

我国高速公路收费技术发展综述

杨茜茜, 张 萌, 郑再超

山东交通学院, 山东 济南
Email: 1035234896@qq.com

收稿日期: 2021年3月22日; 录用日期: 2021年5月11日; 发布日期: 2021年5月18日

摘 要

详细介绍了我国从第一条收费高速公路建成以来各种高速公路收费方式及其发展, 阐述了不同时期各种高速公路收费方式遇到的问题以及应对策略, 并根据国内政策和最新科学技术现状提出了我国高速公路收费技术的发展方向。

关键词

高速公路, 收费技术, ETC技术, 自由流收费

Review on the Development of Expressway Toll Technology in China

Xixi Yang, Meng Zhang, Zaichao Zheng

Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong
Email: 1035234896@qq.com

Received: Mar. 22nd, 2021; accepted: May 11th, 2021; published: May 18th, 2021

Abstract

This paper introduces in detail all kinds of highway toll methods and their development since the first toll highway was built in China, expounds the problems encountered by all kinds of highway toll methods in different periods and the corresponding strategies, and puts forward the development direction of highway toll technology in China according to the domestic policies and the latest scientific and technological status.

Keywords

Expressway, Toll Technology, ETC Technology, Free Flow Toll

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高速公路是国民经济和社会发展的重大基础设施。“十三五”期间，我国在完善高速公路网络的同时，推动高速公路与云计算、大数据、物联网等技术的融合，“十四五”时期更是加快建设交通强国的第一个五年期。因此高速公路的发展建设一直受到国家的重点关注。高速公路建成后需要靠收费系统使资金回流，回流的资金又为高速公路发展提供技术经济支持，从而进一步推进实现交通强国的目标。从1988年我国第一条收费高速公路建成通车，到如今，我国高速公路收费技术已经历三十多年的历程。本文综述详细阐述我国高速公路收费技术的发展，并根据现状分析我国高速公路收费技术的发展方向。

2. 高速公路收费技术发展历程

自高速公路引入国内，我国高速公路建设突飞猛进，加之社会经济持续发展与科学技术不断进步，我国高速公路收费系统经历了从功能单一到功能多样，从机械手动到人工智能的过程。收费方式从单一的人工收费逐步发展到半自动收费、计重收费、联网收费、电子收费等。

2.1. 人工收费和半自动收费

在我国高速公路发展初期，由于当时的社会经济和计算机技术不是很发达，高速公路收费方式多为人工收费和半自动收费。我国大量研究人员对这两种收费方式进行了研究，发现各地区结合当地的特点配以适合的收费制式与收费方式。1994年，王菁[1]充分地比较了人工收费和半自动收费方式，最终得出全封闭、半自动收费系统更加适合当时高速公路的发展建设状况。到了2002年，权可进、王兴国[2]提出了逐步取消人工收费，加强半自动收费的观点，主张采用自动收发卡机来解决通行IC卡易丢失的问题，加上配置不停车收费设备，以此来为更好地实现联网收费作准备。孙金海[3]分析了半自动收费的各种形式，提出了IC卡式的半自动收费方式将在我国发挥重要作用且存在很长一段时期的观点。王武功[4]于2003年设计了一种新的收费系统，入口处不需要配置收费人员，利用发卡机进行发卡，而出口处的收费人员只需根据卡中显示需要支付的费用进行收费与找零。这种收费系统大大减少了人员配置以及人员的劳动强度，并且对消除高速公路通行费流失的问题有很大帮助。

人工收费需要耗费大量人力，效率低下，且随着高速公路建设不断向前发展，汽车保有量逐年攀升，这种方式越来越阻碍高速公路的通行效率，最终退出历史舞台。半自动收费属于一种过渡收费方式，在我国存在了很长时间，并和其他收费方式共同服务于高速公路收费系统。

2.2. 联网收费和电子收费

21世纪初期，中国的高速公路的建设突飞猛进。互联网的普及和计算机技术的不断成熟，人民生活逐渐转变。人均汽车保有量逐年提升，推动了高速公路的建设发展，从而一条条独立路线逐步连接成网。

汽车数量的急剧增长,促使了 ETC 收费技术的发展,与之相关的技术应运而生。随着 ETC 收费技术不断发展,在实际的初步应用中,发现了一些问题,如通行费计算不精准、收费车道设备配置不合理、收费系统仍需优化等,研究人员提出了各种模型与解决办法,从而使 ETC 收费系统更加完善。

对于通行费的计算,2001年,马啸来[5]提出一种标识站法来解决路段二义性的问题,并设计了数据清分算法来结算路网收费情况,更有利于高速公路建设连接成网之后面临的费用清算问题。但对于路网变化拆除人工标识站形成多个环路时,这个方法已经不能满足精确计算通行费的作用。刘学寨[6]于2008年提出了用最短路径法来解决精确计算和拆分通行费的问题,并引入了车牌识别技术判断车辆的行驶路径来作为收费依据。最短路径法不用对路径进行辨别,认为道路使用者一定按最短路径行驶,不太符合实际,具有很大的局限性。但如果同时引进车牌识别技术对车辆路径进行判断,就会大大提高通行费计算的准确性。对于具体的收费技术,何海军[7]开发设计了关于非接触式 IC 卡以及 IC 卡自动收发机的部分系统,对当时高速公路的缴费作弊现象提供了很好的解决办法,推动了高速公路收费技术的进一步发展。2004年,郇鹏、张仲义[8]将射频识别技术的不停车收费系统应用于高速公路收费。IC 卡可以有效防止车辆逃费现象,但也会出现 IC 卡丢失的现象,射频识别技术可以有效避免丢失问题并且提高了车辆通过收费站的时间,但需要在车辆上装载设备,两者各有利弊。但 IC 卡、射频识别技术都是利用互联网使得整个高速路网更加系统化、智能化。

针对收费车道配置不合理的问题,2005年,潘红[9]利用计算机仿真的方法建立了在 ETC 与 MTC 同时存在高速公路收费系统情况下的一种收费站模型,提高各类车道的使用率,但对于多于双向四车道的收费站口还需进一步探讨。刘海涛[10]根据排队论建立了一种优化模型,此模型是以高速公路收费系统延误时间最小为目标,得到车道的类型和数量的最佳配置。而宋丽晓[11]则是基于排队论和遗传算法对车道进行优化设计,以收费系统总费用损失最小为原则,得到收费车道优化配置模型。MTC 与 ETC 车道两者共同服务高速公路的收费系统,既满足了车辆通行的目的,又为日后发展 ETC 技术提供了大量的分析数据。

在 21 世纪初期,联网收费和 ETC 技术处于试用阶段。对于整个收费系统的优化,黄正全、张其善[12]在 2003 年研发了一种融合式的自动收费系统,该系统是在我国不具备大规模实行 ETC 技术的情况下研发的,具有较好的兼容性和拓展性,并为随后发展 ETC 技术提供了接口功能。2008 年,田珏[13]设计了一种旨在服务于高速公路联网收费系统的路网模型,该模型分析了各省的联网收费系统,基于公路各元素之间的拓扑关系建立起了一种路网模型,使得整个路网更加符合高速公路发展的需求。2009 年,王艳平[14]对组合式电子收费系统进行了深入研究,提出了要考虑 ETC 系统与建成的 MTC 系统之间的有机结合的观点,并且建立了一种组合式电子收费技术模型来完成缴费,更加完善了高速公路的收费系统。

2.3. 计重收费

计重收费主要是针对货车而言,从按车型收费转变为计重收费,有效地避免了超重超限运输问题。但这种收费方式发展初期有很多弊端,驾驶员利用政策或设备的漏洞达到逃费的目的,而车辆计重的过程,又增加了车辆通过收费站的时间,造成堵塞,从而降低了高速公路的通行能力。故大量学者研究各种理论模型和方法,在兼顾高速公路收益的同时,保证高速公路的通行效率。

2004 年,马睐[15]等人建立了非线性“两部定价”理论模型,为了加强超限超重运输管理,设计了一种货车计重收费方案,为发展计重收费提供了理论基础。次年,康元春[16]就山西煤炭超限运输问题,提出了两种货车计重收费的建议方案,并建立了测算模型,合理地增加了对超限超重车辆的通行费。2007 年,齐兰[17]设计了一套动态称重的信号仿真源以及其输出通道,可以构成造各种称体机械装置,为之后

计重收费系统提供了技术支持。陈辛、李静等人[18]建立了带时间窗的最小费用路径的数学模型,并开发了相应的路径优化系统。该系统具有良好的扩展性,进一步完善了计重收费系统。张祎[19]就各种逃费形式从管理层面提出了有针对性的建议与对策,对实施计重收费并出现类似逃费形式的车辆的省份具有良好的借鉴意义。2009年,王晓宇[20]综合各种模型与理论,对限内和超限的收费模型进行了优化,为制定计重收费的标准提供了依据。苑翠峰[21]提出用双台面称台计重,增加车辆有效检测时间的方法,以此来减少收费逃费现象。万灿军、李长云[22]在联网收费的基础上,提出了计重收费通行费计算及拆分算法。2010年,曾祥平[23]等深入研究了动态计重收费设备的关键技术参数,为我国行业标准的制定提供理论基础。廖鹏[24]在2012年提出动态称重系统与收费系统相结合的观点,提升ETC识别率,减少称重时间,从而提高车辆通行效率。上述可以看出,计重收费一方面可以通过政策和条文进行管理约束,同时也可以通过硬件设备提供技术支持,从而实现称重收费目的。从高速公路收费技术上说,动态称重技术是计重收费的发展方向,保证收益的前提下减少了车辆延误。

2.4. 各种收费方式比较

上述收费方式可从收费对象、等待延误、投资成本、运营成本四个方面进行比较(如下表1)。

Table 1. Comparison of various charging methods

表 1. 各种收费方式的比较

比较方面	收费方式	收费对象	等待延误	投资成本	运营成本
	人工收费	客车、货车	高	低	高
	半自动收费	客车、货车	较低	较高	较高
	电子联网收费	客车、货车	低	高	低
	计重收费	货车	高	较低	较高

人工收费前期投资成本低,遇突发事件可以机动地处理,但所需人力多,且劳动强度大,设备维修周期短。人工对车辆进行收费,出错率高,车辆逃费现象屡屡出现。这种收费方式出现在高速公路建设初期,全国车辆保有量以及道路负荷并不高,但随着科技与经济不断发展,人工收费已经不适合整个高速公路的发展,很快被淘汰。半自动收费是一种过渡的收费方式,一种从人工向自动转变的过渡模式。半人工半自动收费方式在我国占很长时间,由设备对车进行识别,人工进行收费。既没有人工收费所需劳动力多,也不需要过高的投资成本。相对人工收费来说,可以很大提高收费效率,很适合当时中国的经济技术发展状况。随着国家愈来愈重视对高速公路的建设,逐步形成了全国高速公路网,国家的联网电子收费应运而生。互联网的运用使整个收费系统成为一个整体,查询更加方便。ETC技术的迅速发展,极大地提高了高速公路收费技术的自动化,同时减缓了车辆拥堵状况,减少了因人工产生的失误。后续只需对设备进行定时维修,极大减少劳动强度。整个收费系统向系统化、自动化发展。计重收费主要是针对货车而言,整个过程需要互联网、讯通装备、称重设备的加入,货车的收费需要对经过车辆进行称重,称重过程中耗费时间的累积又加深了车辆的拥堵,降低了高速公路的通行效率。所以后续为了解决这个问题,提出了动态收费,提高车辆通行效率。

上述收费方式各有利弊,但不同时期就有不同的侧重点。在互联网蓬勃发展的时代,电子联网收费必将持续发展,而经济的增长使得人民生活的需求不断发生转变,故经济与科技水平的逐步提高推动着收费方式的不断变化与更新。

3. 高速公路收费技术发展现状

随着信息技术和互联网技术的发展,人们不再只拘泥于现金支付。刷卡消费、电子消费等模式相继出现,这些支付模式都避免了人工找零的时间,从而提高了高速公路的通行效率。而后微信、支付宝等软件的产生,对人们日常生活产生了极大影响,改变了人们出行时的行为习惯,同时这些改变也促使高速公路的产生新的收费方式。2014年,交通运输部提出要实现智慧交通、平安交通、绿色交通与综合交通。我国高速公路收费正朝着智能化、信息化迈进。ETC技术飞速发展,传统的收费模式也在向自由流收费模式转变。在2018年5月,国务院常务会议决定,将推动取消高速公路省界收费站。在如今大数据、“互联网+”等技术广泛应用的背景下,这一决定使得高速公路收费系统与其他技术相互融合,产生基于FRID技术的电子不停车收费系统并且更适合我国高速公路收费技术发展的技术设备等。我国ETC与MTC共同服务于高速公路收费系统的时间较长,但经过努力也逐步地取消了MTC车道,全部采用ETC车道,极大地提高了车辆的通行能力,实现了全自动收费。而关于计重收费,国务院调整了货车通行费计费方式,规定从2020年1月1日起,货车统一按车(轴)型收费,并确保不增加货车通行费总体负担,同步实施封闭式高速公路收费站入口不停车称重检测。这一规定,避免了以往货车车辆计重收费的弊端,规范了货车的收费方式。

唐先亮在2010年[25]设计了一种组合式收费技术方案,该方案实现了无论是MTC车道还是ETC车道,都可以完成非现金支付。2017年李蓉[26]提出将“互联网+”第三方支付平台应用于高速公路收费系统中,这一观点有助于提高收费效率。到2019年,常胜男[27]设计了基于Android系统的一款移动端的高速公路无感支付系统。王琦[28]开发设计了一种高速公路全自动智能收费机,促进智慧交通的建设。这些支付模式是在MTC车道与ETC车道并存的情况下,两者都可以实现非现金缴费甚至是无感支付,缩短收费时间。

对于高速公路与其他技术的结合,2014年到2017年间,程一曼等[29]人应用三维GIS技术建立三维虚拟现实,提高了高速公路信息化管理。赵超杰[30]将GPS技术融入到高速公路收费系统中,实现了车辆的人工识别路径。黄炎[31]在赵超杰的基础上更进一步,建立了能有效支持路径识别的GIS模型信息数据库,使整个高速路网的车辆定位更加准确。梁本仁等人[32]基于北斗差分定位技术,建立了车辆精确定位监测系统。莫丽娜[33]研究了基于图像背景差值法的车型识别系统,从而更好地识别不同类型的车辆,使ETC收费系统更加有效率。2018年,张光华[34]提出了北斗泛在精准定位技术应用于交通收费系统。这些定位技术可以实时观测车辆位置,辨别车辆的行驶路径,为中国高速公路收费提供巨大的技术支持。

关于车辆逃费现象,2018年陈尔希[35]基于挖掘分析算法开发了用于逃费稽查的大数据平台系统。杨龙海等[36]人设计了车辆异常行为分级检测算法,可以识别车辆的各种异常行为。在2019年,华为技术有限公司[37]推出的华为云+ETC门架智慧站点边缘AI平台有效地防止车辆偷逃费行为。李红岩[38]设计了一种异常轨迹检测算法,可以获得车辆异常轨迹的类型和数量。2020年,邹嵩涵[39]设计了一种利用数据挖掘技术结合高速公路异常行为分析业务的算法模型,更容易地检测出异常车辆。上述模型和算法都是围绕车辆异常轨迹的监测,对逃费车辆进行精准定位,为高速公路收费系统提供保障。

4. 高速公路收费技术发展方向

在国家交通运输部的支持下,我国高速公路向智慧高速公路稳步迈进。当前,我国智慧高速公路建设正处于初级层次。高速公路收费技术也继续朝着数字化、网络化及智能化的方向发展。ETC技术对我国实现智慧高速有着极其重要的作用。2019年5月,国务院办公厅印发《深化收费公路制度改革取消高速公路省界收费站实施方案》。这一文件的印发,推进了收费公路进一步的改革,使得ETC自由流收费

模式作为我国主流的收费模式成为可能。欧美国家已经普遍使用这种无收费站的 ETC 自由流模式，大大提升了车辆通行效率。我国大量学者提出要充分利用 ETC 技术发展智慧高速公路，实现高速公路自由流收费。而 ETC 自由流模式需要对车辆进行准确识别和精准定位，故许多研究人员提出或设计出基于车辆识别或车辆精准定位的思路和系统。

4.1. 研究

2019 年，盛亮[40]基于车辆特征识别设计了一个高速公路移动支付平台系统，实现不停车收费操作。汤成、李奇峰等[41]认为应该充分发挥 ETC 的技术优势，推动 ETC 自由流收费技术发展，向“无感通行”迈进。史进[42]提出要推动不停车收费自助化以及不停车收费无感通过。2020 年，杨晓寒[43]从新的政策、形势以及技术等多个方面，提出了我国高速公路新的收费管理思路。王维芳[44]设计了一款北斗高精度车载终端，提高了定位精度，有助于高速公路自由流收费技术的发展。刘小明等人[45]提出了基于区块链技术的车辆轨迹认证方法，实现实时查询车辆轨迹数据。王震宇[46]分析了 ETC 技术推动智慧高速发展的作用，提出 ETC 技术才是实现我国高速公路智能化的技术保障。林凤榕[47]构建了一个覆盖大部分车辆的基于车辆身份的账户体系，能够使无感支付更加安全、高效、便捷。王琪，王广娜[48]提出要基于 5G 和车联网技术发展智慧高速公路。胡凌，宋鸣镛[49]认为多车道自由流是今后不停车收费技术的发展方向，并且提出要从车辆精准定位以及车牌识别精度方向进行改善和提升。袁毅[50]深入分析了 ETC 门架抓拍数据，探究并开发自由流收费视频车辆判别系统，提升抓拍准确率，完善自由流收费技术。上述高速公路收费技术都是基于对车辆进行识别和精准定位，从而实现 ETC 自由流模式。

交通乃兴国之要、强国之基。为了早日实现我国交通强国的目标，就必须加快智慧交通的建设。而智慧交通的发展，离不开先进的技术。未来高速公路将朝着 ETC 自由流收费持续发展。要想全面实现 ETC 自由流收费，还需要攻克许多技术难关。但目前，应继续发展 ETC 技术并充分发挥其优势；其次，收费系统需要与云计算、大数据、5G、北斗等新兴技术不断融合，完善车辆识别和车辆精准定位技术；另外，收费手段将向多样化方向发展，根据不同的道路特点采取不同的收费方式。高速公路自由流收费对于收费系统来说是一场革命性的变化，最终会形成以 ETC 为主，北斗等新兴技术为辅的自由流收费系统。

4.2. 新兴技术发展对高速公路收费的影响

物联网：一种电子、通讯、计算机的融合。例如射频识别技术、GPS，能够识别、追踪以及监控车辆，使车辆、道路进行连接，实现车路协同。就像人的神经网络，感知整个系统并可以实时反馈给中心，中心下达任务，神经负责传达，形成有机统一体，是整个高速公路收费系统自动化的技术基础。

5G：就像人刺激反应能力，超高的数据传输速率为高速公路收费系统的畅通提供了保障。5G 的出现，为整个高速公路收费系统注入了新的能量与活力。

云计算与大数据：巨大的云储存空间为储存高速公路收费系统的海量数据提供了足够的空间，并且可以数据共享与整合，大数据分析则结合云计算对海量的车辆数据进行储存和分析，有助于对车辆的监察以及管控，为监察车辆逃费的现象提供了技术保障。两者就如人的大脑，对获得的信息进行记忆储存以及整合分析，以此做出更好的指令。

北斗：就像人的皮肤，遍布全身，可以感知身体上的任何部位，并无时不刻地将状态反馈给大脑。北斗卫星导航系统可以实现车辆的自主导航、车辆跟踪监控等任务，为之后实现 ETC 自由流提供了坚实的技术支持。

上述技术的关系见图 1。

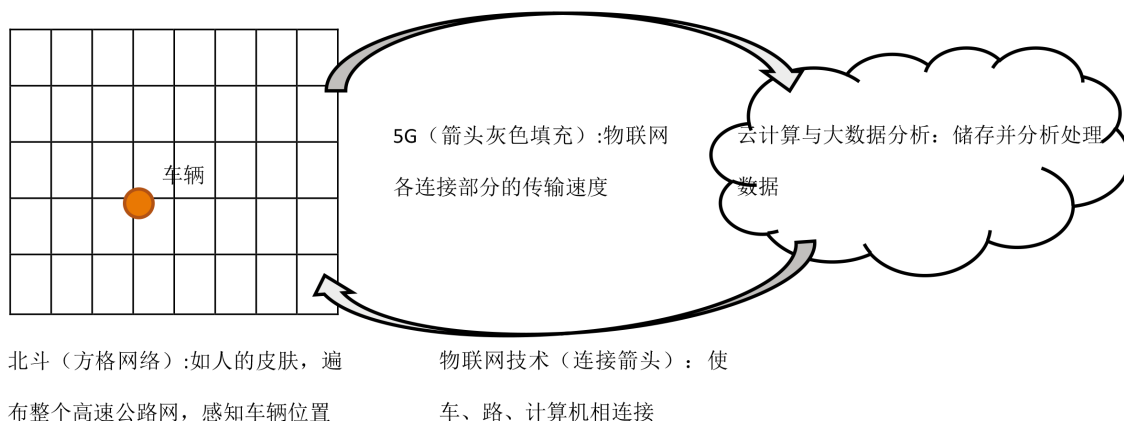


Figure 1. The relationship between emerging technologies and its effect on high speed toll system
图 1. 新兴技术之间的关系以及对高速收费系统的作用

5. 结论

我国高速公路收费技术发展初期，收费方式多为人工收费和半自动收费。随着科技的发展，人工收费不再适应高速公路的发展，从而被淘汰。半自动收费是一种过渡收费方式，需要人工的干预，与其他收费模式一同服务高速公路收费系统，且存在的时间较长。联网收费和电子收费方式的出现，是互联网的普及和计算机信息技术快速发展背景下高速公路收费技术发展的必然趋势。然而，这两种收费模式发展初期依旧存在很多问题，如通行费计算不精确，收费车道配置不合理等等。计重收费主要对于货车而言，有效避免了超重超限的问题，但实施初期存在很多不足，偷费、逃费现象严重，称重过程所需时间影响了高速公路的通行效率。以上这些问题大量学者都进行了深入研究和分析，并提出了各种模型和解决办法。近十年，随着国内经济提升和计算机技术的不断革新，加上高速公路建进入极速发展期，收费技术面临着很大的复杂性和挑战性，错综的路网、海量的数据以及技术的难关都需要大量研究人员去分析、整理和解决。国家的政策也随之发生改变，如取消货车计重收费统一按车(轴)型收费，取消高速公路省界收费站等，都引导着高速公路及其收费技术的发展方向。在未来，高速公路会朝着智慧高速公路继续迈进，收费技术会与大数据，云计算，物联网，5G，北斗等新型技术不断擦出火花，为收费技术提供新的技术思路，更好地实现车辆在高速公路上的ETC自由流收费模式。可能在未来的某一天，高速公路上看不到任何物理意义上的收费建筑，真正实现全程“无感通行”。

参考文献

- [1] 王菁. 浅谈高速公路收费系统的收费方式[J]. 东北公路, 1994(3): 70-73.
- [2] 权可进, 王兴国. 运风高速公路收费模式发展浅析[J]. 山西建筑, 2002(11): 99-100.
- [3] 孙金海. 谈高速公路的几种收费方式[J]. 公路运输文摘, 2002(1): 22-23.
- [4] 王武功. 高速公路收费系统新模式研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2003.
- [5] 马啸来. 基于电子收费技术的高速公路联网收费模式研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2004.
- [6] 刘学寨. 基于车牌识别系统的多路径结算系统[J]. 中国交通信息产业, 2008(12): 94-96.
- [7] 何海军. 循环式 IC 卡收发机及高速公路联网收费系统相关技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2002.
- [8] 郇鹏, 张仲义. 基于射频技术的高速公路不停车收费系统[J]. 交通运输系统工程与信息, 2004(2): 121-124.
- [9] 潘红. 高速公路收费站 ETC 车道设置仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2005.
- [10] 刘海涛. 公路联网收费的缴费方式选择与路径识别模型研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2005.

- [11] 宋丽晓. 电子不停车收费系统的研究与优化设计[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2009.
- [12] 黄正全, 张其善. 高速公路融合式联网收费系统设计与实现[J]. 遥测遥控, 2003(2): 51-54.
- [13] 田珏. 高速公路封闭式收费系统软件模型研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2008.
- [14] 王艳平. 组合式收费系统在甘肃省的推广研究和实施方案[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2010.
- [15] 马暎, 王健伟, 杨铭. 公路计重收费定价理论模型与实证研究[J]. 价格理论与实践, 2004(3): 27-28.
- [16] 康元春. 山西高速公路实施计重收费的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2006.
- [17] 齐兰. 高速公路计重收费动态称重的应用研究[J]. 企业标准化, 2007(12): 30-31.
- [18] 陈辛, 李静, 杨帆, 等. 基于计重收费的车辆路径优化系统设计与实现[J]. 中国制造业信息化, 2007(17): 69-72.
- [19] 张祎. 让作弊者无处可逃——计重收费逃费手段分析与管理思考[J]. 中国交通信息产业, 2007(9): 52-54.
- [20] 王晓宇. 高速公路计重收费标准最优确定模型研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2009.
- [21] 苑翠峰. 高速公路计重收费偷、逃费解决方案——两称台公路车辆计重收费、超限检测系统[J]. 科技风, 2009(24): 57+83.
- [22] 万灿军, 李长云. 高速公路联网计重收费通行费计算及拆分方法[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(3): 246-248.
- [23] 曾祥平, 王鼎媛, 李俊娜. 高速公路动态计重收费设备关键技术参数研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2010, 6(8): 295-298.
- [24] 廖鹏. 高速公路计重 ETC 信号采集的研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- [25] 唐先亮. 高速公路非现金支付和电子不停车收费的研究与实现[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2010.
- [26] 李蓉. “互联网+”高速公路收费系统分析研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原科技大学, 2017.
- [27] 常胜男. 基于移动终端的高速公路无感支付系统设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2019.
- [28] 王琦. 基于 PLC 的高速公路全自动智能收费机设计与应用[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2019.
- [29] 程一曼, 李舸, 李翼. 三维 GIS 在陕西省高速公路管理中的应用设计[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(12): 107-109.
- [30] 赵超杰. 基于 GPS 技术的高速公路收费系统精确路径识别研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [31] 黄炎. 基于卫星定位的高速公路联网收费路径识别技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
- [32] 梁本仁, 斯庭勇, 王世臣. 基于北斗的车辆精确定位监测系统设计与实现[J]. 电子世界, 2016(1): 130-132.
- [33] 莫丽娜. 青海地区高速公路电子不停车收费系统应用关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [34] 张光华. 基于北斗的收费革命[J]. 中国公路, 2018(15): 31.
- [35] 陈尔希. 基于通行大数据的车辆逃费稽查系统的研究与开发[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2018.
- [36] 杨龙海, 徐洪, 张春. 基于 GPS 数据的高速公路车辆异常行为检测[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(5): 97-103.
- [37] 华为自由流收费大数据稽核解决方案及应用[J]. 中国交通信息化, 2019(12): 138-141.
- [38] 李红岩. 车辆轨迹异常检测应用研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春工业大学, 2019.
- [39] 邹嵩涵. 面向高速公路收费数据的异常行为分析与应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [40] 盛亮. 高速公路不停车移动支付浅析[J]. 中国管理信息化, 2019, 22(24): 63-65.
- [41] 杨晓寒, 彭亚荣. 面向 ETC 自由流的收费管理探讨[J]. 中国交通信息化, 2020(9): 40-43.
- [42] 史进. 浅谈“自助化+无感通过”技术及其发展[J]. 低碳世界, 2019, 9(6): 224-225.
- [43] 汤成, 李奇峰, 陈伟明, 等. 高速公路 ETC 自由流收费技术探讨[J]. 中国交通信息化, 2019(1): 118-120.
- [44] 王维芳, 钱莉, 王立端. 基于北斗高精度定位的自由流车载终端软硬件研究[J]. 软件导刊, 2020, 19(5): 155-158.
- [45] 刘小明, 尚春琳, 张杰, 陈洁, 魏向达, 朱桂清. 基于区块链技术的高速公路收费凭证信息认证方法研究[J]. 智能科学与技术学报, 2020, 2(2): 153-160.
- [46] 王震宇. 浅谈 ETC 技术对我国智慧高速公路发展的推动作用[J]. 智能城市, 2020, 6(19): 157-158.
- [47] 林凤榕. 基于多方式车辆身份识别的涉车支付系统关键技术研究[J]. 福建交通科技, 2020(1): 143-145.

- [48] 王琪, 王广娜. 5G 背景下智能交通的发展趋势探讨[J]. 内燃机与配件, 2020(9): 263-264.
- [49] 胡凌, 宋鸣镛. 从专利信息看多车道自由流技术研发趋势[J]. 专利代理, 2020(2): 76-79.
- [50] 袁毅. 自由流收费视频车辆判别系统探究[J]. 中国交通信息化, 2020(7): 88-92.