

高速公路收费站与平面交叉口联动控制方法

雷青¹,王昭勇¹,吴玉荣²,江维维^{3*},骆中斌³

(1.贵州省铜仁公路管理局,贵州 铜仁 554300;2.贵州省公路局,贵州 贵阳 550081;

3.招商局重庆交通科研设计院有限公司,重庆市 400067)

摘要:为解决高速公路收费站与平面交叉口通行能力不匹配导致车辆排队溢出的问题,该文通过分析收费站与平面交叉口之间的交通运行特征,结合车辆变道行为,给出最大排队长度计算公式。考虑因收费站与平面交叉口间距过近而导致两者之间交通运行存在强耦合关系,因此建立一个统一的联动控制优化模型。研究表明:若平面交叉口衔接方向排队长度超过允许的最大排队长度,部分车辆难以寻找到合适的变道机会而停车等待,破坏了收费站与平面交叉口稳定的运行状态;联动控制在3种流量方案(方案2、4、6)中相较于常规控制,车均延误分别降低了6.48%、13.43%、10.46%。

关键词:交通工程;联动控制;非线性规划;收费站;邻接交叉口

中图分类号:U491.5

文献标志码:A

Linkage Control Method for Expressway Toll Stations and Plane Intersections

LEI Qing¹, WANG Zhaoyong¹, WU Yurong², JIANG Weiwei^{3*}, LUO Zhongbin³

(1.Tongren Highway Administration Bureau of Guizhou Province, Tongren, Guizhou 554300,China; 2.Guizhou Provincial Highway Bureau, Guiyang, Guizhou 550081,China; 3. China Merchants Chongqing Communications Research & Design Institute Co.,Ltd.,Chongqing 400067, China)

Abstract: In order to solve the problem of vehicle queuing overflow caused by the mismatch between the expressway toll stations and the capacity of plane intersections, the formula for calculating the maximum queue length was given by analyzing the traffic operation characteristics between toll stations and plane intersections and considering vehicles' lane-changing behavior. Due to the strong coupling of the traffic operation between toll stations and plane intersections caused by a short distance between them, a unified linkage control optimization model was established. The research shows that if the queue length in the connecting direction of the plane intersections exceeds the allowable maximum queue length, some vehicles find it difficult to find a suitable lane-changing opportunity and thus will stop and wait, which affects the stable operation state of the toll stations and plane intersections. Compared with the conventional control, the linkage control reduces the average vehicle delay by 6.48%, 13.43%, and 10.46% in three traffic schemes (schemes 2, 4, and 6) respectively.

Keywords: traffic engineering; linkage control; nonlinear programming; toll station; adjacent intersection

0 引言

随着高速公路网不断加密,临近城区高速公路受道路用地条件限制,高速公路收费站与平面交叉口间距过近现象越来越频繁,且此类收费站交通需求一般

较大,容易形成排队导致排队溢出,破坏收费站与平面交叉口稳定的运行状态。李祎艺^[1]结合排队论和VISSIM仿真给出了收费车道数与平面交叉口进出口车道数的匹配关系,以确保道路衔接的顺畅性。

但实际工程中收费站与衔接城市道路通常是单

收稿日期:2024-07-06(修改稿)

基金项目:贵州省公路局科技项目(编号:2024QLK09)

作者简介:雷青,男,高级工程师.E-mail:2215970721@qq.com

*通信作者:江维维,男,工程师.E-mail:351733272@qq.com

独设计和单独控制的,其所设计的车道数并不完全匹配,运营阶段容易存在通行瓶颈导致排队。已有研究主要关注收费站车道数配置与车道开放^[2-4],崔洪军等^[5]以运营成本和排队长度最小化为目标建立优化模型,以寻找最佳的收费车道启用方案;宋浪等^[6]针对近城高速公路收费站存在潮汐交通的特征,提出了可调整收费功能与收费方向的车道控制方案,进而建立统一的车道开放优化模型,以匹配收费站出入口交通需求;Neuhold等^[7]结合流量预测算法分配收费车道,确保了收费站车道控制更加科学合理。其他学者则对收费站广场设计^[8]、匝道控制^[9]、智慧收费^[10]、收费站与互通立交之间总体设计^[11]等进行研究,以提升收费站通行效率。

目前快速路出入口匝道与平面交叉口联动控制的相关研究已较为成熟^[12-15],然而快速路出入口匝道与高速公路收费站交通运行存在明显区别,无法将上述联动控制策略直接用于收费站。沈照庆等^[16]针对主线收费站与平面交叉口净距进行研究,结合中国交通运行状况给出了相应的推荐值;刘伟铭等^[17]提出了一种收费站与平面交叉口协同控制方法,但排队长度约束中并没有考虑车辆变道及展宽段、渐变段交通行为影响,在此基础上,刘伟铭等^[18]进一步探讨了收费站与平面交叉口的半感应协同控制。

综上所述,关于收费站与平面交叉口联动控制的相关研究还有所不足,也没有考虑到收费站与平面交叉口之间车辆变道对排队长度的影响。为此,本文提出一种高速公路收费站与平面交叉口联动控制方法,通过分析车辆变道行为给出最大排队长度计算公式,进而将其考虑到平面交叉口信号配时中,建立统一的优化模型,以避免车辆排队溢出,提升收费站与平面交叉口的通行效率。

1 联动控制方法

高速公路收费站与平面交叉口连接区段如图1所示,交叉口一个方向(本文统一考虑为西向)的进出口连接收费站出入口,导致两者之间交通运行存在强耦合关系。其中: L_1 为西向进口道展宽段长度(m); L_2 为西向进口道渐变段长度(m); L_3 为收费站出口与平面交叉口过渡段长度(m); L_4 为收费站出口外广场渐变段长度(m); L_5 为收费站出口外广场展宽段长度(m); L_6 为收费站出口内广场展宽段长度(m); L_7 为收费站出口内广场渐变段长度(m)。

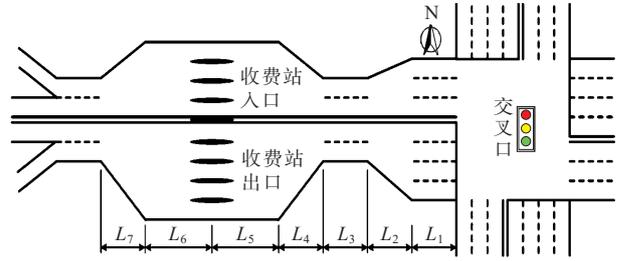
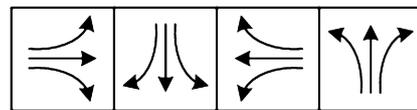


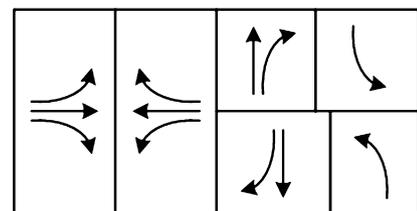
图1 收费站与平面交叉口间距过近区段
Figure 1 Section with short distance between toll station and plane intersection

《高速公路收费站及收费广场设计规范》(报批稿)规定收费广场中心线至平面交叉口距离($L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5$)不小于100 m,当收费车道大于8条,距离宜增大25%~50%。同时也推荐外广场展宽段长度(L_5)为50 m,渐变段宽度与长度比值为1/4~1/5。《城市道路交叉口设计规程》(CJJ 152—2010)规定次干路交叉口展宽段长度(L_1)不小于50 m、渐变段长度(L_2)不小于25 m。由此可知,收费站与平面交叉口间距不宜小于150 m,甚至可以更大。但受道路用地条件限制,近城高速公路收费站与平面交叉口间距过近的现象越来越频繁,如酒嘉绕城高速嘉峪关北收费站、重庆绕城高速迎龙收费站、杭瑞高速铜仁北收费站、九永高速莲花收费站、银昆高速大安收费站等。

为此,宜将收费站与平面交叉口间距过近区段进行联动控制,将收费站出口方向放行交通需求考虑到平面交叉口的信号配时中,约束平面交叉口相应进口道的最大排队长度,以避免车辆排队溢出造成收费站或交叉口交通组织混乱。联动控制中交叉口的信号相位相序方案如图2所示,为便于构建最大



(a) 全轮放式



(b) 东西轮放式+南北对称式

图2 信号相位相序方案

Figure 2 Signal phase and sequence scheme

排队长度约束条件,其西向宜采用轮放式相位方案,南北向可根据需要选择轮放式或对称式相位方案。

2 最大排队长度计算

由图2可知:驶离高速公路车辆在收费站内广场根据排队情况选择收费车道缴费,完成缴费后在外广场汇入过渡段,驶入过渡段后根据信息指引完成变道以便选择左转、直行或右转车道行驶,故最大排队长度由过渡段、进口道渐变段、进口道展宽段长度之和减去车辆所需的最小变道长度确定,见式(1):

$$L_{\max} = L_1 + L_2 + L_3 - l \quad (1)$$

式中: L_{\max} 为收费站与平面交叉口间距过近区段所容许的最大排队长度(m); l 为路段最小变道长度(m)。

车辆变道过程行驶轨迹可简化为两个反向相连的圆曲线^[19-20],如图3所示,两个圆曲线的半径是相等的。为保证行车安全,避免车辆横向滑移,变道过程中车辆行驶圆曲线半径计算见式(2)。通过对图3几何关系推导,可得到圆曲线偏角和变换1条车道所需变道长度的计算公式,见式(3)、(4)。根据需要变换的车道数,进而得到路段最小变道长度,见式(5)。

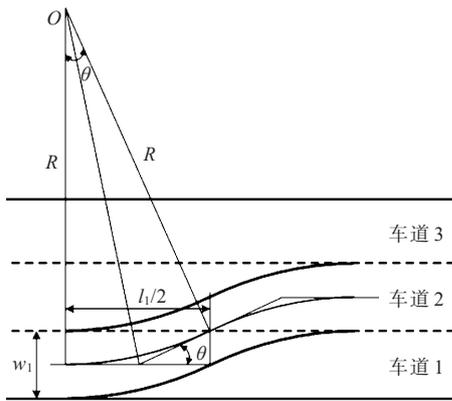


图3 车辆变道长度计算

Figure 3 Lane-changing length calculation

$$R = \frac{v^2}{127(\varphi_1 + \varphi_2)} \quad (2)$$

$$\theta = 2 \arctan \left(\sqrt{\frac{w_1}{4R - w_1}} \right) \quad (3)$$

$$l_1 = 2R \tan \left[\frac{\theta}{2} (1 + \cos \theta) \right] \quad (4)$$

$$l = (n' - 1)l_1 \quad (5)$$

式中: R 为变道过程中车辆行驶圆曲线半径(m); v 为

变道过程中车辆行驶速度(km/h); φ_1 为横向摩阻系数,取0.15; φ_2 为横坡度; w_1 为车道宽度(m); θ 为圆曲线偏角; l_1 为变换1条车道所需变道长度(m); n' 为收费站出口与平面交叉口过渡段总车道数。

参考《城市道路交叉口设计规程》(CJJ 152—2010)、《城市道路路线设计规范》(CJJ 193—2012)等标准取值,道路在交叉口的设计速度为基本路段的50%~70%,则最小变道长度如表1所示。

表1 最小变道长度计算结果

Table 1 Minimum lane-changing length calculation results

序号	设计速度/ (km·h ⁻¹)	车道宽 度/m	变换1条车道 的变道长度/m	变换2条车道 的变道长度/m
1	20	3.5	17	34
2	25	3.5	21	42
3	30	3.5	25	51
4	35	3.5	30	60
5	40	3.5	34	68
6	45	3.5	38	77
7	50	3.5	43	85
8	55	3.5	47	94
9	60	3.5	51	103

3 模型构建

3.1 目标函数

采用交叉口车辆延误最小化作为目标函数,以提升交叉口运行效率,如式(6)所示:

$$\min f(x) = \min \frac{\sum_{\forall i \in I} \sum_{\forall j \in J} d_{i,j} q_{i,j}}{\sum_{\forall i \in I} \sum_{\forall j \in J} q_{i,j}} \quad (6)$$

式中: $d_{i,j}$ 为方向*i*转向*j*车均延误(s); $q_{i,j}$ 为方向*i*转向*j*交通流量(pcu/h); i 为交叉口路段方向, $i \in I = \{1, 2, 3, 4\}$ 分别为西、北、东和南; j 为交叉口转向, $j \in J = \{1, 2, 3\}$ 分别为左转、直行和右转。

利用HCM经典延误模型^[21-22]确定各方向各转向车均延误,如式(7)~(9)所示。

$$d_{i,j} = \frac{0.5C(1 - \lambda_{i,j})^2}{1 - \min\{x_{i,j}, 1\}\lambda_{i,j}} + 900T \left[(x_{i,j} - 1) + \sqrt{(x_{i,j} - 1)^2 + \frac{8ex_{i,j}}{c_{i,j}T}} \right], \forall i \in I, j \in J \quad (7)$$

$$\lambda_{i,j} = \frac{g_{i,j}}{C}, \forall i \in I, j \in J \quad (8)$$

$$x_{i,j} = \frac{q_{i,j}}{\lambda_{i,j} n_{i,j} s_{i,j}}, \forall i \in I, j \in J \quad (9)$$

式中: $x_{i,j}$ 为饱和度; $\lambda_{i,j}$ 为绿信比; C 为周期时长(s); $g_{i,j}$ 为方向 i 转向 j 绿灯时长(s); $n_{i,j}$ 为方向 i 转向 j 行驶车道数; $s_{i,j}$ 为方向 i 转向 j 车道饱和流率(pcu/h); T 为分析时长(h), 默认取 0.25 h; e 为校正系数, 默认取 0.5; $c_{i,j}$ 为方向 i 转向 j 的通行能力。

3.2 约束条件

3.2.1 相位相序约束

采用图 2(a) 的信号相位相序方案进行信号配时。同一相位放行各转向的绿灯时长和绿灯启亮时刻相等, 见式(10)、(11)。两个相邻相位绿灯时长与绿灯启亮时刻的关系, 见式(12)~(16)。所有相位绿灯时长和绿灯间隔时间之和等于周期时长, 见式(17)。绿灯启亮时刻、绿灯时长及周期时长应在合理的范围内, 见式(18)~(20):

$$g_{i,j} = g_i, \forall i \in I, j \in J \quad (10)$$

$$t_{i,j} = t_i, \forall i \in I, j \in J \quad (11)$$

$$t_i = 0, \forall i \in \{1\} \quad (12)$$

$$t_{i'} = t_i + g_i + \delta, \forall i \in \{1\}, i' \in \{2\} \quad (13)$$

$$t_{i'} = t_i + g_i + \delta, \forall i \in \{2\}, i' \in \{3\} \quad (14)$$

$$t_{i'} = t_i + g_i + \delta, \forall i \in \{3\}, i' \in \{4\} \quad (15)$$

$$t_i + g_i + \delta = C, \forall i \in \{4\} \quad (16)$$

$$\sum_{\forall i \in I} g_i + 4\delta = C \quad (17)$$

$$0 \leq t_i \leq C, \forall i \in I \quad (18)$$

$$g_{\min} \leq g_i \leq C, \forall i \in I \quad (19)$$

$$C_{\min} \leq C \leq C_{\max}, \forall i \in I \quad (20)$$

式中: g_i 为方向 i 绿灯时长(s); t_i 为方向 i 绿灯启亮时刻(s); $t_{i,j}$ 为方向 i 转向 j 绿灯启亮时刻(s); δ 为绿灯间隔时间(s); g_{\min} 为最小绿灯时长(s); C_{\min} 为最小周期时长(s); C_{\max} 为最大周期时长(s)。

3.2.2 排队长度约束

平面交叉口西向进口道的排队长度不能超过可容许的最大排队长度, 以避免排队溢出造成收费站或交叉口交通组织混乱。如式(21)所示:

$$\frac{(C - g_{i,j}) q_{i,j} \beta_{i,j} \eta}{3600 n_{i,j} \left[1 - q_{i,j} / (n_{i,j} s_{i,j}) \right]} \leq L_{\max}, \forall i \in \{1\}, j \in J \quad (21)$$

式中: $\beta_{i,j}$ 为方向 i 转向 j 饱和车头间距(m/pcu); η 为波动系数。

3.2.3 饱和度约束

为防止某方向出现过饱和现象, 破坏平面交叉口稳定的运行状态, 各转向饱和度应存在最大值约束, 如式(22)所示:

$$\frac{C q_{i,j}}{g_{i,j} n_{i,j} s_{i,j}} \leq Y_{\max}, \forall i \in I, j \in J \quad (22)$$

式中: Y_{\max} 为饱和度最大值。

3.3 模型讨论

本文所构建的优化模型是一个非线性规划求解问题, 目标函数为式(6), 约束条件为式(7)~(22), 决策变量为绿灯启亮时刻($t_i, t_{i,j}$)、绿灯时长($g_i, g_{i,j}$)及周期时长(C)。

4 案例分析

选取如图 1 所示的收费站与平面交叉口作为案例分析对象, 对比分析联动控制方法与单独控制的常规控制方法下交叉口车辆运行情况。相关参数取值如下: 进口道展宽段长度 L_1 为 50 m, 进口道渐变段长度 L_2 为 25 m, 车辆行驶速度 30 km/h, 由此确定最大排队长度 L_{\max} 为 50 m; 车道饱和流率 $s_{i,j}$ 为 1 500 pcu/h, 最小周期时长 C_{\min} 为 60 s, 最大周期时长 C_{\max} 为 120 s, 最小绿灯时长 g_{\min} 为 10 s, 绿灯间隔时间 δ 为 4 s, 饱和车头间距 $\beta_{i,j}$ 为 7 m/pcu。

设计 6 种流量方案比较联动控制和常规控制的运行性能, 如表 2 所示。采用本文所构建模型优化求解, 结果如表 3 所示。将几何设计和信号配时输入 VISSIM 进行仿真验证, 仿真结果如图 4、5 所示。

表 2 输入流量方案

Table 2 Input flow scheme

方案	西向流量/(pcu·h ⁻¹)			北、东、南向流量/(pcu·h ⁻¹)		
	左转	直行	右转	左转	直行	右转
1	300	600	300	210	420	210
2	405	810	405	210	420	210
3	300	600	300	240	480	240
4	375	750	375	240	480	240
5	300	600	300	270	540	270
6	325	650	325	270	540	270

由图 4、5 可知: 在流量方案 2、4、6 中, 因常规控

制导致西向排队长度超过可允许的最大排队长度,使得部分车辆在收费站出口与平面交叉口过渡段、进口道渐变段难以寻找到合适的变道机会而停车等待,破坏交叉口稳定的运行状态,反而降低了通行效率。联动控制将收费站与平面交叉口进行协同,有

效避免了排队溢出,与常规控制方法相比,流量方案2、4、6的平均延误分别降低了6.49%、13.43%、10.46%。而在流量方案1、3、5中,由于西向排队长度未超过最大排队长度,所以常规控制和联动控制的车均延误和信号配时结果是相同的。

表3 求解结果

Table 3 Solution results

方案	控制方法	绿灯时长 g_i/s				放行时段 $(t_i, t_i + g_i + \delta)/s$				周期时长 C/s
		西	北	东	南	西	北	东	南	
1	联动控制	14	10	10	10	[0,18)	[18,32)	[32,46)	[46,60)	60
	常规控制	14	10	10	10	[0,18)	[18,32)	[32,46)	[46,60)	60
2	联动控制	20	10	10	10	[0,24)	[24,38)	[38,52)	[52,66)	66
	常规控制	20	11	10	10	[0,24)	[24,39)	[39,53)	[53,67)	67
3	联动控制	14	12	12	11	[0,18)	[18,34)	[34,50)	[50,65)	65
	常规控制	14	12	12	11	[0,18)	[18,34)	[34,50)	[50,65)	65
4	联动控制	19	11	12	12	[0,23)	[23,38)	[38,54)	[54,70)	70
	常规控制	20	13	13	13	[0,24)	[24,41)	[41,58)	[58,75)	75
5	联动控制	17	15	14	15	[0,21)	[21,40)	[40,58)	[58,77)	77
	常规控制	17	15	14	15	[0,21)	[21,40)	[40,58)	[58,77)	77
6	联动控制	19	15	15	15	[0,23)	[23,42)	[42,61)	[61,80)	80
	常规控制	19	15	16	16	[0,23)	[23,42)	[42,62)	[62,82)	82

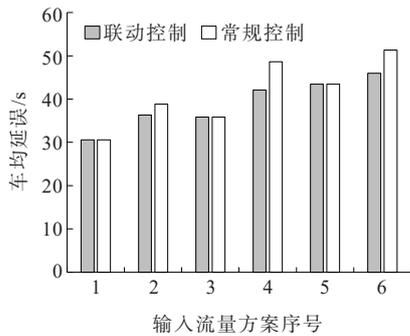


图4 车均延误仿真对比结果

Figure 4 Simulation results of average vehicle delay

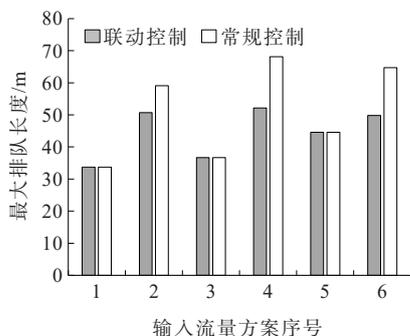


图5 最大排队长度仿真对比结果

Figure 5 Simulation results of maximum queue length

5 联动控制实施建议

G56 杭瑞高速铜仁段打通了第2条通往湖南省、走向中国中部腹地以及东部沿海地区的高速通道,同时也打通了铜仁交通瓶颈的“经脉”,为铜仁经济及旅游的高速发展发挥了重要作用。G56 杭瑞高速铜仁段与 G354、G242 等协同运行,承担铜仁境内非常大的集散交通量,但部分收费站与国道均不同程度存在收费站与平面交叉口间距过近问题,如铜仁北收费站与 G354 国道交叉口、苗王城收费站与 G242 国道交叉口等。若将研究成果应用到杭瑞高速公路及国道运营管控中,并对杭瑞高速公路收费站与平面交叉口间距过近区段实施车辆变道控制及联动管理,将有助于避免排队溢出、维持稳定运行状态、改善行车秩序、提升通行效率,值得推广应用。

6 结论

(1) 提出了一种高速公路收费站与平面交叉口联动控制方法,结合车辆变道行为给出了衔接区段可允许的最大排队长度计算公式。研究收费站与平

面交叉口交通运行强耦合关系,将衔接方向排队长度考虑到平面交叉口信号配时中,建立一个统一的非线性规划联动控制优化模型,有效地解决了收费站与平面交叉口间距过近而导致交通运行不稳定的问题。

(2) 通过案例分析发现,在3种常规控制存在排队溢出的流量设计方案中(方案2、4、6),联动控制与常规控制相比,车均延误分别降低了6.49%、13.43%、10.46%,有效提升了收费站与平面交叉口的通行效率,说明联动控制通过防止车辆排队溢出,避免了车辆停车等待破坏收费站与平面交叉口稳定运行的问题。

(3) 本文研究成果可进一步扩展应用到城市快速路出入口匝道与平面交叉口衔接路段。考虑到收费车道启用数量、抬杆速度调节服务时间等手段均会影响收费站通行能力,故后续研究可将上述策略与衔接平面交叉口信号配时进一步联动控制,以缓解交通拥堵。

参考文献:

References:

- [1] 李玮艺.高速公路与城市道路衔接适应性分析[J].交通运输工程与信息学报,2020,18(2):132-138.
LI Yiyi, Applicability analysis of the connection between expressway and urban road [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2020, 18(2): 132-138.
- [2] YU B, MWABA D. Toll plaza lane choice and lane configuration strategy for autonomous vehicles in mixed traffic[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2020, 146(12): 04020133.
- [3] WANG P, ZHAO J D, GAO Y, et al. Lane work-schedule of toll station based on queuing theory and PSO-LSTM model[J]. IEEE Access, 2020, 8: 84434-84443.
- [4] 张杰, 杨青, 柴啸龙. 伏牛山区高速公路收费型互通式立交设计流程研究[J]. 中外公路, 2023, 43(1): 235-239.
ZHANG Jie, YANG Qing, CHAI Xiaolong. Research on design process of toll interchange-expressway in the area of Funiu Mountain[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1): 235-239.
- [5] 崔洪军, 李亚平. 基于收费站运营成本和司机排队成本的车道开启数量优化方法[J]. 公路, 2013, 58(4): 149-152.
CUI Hongjun, LI Yaping. Optimization method for opening number of lanes based on operating costs of toll station and queuing costs of driver[J]. Highway, 2013, 58(4): 149-152.
- [6] 宋浪, 俞山川, 王少飞, 等. 高速公路收费站车道功能及方向优化模型[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(3): 1278-1284.
SONG Lang, YU Shanchuan, WANG Shaofei, et al. Optimization for toll lane function and direction of freeway toll plaza[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(3): 1278-1284.
- [7] NEUHOLD R, GAROLLA F, SIDLA O, et al. Predicting and optimizing traffic flow at toll plazas[J]. Transportation Research Procedia, 2019, 37: 330-337.
- [8] 刘利民, 汪海芳. 平曲线路段匝道收费广场设计新方法[J]. 中外公路, 2022, 42(4): 258-260.
LIU Limin, WANG Haifang. New design method of ramp toll plaza in horizontal curve section[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(4): 258-260.
- [9] 张军, 宋浪, 俞山川, 等. 高速公路车道分配与入口多匝道协同控制方法[J]. 公路交通技术, 2023, 39(3): 166-175.
ZHANG Jun, SONG Lang, YU Shanchuan, et al. A collaborative control method of lane assignment and entrance multi-ramp on expressway[J]. Technology of Highway and Transport, 2023, 39(3): 166-175.
- [10] 贺钊, 杨欣, 李广, 等. 基于智慧收费云的无人收费站系统[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(25): 11235-11240.
HE Zhao, YANG Xin, LI Guang, et al. Unmanned toll station system based on intelligent charging cloud[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(25): 11235-11240.
- [11] 廖勇刚, 丁振中, 郭凯, 等. 高速公路短间距收费-服务设施综合优化设计: 以广州东环高速公路黄村服务区总体方案设计为例[J]. 中外公路, 2022, 42(6): 241-246.
LIAO Yonggang, DING Zhenzhong, GUO Kai, et al. Research on comprehensive optimization design of short distance toll station-service area for suburban road: A case study of the overall plan design of Huangcun service area of Guangzhou East Ring Expressway[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(6): 241-246.
- [12] KAN X D, LU X Y, SKABARDONIS A. Increasing freeway capacity by efficiently timing its nearby arterial traffic signals[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2018, 2672(18): 27-34.
- [13] 李妙哈, 徐鹏, 王新竹, 等. 城市高架式快速路出入口匝道

- 与平面交叉口衔接段长度设计优化研究[J].公路交通技术,2023,39(1):161-167.
- LI Miaohan,XU Peng,WANG Xinzhu,et al.Optimal design of the length of the connecting section between the ramp of urban elevated expressway and the intersection[J]. Technology of Highway and Transport, 2023, 39(1): 161-167.
- [14] YANG X F,LU Y C,CHANG G L.Dynamic signal priority control strategy to mitigate off-ramp queue spillback to freeway mainline segment[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2014,2438(1):1-11.
- [15] WANG F,GU D J,CHEN A Q.Analysis of traffic operation characteristics and calculation model of the length of the connecting section between ramp and intersection[J]. Sustainability,2022,14(2):629.
- [16] 沈照庆,王雄,杜兴,等.主线收费站与非信号控制交叉的净距研究[J].公路,2017,62(2):129-133.
- SHEN Zhaoqing,WANG Xiong,DU Xing,et al.Study of the net distance between the main line toll station and the non-signal control crossing[J]. Highway, 2017, 62(2): 129-133.
- [17] 刘伟铭,陈纲梅,林观荣,等.高速公路收费站与衔接信号交叉口协调控制研究[J].广西师范大学学报(自然科学版),2019,37(4):16-26.
- LIU Weiming, CHEN Gangmei, LIN Guanrong, et al. Coordination control method for toll station of freeway and adjacent intersection[J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition),2019,37(4):16-26.
- [18] 刘伟铭,宋文通,区俊锋.收费站与衔接交叉口半感应控制研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(3): 358-363.
- LIU Weiming, SONG Wentong, OU Junfeng. Research on semi-actuated control of toll station and adjacent intersection[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science),2023,46(3):358-363.
- [19] 郝嘉田,吴忠广,田万利,等.高速公路改扩建中央分隔带开口长度通用计算模型构建与验证[J].交通运输系统工程与信息,2023,23(4):262-269.
- HAO Jiatian, WU Zhongguang, TIAN Wanli, et al. Construction and validation of a general calculation model on median opening length for expressway renovation and expansion project[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(4): 262-269.
- [20] 赵一飞,万航,肖珊.高速公路改扩建借道施工作业区中央分隔带开口长度研究[J].中外公路,2021,41(3):365-369.
- ZHAO Yifei, WAN Hang, XIAO Shan. Study on opening length of median strip in temporary construction area for reconstruction and expansion of expressways[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(3):365-369.
- [21] 宋浪,王健,杨滨毓,等.双开口式逆流左转车道几何设计及信号配时优化[J].交通信息与安全,2022,40(3):75-85,107.
- SONG Lang,WANG Jian,YANG Binyu,et al.A method for optimizing geometric design and signal timing for contraflow left-turn lanes with double-exits[J]. Journal of Transport Information and Safety,2022,40(3):75-85,107.
- [22] 安实,宋浪,王健,等.平行流交叉口信号控制策略及效益分析[J].交通运输系统工程与信息,2020,20(3):75-82.
- AN Shi, SONG Lang, WANG Jian, et al. Signal control strategy and benefit analysis of parallel flow intersection [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2020,20(3):75-82.