{\mu_i + \sigma_i \Phi^{-1}(\alpha_i)}$, 则式(9)变为

$$g_1 + \sum_{i=2}^{n-1} g_i (1 - B_i) + g_n = -L \quad (10)$$

采用高斯消元法求解式(10),得到

$$g_1 = \frac{L \prod_{i=2}^n B_i}{\prod_{i=1}^n B_i - \prod_{i=2}^n B_i - \prod_{m=2}^n \prod_{i=1, i \neq m}^n B_i} \quad (11)$$

$$g_i = \frac{g_1 B_1}{B_i} \quad (12)$$

利用式(8)、式(11)、式(12) 确定 C 、 g_i 、 α_i 。当给定 α_i 时,协调相位 i 的最佳周期、绿灯时长、车均延误时间、最大排队长度均可求得。表明车流到达率随机性会影响交叉口的最佳周期、绿灯时间^[19-20]。分析式(5)、式(6)、式(8)、式(12),可以发现 g_i 、 C 、 $\bar{d}$ 、

$l_{\max}$ 是关于 $\prod_{i=1}^n \sigma_i$ 的函数,即

$$g_i = g_i\left(\prod_{i=1}^n \sigma_i\right) \quad (13)$$

$$C = C\left(\prod_{i=1}^n \sigma_i\right) \quad (14)$$

$$l_{\max} = C\left(\prod_{i=1}^n \sigma_i\right) - g_i\left(\prod_{i=1}^n \sigma_i\right) \quad (15)$$

$$\bar{d} = m \frac{C\left(\prod_{i=1}^n \sigma_i\right) - g_i\left(\prod_{i=1}^n \sigma_i^2\right)}{C\left(\prod_{i=1}^n \sigma_i\right)} + nC\left(\prod_{i=1}^n \sigma_i\right) \quad (16)$$

由上述分析可知,车流到达率随机特性不仅影响着交叉口的最佳周期、协调相位绿灯时长,而且影

响着进口道的车均延误及最大排队长度。交叉口的相位数也是一个关键的影响因素^[21]。

双向协调控制系统中绿时差的求解方法是数解法^[22-23],其具体求解如表 1 所示。

表 1 绿时差
Tab. 1 Difference of green time

交叉口	奇数交叉口	偶数交叉口
绿信比 λ	g_i/C	
绿时差	$1-0.5\lambda$	$0.5-0.5\lambda$

基于最佳周期时长、协调相位绿灯时长与车流到达率波动方差的关系,可由表 1 分析绿时差受车流到达率波动方差的影响。

2 仿真分析

借助 VISSIM 对协调系统进行仿真,提取相应评价指标,进一步分析车流随机性对协调系统控制效果的影响。

选取 2 个几何线形规则的信号交叉口,测定同侧停车线距离为 400 m,车流速度约为 40 km/h。求得系统周期为 72 s,各个交叉口协调相位绿灯时间均为 37 s,各交叉口协调相位的进口道平均流量为 1 600 pcu/h,直行、右转、左转车流比例约为 18 : 1 : 1;非协调相位进口道平均流量为 500 pcu/h,直行、右转、左转车流比例为 17 : 2 : 1,均为两相位控制,忽略 2 个信号交叉口路段间车流的转出与汇入。提取 3 000~3 600 s 间运行稳定且与实际运行状况较为吻合的车流控制效果。分别选取 2 个交叉口的平均排队长度、车均延误时间、车均停车时间、车均停车次数、通过车辆数等信息后,计算系统平均排队长度、车均延误时间、车均停车时间、车均停车次数 4 个评价指标,其计算公式为

$$E = \sum_{i=1}^n E_i q_i / q \tag{17}$$

$$q = \sum_{i=1}^n q_i \tag{18}$$

$$\bar{l} = \sum_{i=1}^n \bar{l}_i / n \tag{19}$$

式中: E 为协调系统评价指标,如车均延误时间、车均停车时间、车均停车次数等; E_i 为相位 i 的协调系统评价指标; q 为车流到达率; $\bar{l}$ 为协调系统在所测时间内的平均排队长度; $\bar{l}_i$ 为干线协调系统内相位 i 在所测时段内的平均排队长度;本文中 $n=2$ 。

2.1 车流速度波动

根据相关研究,车流速度分布符合正态分

布^[8,24-25]。利用 MATLAB 分别生成速度方差为 0、20、40、60、80 的随机数各 100 个,分别仿真 3 600 s,取 3 000~3 600 s 间的 4 个指标进行处理,各指标与速度方差的关系如图 1 所示。

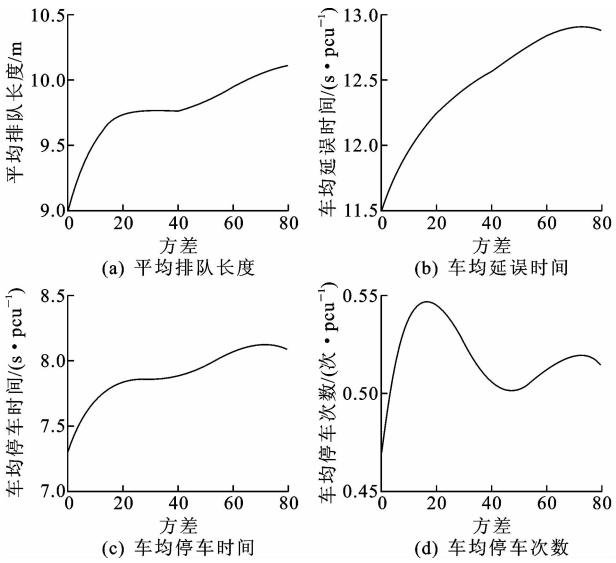


图 1 各指标与速度方差的关系

Fig. 1 Relationship between each index and velocity variance

由图 1 可知,平均排队长度、车均延误时间、车均停车时间随速度方差变化的趋势均为平稳上升,在 $[0,20]$ 区间内,增长较快,在 $(20,80]$ 区间内,增长放缓。而车均停车次数随速度方差变化的趋势不同,在 $[0,20]$ 区间内迅速增大,在 $(20,80]$ 区间内先减小再增大,在速度方差约为 50 时达到本区间内最小,但仍大于速度方差为 0 时的值,表明车流速度波动导致协调系统的控制效果下降,并且车速波动越大,控制效果越差。车均延误时间与车均停车次数既相关又有所不同,协调系统中,车均延误时间降低,车均停车次数增加。

当选定方差值后,根据协调系统中车流速度的分布规律,可计算其速度适用范围,车流速度近似符合正态分布^[24-26],即

$$Q = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} f(v) dv \tag{20}$$

式中: Q 为车流速度分布概率。

依据正态分布的性质,可求得多组 $[v_{\min}, v_{\max}]$ 。为尽量缩小车流速度变化范围,依据正态分布的性质有

$$(v_{\min} + v_{\max}) / 2 = u \tag{21}$$

式中: u 为任一组速度 $[v_{\min}, v_{\max}]$ 变化的平均值。

由式(21)可知,速度 v 在置信水平 $1-Q$ 的置信区间为 $(\bar{v} - \frac{\sigma}{\sqrt{q}} Z_{Q/2}, \bar{v} + \frac{\sigma}{\sqrt{q}} Z_{Q/2})$,其中, $\bar{v}$ 为平均车

速, σ 为车速度的标准差, $Z_{Q/2}$ 为分布参数。

由此可知, 协调系统的速度变化范围为 $\left(\bar{v} - \frac{\sigma}{\sqrt{q}} Z_{Q/2}, \bar{v} + \frac{\sigma}{\sqrt{q}} Z_{Q/2}\right)$ 。

2.2 车流到达率波动

针对协调系统中协调方向两端车流波动, 多次仿真分析其控制效果变化, 依据概率知识, 求在满足控制效果前提条件下车流到达率变化区间, 可提高协调系统的稳定性。

利用 MATLAB 分别生成流量方差为 0、800、1 600、2 400、3 200 的随机数 100 个, 分别仿真 3 600 s, 提取 3 000~3 600 s 时间段内的各指标, 计算处理后, 得出单侧车流到达率波动(图 2)、双侧车流到达率波动(图 3)的各指标与流量方差的关系。

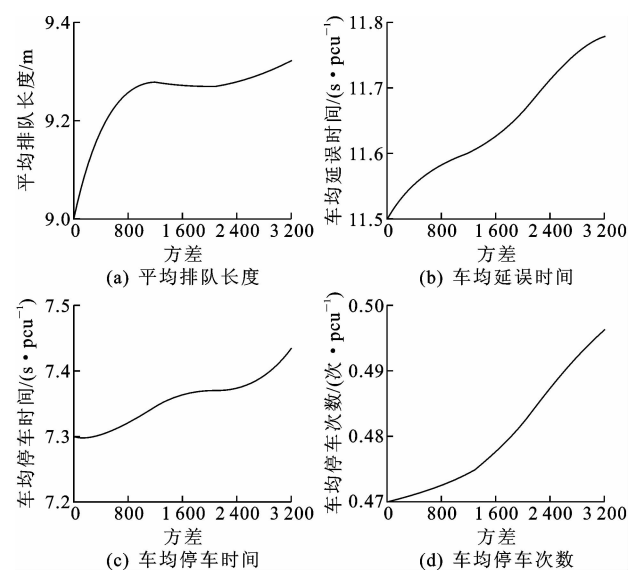


图2 各指标与流量方差的关系(单侧车流到达率波动)

Fig. 2 Relationship between each index and flow variance (Unilateral traffic arrival rate fluctuation)

由图 2、图 3 可知, 单侧主线车流波动时, 平均排队长度、车均延误时间、车均停车时间、车均停车次数随流量方差变化的趋势大体相同, 均平稳迅速上升。车流到达率波动导致协调系统的控制效果下降, 且车流到达率波动越大, 控制效果越差。

主线车流到达率单侧波动与双侧波动对协调系统控制效果的影响趋势相同, 将两者进行对比分析, 进一步挖掘两者间的关系, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 主线车流双侧同步波动(流量相同)时的控制效果优于主线车流单侧波动(流量不同)时的控制效果。

2.3 车流速度及车流到达率同时波动

在交通流理论中, 格林希尔兹速度-流量关系如

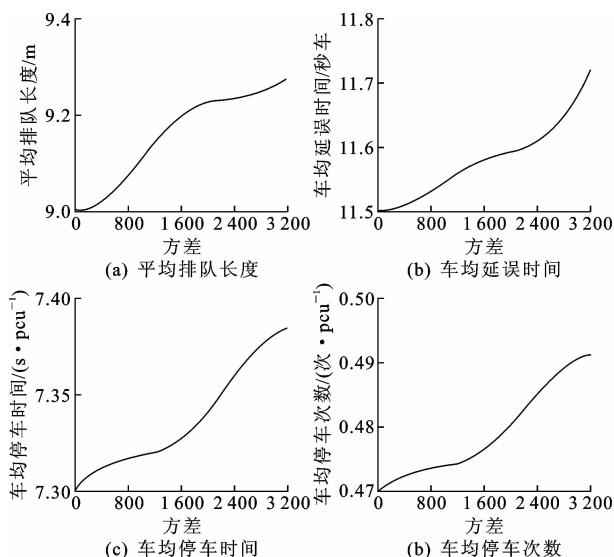


图3 各指标与流量方差的关系(双侧车流到达率波动)

Fig. 3 Relationship between each index and flow variance (Bilateral traffic arrival rate fluctuation)

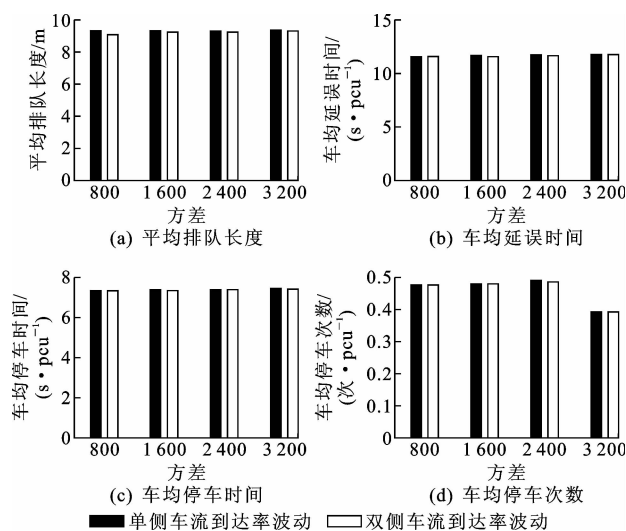


图4 两种车流量波动控制效果对比

Fig. 4 Comparisons of two traffic flow control effects

下页图 5 所示。图 5 中, v_f 为自由流速度。在自由流状态下, 车流量随车流密度增大而增大; 在拥挤流状态下, 车流量随车流速度增大而减小。自由流与拥挤流的分界处, 车流量达到最大。当车流量在最大车流量附近波动时, 2 个车流速度可与之对应。针对协调系统, 首先要对整个系统的车流状况进行判别^[14-15]。仿真时, 车流量与车流速度两者波动匹配需分开讨论。

2.3.1 随机匹配

当车流到达率在最大流量附近波动时, 车流状态在自由流与拥挤流两者间切换, 无法识别车流状态, 车流速度方差与车流量波动方差按照 0-0(组合

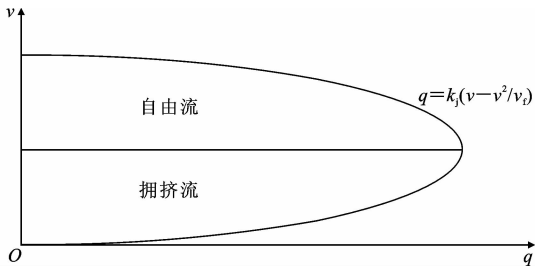


图5 车流速度与车流量的关系

Fig. 5 Relationship between traffic velocity and traffic flow

0)、20-800(组合 1)、40-1 600(组合 2)、60-2 400(组合 3)、80-3 200(组合 4)(车流速度方差分别取 0、20、40、60、80;车流量波动方差分别取 0、800、1 600、2 400、3 200)随机匹配,分别仿真,结果如图 6 所示。

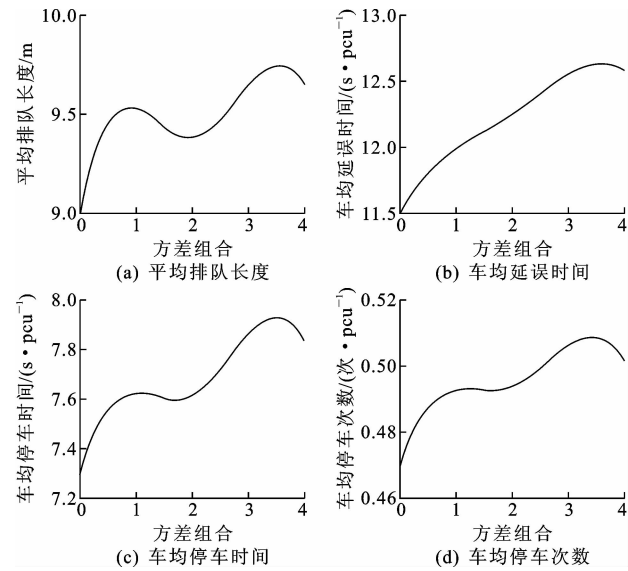


图6 各指标与方差组合的关系(随机匹配)

Fig. 6 Relationship between each index and variance combination (random matching)

由图 6 可知,平均排队长度、车均停车时间、车均停车次数随方差组合变化的趋势大体相同,在车流量方差[0,800]区间内增长较快,在(800,1 600]区间内下降,在 1 600 时达到最小,但大于方差组合 0 时的值。车均延误时间随方差组合增大而增大。说明车流速度波动与车流到达率波动随机匹配会降低协调系统的控制效果,且波动越大,控制效果越差。车均延误时间与车均停车次数既相关又有所不同。协调系统中,车均延误时间增加,车均停车次数有减少的几率(除去方差组合 0 时的情况)。

2.3.2 自由流匹配

车流到达率远小于最大流量且车流始终处于自由流状态时,车流速度方差与车流量波动方差按照 0-0(组合 0)、20-800(组合 1)、40-1 600(组合 2)、60-

2 400(组合 3)、80-3 200(组合 4)的自由流匹配(即速度大,流量小;速度小,流量大)分别仿真,结果如图 7 所示。

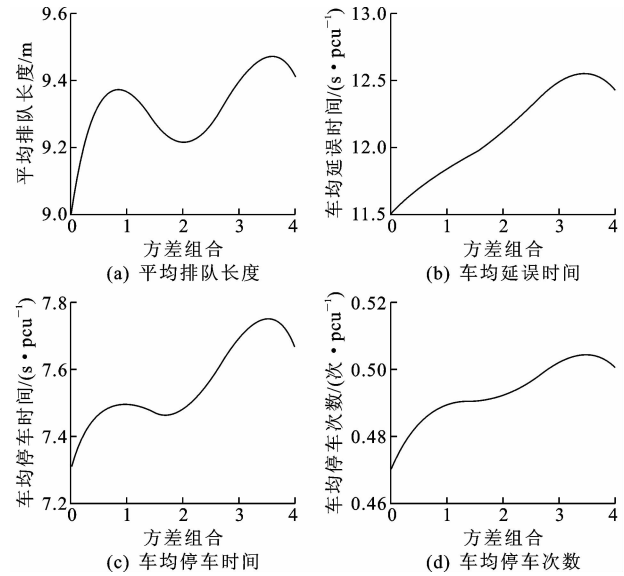


图7 各指标与方差组合的关系(自由流匹配)

Fig. 7 Relationship between each index and variance combination (free flow matching)

由图 7 可知,平均排队长度、车均停车时间随方差组合变化的趋势一致,而车均延误时间、车均停车次数变化趋势一致。4 个指标虽在个别区间内呈下降趋势,但其最小值仍大于方差组合 0 时的值。总体而言,各指标随方差组合的增大而增大。车流速度与车流到达率的波动方差组合导致协调系统的控制效果下降,且波动越大,控制效果越差。

2.3.3 拥挤流匹配

车流到达率远小于最大流量且车流始终处于拥挤流状态时,车流速度与车流量波动方差按照 0-0(组合 0)、20-800(组合 1)、40-1 600(组合 2)、60-2 400(组合 3)、80-3 200(组合 4)的拥挤流匹配(即速度大,流量大;速度小,流量小)分别仿真,结果如下页图 8 所示。

由图 8 可知,4 个指标虽在个别区间内呈下降趋势,但其最小值仍大于方差组合 0 时的值。总体而言,各指标随方差组合的增大而增大。车流速度与车流到达率的波动导致协调系统的控制效果下降,且波动越大,控制效果越差。

2.3.4 三种状态对比

3 种交通流状态下,车流速度与车流到达率波动对协调系统的控制效果对比如图下页 9 所示。

由图 9 可知,平均排队长度、车均延误时间、车均停车时间、车均停车次数在 3 种交通流状态下的

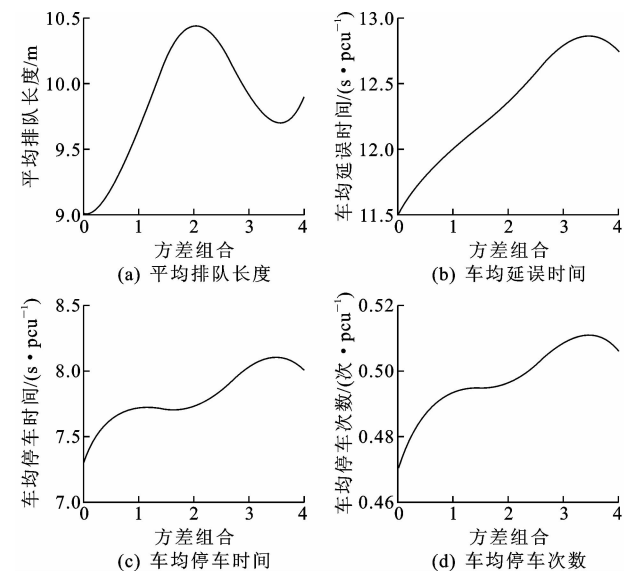


图 8 各指标与方差组合的关系(拥挤流匹配)
Fig. 8 Relationship between each index and variance combination (congested flow matching)

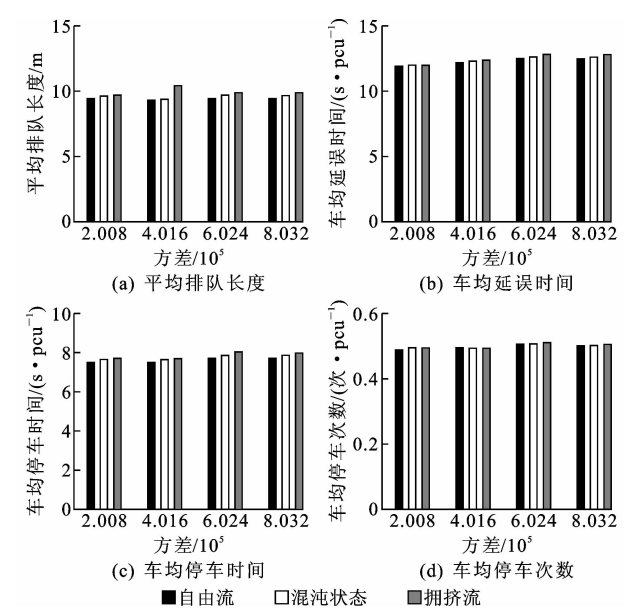


图 9 三种车流状态下控制效果对比
Fig. 9 Comparisons of control effects under three conditions traffic flow

变化趋势一致。在车流处于自由流与拥挤流之间切换时(图 9 的混沌状态),协调控制效果优于拥挤流状态,劣于自由流状态。

2.4 三种情况对比

进一步分析车流速度、车流达到率波动对协调系统控制效果的影响,选取仅车流速度波动、仅车流到达率双侧波动、车流速度与车流到达率在自由流状态下同时波动这 3 种情况进行对比分析,结果如图 10 所示。

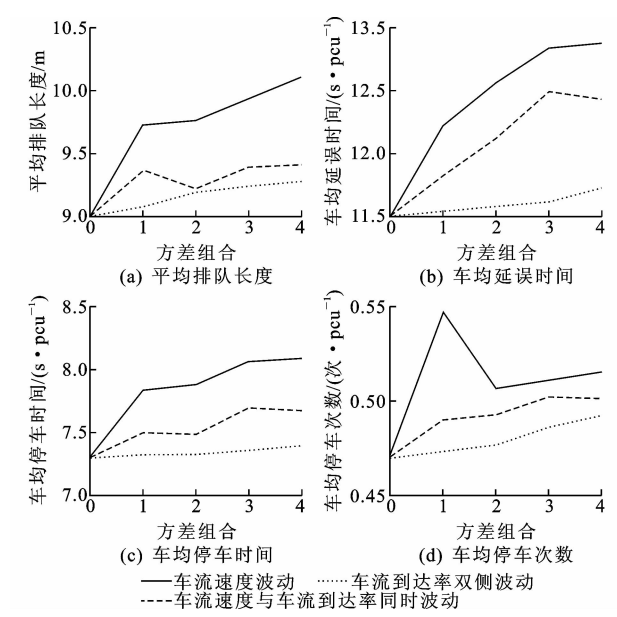


图 10 三种情况下控制效果对比
Fig. 10 Comparisons of control effects under three conditions

均停车时间、车均停车次数在 3 种情况下的变化趋势一致。车流速度与车流到达率在自由流状态下同时波动的控制效果优于仅车流速度波动时的控制效果,劣于仅车流到达率双侧波动时的控制效果。

上述分析表明,协调系统的控制效果受车流速度波动的影响大于车流到达率波动,当两者同时波动时不能简单叠加,两者的影响可能相互抵消,而使结果介于 2 种情况之间。

3 结 语

(1)车流速度波动方差与控制效果正相关,即车流速度波动方差越大,控制效果越差。

(2)车流到达率波动方差与控制效果正相关,且双侧车流到达率波动时的控制效果优于单侧车流到达率波动。

(3)在车流处于自由流与拥挤流之间切换时,协调控制效果优于拥挤流状态,劣于自由流状态。

(4)协调系统的控制效果受车流速度波动的影响大于车流达到率波动的影响,当两者同时波动时不能简单叠加,两者的影响会相互抵消,使控制效果介于 2 种情况之间。

(5)下一步研究将分析各时段的道路车流速度和到达率波动,制定分时段变动的协调控制方案。

参考文献:

References:

[1] 杨佩昆,黄文忠,车丕明.城市道路车队离散过程中的

- 交通流模型[J]. 同济大学学报:自然科学版,1994,22(3):294-299.
- YANG Pei-kun, HUANG Wen-zhong, CHE Pi-ming. Traffic flow model in consideration of vehicle platoon dispersion on urban roads[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1994, 22(3): 294-299.
- [2] 邵长桥. 平面信号交叉口延误分析[D]. 北京:北京工业大学,2002.
- SHAO Chang-qiao. Analysis of delay at urban signalized intersections[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2002.
- [3] 邵长桥,杜晓辉,李光芹. 信号交叉口排队离散车头时距统计分析[J]. 公路交通科技,2003,20(4):76-79.
- SHAO Chang-qiao, DU Xiao-hui, LI Guang-qin. Queuing vehicle headway statistic analysis at signalized intersection[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(4): 76-79.
- [4] 刘灿齐,周溪召,刘安. 一些常用的车头时距分布所对应的到达分布[J]. 公路交通科技,1995,12(3):53-59.
- LIU Can-qi, ZHOU Xi-zhao, LIU An. The arrival distributions corresponded by some common headway distributions[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 1995, 12(3): 53-59.
- [5] 赵星,任刚. 信号交叉口车头时距特性分析[J]. 交通运输工程与信息学报,2010,8(1):103-108.
- ZHAO Xing, REN Gang. Analysis of vehicle headway characters at a signalized intersection[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2010, 8(1): 103-108.
- [6] 袁凯,关伟. 城市快速路交通流车头时距分布特性分析[J]. 交通运输系统工程与信息,2011,11(6):68-73.
- YUAN Kai, GUAN Wei. Time-headway distribution features on urban freeway[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(6): 68-73.
- [7] 蒋阳升,韩世凡,吴婷,等. 信号交叉口车辆到达规律分析[J]. 交通运输工程与信息学报,2015,13(1):1-6.
- JIANG Yang-sheng, HAN Shi-fan, WU Ting, et al. Analysis of vehicle arrival law at signalized intersection[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2015, 13(1): 1-6.
- [8] 吕斌,牛惠民. 信号控制交叉口可靠性建模与仿真[J]. 交通运输系统工程与信息,2011,11(6):45-50.
- LU Bin, NIU Hui-min. Reliability modeling and simulation of signalized intersections[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(6): 45-50.
- [9] BIE Y M, WANG D H, MA D F, et al. A distributed algorithm for signal coordination of multiple agents with embedded platoon dispersion model[J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2011, 27(3): 311-315.
- [10] 卢凯,吴焕,杨兴,等. 绿波协调控制方案的速度区间适应性分析与评价[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2014,42(5):60-66,83.
- LU Kai, WU Huan, YANG Xing, et al. Analysis and evaluation of adaptability to velocity band for green wave coordination control scheme[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2014, 42(5): 60-66, 83.
- [11] 刘灿齐,杨佩昆. 车队密度散布模型及在车队截尾问题上的应用[J]. 中国公路学报,2001,14(1):89-91.
- LIU Can-qi, YANG Pei-kun. Diffusion model of density of traffic platoon and signal coordinate control[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(1): 89-91.
- [12] 刘灿齐,杨佩昆. 信号灯交叉口车队散布模型与信号灯协调控制[J]. 同济大学学报:自然科学版,1996,24(6):636-641.
- LIU Can-qi, YANG Pei-kun. Diffusion models of traffic platoon on signal-intersection and control of coordinated signals[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1996, 24(6): 636-641.
- [13] 王殿海,李凤,宋现敏. 一种新的车队离散模型及其应用[J]. 吉林大学学报:工学版,2009,39(4):891-895.
- WANG Dian-hai, LI Feng, SONG Xian-min. A new platoon dispersion model and its application[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(4): 891-895.
- [14] 卢凯,徐建闽. 干道协调控制相位差模型及其优化方法[J]. 中国公路学报,2008,21(1):83-88.
- LU Kai, XU Jian-min. Offset model for arterial road coordinate control and its optimization method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 83-88.
- [15] 魏朗,陈荫三,饭田恭敬. 城市主干道交通信号群系统控制的参数优化设计模式及其模拟系统开发[J]. 交通运输工程学报,2001,1(1):72-76.
- WEI Lang, CHEN Yin-san, LIDA Y. The optimal offsets pattern and development of simulation in signals control system on urban main road[J]. Journal of

- Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(1): 72-76.
- [16] 李 康,吕 斌,孙玮玮.基于协调效益的交通子区划分方法研究[J].公路,2016(3):110-114.
LI Kang, LU Bin, SUN Wei-wei. Research on traffic sub-area divisions based on coordinate benefit[J]. Highway, 2016(3):110-114.
- [17] 李 康.干线协调控制系统子区划分问题研究[D].兰州:兰州交通大学,2016.
LI Kang. Research on traffic sub-area divisions in arterial coordination control system [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [18] 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.
- [19] 徐庆增,杨美艳.拥塞车流区疏散优化模型仿真研究[J].计算机仿真,2016,33(3):155-158.
XU Qing-zeng, YANG Mei-yan. Simulation and research on evacuation optimization model in congested traffic flow area[J]. Computer Simulation, 2016, 33(3):155-158.
- [20] 马旭辉.城市道路交通网络过饱和状态信号控制方法研究[D].北京:北京交通大学,2016.
MA Xun-hui. Research on signal control for oversaturated state of urban road traffic networks[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [21] 孙景昊,关 楠,邓庆绪,等.城市交通网络信号控制系统的实时演算模型[J].软件学报,2016,27(3): 527-546.
SUN Jing-hao, GUAN Nan, DENG Qing-xu, et al. Modeling urban traffic control systems from the perspective of real time calculus[J]. Journal of Software, 2016, 27(3):527-546.
- [22] 冯远静,单 敏,乐浩成,等.绿波协调控制的子区动态划分算法[J].控制理论与应用,2014,31(8): 1034-1046.
FENG Yuan-jing, SHAN Min, LE Hao-cheng, et al. Subarea dynamic division algorithm based on green wave coordinated control[J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(8):1034-1046.
- [23] 宋春跃,王 慧,李 平.基于成本车流模型的城市交叉路口优化控制[J].控制理论与应用,2004,21(4): 541-545.
SONG Chun-yue, WANG Hui, LI Ping. Optimization control of urban intersection based on vehicle flow cost model[J]. Control Theory & Applications, 2004, 21(4):541-545.
- [24] 楼小明,钟文豪,李宗平.一种新的基于细胞模型车流模拟方法[J].公路交通科技,2013,30(5):103-111.
LOU Xiao-ming, ZHONG Wen-hao, LI Zong-ping. A novel traffic flow simulation method based on cell transmission model [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(5):103-111.
- [25] 周 煜,余朝蓬,王江锋,等.基于模糊模型的跟驰车流特性研究[J].公路交通科技,2009,26(9):116-119,124.
ZHOU Yu, YU Zhao-peng, WANG Jiang-feng, et al. Research on characteristics of car-following based on fuzzy model[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(9):116-119,124.
- [26] 花 伟,林柏梁.一种新的混合车流下的元胞自动机交通流模型[J].系统仿真学报,2006,18(6): 1431-1433.
HUA Wei, LIN Bo-liang. New cellular automaton traffic model with mixed traffic flow[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(6):1431-1433.