

地面交通控制的百年回顾和未来展望

李力¹ 王飞跃^{2,3,4,5}

摘要 从路权这个新的角度回顾了过去 100 年地面交通控制发展的几个关键转变点,并结合目前新兴的网联车和无人车技术,分析了今后 50 年地面交通控制的发展方向。

关键词 交通控制,无人车,自动驾驶,路权

引用格式 李力,王飞跃.地面交通控制的百年回顾和未来展望.自动化学报,2018,44(4):577-583

DOI 10.16383/j.aas.2018.c170616

Ground Traffic Control in the Past Century and Its Future Perspective

LI Li¹ WANG Fei-Yue^{2,3,4,5}

Abstract In this paper, we first review the past 100-year development of ground traffic control from the viewpoint of right of way. Then, based on the development of the recent connected and automated vehicle (CAV) technologies, we provide a perspective of its next 50-year development.

Key words Traffic control, connected and automated vehicles (CAV), autonomous driving, right of way

Citation Li Li, Wang Fei-Yue. Ground traffic control in the past century and its future perspective. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(4): 577-583

在现代社会,地面交通出行与我们每个人密切相关.在当前城市道路日益复杂和拥挤的情况下,如何保证交通出行的安全和便捷是国内外社会大众和科研工作者共同关注的热点问题。

实现该目的的重要方法之一是实施有效的交通控制.很多研究者将 1914 年出现在美国俄亥俄州克利夫兰市 (Cleveland, Ohio) 的电气交通信号灯作为地面交通控制系统的真正发轫.虽然今天的交通信号灯和早期的交通信号灯 (见图 1) 形式变化不大,

但在过去的 100 多年中,交通控制从理论方法到产品系统都经历了深刻的变化.然而在日益增长的交通出行需求压力下,现有的交通控制方法已经逐渐达到性能天花板.今后的地面交通控制应该如何发展是摆在所有研究者面前的重要问题。



图 1 1924 年德国柏林坡茨坦广场的五边交通灯塔
Fig. 1 The famous five-sided traffic light tower installed at Berlin's Potsdamer Platz in 1924

从更高的角度来看,交通是人或物在时空上的转移.地面交通控制的核心一直是如何使用各种方法在时空上对道路通行权进行合理高效的分配和提示,解决人们通过交通冲突区域时可能发生的冲突问题。

收稿日期 2017-11-07 录用日期 2018-03-07
Manuscript received November 7, 2017; accepted March 7, 2018
国家自然科学基金 (91520301, 61533019, 71232006, 61233001) 和北京市科技项目 (D17110600030000, ZC179074Z) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (91520301, 61533019, 71232006, 61233001) and Beijing Municipal Science and Technology Commission Program under Grant (D17110600030000, ZC179074Z)

本文责任编辑 魏庆来

Recommended by Associate Editor WEI Qing-Lai

1. 北京信息科学与技术国家研究中心,清华大学自动化系 北京 100084 2. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室 北京 100190 3. 青岛智能产业技术研究院 青岛 266109 4. 国防科学技术大学军事计算实验与平行系统技术中心 长沙 410073 5. 中国科学院大学中国经济与社会安全研究中心 北京 101408

1. Department of Automation, Beijing National Research Center for Information Science and Technology (BNRist), Tsinghua University, Beijing 100084 2. The State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 3. Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266109 4. Research Center of Military Computational Experiments and Parallel System, National University of Defense Technology, Changsha 410073 5. Center of China Economic and Social Security, The University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408

所谓道路通行权 (Right of way, 简称路权), 可理解为对特定时空范围道路资源的优先占有权和使用权^[1-2]. 类似于铁路的轨道闭锁机制^[3], 地面驾驶同样需要保证在特定的时间和空间内, 最多只有一辆车存在. 换句话说, 如果我们按照时间和空间两个维度, 以最小时间和最小空间为分割单位, 将道路资源划分为时空网格, 那么, 每个格子最多只能被一辆车占用. 如果违反了这一法则, 碰撞就会发生.

历史上的地面交通控制正是围绕着如何合理妥善解决路权竞争的问题而发展起来的. 历经百年来的发展, 交通系统大致经历了无控制时期、标志标线控制时期、单点定时交通信号控制时期、智能交通控制时期、车路协同时期和自动驾驶时期等几个阶段. 图 2 的时间轴描绘了标志着这几个时期切换点的国内外典型事件所发生的年代.

有鉴于此, 本文从路权这个新的角度回顾了过去 100 多年地面交通控制发展的几个关键转变点, 对比了各个时期交通路权的获取方式和性能. 我们特别结合目前新兴的网联车和无人车技术, 探讨了基于规划分配或竞价获取的交通路权分配, 分析了今后 50 年地面交通控制的发展方向.

1 无控制时期

最初, 人们在遇到路权纷争时, 往往遵从“先到先行, 互相礼让”的基本原则. 双方驾驶员根据各自

目视的结果, 决定由谁优先通过冲突区域, 并按照默契各自驾驶. 实际上, 这也是从步行、骑马和驾驶马车时代起就遵循的基本路权决定方式.

但这一路权决定方式存在诸多问题:

1) 该决定方式非常依赖于驾驶员对周边环境的正确感知和合理判断. 在车速较快、视线不佳、交通状况复杂等情况下, 驾驶员难以准确地判断何时何地会发生碰撞, 因此无法决定路权归属^[4].

2) 该决定方式需要多方驾驶员采用能够共同理解的方式进行交流. 在转向灯还未出现的时候, 驾驶员会将手臂伸出窗外, 通过不同的手势来表示其行驶意图. 即使在转向灯已是车辆必备件的今日, 驾驶员也经常以眼神和手势来辅助换道、并线等操作. 为此, Google 公司还在 2015 年提交了无人车和人类驾驶员交流的专利^[5]. 然而, 手势交流首先没有统一的交互标准. 人们互相打手势或者眼神示意的方式千差万别; 特别是由于历史文化差异, 不同国家和地区对同一手势可能有截然不同的解读. 其次, 手势交流的通信速度慢、可视距离短、谈判效率低, 在车辆速度较高时, 极易出现误差而造成交通事故.

3) 该决定方式在相当程度上取决于驾驶员个人的礼让精神, 路权的分配很可能由“合作”演变为“竞争”, 甚至“抢夺”.

由于上述三方面问题, 基于默契的路权谈判很难在短时间内有效达成. 因此, 这一路权决定方式在汽车时代逐渐被新的交通控制方式所代替.

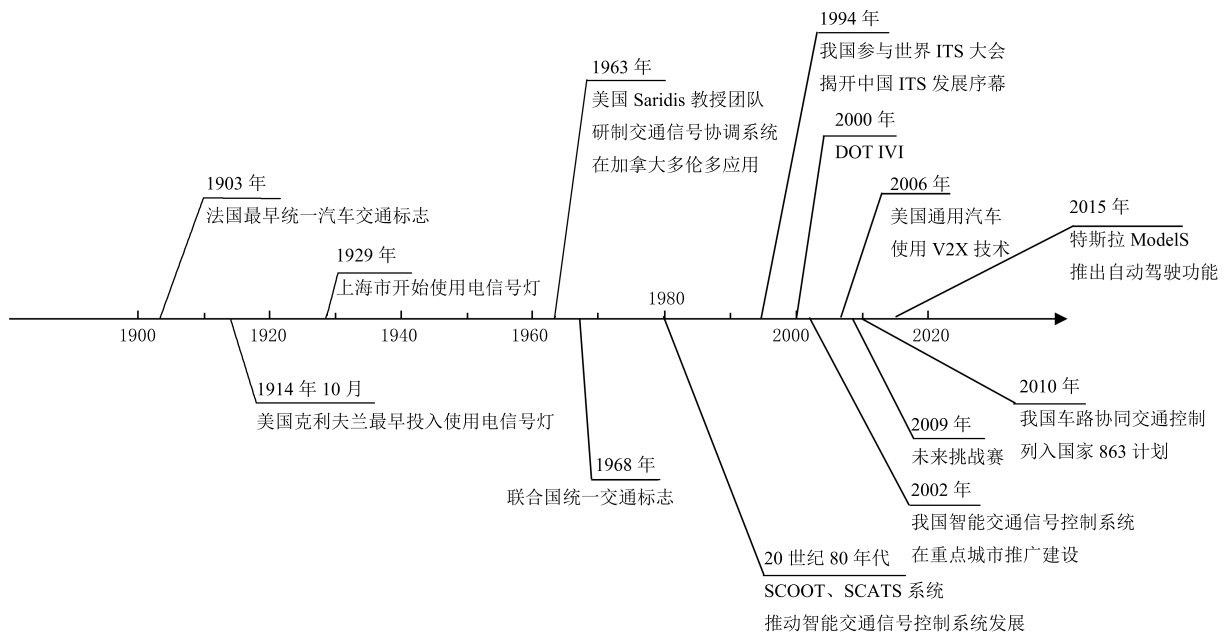


图 2 地面交通控制百年发展时间轴图

Fig. 2 Timeline for the past 100-year development of ground traffic control

2 交通标志标线控制时期

早在中国周代, 已有“列树以表道”的记载. 在古罗马时代的军用大道上也设有里程碑和指路牌. 但这些仅仅是标记道路信息, 并未指示路权.

1903 年, 由于法国汽车联盟的积极推进使法国成为世界上最早在全国范围内使用统一汽车交通标志的国家. 而直到 1930 年以后, 统一交通标志法才在英国各地获得认可, 使交通标志更加规范化. 1935 年, 美国的第一版《统一交通控制设施手册》(Manual of United Traffic Control Devices) 出版, 在全美国统一了制作交通标志的办法和标准. 这一阶段, 交通标志依然以提示驾驶员危险为主要职责. 如当时的法国交通标志是在黑色的木板上用白漆书写“左拐”、“右拐”、“桥梁”等提醒司机注意的文字.

1968 年, 联合国颁布《道路交通和道路标志、信号协定》作为各国制定交通标志的基础. 从此各国的交通标志在分类、形状、颜色、图案等方面逐渐向国际统一的方向发展. 地面交通进入了“各行其道”的时代.

道路交通标志通常用图形符号和文字来传递特定的交通法规以及交通运行控制方法的信息. 道路交通标线是由路面标线、箭头、文字、立面标志、突出路边、道路轮廓线等组成, 用于路权设置的基础设施. 这两者的作用都是为了管制、引导、控制和分配交通流, 可单独使用也可配合使用.

交通标志标线控制的优势在于造价低廉、耐用, 尽量减少人对于路权的理解歧义和纷争. 在道路中明确标识了道路使用权中的通行权、先行权、占用权等, 是目前道路交通中最为重要的静态交通设施. 特别是车道线的引入, 大大简化了车道路权的分配方式, 减少了车辆行驶冲突发生碰撞的风险.

然而, 交通标志标线对交通冲突点(交叉路口和出入口匝道)区域中不同方向车辆的路权很难起到有序和安全的控制引导. 因此, 交通信号控制成为地面交通控制的研究重点.

3 单点定时交通控制时期

最早的交通信号灯出现在 1868 年英国伦敦威斯敏斯特区, 为调度马车的运行而设立, 由煤气点燃发光的, 仅仅工作了 20 余天便因为煤气爆炸而夭折. 所以, 很多人认为 1914 年出现在美国俄亥俄州克利夫兰市(Cleveland, Ohio)的电气交通信号灯才是交通控制系统的真正发轫^[6]. 而中国直到 1929 年才在上海市第一次安装交通信号灯.

交通信号灯的出现, 使得“令行禁止”成为了交通冲突点的新型路权分配和提示方式. 通常, 交通信

号控制用在道路空间上不同方向交通流冲突的交叉口, 用来在时间维度上给不同方向的交通流分配道路通行权.

传统的交通控制系统将道路上的连续多个车辆视为流体, 通过局部时空中的流体密度、速度和流率来简化描述车辆的运动^[7-11]. 为了避免车辆在路口发生碰撞, 一般根据车流方向划分不同的相位, 在一段时间内依次切换各个相位, 以便不同方向的车辆通过. 所有相位切换一遍的时长称为周期, 其中去掉红灯黄灯时长, 路口能被利用的有效时间和周期的比值称为绿信比.

交通信号灯的引入一方面改善了交叉口通行秩序, 另一方面降低了驾驶员信息负荷, 从而减轻驾驶负担. 在安装了交通信号灯的交叉路口, 潜在冲突区域的路权决定有了“权威认证”. 路权由原先驾驶员之间的“分布式”谈判转变为“集中式”指派. 从此, 人们只需按照统一的红绿灯规则, 和前车保持距离行进, 无需花费时间和精力和其他方向的司机进行沟通, 大大降低了道路交叉口的事故率. 而居于高处、有着明亮颜色的红绿灯能够被通过道路交叉口的众多驾驶员一致看到并明确认知, 很好地解决了消息交互和确认的问题.

早期的信号灯由警察根据目视所及的有限信息, 进行手动控制. 每个警察仅能控制一个路口的信号灯. 这种控制方式缺乏足够的交通信息感知能力和联动控制机制, 难以提高交通效率. 其后很长一段时间, 交通信号的三个主要参数(周期、相位和绿信比)均被设置为定时切换, 时段内固定的方式^[12]. 这一工作方式虽然较人工控制简单, 但仍然不能最大化交通运行效率.

4 智能交通控制时期

随着智能交通系统概念的深入和普及, 城市交通控制转向信息化和智能化的方向. 交通信号控制开始采用计算机联网控制, 根据磁感应线圈、摄像头等采集的数据计算交叉路口的实时交通流量, 研发相应的交通流量分配模型来确定信号配时方案, 动态调整交通信号的三个主要参数: 周期、相位和绿信比, 实现整个交通路网的配时优化.

美国 Purdue 大学的 Saridis 教授及其团队是最早开始智能交通信号控制研究的小组之一^[13]. 其后, 英国运输与道路研究所研制的 SCOOT 系统^[14-15]和澳大利亚 RTA 所研制的 SCATS 系统^[16-17]成为了业界使用最广的智能交通信号控制系统. SCOOT 系统和 SCATS 系统以其动态实时自适应控制的特点, 对城市交通信号控制的推动与发展起到了实质性作用. 日本、美国和欧洲其他地区的智能交通信号控制系统也随之发展和普及起来. 目前中国的智

能交通系统发展迅速,在北京、上海、广州等大城市已经建设了先进的智能交通系统。

当今的智能交通控制系统更加复杂。例如美国亚利桑那大学王飞跃等提出“无交通信号灯的未來交通设想”^[18-19],其先进交通、物流算法和系统(Advanced traffic and logistics algorithms and systems, ATLAS)开发的 RHODES 智能交通控制系统^[20]包括:智能交通数据收集和处理、智能预测交通流量变化、智能计算最优配时方案等多个模块,组合起来以求最佳地协同不同路口的信号灯,实现“智能网联联控”。

随着智能、网络通讯等技术的发展,智能交通系统在交通信号控制行业得到越来越广泛的应用。基于互联网、大数据以及云计算的交通信号控制系统,可以对道路系统中的交通状况、交通事故、气象状况和交通环境进行实时监视,依靠先进的车辆检测技术和计算机信息处理技术,获得有关交通状况的信息,并根据收集到的信息对交通进行有效控制,如信号灯控制、发布诱导信息等,乃至根据手机定位、微博留言等数据对于交通系统性能进行评估和调整^[21-22]。

然而,全球每年的交通事故率依然高居不下。交通效率和安全问题始终困扰着交通管理者和出行者。其重要原因之一在于交通信号控制仍然存在相当的局限性。

1) 交通信号灯控制范围有限。通常来说,信号灯一般只布设在道路交叉口和快速路出入口匝道这些容易出现路权冲突导致碰撞的位置。可实际上,路权冲突导致的交通事故可能出现在道路任何位置,并不局限在有信号灯控制的道路范围内。

2) 交通信号灯对路权的定义仍有模糊和不合理之处。其中最著名的应该就是所谓的“黄灯时两难境地”(Yellow interval dilemma),即,当车辆以一定速度接近交叉口时恰逢黄灯,如果急停则刹车距离不够,还可能会对后车造成安全隐患;如果硬闯则面临闯红灯的危险,使得驾驶员陷入无所适从的两难境地^[23]。虽然研究者提出了多种改变交通信号灯设置的算法,但依然不能杜绝“黄灯时两难境地”的出现。

3) 交通信号灯的信息交互方式仍有值得改进之处。在逆光、雨雪、浓雾、沙尘等视线不佳场景和恶劣天气下,驾驶员很难及时分辨信号灯状态,无形中增加了交通事故发生概率^[24]。

4) 交通信号灯的配时优化是一大难题。配时不合理,会导致道路资源时空利用率降低,特别是在交通流不平衡的交叉口尤为明显。即使采用感应式控制和各种新型智能算法^[25-27],在解决如下三个挑战之前,也难以做到路权的精确分配,道路资源仍存在相当程度的浪费。挑战之一是如何精确地确定车辆

到达某一路口的时间,以便采取合理的控制信号。挑战之二是需要交叉口和快速路匝道之外的道路区域,将路权的分配和通讯贯穿于驾驶全过程。挑战之三是将道路上的连续多个车辆视为流体之后,不能精确衡量和控制每个车辆的运动,未能充分利用有限道路资源。

传统交通控制面临的上述难题,亟待新概念、新技术来破解。

5 车路协同时期

最近 10 多年飞速发展的车联网 (Vehicle-to-everything, V2X) 技术,以及车路协同系统的兴起和发展为上述前两个问题的解决带来新的契机。

车-车之间 (Vehicle-to-vehicle, V2V)、车-路之间 (Vehicle-to-infrastructure, V2I) 的信息交互和协同控制,使得每一辆车都可以实时感知到周边车辆的运动信息、交叉口信号灯状态以及道路环境信息;同时,车辆自身信息也能够通过通信手段传递给周边车辆和路侧设备。这意味着我们能更加合理和准确地决定路权^[28]。

首先,全时空感知的信息获取使得我们减少乃至避免了误判某一特定时空区域发生碰撞的可能。路权分配的粒度大大细化,路权分配将覆盖整个道路时空,解决任意时间和空间的路权分配问题。

其次,交通控制系统可以借助车路协同时获取车辆的位置,运行速度等信息,进一步优化计算信号灯的配时^[29-31]。

再者,我们可以在没有信号灯的地方,将路权归属信息迅速传达给交通参与者。车路协同技术的发展使得人、车、路等交通要素之间形成一张巨大的网络,信息感知、信息交互和信息共享无处不在^[32-34]。路权的提示将变得更加直观易懂,人类驾驶员的负担将大幅度降低。图 3 展示的车路协同系统能将信号灯状态无线传输给附近车辆,以便驾驶员调整车辆速度,以最舒适的方式通过交叉路口。

6 无人驾驶时期

最近十几年持续不断方兴未艾的无人车 (Automated vehicles) 和自动驾驶 (Autonomous driving) 技术的出现^[35-36],为第 4 节中提到的最后一个问题的解决带来了可能。

在未来 50 年中,传统的交通控制将逐渐被更为精细的基于每辆车实时动态信息的自组织协同驾驶 (Cooperative driving) 所替代,实现路权分配的“协同利用”。对于路口交通控制而言,我们的决策变量变为每个通过路口车辆的运动时空轨迹。基于这些时空轨迹,我们可以方便地定义控制目标函数为全体车辆的通过时间最少,或者平均通行时间更短等。而车辆之间的避撞要求也可以直接从时空轨迹



图3 2014年IEEE智能交通年会上中国多家高校和企业联合演示的基于车路协同技术的交通信号提示和车辆速度导引控制

Fig. 3 The V2X-based signal alert and speed guidance system demonstrated by the union of several Chinese universities and companies during IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems 2014

的相对位置上设置^[37-43]。虽然看起来此时的控制问题可能过于复杂,但研究表明,协同驾驶问题的核心在于决定车辆通过路口的时间顺序,确定这一顺序后,整个问题可以迎刃而解。仿真表明,协同驾驶在交通压力不至于导致路口过饱和的情况下,能够显著提高路口的通行能力^[41]。

从控制的本质上来看,传统的交通控制属于被动的反馈控制。控制系统被动的感知车流到达的变化,仅仅通过施加信号灯控制以期从当前的系统状态发展到理想的状态。而协同驾驶是前馈控制和反馈控制相结合,通过预先规划车辆轨迹来更好导向系统理想状态^[44-46]。

虽然囿于计算能力,目前的协同驾驶尚只考虑独立路口的交通控制,路口和路口之间的协同驾驶尚未引起研究者的广泛兴趣。但研究者正在探讨未来实现提前规划和控制路面上行驶的每一辆车从出发地到目的地的整条轨迹。在完全掌握车辆信息和道路环境信息的前提下,控制中心可以计算出每辆车具体到每一秒钟的最优行驶路线,并让每辆车准确执行。因为人不再参与驾驶活动,也就不存在拒不执行调度或者产生延迟等行为,交通有可能变得更加流畅和安全。此时,局部时空的路权分配将从“集中式”指派再次回归到“分布式”协作,实现螺旋式演进发展。

这里,我们可以将地面交通控制与公认于1936年创立的空中交通控制进行一个有趣的对比。80多年来,国内外主要的干线航空和设想的未来地面交通一样,每架飞机基本按照预先设置好的固定轨迹飞行,大部分飞行时间由机载系统驾驶。但空中管理依赖以人为主划定少量航线,在近场时主要依靠人类管理员来进行管制^[47]。这一方式导致管理效率不高,时有危险发生。美国因此决定启动NextGen

计划开发主要由机器自动管理的空中交通控制系统^[47]。而地面交通控制系统很早就进入了主要由机器自动管理的时代。不过无人车有待落地普及,尚未达到完全预先设定每辆车的运动轨迹,实现全程自动驾驶。

此外,由于在很多大城市中,道路供给资源始终小于道路行驶需求。因此,研究者们研究了拥堵收费、投票获取路权,或者可交易电子路票等多种方式^[48-50]决定车辆是否能够获得驶入特定区域或路段的路权。在车联网和无人驾驶技术成熟之后,这些方法的实施也将变得非常方便。

不仅如此,完全定制化的路权也将使得特权出行和共享出行变得更为简捷。我们可以动态地为特殊车辆(救火车、救护车等)或者载有多名乘客的车辆(High-occupancy vehicle, HOV)设置更高的路权,以方便其出行。这比设置静态的载有多名乘客车辆的专用车道(HOV lane)^[51]要节省更多道路资源。

综合来看,今后50年中实施上述想法首先需要无人驾驶技术进一步完善,通过测试^[52],上路普及。这一点与本文主题较远,暂不在本文做过多论述。其他的主要困难包括:

1) 在较长的一段时间中,有人驾驶车辆和无人驾驶车辆混行在道路上,如何避免驾驶员或者无人车误解对方的意图而发生碰撞是值得深入研究的课题。同时,混行交通也为道路交通管理带来了新的挑战,需要构建与之相适应的交通控制策略。

2) 计算的复杂性随着所需要考虑的车辆数目急速增长,如何设计合适的算法、找到较优的可行解是今后研究的热点。目前来看,自组织式的交通系统分布式控制方法^[53]具有较强抗系统崩溃性失效的能力,可能是较优的选择。

3) 今后的交通系统将越来越依赖通信的实时性

和可靠性来保障路权计算的合理、最优以及路权分配的及时准确。同时交通参与者的隐私性也需要得到更仔细的考量。这方面也将是今后关注的热点。

7 结束语

回溯以往,我们不难发现,地面交通控制围绕着如何公平高效地决定路权归属和如何有效地将路权归属信息传达给交通参与者这两方面展开研究和实践,探索和实施了多种路权分配方式。

过去的 100 多年中,交通信号控制是定义道路通行权分配的重要工具。但随着车路协同理念的出现和车联网、无人驾驶等相关技术的日益成熟,正在重新定义交通控制。由传统固定配时信号控制到感应式信号控制,再到车路协同环境下的交通感知与控制,我们完成了从宏观到微观、从路权粗放式管理到道路资源全时空精细化分配的进阶。未来交通系统中的很多新型技术,包括共享出行、可交易路权等,都将和这一变革联系和交互,共同改变人们未来的出行方式^[54-56]。

未来交通系统将逐渐实现路面上没有交通信号灯设施,但每个交通参与者都在合作中有序运行的形态。简言之,就是“一路无灯、处处畅通”。这看似科幻的场景,必将在未来的 50 年中颠覆已有的交通控制方式,成为人工智能、自动化、控制理论、智能交通、智能汽车等多个领域的交叉研究热点。

后记

本文根据第一作者应同济大学马万经教授邀请在 2016 年 Transportation Research Congress 上的特邀报告修改扩展而得,并综合了第二作者 1997 年以来的相关工作。

References

- Lay M G. *Ways of the World: A History of the World's Roads and the Vehicles that Used Them*. New Brunswick: Rutgers University Press, 1992.
- Weingroff R F. On the right side of the road [Online], available: <https://www.fhwa.dot.gov/infrastructure/right.cfm>, July 6, 2017.
- Yin J T, Tang T, Yang L X, Xun J, Huang Y R, Gao Z Y. Research and development of automatic train operation for railway transportation systems: a survey. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, **85**: 548-572
- Li Li, Wang Fei-Yue, Zheng Nan-Ning, Zhang Yi. Research and developments of intelligent driving behavior analysis. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(10): 1014-1022
(李力, 王飞跃, 郑南宁, 张毅. 驾驶行为智能分析的研究与发展. *自动化学报*, 2007, **33**(10): 1014-1022)
- Christopher P U, Ian J M, Dmitri A D, Zhu J J. Pedestrian Notifications, US Patent, US009196164B1, November 2015
- 100 years of Traffic Light [Online], available: <https://www.siemens.com/press/en/feature/2014/infrastructure-cities/2014-08-trafficlights100.php>, October 19, 2017.
- Gazis D C. Optimum control of a system of oversaturated intersections. *Operations Research*, 1964, **12**(6): 815-831
- Green D H. Control of oversaturated intersections. *Operations Research*, 1967, **18**(2): 161-173
- Li Li, Jiang Rui, Jia Bin, Zhao Xiao-Mei. *Modern Traffic Flow Theory and Applications, Vol. I, Highway Traffic*, Tsinghua University Press, Beijing, China, 2010, ISBN 978-7-302-23807-2.
(李力, 姜锐, 贾斌, 赵晓梅. *现代交通流理论与应用, 卷 I, 高速公路交通流*. 北京: 清华大学出版社, 2010.)
- Zhao L, Peng X S, Li L, Li Z J. A fast signal timing algorithm for individual oversaturated intersections. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, **12**(1): 280-283
- Li L, Yang K D, Li Z H, Zhang Z. The optimality condition of the multiple-cycle smoothed curve signal timing model. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, **27**: 46-57
- Yin Y F. Robust optimal traffic signal timing. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2008, **42**(10): 911-924
- Lee C S G, Saridis G N. Hierarchically intelligent control and management of traffic systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 1981, **14**(2): 2395-2400
- Hunt P B, Robertson D I, Bretherton R D, Winton R I. SCOOT — A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals. Technical Report TRRL-LR-1014, Transport and Road Research Laboratory, Wokingham, Berkshire, UK, 1981.
- Robertson D I, Bretherton R D. Optimizing networks of traffic signals in real time—the SCOOT method. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1991, **40**(1): 11-15
- Lowrie P R. The Sydney coordinated adaptive traffic system—principles, methodology, algorithms. In: *Proceedings of 1982 International Conference on Road Traffic Signalling*. London, UK: Institution of Electrical Engineers, 1982. 67-70
- Lowrie P R. *SCATS — A Traffic Responsive Method of Controlling Urban Traffic*, Roads and Traffic Authority. Sydney, New South Wales: Roads and Traffic Authority, 1990.
- Wang F Y. ITS with complete traffic control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, **15**(2): 457-462
- Wang F Y. The T-ITS awards and future transportation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, **15**(6): 2353-2359
- Mirchandani P, Wang F Y. RHODES to intelligent transportation systems. *IEEE Intelligent Systems*, 2005, **20**(1): 10-15
- Wang F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, **11**(3): 630-638
- Guo W, Zhang Y, Li L. The integration of CPS, CPSS, and ITS: a focus on data. *Tsinghua Science and Technology*, 2015, **20**(4): 327-335
- Liu C, Herman R, Gazis D C. A review of the yellow interval dilemma. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 1996, **30**(5): 333-348
- Li L, Wen D, Zheng N N, Shen L C. Cognitive cars: a new frontier for ADAS research. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, **13**(1): 395-407
- Zhao Dong-Bin, Liu De-Rong, Yi Jian-Qiang. An overview on the adaptive dynamic programming based urban city traffic signal optimal control. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(6): 676-681
(赵冬斌, 刘德荣, 易建强. 基于自适应动态规划的城市交通信号优化控制方法综述. *自动化学报*, 2009, **35**(6): 676-681)
- Chi R H, Hou Z S. A model-free periodic adaptive control for freeway traffic density via ramp metering. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(7): 1029-1033

- 27 Liu Xiao-Ming, Tang Shao-Hu, Zhu Feng-Hua, Chen Zhao-Meng. Urban area oversaturated traffic signal optimization control based on MFD. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(7): 1220–1233
(刘小明, 唐少虎, 朱风华, 陈兆盟. 基于 MFD 的城市区域过饱和和交通信号优化控制. *自动化学报*, 2017, **43**(7): 1220–1233)
- 28 Li L, Song J Y, Wang F Y, Niehsen W, Zheng N N. IVS 05: new developments and research trends for intelligent vehicles. *IEEE Intelligent Systems*, 2005, **20**(4): 10–14
- 29 Florin R, Olariu S. A survey of vehicular communications for traffic signal optimization. *Vehicular Communications*, 2015, **2**(2): 70–79
- 30 Younes M B, Boukerche A. Intelligent traffic light controlling algorithms using vehicular networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, **65**(8): 5887–5899
- 31 Xu B, Ban X J, Bian Y G, Wang J Q, Li K Q. V2I based cooperation between traffic signal and approaching automated vehicles. In: Proceedings of 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2017. 1658–1664
- 32 Martinez F J, Toh C K, Cano J C, Calafate C T, Manzoni P. Emergency services in future intelligent transportation systems based on vehicular communication networks. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2010, **2**(2): 6–20
- 33 Pau G. Quickly home please: how connected vehicles are revolutionizing road transportation. *IEEE Internet Computing*, 2013, **17**(1): 80–83
- 34 Shladover S E. Connected and automated vehicle systems: introduction and overview. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, to be published
- 35 Nobe S A, Wang F Y. An overview of recent developments in automated lateral and longitudinal vehicle controls. In: Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Tucson, AZ, USA, USA: IEEE, 2001. 3447–3452
- 36 Zheng N N, Tang S M, Cheng H, Li Q, Lai G, Wang F W. Toward intelligent driver-assistance and safety warning system. *IEEE Intelligent Systems*, 2004, **19**(2): 8–11
- 37 Li L, Wang F Y. Cooperative driving at blind crossings using intervehicle communication. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006, **55**(6): 1712–1724
- 38 Dresner K, Stone P. A multiagent approach to autonomous intersection management. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2008, **31**(1): 591–656
- 39 Li L, Wen D, Yao D Y. A survey of traffic control with vehicular communications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, **15**(1): 425–432
- 40 Chen L, Englund C. Cooperative intersection management: a survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, **17**(2): 570–586
- 41 Meng Y, Li L, Wang F Y, Li K Q, Li Z H. Analysis of cooperative driving strategies for non-signalized intersections. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, to be published
- 42 Li P F, Zhou X S. Recasting and optimizing intersection automation as a connected-and-automated-vehicle (CAV) scheduling problem: a sequential branch-and-bound search approach in phase-time-traffic hypernetwork. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2017, **105**: 479–506
- 43 Cassandras C G. Automating mobility in smart cities. *Annual Reviews in Control*, 2017, **44**: 1–8
- 44 Liu W, Li Z H, Li L, Wang F Y. Parking like a human: a direct trajectory planning solution. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, **18**(12): 3388–3397
- 45 Li Li, Lin Yi-Lun, Cao Dong-Pu, Zheng Nan-Ning, Wang Fei-Yue. Parallel learning — a new framework for machine learning. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(1): 1–8
(李力, 林懿伦, 曹东璞, 郑南宁, 王飞跃. 平行学习 — 机器学习的一个新型理论框架. *自动化学报*, 2017, **43**(1): 1–8)
- 46 Li L, Lin Y L, Zheng N N, Wang F Y. Parallel learning: a perspective and a framework. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, **4**(3): 389–395
- 47 FAA. NextGen Implementation Plan. Federal Aviation Administration, Washington, DC, USA, 2016.
- 48 Yang H, Wang X L. Managing network mobility with tradable credits. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2011, **45**(3): 580–594
- 49 Lin W H, Lo H K. Highway voting system: embracing a possible paradigm shift in traffic data acquisition. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, **56**: 149–160
- 50 Nie Y. Why is license plate rationing not a good transport policy? *Transportmetrica A: Transport Science*, 2017, **13**(1): 1–23
- 51 Daganzo C F, Cassidy M J. Effects of high occupancy vehicle lanes on freeway congestion. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2008, **42**(10): 861–872
- 52 Li L, Huang W L, Liu Y H, Zheng N N, Wang F Y. Intelligence testing for autonomous vehicles: a new approach. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2016, **1**(2): 158–166
- 53 Helbing D. Globally networked risks and how to respond. *Nature*, 2013, **497**(7447): 51–59
- 54 Wang F Y. Toward a revolution in transportation operations: AI for complex systems. *IEEE Intelligent Systems*, 2008, **23**(6): 8–13
- 55 王飞跃. 智能车如何上路? CSIS/CAST 报告, 北京, 2007.
- 56 Ran B, Jin P J, Boyce D, Qiu T Z, Cheng Y. Perspectives on future transportation research: impact of intelligent transportation system technologies on next-generation transportation modeling. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2012, **16**(4): 226–242



李力 清华大学自动化系副教授。主要研究方向为人工智能, 智能交通系统和智能汽车。E-mail: li-li@tsinghua.edu.cn (LI Li Associate professor in the Department of Automation, Tsinghua University. His research interest covers artificial intelligence, intelligent transportation systems, intelligent vehicles.)



王飞跃 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室研究员, 国防科技大学军事计算实验与平行系统技术中心教授, 中国科学院大学中国经济与社会安全研究中心主任。主要研究方向为智能系统和复杂系统的建模, 分析与控制。本文通信作者。

E-mail: feiyue.wang@ia.ac.cn

(WANG Fei-Yue Professor at The State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He is also a professor at the Research Center of Military Computational Experiments and Parallel System, National University of Defense Technology; and the Director of the Center of China Economic and Social Security, University of Chinese Academy of Sciences. His research interest covers modeling, analysis, and control of intelligent systems and complex systems. Corresponding author of this paper.)