文章编号:1005-0523(2016)02-0078-08

城市停车场ETC系统效益评价研究

曹旻骏[1],陈景雅[1],党 倩[2]

(1.河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098;2.江苏省交通规划设计院股份有限公司,江苏 南京 210014)

摘要:基于停车场收费通道的交通环境,针对ETC系统应用后对通道交通运行状态的影响进行深入分析,遵循科学性、全面综合性、实用性原则,从交通运行状态、能源消耗和环保价值3个方面选取5项指标建立停车场ETC项目效益综合评价指标体系,并运用数据包络分析法(DEA)对模拟条件下不同交通量、不同缴费方式比例条件下的交通效益进行超效率分析。结果证明,系统DEA效率与ETC缴费车辆比例呈正相关关系,当交通量为110 pcu·h^{-1},电子缴费比例为80%时,车均延误时间减少119.4 s,车均运行速度提高735%,收费通道内交通运行状态明显改善。

关键词:智能交通;效益评价;DEA评价方法;停车场ETC系统;指标体系;Vissim仿真

中图分类号:U491.7 文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.02.012

电子收费(electronic toll collection,ETC)系统,又称不停车电子收费系统。通过安装在车辆挡风玻璃上的电子标识卡(储存有车辆缴费相关信息,如车牌号码、缴费账户信息等),系统以电子支付形式完成结算,实现车辆不停车收费[1]。近年来,ETC技术在我国高速公路收费中得到普遍应用,发展日趋成熟、稳定,应用范围和场景逐步得到拓展。城市路外停车场使用ETC技术实现不停车收费成为了一种新趋势。

国内外实施ETC实践已证明,采用电子收费系统以电子交易方式,自动完成收费交易过程,可有效提高收费效率,提高道路的通行能力[2]。借鉴电子收费系统在高速公路收费中的应用机理与效果,将其应用于城市路外停车场收费,可大幅缩短车辆出库缴费时间,缓解因人工收费效率低下而造成的车辆排队和拥堵,减少车辆等待缴费时的能源消耗和尾气排放。

城市路外停车场ETC系统应用特征相较于高速公路收费具有明显不同:

1)不同于高速公路收费站建有多个收费通道,停车场内多个出入口分散并相对独立,每个出口均为单通道,整体服务水平较低;

2)不同于高速公路收费站按缴费方式区分收费通道,停车场ETC系统应用中,会出现同一收费通道内人工缴费车辆和电子缴费车辆混行现象;

3)停车场内,车辆运行速度较低,在收费通道内加、减速特性与在高速公路收费站前后路段具有较大差异,由于排队引发的延误更加明显。

基于以上3点,可得结论:城市路外停车场收费通道内的交通流特性和排队机制与高速公路收费站相比具有很大差异,这直接决定了停车场ETC系统应用的效率、效益提升将与高速公路ETC系统具有明显不同。同时,ETC系统建设复杂、涉及面广,决策者、投资者等有必要通过对停车场效益回报的量化分析获得系统应用方面的决策支持;因此有必要基于停车场ETC系统的运行机制,对该系统进行效益综合评价分析。

收稿日期:2015-10-19
基金项目:国家自然科学基金项目(51308192)
作者简介:曹旻骏(1990—),男,硕士研究生,研究方向为智能停车场系统。
通讯作者:陈景雅(1967—),女,教授,硕士生导师,研究方向为道路设计与路面材料研究,城市停车管理研究等。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考高速公路 ETC 系统效益评价体系，基于停车场 ETC 应用特征机理，从交通运行状态和节能环保等多角度出发选取恰当的效益评价指标，使用 Vissim 软件模拟停车场收费通道内的交通运行情况，采用数据包络分析法（DEA）对仿真结果进行超效率量化分析，旨在精确度量各种交通流量和付费比例下停车场 ETC 系统的效率贡献，全面评价ETC 系统建设项目的效益。

1　停车场 ETC 系统项目效益综合评价指标体系

建立停车场 ETC 系统项目效益综合评价指标体系，即选取一组具有代表性的特征指标，全面、恰当、定量地反映系统在各方面获得的效益[3]。基于停车场 ETC 系统的应用特性和评价要求，以系统性、定性和定量结合及可操作性为原则，选取运行速度、通行能力、延误时间节约价值、能源消耗价值和尾气排放价值 5 个指标对停车场 ETC 系统项目进行效益评价分析，基于对各指标的定义及相关性分析建立效益综合评价指标体系。

1.1　评价指标选取

1）运行速度。车辆区间运行速度是评价停车场出口收费服务水平的关键指标之一，定义为车辆行驶距离与通过该路段所需的总时间之比（包括收费和等待时间）。设定收费亭前后总长 70 m 路段为区间，运行速度计算公式如下：

$$V=\frac{S}{T} \tag{1}$$

式中：V 为车辆运行速度；S 为收费通道区间长度，取值为 70 m；T 是车辆通过该区间所需的总时间。

停车场收费通道收费时间缩短，可有效提高车辆运行速度，这将对提高停车场周转效率具有积极意义。

2）通行能力。将停车场出口通行能力定义为："停车场出口通道在极限条件下，车辆通过出口通道的一点或均匀断面的最大小时交通量，以 pcu 表示。"极限条件指车辆到达与离去均只保持安全的车头距离。

停车场出口通行能力的主要决定因素是收费处理时间，其计算模型如下：

$$C_b=\frac{3\ 600}{(T_{ST}+T_{GE})\mu+(T_{SR}+T_{GR})(1-\mu)} \tag{2}$$

式中：C_b 为收费通道的通行能力；T_{ST} 为 ETC 系统收费平均服务时间 s；T_{GE} 为 ETC 系统收费平均离去时间；μ为使用 ETC 付费车辆比例；T_{SR} 为人工收费平均服务时间 s；T_{GR} 为人工收费平均离去时间 s。

该项指标不代表实际通行能力，仅作为量化收费服务水平的单元参与效益评价计算过程。

3）延误时间节约价值。停车场人工收费服务水平较低，对车辆的通行速率有较大的限制，通过实施 ETC 系统，其收费时间可由人工收费的 25 s 缩短至电子收费的 3 s 左右，收费时长大幅降低。车辆在停车场中运行速度一般较低（30 km·h^{-1} 以下），满足 ETC 系统收费对车速的要求，故不考虑车辆减速所导致的时间延误。系统实施带来的延误时间节约价值计算公式如下[4]：

$$B=Q\mu T_C\frac{(T_r+T_e)}{3\ 600} \tag{3}$$

式中：B 为延误节约效益，元/d；Q 是单个停车场日均周转车辆总数；T_r 是人工收费延误时间，s；T_e 是电子收费延误时间，s；T_C 是单车时间价值，元/h。

城市路外停车场一般供小客车停车使用，无需进行标准车换算。标准小客车平均载客人数约为 2.6 人，参照不同地区人均国内生产总值，测算得出相应的时间价值（以南京为例，2014 年人均 GDP 为 10.77 万元，即单车时间价值为 31.97 元·h^{-1}）。

停车场应用 ETC 系统后，收费通道内将出现人工缴费车辆与电子缴费车辆同时存在的混行现象。路外停车场收费通道均为单车道，在收费排队中，后队车辆收费延误时间与前车缴费时间直接相关。车辆缴费时间缩短，将缩短自身及后队车辆延误时间，减少所损失的时间价值。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4）能源消耗价值。车辆在收费通道内，速度低于 30 $km \cdot h^{-1}$，并且经常出现排队等待现象。车辆在低速或怠速状态下，燃油消耗量（9.0 $L \cdot h^{-1}$）高于正常中速行驶油耗水平。ETC 系统项目的实施将缩短车辆在停车通道内滞留时间，提高车辆运行速度，减少燃油消耗及其价值。燃油消耗价值基于车辆通过收费通道的延误时间进行计算。计算模型如下[5]：

$$BRY = Q\frac{t}{3\ 600}FP_{ry} \tag{4}$$

式中：BRY 为燃油消耗的价值，元/d；Q 为单个停车场日均周转车辆总数；t 为单车平均延误时间，s；F 为车辆在收费通道内的平均燃油量，取 9.0 $L \cdot h^{-1}$；P_{ry} 为平均燃油价格，取 6 元·L^{-1}。

5）尾气排放价值。车辆在低速或怠速状态下，不仅消耗燃油增加，同时会因为燃油的不充分燃烧而排放更多尾气。停车场采用 ETC 收费系统后，车辆缴费时间缩短，排队引发的延误减小，将有效减少车辆尾气排放量，减少尾气排放价值损失。为计算因延误减少而导致的尾气排放量减少所得效益，可根据每车每小时尾气排放损失的价格，通过以下公式计算[6]：

$$B_{fs} = Q\frac{t}{3\ 600}P_f \tag{5}$$

式中：B_{fs} 是尾气排放价值，元/d；Q 为单个停车场日均周转车辆总数；t 为单车平均延误时间，s；P_f 为每车每小时尾气排放损失的价格，取 4.21 元/车·h。

1.2 评价指标相关性分析

停车场 ETC 系统项目效益综合评价是对各指标效益的综合考量；因此，结合上述对单个指标的定义和分析，选取收费时长为基准，对各评价指标进行相关性分析，确定指标之间的关联性，为评价指标体系的建立奠定基础。各指标间关联性分析如图 1 所示。

图中“+、–”号表示两指标间存在正相关或负相关关系。当收费时间缩短，收费通道内车辆运行速度增加，通行能力得到提升，延误时间节约价值增加，同时，能源消耗价值和尾气排放价值都将减少。（运行速度与车辆密度共同决定通行能力，故运行速度与通行能力两指标之间不存在严格的正、负相关关系）

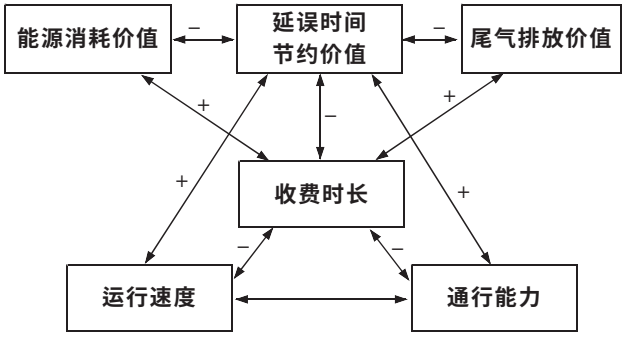

图 1 评价指标相关性分析

Fig.1 Correlation analysis of evaluations

1.3 停车场 ETC 系统项目效益综合评价指标体系

应用 ETC 系统获取效益最主要的表现为实现不停车收费，缩短收费时间，减少排队延误。5 种评价指标分别从交通运行状态、能源消耗和环保价值 3 个方面具体表达收费时间缩短所带来的各项价值，依据该指标体系通过评价方法计算综合考量停车场 ETC 系统所带来的效益回报，完成相关评价工作。以实现停车场 ETC 系统效益综合评价为目标，建立效益综合评价指标体系，如图 2 所示。

将 5 项评价指标依据属性分为两类：正向指标包括运行速度、通行能力和延误时间节约效益（越大越好）；负向指标包括能源消耗价值和尾气排放价值（越小越好）。基于该综合评价指标体系，本文采用数据包络分析法对仿真模拟获得的停车场收费通道内交通运行数据进行计算，量化停车场 ETC 系统的效益提升趋势。

2 数据包络分析方法（DEA）

数据包络分析方法（DEA）是一种以相对效率概念为基础的多目标决策方法，可以将一些无法币值化的重要指标进行量化分析[7]。相较于其他分析方法，如简单综合法、关联矩阵法、模糊评价法和层次分析法等，DEA 方法具有以下优点：

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

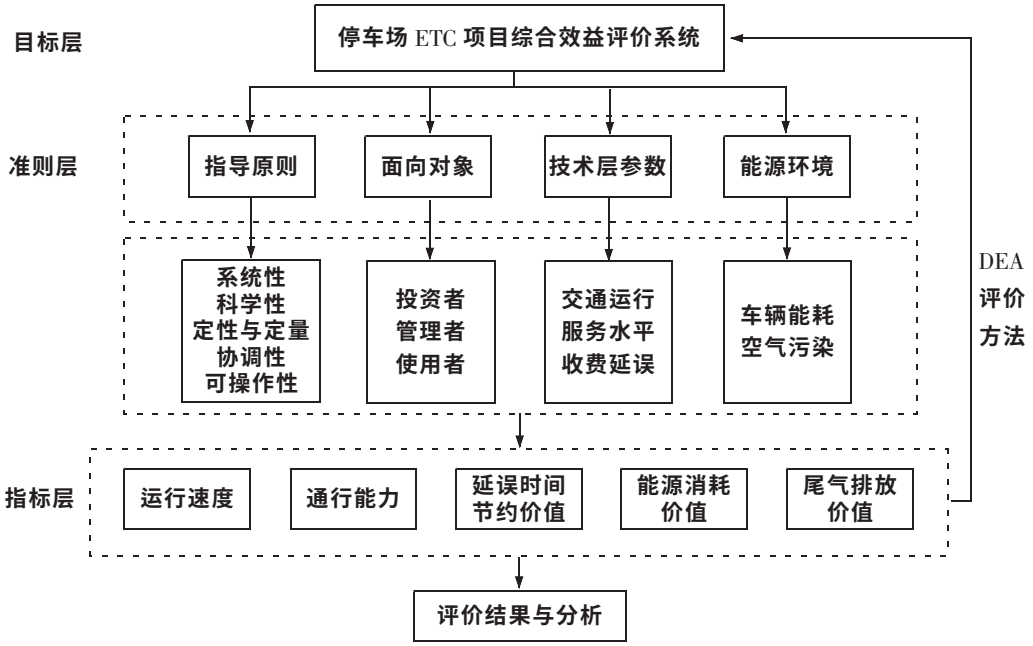

图 2　停车场 ETC 系统项目效益综合评价指标体系

Fig.2　ETC comprehensive evaluation system of parking lots

1）适用于多投入、多产出系统的效益评价，对投入、产出的函数形态无需定义；

2）具有单位不变特性，效率结果不受投入、产出数据单位变化的影响；

3）数学规划动态生成各项权重，消除人为主观因素影响[8]。

DEA 方法的局限性在于衡量生产函数边界的确定性，所有随机干扰项都会影响最后的效率评价结果，同时，该方法的评价容易受到极值的影响[9]。但在本文 DEA 方法评价应用中，结果不受方法局限性影响。

综合考虑停车场 ETC 系统项目评价指标体系中多单元的特点，采用 DEA 评价方法可对下列非币值化指标进行效益分析：① 运行速度增加，运行速度增加主要反映在 ETC 技术实现了不停车收费，收费程序在瞬间自动完成；② 通行能力增加，运行速度直接影响通行能力，通行能力的增加反映在单位时间内通过收费通道的车辆数增加，可有效提高车道的利用率，提高停车场周转率。

在 DEA 算法中，将 n 组评价对象定义为决策单元（DUM），每个决策单元都包含 m 种类型的投入数据和 s 种类型的产出数据，分别表示对“资源”的消耗和获得的“成效”[9]。结合评价指标体系以能源消耗价值和尾气排放价值作为投入量，以运行速度、通行能力和延误时间节约价值作为产出量。将投入向量和产出向量分别以 $\boldsymbol{X}_j=(x_{1j},x_{2j},\cdots,x_{mj})$ 和 $\boldsymbol{Y}_j=(y_{1j},y_{2j},\cdots,y_{sj})^{\mathrm{T}}$ 表示；同时将对应的投入、产出权向量定义为 $\boldsymbol{v}=(v_1,v_2,\cdots,v_m)^{\mathrm{T}}$ 和 $\boldsymbol{u}=(u_1,u_2,\cdots,u_s)^{\mathrm{T}}$。考察 DMU_k 的效率评价问题：以 $h_k=\sum_{r=1}^{s}u_r,y_{rk}/\sum_{i=1}^{m}v_i,x_{ik}$ 为目标，以所有决策单元的效率指数 $h_j=\sum_{r=1}^{s}u_r,y_{rj}/\sum_{r=1}^{m}v_i,y_{ij},1\leqslant j\leqslant n$ 为约束，计算 DMU_k 效率评价指数，方法计算模型如下[9]：

$$\max=\frac{\sum_{r=1}^{s}u_r,y_{rk}}{\sum_{i=1}^{s}u_i,y_{ik}},(C^2R)\begin{cases}\dfrac{\sum_{r=1}^{s}u_r,y_{rk}}{\sum_{i=1}^{s}u_i,y_{ik}}\leqslant 1,\ j=1,2,\cdots,n\\ u_r\geqslant 0,v_i\geqslant 0,r=1,2,\cdots,S,i=1,2,\cdots,m\end{cases}\tag{6}$$

利用 Charnes-Cooper 变换，令

$$t=\frac{1}{\boldsymbol{v}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}_k},\boldsymbol{\omega}=\boldsymbol{v}t,\ \boldsymbol{\mu}=\boldsymbol{u}t$$

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

因此上式规划问题转化线性规划问题为

$$\max \boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}_k, \boldsymbol{P}'(C^2R) \begin{cases} \boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}X_j - \boldsymbol{\mu}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}_j \geqslant 0,\ j=1,2,\cdots,n \\ \boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}X_0 = 1 \\ \boldsymbol{\omega} \geqslant 0,\ \boldsymbol{\mu} \geqslant 0 \end{cases} \tag{7}$$

3 仿真分析

以停车场出入口统计数据为依据，设计停车场出口收费通道交通模型，并使用 Vissim 交通仿真软件进行仿真模拟，获取相关评价指标的基础数据。仿真模型设定为长度 70 m，宽度 3 m 的直线收费通道，收费亭位于路段中点；通行车辆速度模型服从正态分布 $v \sim N(17.5,4)$（下限 5 km·h^{-1}，上限 30 km·h^{-1}）；人工缴费车辆停车时间服从正态分布 $t \sim N(25,7)$（下限 5 s，上限 45 s），ETC 用户不停车直接通过；车辆生成及跟车模型均采用 Vissim 自带默认模型。仿真方案设定为收费通道，交通量分别为 30，60，90，110 pcu·h^{-1}，混行车流中 ETC 付费车辆比例分别为 0%，20%，40%，60%，80%，日均通行车辆 1 000 辆。基于交通流量、ETC 付费车辆比例的差异性，对 ETC 系统的特征指标进行统计计算，并借助 DEA 方法及各相关指标的综合分析，评价 ETC 收费系统的综合效益。仿真结果如表 1 所示。

表 1 仿真数据结果

Tab.1 Result of simulation data

交通量/(pcu·h^{-1})	ETC 付费车辆比例/%	平均行程时间/s	车辆平均运行速度/(km·h^{-1})	平均延误时间/s	通行能力提高/%	燃油消耗量/(L/辆)	尾气排放量/(kg/辆)
30	0	46.9	5.4	32.5	–	0.117 3	0.044 0
	20	38.2	8	24.8	22.80	0.095 5	0.035 9
	40	30.6	10.1	18.2	53.30	0.076 5	0.028 7
	60	25.6	12.5	12.1	83.20	0.064 0	0.024 0
	80	20.5	15.3	6.22	128.78	0.051 3	0.019 2
60	0	56.4	4.5	42.2	–	0.141 0	0.053 0
	20	46.3	6.5	32.2	21.80	0.115 8	0.043 5
	40	36.7	8.7	22.2	53.70	0.091 8	0.034 5
	60	29.5	10.9	15.5	91.20	0.073 8	0.027 7
	80	22	14.2	7.9	156.36	0.055 0	0.020 7
90	0	85.1	3.1	70.7	–	0.212 8	0.079 9
	20	62.7	4.3	48.3	35.70	0.156 8	0.058 9
	40	41.5	7.2	27.3	105.10	0.103 8	0.039 0
	60	31.2	9.9	16.9	172.80	0.078 0	0.029 3
	80	22.9	13.1	8.7	271.62	0.057 3	0.021 5
110	0	144.1	1.7	129.6	–	0.360 3	0.135 3
	20	80.9	3.2	66.4	78.10	0.202 3	0.076 0
	40	48.7	6	34.5	195.90	0.121 8	0.045 7
	60	35	8.9	20.7	311.70	0.087 5	0.032 9
	80	24.5	12.5	10.2	488.16	0.061 3	0.023 0

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

根据式(1)–式(5)计算各 DMU 输入输出指标，使用 DEA 方法进行超效率数据包络分析(使用规划软件 Lindo 对线性规划问题求解)，计算结果如表 2 所示。

表 2　评价指标数据及效率结果

Tab.2　Calculation and efficiency results of the super–efficiency analysis

交通量/(pcu·h^{-1})	ETC 付费车辆比例/%	决策单元	区间速度/(km·h^{-1})	延误时间节约价值/元	通行能力/(pcu·h^{-1})	燃油消耗价值/元	尾气排放价值/元	DEA 效率值
30	0	DMU1	5.4	0.0	77	703.5	54.8	0.192
	20	DMU2	8	68.4	94	573.0	44.7	0.287
	40	DMU3	10.1	127.0	118	459.0	35.8	0.449
	60	DMU4	12.5	181.2	141	384.0	29.9	0.656
	80	DMU5	15.3	233.4	176	307.5	24.0	1.000
60	0	DMU6	4.5	0.0	64	846.0	66.0	0.132
	20	DMU7	6.5	88.8	78	694.5	54.1	0.197
	40	DMU8	8.7	177.6	98	550.5	42.9	0.329
	60	DMU9	10.9	237.1	122	442.5	34.5	0.517
	80	DMU10	14.2	304.6	164	330.0	25.7	0.904
90	0	DMU11	3.1	0.0	42	1276.5	99.5	0.056
	20	DMU12	4.3	198.9	57	940.5	73.3	0.123
	40	DMU13	7.2	385.4	87	622.5	48.5	0.300
	60	DMU14	9.9	477.8	115	468.0	36.5	0.519
	80	DMU15	13.1	550.6	157	343.5	26.8	0.927
110	0	DMU16	1.7	0.0	25	2161.5	168.5	0.020
	20	DMU17	3.2	561.3	44	1213.5	94.6	0.161
	40	DMU18	6	844.5	74	730.5	57.0	0.401
	60	DMU19	8.9	967.1	103	525.0	40.9	0.640
	80	DMU20	12.5	1060.3	147	367.5	28.7	1.000

分析 DEA 效率值结果可以看出，在交通量一定的条件下，ETC 系统可有效提高收费效率，随着电子付费车辆比例的提升，系统 DEA 效率值大幅增加；在相同 ETC 付费车辆比例条件下，交通量越大，ETC 所带来的效益提高越大，DEA 效率明显提升。在此基础上，以一个停车场为例进行量化收益计算，假定该停车场日均车辆周转量为 1 000 pcu，营业时间 17 h，ETC 付费车辆比例达到 80%，收益量化计算结果如表 3 所示。

通过分析 DEA 评价结果及收益量化分析结果可得出如下结论：

1）停车场 ETC 系统项目效益综合评价指标体系可从多方面全面衡量 ETC 系统所带来的各项效益，为币值化评价提供了基础；

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 收益量化计算结果

Tab.3 Calculation results of the quantized benefits

序号	车流量/(pcu·h^{-1})	持续时间/h	交通量/(pcu·h^{-1})	延误时间节约价值/元	燃油消耗节约价值/元	尾气排放减少价值/元	合计/元
1	30	7	210	49.0	83.2	6.5	138.7
2	60	5	300	91.4	154.8	12.1	258.3
3	90	3	270	148.7	251.9	19.6	420.2
4	110	2	220	222.7	394.7	30.8	648.2
合计	—	17	1 000	511.8	884.6	69.0	1 465.4

2）停车场 ETC 系统对交通性能的影响主要在于缩短收费时间，提高车辆通过速度，减少因人工缴费时间长导致的排队延误，从而大幅提高收费通道服务水平，这对提高停车场周转率具有积极意义；

3）延误的减少代表相应的人工时间成本损耗的减少，同时，车辆消耗的燃油与排放的尾气都将减少，这将带来可观的经济效益；

4）DEA 效率值与收益值均与 ETC 缴费车辆比例呈正相关关系，电子缴费车辆越多，排队时间越少，系统效率越高，获得的各项收益也越多。

4 结论

基于 ETC 系统应用于停车场收费通道对交通运行状况产生的影响分析，建立了停车场 ETC 系统项目效益综合评价指标体系，通过 DEA 评价模型和 Vissim 仿真进行量化效益分析。总体来看，停车场收费应用 ETC 系统可大幅缩短收费时间，减少排队延误，从而减少燃油消耗与尾气排放，取得良好的交通效益与经济效益。

准确地评估 ETC 系统在停车场收费方面的应用收益，根据评价结果合理配置收费系统是将各方面利益最大化的有效途径；因此，建立科学、恰当、实用的评价方法，为停车场 ETC 系统的应用提供量化分析支撑将会成为该技术发展重要的一部分。

参考文献：

[1] 贾洪飞，隽志才，姚宏伟，等. 电子收费系统(ETC)社会效益分析[J]. 系统工程理论与实践，2004(7)：121-127.

[2] 陈伟. 基于 Vissim 的 ETC 社会效益评价方法研究[J]. 长春理工大学学报：自然科学版，2013，36：136-139.

[3] 壬成祥. 高速公路不停车收费系统[J]. 安防科技，2003，3(5)：47-49.

[4] 王利杰. 高速公路 ETC 社会经济效益评价研究[D]. 南京：东南大学，2005.

[5] WENG J C，RONG J，WANG M J，et al. Calculation model on environment benefit evaluation of the ETC system[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2014，14(5)：55-60.

[6] 刘东波. 高速公路 ETC 交通效益评价研究[J]. 交通运输系统工程与信息，2013，13(4)：182-186.

[7] 曲思源，徐行方. 基于 DEA 的城际铁路列车开行方案评价[J]. 华东交通大学学报，2012，29(1)：79-85.

[8] 王全文. DEA 方法的进一步研究[D]. 天津：天津大学，2008.

[9] 魏权龄. 数据包络分析[M]. 北京：科学出版社，2004：2-19.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Study on Benefit Evaluation of ETC System for Urban Parking Lots

Cao Minjun[1], Chen Jingya[1], Dang Qian[2]

(1.College of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing 21098, China; 2. Jiangsu Province Communications Planning and Design Institute Limited Company, Nanjing 21014, China)

Abstract: According to the traffic environment of parking lots with charging channels, based on effect of the application of ETC system on traffic performance of parking lots, in light of scientific, comprehensive and practical principles, this paper established a comprehensive benefit evaluation system consisting of 5 indices selected from the three aspects of traffic operation status, cost of fuel consumption and the environmental value. Furthermore, by use of data envelopment analysis (DEA), it conducted extra-performance analyses of the traffic benefit for different traffic flow and proportions of payment methods under simulated conditions. The result indicated there was a positive correlation between DEA efficiency of the system and the proportion of ETC vehicles. It found out that average delay time decreased by 119.4 s, average travel speed increased by 735% under the simulated condition(110 pcu·h^{-1}, 80% of ETC) and traffic operation status was improved significantly in the charging channel.

Key words: intelligent transportation; benefit evaluation; DEA evaluation; ETC system of parking lots; index system; Vissim simulation

(责任编辑　刘棉玲)

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net