

文章编号:1005-0523(2018)03-0035-08

# 高速公路收费站免费放行区域计算方法优化改进

崔志宾<sup>1</sup>,张教木翰<sup>2</sup>

(1.中铁隧道勘察设计研究院有限公司,广东 广州 511455; 2.交通运输部科学研究院,北京 100029)

**摘要:**从本质上来讲,高速公路出行是道路使用者购买的一种快捷服务,道路使用者理应获取满意的服务。针对目前高速公路收费站存在大量拥堵的现状,以江苏省高速公路相关规定及沈海高速公路江苏段某收费站为例,利用收费站设计相关理论及排队论理论,介绍了现有车道长度折算免费放行区域计算方法,并针对现有计算方法的不足,提出了车道长度折算和车道面积折算双重折算的优化改进模型,同时,增加排队长度值参数作为优化改进模型的重要组成部分,采用排队长度值对计算结果进行理论校验。结果表明:优化改进后的计算方法获取的结果更加准确合理,可大量减少由于免费放行所引起的民事纠纷,排队长度的校验使得收费站免费放行区域的法规规定有了理论支撑。

**关键词:**高速公路收费站;免费放行区域;排队论;车道长度折算;车道面积折算

中图分类号:U491

文献标志码:A

目前我国高速公路以收费公路为主,道路使用者支付了相应费用使用高速公路,从本质上来讲,高速公路出行是道路使用者购买的一种快捷出行服务,理应获得满意的服务。但现状是,很多高速公路收费站出口车道存在大量拥堵排队等候缴费的情况。针对上述情况,一方面,从技术上合理设计收费站、合理配置收费车道数、采用ETC电子不停车收费等措施提升收费站通行能力;另一方面,从管理上应考虑当等待缴费车辆排队长度超过一定阈值时,对排队车辆免费放行,减少拥堵,提升服务质量。

针对这种情况,国内多个省份已经出台了相应的拥堵免费快速通行政策及文件,以给道路使用者提供快捷的服务。江苏省2014年通过的《江苏省高速公路条例》<sup>[1]</sup>第46条规定:“因未开足收费道口而造成平均十台以上车辆待交费,或者开足收费道口待交费车辆排队均超过二百米的,高速公路经营管理单位应当免费放行。”广东省2015年通过的《广东省公路条例》<sup>[2]</sup>第48条规定:“收费站因未开足通道而造成在用通道平均五台以上车辆堵塞的,应当免费放行并开足通道。”重庆市2015年通过的《重庆市公路管理条例》<sup>[3]</sup>第49条规定:“因缓解收费道口拥堵,确需快速疏导、分流车辆的,市交通运输主管部门可以决定临时免费放行车辆。”湖北省通过的《湖北省高速公路警路联合应急调度工作规范》规定收费站拥堵超过一定程度时,需抬杆免费放行。

表1 部分省份关于拥堵免费快速通行的规定  
Tab.1 The rules about the toll gate free passing in some provinces

序号	省份	拥堵免费快速通行条件
1	江苏省	200 m
2	广东省	排队车辆超过5辆
3	湖北省	达到一定拥堵程度
4	重庆市	达到一定拥堵程度

收稿日期:2018-01-30

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0803109)

作者简介:崔志宾(1983—),男,工程师,研究方向为交通工程设计研究。

这些规定值得向全国范围推广,并应形成国家标准,但目前关于拥堵免费快速通行的规定均较模糊<sup>[4]</sup>,比如江苏省提出了免费放行位置的计算方法<sup>[5]</sup>,但该方法属于一种近似计算方法,还存在很多不足。针对高速公路收费站排队长度方面的研究,常见的有地磁感应线圈、微波车辆探测器、雷达探测器<sup>[6-7]</sup>、浮动车<sup>[8]</sup>、GPS、北斗系统数据<sup>[9]</sup>、视频数据检测等研究方法,但此类排队长度研究方法主要适用于已建的高速公路收费站,却不能很好地适用于规划阶段的高速公路收费站。

本文以江苏省高速公路为例,针对目前的计算方法,提出了一种双重折算的修正模型,并基于排队理论,采用排队长度对计算结果进行理论校验,判定计算结果是否合理正确。

## 1 现有计算模型与优化

### 1.1 现有计算模型

以江苏高速公路为例,高速公路管理部门给出计算模型流程如图1所示。

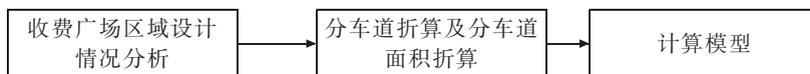


图1 分车道折算计算模型流程图

Fig.1 Flow chart of fractional lane calculation model

从收费岛岛头往高速公路来车方向推 200 m 处,如收费岛距离渐变段不足 200 m,设总出口车道数为  $M$ ,主线(出口)车道数为  $N$ , $L$  为渐变段不足 200 m 出口车道的平均值,则渐变段开始处不足 200 m 的车道数为  $(M-N)$ ,则 200 m 免费放行点位置处为:  $200+(M-N) \times (200-L)/N$ ,并在标志设置处划振荡标线。对于匝道收费站,若上述公式计算所得距离延伸至不同方向匝道,则上述公式计算结果按不同方向匝道上的车道总数平均分配。对其所给出的方法进行如下归纳整理

$$Y = 200 + (M - N) \frac{200 - \frac{\sum_{i=1}^{M-N} L_i}{M-N}}{N} \quad (1)$$

式中: $Y$  为收费站出口车道 200 m 免费放行点位置, m;  $M$  为收费站总出口车道数;  $N$  为主线(出口)车道数;  $L_i$  为收费站出口渐变段不足 200 m 出口车道长度, m;  $i=1, 2, \dots, M-N$ 。

### 1.2 现有模型优化

目前,由于相关规定及计算方法比较模糊,高速公路使用者常常误认为自己处于免费放行区域内而高速公路运营单位却未按照相关规定进行免费放行,进而发生高速公路使用者投诉高速公路运营单位的情况。

高速公路收费站特别是重点收费站,如各地方的机场高速公路收费站、省界收费站等关注度很高,如果发生纠纷,而不能正确处理,会产生较恶劣的社会影响,且近年来确实经常发生高速公路使用者针对免费放行问题投诉高速公路路公司的情况,所以,深入研究免费放行区域的计算方法,是非常有必要的。

目前采用的计算模型,优点是简单方便,实质是将收费广场区域不同车道不满足 200 m 范围的区域简化为直线进行估算,该模型必然会造成一定的误差,且该模型本身有一定的局限性,对有些收费站不能完全适用,比如有些高速公路收费站的渐变段较缓,很难判断应以何处作为不足 200 m 的起点位置,只能进行估测<sup>[10]</sup>。

针对以上存在的问题,提出一种优化改进的计算模型。

实际的高速公路收费站收费广场区域,是由直线段区域和渐变段区域所组成的曲线区域。不同项目收费广场直线段和渐变段的曲线区域情况均有差别,根据不同项目情况,将收费广场直线段和渐变段拟合为对应曲线函数,根据该曲线函数对不同车道和不同车道面积进行折算,获取免费放行区域值,同时,计算收

费广场的出口车道排队长度值,作为优化改进模型的一个必要验证条件,使得优化改进模型更加完备,如图 2 所示。

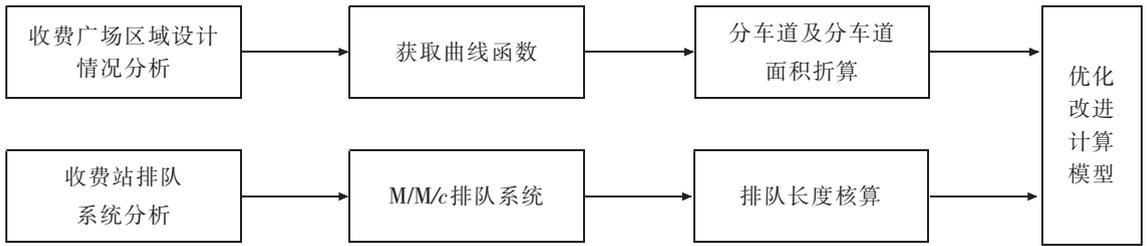


图 2 优化改进计算模型流程图

Fig.2 The flow chart of optimized model

假设:收费站总出口车道数为  $M$ ,主线(匝道)出口车道数为  $N$ 。

以第  $N$  条车道与收费广场最外侧车行道边缘线的交点(若无交点则以收费岛岛头延伸至来车方向 200 m 位置为准)及第  $M$  条车道收费广场平行收费岛最外侧车行道边缘线与渐变段的交点的中间点为基准点,以平行于收费岛方向为  $Y$  轴,以垂直于收费岛方向为  $X$  轴,构建标准直角坐标系。设收费广场车道直线段及渐变段曲线(若是规划设计阶段项目可按照硬路肩边缘线控制)在本坐标系中曲线函数为  $f(x)$ 。

根据车辆到达分布、服务时间分布和收费车道数量不同<sup>[11]</sup>,可以采用不同的排队模型来描述排队长度<sup>[12-13]</sup>,如图 3 所示。根据高速公路收费站实际情况,收费站的车辆到达一般服从负指数分布,服务时间一般服从负指数分布或正态分布,设收费车道数为  $c$ ,则高速公路收费站排队系统模型可采用  $M/M/c$  模型或者  $M/G/c$  模型。根据孙宝芸等人的研究<sup>[14]</sup>, $M/G/c$  模型对部分收费站排队情形不适用,本文采用  $M/M/c$  模型进行排队长度验算。

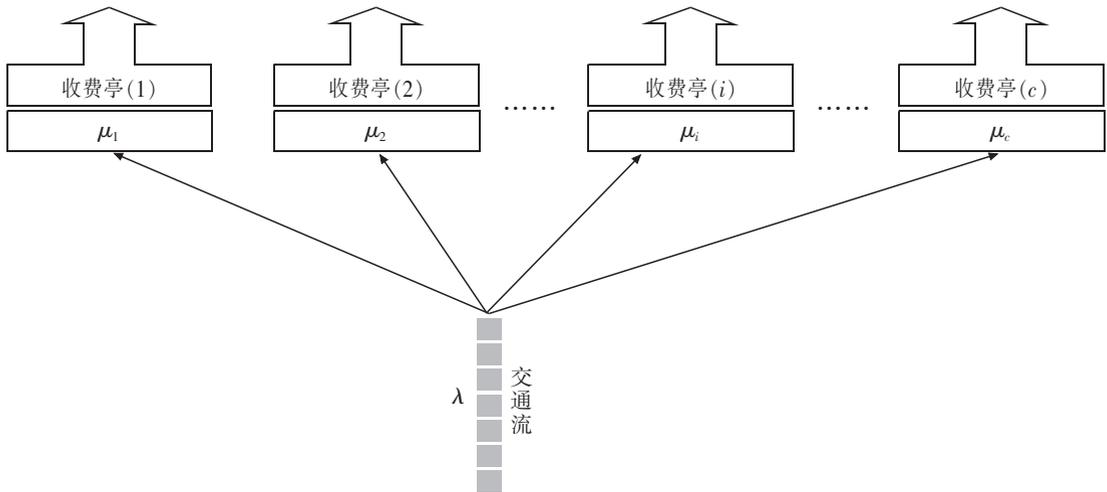


图 3 高速公路收费站排队过程模型

Fig.3 The model of highway toll gate queuing procedure

$M/M/c$  模型是指车辆到达符合负指数分布,服务时间符合负指数分布, $c$  个服务台的模型。输入过程为车辆源是无限的,车辆为单个到来,互相独立,一定时间的到达服从泊松分布,到达过程是稳定的;排队规则为单队,且对队长没有限制,先到先服务;服务机构为多服务台,即  $c$  个服务台,各顾客的服务时间是相互独立的,服从相同的负指数分布,此外,假定到达间隔时间和服务时间是相互独立的,根据该模型,有

$$\begin{cases} \mu P_1 = \lambda P_0 \\ (n+1)\mu P_{n+1} + \lambda P_{n-1} = (\lambda + n\mu) P_n & (1 \leq n \leq c) \\ c\mu P_{n+1} + \lambda P_{n-1} = (\lambda + c\mu) P_n & (n > c) \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$\sum_{i=0}^{\infty} P_i=1, \text{且 } \rho \leq 1 \tag{3}$$

推导可知:

$$P_0 = \left[ \sum_{k=0}^{c-1} \frac{1}{k!} \left[ \frac{\lambda}{\mu} \right]^k + \frac{1}{c!} \times \frac{1}{1-\rho} \times \left[ \frac{\lambda}{\mu} \right]^c \right]^{-1}$$

$$P_n = \begin{cases} \frac{1}{n!} \left[ \frac{\lambda}{\mu} \right]^n P_0 & (n \leq c) \\ \frac{1}{c!} \frac{1}{c^{n-c}} \left[ \frac{\lambda}{\mu} \right]^n P_0 & (n > c) \end{cases} \tag{4}$$

系统的平均排队长度

$$\begin{cases} L_s = L_q + \frac{\lambda}{\mu} \\ L_q = \sum_{n=c+1}^{\infty} (n-c) P_n = \frac{(c\rho)^c \rho}{c! (1-\rho)^2} P_0 \end{cases} \tag{5}$$

优化改进后的收费站免费放行区域计算模型为

$$Y = 200 + \frac{\int_{-\frac{d_c-d_z}{2}}^{\frac{d_c-d_z}{2}} (f(x) + 200 - l_0) dx}{\sum_1^N d_i} \tag{6}$$

$$S = \left[ \sum_{j=1}^m C_j \times P_j \right] \times \left( L_q \times \frac{\lambda}{\mu} \right) < 200$$

式中:  $Y$  为收费站出口车道 200 m 免费放行点位置;  $M$  为收费站总出口车道数;  $N$  为收费站主线(出口)车道数;  $d_c$  为收费站出口车道总宽度;  $d_z$  为收费站出口主线(匝道)车道总宽度;  $d_i$  为收费站来车方向出口主线(匝道)车道  $i$  宽度;  $f(x)$  为收费广场车行道外边缘线曲线函数;  $l_0$  为基准点至收费岛岛头距离;  $i$  为收费站出口主线/匝道车道数 1, 2, ...,  $N$ ;  $S$  为收费站收费广场出口车道计算排队长度;  $C_j$  为预测/实际交通量中不同车型车辆所占比例;  $P_j$  为不同车型车辆平均长度;  $L_q$  为平均排队长度;  $\lambda$  为平均到达率;  $\mu$  为平均服务率;  $j$ : 不同车型种类(1, 2, ...,  $m$ )。改后计算模型如图 4 所示。

## 2 算例分析

以沈海高速赣榆柘汪互通收费站为例, 计算其免费放行区域。

项目概况: 沈海高速公路路基宽度 28 m, 设计速度 120 km/h。项目位于江苏省连云港市, 为现状临海高等级公路与 204 国道交叉位置。项目起于临海高等级公路 204 国道东 200 m 左右, 向

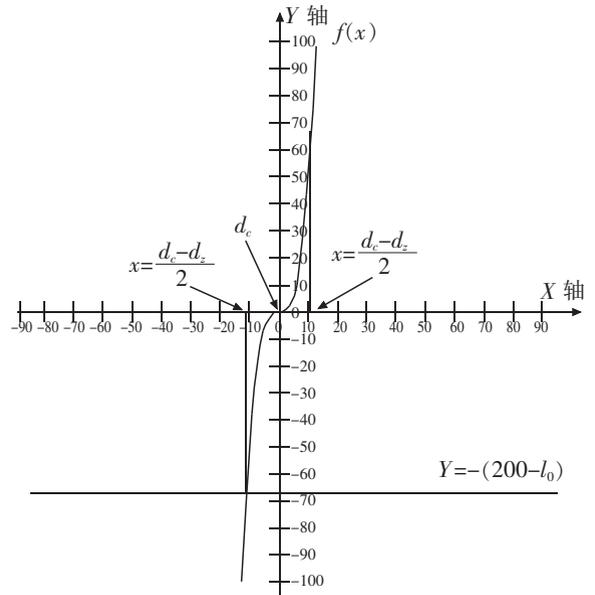


图 4 改进后免费放行区域计算模型  
Fig.4 The improved calculation model of free passing area

西高架跨越 204 国道、下穿青连铁路、在沈海高速公路 K969+000 处跨越沈海高速公路。沈海高速赣榆柘汪互通收费站设置规模为 4 入 6 出,其中包含 1 入 1 出 ETC 车道,1 入 1 出超宽车道。收费广场平面图如图 5 所示。

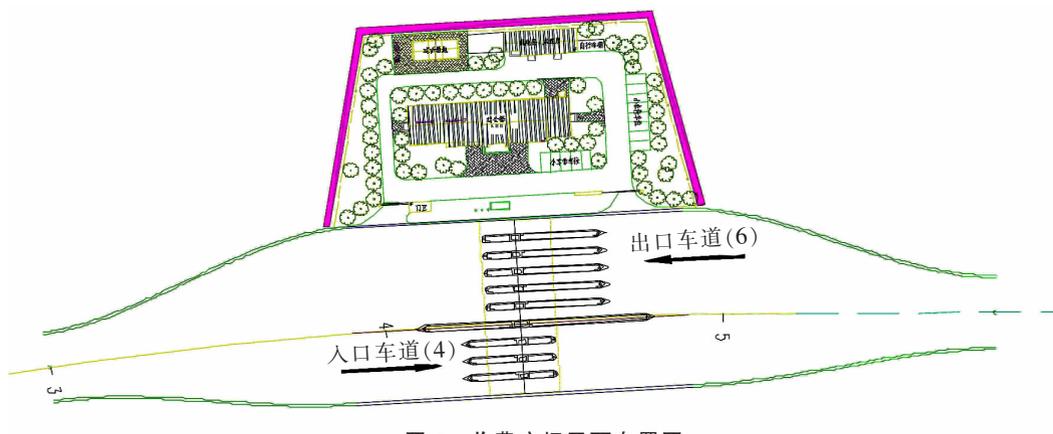


图 5 收费广场平面布置图  
Fig.5 The schema of toll gate square

2.1 现有计算模型计算

结合本工程算例数据: $M=6,N=2$ 。

收费站出口车道免费放行区域

$$Y=200+(M-N) \frac{\sum_{i=1}^{M-N} (41.1+59.8+72.1+85.8)}{N} =470.6$$

通过以上计算可知,收费站出口车道免费放行区域  $Y=470.6$  m。收费站免费放行点,如图 6 所示。由于本例为匝道收费站,上述计算结果需按不同方向匝道上的车道总数进行平均分配。

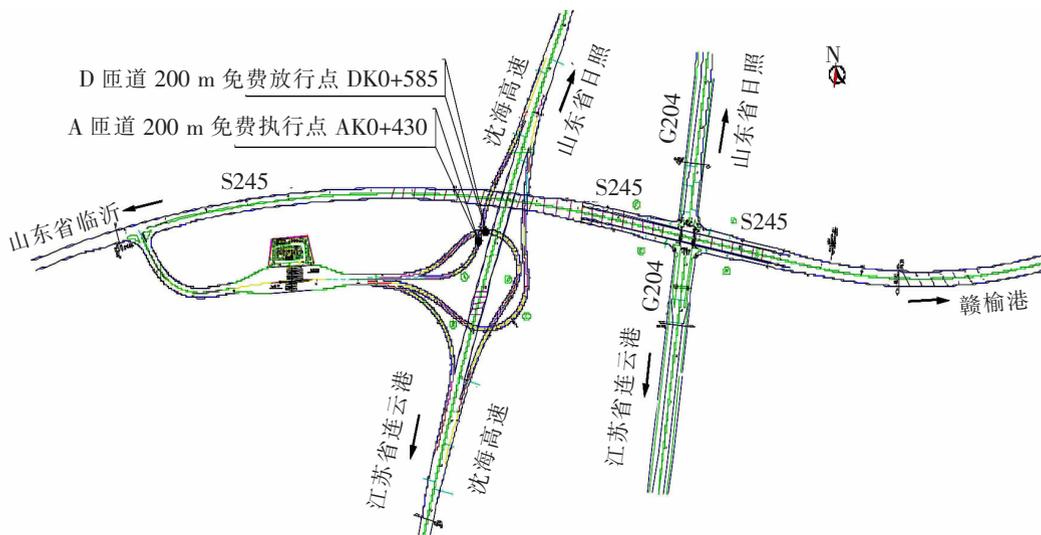


图 6 收费站免费放行点设置位置图  
Fig.6 The toll gate location of free passing position

2.2 优化改进模型计算

结合本项目线形特征,直线段及渐变段曲线函数取三次抛物线曲线函数

$$f(x)=ax^3 \tag{3}$$

其中,根据不同收费站渐变段渐变率调整  $a$  值,本工程算例取 0.05。

根据本工程相关数据,  $d_c=32.9$ ;  $d_2=11$ ;  $l_0=67.3$ ,

则:

$$Y=200+\frac{\int_{-\frac{d_c-d_2}{2}}^{\frac{d_c-d_2}{2}}(ax^3+200-l_0)dx}{\sum_1^N d_i}$$

带入相关数据进行计算,可知收费站距离出口车道 200 m 免费放行点位置

$$Y=464.2 \text{ m}$$

对模型中排队长度  $S$  进行校验。根据本工程项目基础资料,高峰小时交通量  $D_{HV}$  为

$$D_{HV}=(1154+3719+1678+7893)\times 0.12\times 0.6=1040 \text{ pcu/h}$$

本收费站为 M/M/6 排队系统。

车辆平均到达率

$$\lambda=1040 \text{ pcu/h}\times 3600 \text{ h/s}=0.289 \text{ pcu/s}$$

根据《收费公路联网收费技术要求(交通部 2007 年第 35 号公告)》<sup>[15]</sup>,收费站出口车辆平均服务时间取 18 s。

平均服务率

$$\mu=\frac{1}{18}=0.056 \text{ pcu/s}$$

$$\frac{\lambda}{\mu}=\frac{0.289}{0.056}=5.161$$

服务机构的平均利用率  $e$ (服务强度)

$$\rho=\frac{\lambda}{c\times\mu}=\frac{0.289}{6\times 0.056}=0.86<1$$

系统稳定,符合要求的条件,根据交通流理论<sup>[16-17]</sup>、M/M/c 模型计算。

1) 整个收费亭空闲概率

$$P_0=\frac{1}{\frac{(5.161)^0}{0!}+\frac{(5.161)^1}{1!}+\frac{(5.161)^2}{2!}+\frac{(5.161)^3}{3!}+\frac{(5.161)^4}{4!}+\frac{(5.161)^5}{5!}+\frac{(5.161)^6}{6!}}\times\frac{1}{1-\frac{5.161}{6!}}=0.00385$$

2) 平均队长

$$L_q=\frac{(c\rho)^c\rho}{c!(1-\rho)^2}P_0=\frac{(5.161)^6\times 0.86}{6!(0.14)^2}\times 0.00385=4.434$$

$$L_s=L_q+\frac{\lambda}{\mu}=9.595$$

参考设计车辆轮廓尺寸标准,取小型车车长 6 m,中型车车长 8 m,大型车车长 13.7 m,拖挂车车长 18.1 m<sup>[18-19]</sup>,根据车型比例,折算后车辆长度  $Q$  为

$$Q=\sum(C_i\times P_i)=0.75\times 6+0.2\times 8+0.03\times 13.7+0.02\times 18.1=6.873$$

则平均排队长度  $S$  为

$$S=Q\times L_s=6.873\times 9.595=64.9 \text{ m}$$

排队长度未超过免费放行区域范围。优化后的收费站免费放行点如图 7 所示,算例分析结果如表 2 所示。

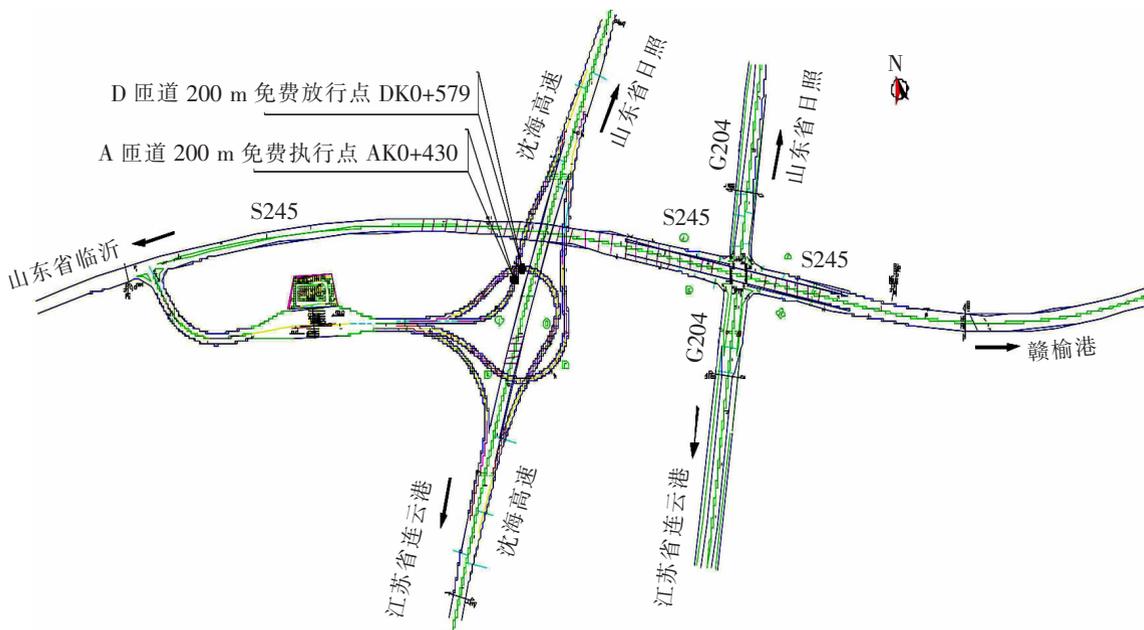


图 7 优化改进后的收费站免费放行点设置位置

Fig.7 The improved toll gate location of free passing position

优化改进计算模型是按照车道长度及对应车道长度面积进行折算,相比原有计算模型更加合理、准确且适用范围更广泛,特别是对于大型收费站,如港区收费站及省界收费站,出口收费车道较多,原有计算方法对于此类收费站的适用性较差,且部分车辆不会按照固定的车道和秩序等待<sup>[20]</sup>,优化改进计算模型可有效减少高速公路驾乘人员和高速公路运营管理公司关于免费放行区域的民事及经济纠纷,减少高速公路使用者的投诉,减少社会负面影响。

同时,为了有效监视免费放行区域车辆的情况,建议设置免费放行监视摄像机<sup>[21]</sup>。设置免费放行监控摄像机的目的是要监视位于免费放行点处的车辆形态特征。根据高清遥控监控摄像机的最佳监视距离,建议免费放行高清遥控监控摄像机设置在免费放行点远离收费广场方向 30 m 处。

### 3 结论

高速公路是有偿出行,道路使用者理应获取高效快捷的服务,且国内多个省份已经出台相关法规条文,本文以江苏省高速公路为例,分析了现有免费放行区域计算方法的不足,同时提出了一种双重折算的修正计算模型,并引入排队长度值作为结果校验,这不仅使计算结果更加准确合理,避免了由于免费放行而引发的大量民事纠纷,而且从理论上保证了模型的合理性,给相关法规条文提供了理论支撑。

交通流系统是一个复杂的系统,大量变量参数存在复杂的变化规律,优化改进后的计算模型,仍有不足,需进一步拟合高速公路收费站收费广场区域的曲线函数,使拟合后的曲线函数与工程实际更加切合,进一步研究车辆相继到达间隔时间分布规律、单收费亭、一岛多亭服务时间分布规律、ETC 收费车道、MTC 收费车道、客货车收费车道服务时间的分布规律,从而建立更加符合高速公路交通流系统实际的模型,获取更加合理准确的结果。

表 2 算例分析结果

Tab.2 The example analysis results

项目	A 匝道	D 匝道	排队长度校验/m
现有计算模型	AK0+430	DK0+585	64.9
优化改进模型	Ak0+424	DK0+579	64.9

**参考文献:**

- [1] 中华人民共和国江苏省第十二届人大常委会. 江苏省高速公路条例[Z]. 2014-3-28
- [2] 中华人民共和国广东省第十一届人民代表大会常务委员会. 广东省公路条例[Z]. 2012-7-26
- [3] 中华人民共和国重庆市第四届人民代表大会常务委员会. 重庆市公路管理条例[Z]. 2015-4-1
- [4] 张晨琛. 高速公路主线收费站拥堵消散控制策略[J]. 中国公路学报, 2013(7): 140-145.
- [5] 中华人民共和国江苏省交通控股有限公司. 关于 200 米标志牌设置的位置、内容和式样的紧急通知[Z]. 2007-10-10.
- [6] 贾利民, 陈娜. 基于单个地磁传感器的交叉口排队长度估计[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2016, 46(3): 756-763.
- [7] 李彬亮. 基于多段地磁传感器的高速公路收费站车辆排队长度检测算法[J]. 中国新通信, 2016(8): 151-153.
- [8] 庄立坚, 何兆成. 基于浮动车数据的排队长度检测方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(3): 78-84.
- [9] 买艳辉. 基于出租车 GPS 数据的速度分布和排队度估计研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
- [10] 周宏敏. 高速公路断面运行车速分布的研究[J]. 华东交通大学学报, 2008, 25(10): 32-35.
- [11] 李志斌, 王炜. 高速公路车辆排队尾部交通事故时空分布特征[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(4): 77-81.
- [12] 黄临娜. 排队论在成渝高速公路收费站服务台设计和管理中的应用[J]. 交通标准化, 2007(2): 191-193.
- [13] 卢为杰. 国省干线公路出入口管理系统性安全评价[J]. 华东交通大学学报, 2015, 22(10): 27-34.
- [14] 孙宝芸, 张悦. 高速公路停车收费系统中排队模型的比较分析[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2015(10): 229-231.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 收费公路联网收费技术要求 2007 年第 35 号公告[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [16] 任福田, 刘小明. 交通工程学[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2008: 102-128.
- [17] 王花兰. 交通预测与评估[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016: 129-135.
- [18] 中华人民共和国交通运输部. JTG B01-2014 公路工程技术标准[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [19] 周荣贵, 钟连德. 公路通行能力手册[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
- [20] 侯海晶. 高速公路驾驶人换道意图识别方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [21] 中华人民共和国交通运输部. 高速公路监控技术要求 2012 年第 3 号公告[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

## Improved Calculation Method of Free Passing Area for Highway Toll Gate

Cui Zhibin<sup>1</sup>, Zhang Aomuhan<sup>2</sup>

(1. China Railway Tunnel Consultants Co., Ltd., Guangzhou 511455, China;

2. Chinese Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Fundamentally, traveling on highways is bought by road users who deserve quick and satisfactory service. Currently, highway toll gates are generally congested. In view of this situation, this paper, by taking a toll station in Jiangsu province according to regulations of Jiangsu provincial highways as an example, and by using relevant theories of toll gate design as well queuing theory, introduces the current calculation method of the free passing lane. Aiming at current shortcomings, this paper also presents the lane length conversion and lane area conversion optimization model. Meanwhile, it increases the queue length value parameter as an important part of the optimization and improvement model. Then, the queue length values are used to theoretically verify the calculations. The research results show that the results obtained are accurate and reasonable by using the optimization model, which can greatly reduce civil disputes caused by free clearance. The verification of the length of the queuing system has given theoretical support to the laws and regulations on free passing position.

**Key words:** highway toll gate; free passing position; queuing theory; lane length conversion; lane area conversion