**协同编队驾驶决策控制方法**

**Decision-making and Control for Vehicle Platooning**

**1 科学问题概述**

以移动互联、大数据及云计算等技术为代表的新一轮科技革命方兴未艾，极大地拓展了交通参与者、运载工具和道路基础设施的信息获取与交互手段，这将彻底改变各交通主体各自为政、独立决策的现状，使得多主体协作成为可能。随着车路协同的进一步发展和推广应用，人车路一体化的交通系统将成为现实，基于全时空交通信息的协同感知、融合和交互，研究车辆协同编队决策控制理论方法及其关键技术已成为必然。

车辆协同编队（又名CACC，Cooperative Adaptive Cruise Control）是智能网联驾驶与车路协同系统的重要场景之一，通过V2X通信实现车车协作，以减小车辆速度波动，提升车队的稳定性。它既可以缓解驾驶员驾驶疲劳、提升行驶的安全性，也能够改善交通效率，降低行驶能耗。更为重要的是，CACC车队的队列稳定特性（String Stability）可大幅度消解人类驾驶员造成的交通流波动，使整体交通更为均质化、稳定化。此外，车辆编队技术可减少车队驾驶员数量、降低风阻和能耗，进而大幅度减小相关运输企业人工及油料成本，具有广阔的商业前景和应用价值。

上世纪90年代末至今，国内外学者已在车辆编队驾驶领域耕耘多年，做出了许多卓有成效的研究，但时至今日，编队驾驶依旧难以规模化商用，总的来说有以下四大瓶颈：1) **难以适应复杂交通环境，**现有的编队驾驶研究主要聚焦于车流密度较低、车速较为稳定、驾驶行为较为单一的快速路连续流场景。面对车流密度大、车速离散性强、交通行为随机性高、人工驾驶/自动驾驶混行特征显著的复杂环境，现有的理论与方法难以适用；2) **对交通的负面影响难以降低，**虽然编队驾驶能够减小车间距来显著提高道路通行能力，然而，不合理的编队控制设定会对交通产生不利影响，譬如，过大的车队规模会像火车一样阻碍其他车辆换道、汇入等驾驶行为，从而导致环境车辆通行效率下降；3) **难以保证真实环境下的队列稳定性，**作为衡量编队效益最重要的指标，其直接决定编队决策控制最终效果，较差的稳定性会严重影响车队行驶的安全性，然而现有队列稳定性分析多基于理想假设，缺乏对时滞、失效、扰动等实际影响因素的考量，此外，传统编队驾驶仅针对纵向控制，面向横纵向耦合的编队稳定性分析仍有待研究；4) **算法普适性尚待提高，**现有控制方法多基于理想模型建模，许多假设与工程实际存在较大差异，此外，测试验证多基于特定场景、特定工况进行，验证手段较为单一、说服力较弱，难以满足全场景复杂工况的实际需求。

因此，在解决实际复杂环境下协同编队决策控制问题的过程中，还需要面向真实混合交通流环境的强随机、泛耦合、非线性等特征，构建高可靠车辆群体运动态势推演模型；进而引入整体交通效益与车辆动态博弈关系，建立面向全局最优的协同编队驾驶决策控制机制；并考虑车辆编队系统动态时延、随机不可测扰动等实际影响因素，形成面向真实行驶环境的队列稳定性建模与分析范式；通过构建各类典型场景复杂工况，研究协同编队决策控制自校正学习机制，最终实现普适性强、可靠性好的协同编队驾驶决策控制方法。

**2 科学问题背景**

近几年，随着国民经济的快速发展，我国道路交通运输系统日趋发达。但根据相关统计，随着车辆保有量的日益增加，交通拥堵现象日趋严重，仅北京一地，由于交通拥堵带来的经济损失便达近千亿元，几乎占城市GDP的5%；此外，驾驶员人为原因（疲劳、酒驾、误操作等）导致的交通安全事故导致的伤亡人数达数千人。而依据当斯(Downs)定律，交通供给的发展永远赶不上交通需求的增长速度，这将无疑造成日益严重的交通拥堵、交通安全问题，照此趋势发展，交通系统面临的压力将日益严峻。

除此之外，日益增长的配备自适应巡航控制（ACC: Adaptive Cruise Control）系统的车辆也给交通系统的发展平添一丝隐忧。据统计，ACC系统目前已得到广泛应用，特别是中高档轿车群体，其ACC系统配备率已高达70%。然而有研究表明，ACC难以改善如今的交通问题，并且在以下两个方面均对交通系统造成负面影响：1) **降低道路通行能力，**根据相关研究，由于ACC车辆的跟车时距要求较高，一定程度的ACC渗透率会降低道路通行能力，这将进一步加剧交通拥堵问题。**2) 影响交通流稳定性，**具备ACC功能的车辆群体在进行加减速时，跟车误差在向后传递的过程中有放大效果，即不满足队列稳定性，这将严重破坏交通流稳定性，进而影响驾驶平顺性，同时威胁驾驶安全。

由此可见，如果放任ACC系统自然发展，将会给原本已不堪重负的交通系统雪上加霜。因此为了克服上述问题，提高道路通行能力、减少能源消耗、保证交通流稳定性，发展协同编队系统是需求导向下的应有之义、必然要求。

**3 科学问题的研究进展**

编队决策控制以环境感知与车辆感知为输入，主要完成决策驾驶行为、规划行驶轨迹、优化控制指令的任务。依据任务划分粒度的不同，目前对于编队决策控制的研究主要分为三种技术路线：细模块化路线、泛集成化路线、全集成化路线。

**3.1 技术路线1：细模块化路线**

细模块化路线是当前主流路线，并在工程中得到广泛应用。该路线通过把决策控制进行细化模块分级，明确模块间输入输出，实现各模块之间的相互耦合，通过建立各个模块的算法模型，依次完成各项子任务，实现编队驾驶。该路线主要包括三个模块：①行为决策：以车队的状态、及其感知信息为输入，考虑个体驾驶目标及整体交通效益，决策拓扑结构以及编队行为（组队、保持、换道、拆分等）。该领域研究以图论、博弈论、整数规划等方法为主。②轨迹规划：基于上层行为决策，规划车队行驶路径，输出时/空序列坐标矩阵。主要方法包括图论、整数规划等数学优化方法，神经网络方法，以及样条曲线拟合方法。③反馈控制：以行驶轨迹坐标为输入，考虑车辆运动学、动力学特性，设计控制器计算控制指令（加速度、方向盘转角等），使车队精确跟踪行驶轨迹。研究方法包括以PID为代表的传统方法以及优化控制方法。

细模块化路线存在以下难点：①面向复杂交通场景，以往行为决策方案难以尽数遍历车辆驾驶行为；②面向非结构化道路等特殊场景，当前轨迹规划方案难以保证编队横纵向稳定性；③面向控制时延、通信时延等不确定性扰动，传统底层控制器设计方法难以保障控制的鲁棒性与稳定性。

总体上，技术路线1通过模块化分层，降低优化问题的复杂度，提高计算效率，容易实现工程应用。然而，细模块化分层也带来一些劣势，一方面影响了决策控制效果的整体最优性；另一方面，轨迹规划输出可能无法被车辆控制精准执行，造成潜在安全风险。

**3.2 技术路线2：泛集成化路线**

泛集成化路线近年来得到学术领域的广泛研究，并在工程上初步探索实践。在细模块化路线的基础上，泛集成化路线将轨迹规划与反馈控制集成为一个新模块——运动规划。运动规划模块以编队行为决策结果为上层输入，结合车队状态与环境信息，以车辆运动学、动力学为约束，优化编队轨迹，并输出最优控制指令。目前关于运动规划领域的研究主要采用基于模型的优化控制的方法，以及基于数据驱动的人工智能方法。

泛集成化路线存在以下难点：①面向复杂交通场景，以往行为决策方案难以尽数遍历车辆驾驶行为；②相较于细模块化路线，泛集成化路线的运动规划模块难以建模求解，对高效的求解算法需求度较高。

总体上，泛集成化路线基于行为决策直接优化底层控制指令，因此能够保障决策控制效果的最优性，并避免规划路径不可行所带来的控制器失效问题。然而，泛集成化路线在一定程度上增加了问题的计算复杂度，降低了计算效率，并存在奇异点、不可行解等潜在风险，在广泛工程落地应用前尚需更加完备的理论研究。

**3.3 技术路线3：全集成化路线**

全集成化路线是一种全新的端到端编队驾驶技术，该路线集成上述所有模块，基于环境感知与车辆状态信息，直接规划最优轨迹，并输出底层控制指令，完成编队任务。全集成化路线相关研究较少，传统研究主要采用数据驱动的人工智能方法、基于模型的优化控制方法。面对提高全集成化路线计算效率的需求，面向群体一致性的分布式方法将成为未来的研究热点。

全集成化路线存在以下难点：①当前基于数据的方法，数据量要求高、模型可解释性差、泛化能力弱；②当前基于模型的方法，求解复杂度高，存在局部最优风险；③当前的分布式方法难以考虑实际交通场景，建模方法较为理想。

总体上，全集成化路线降低编队驾驶决策控制维度，直接优化轨迹及运动指令，不再需要遍历决策驾驶行为，从而提高了对实际复杂交通场景的适应性。然而，相较于细模块化路线和泛集成化路线，全集成化路线需基于全可行域进行规划求解，计算复杂度更高，亟需更加高效的建模求解算法。

**3.4 总结与展望**

综上所述，现有编队决策控制研究主要围绕上述三种技术路线展开，然而三种技术路线的优劣势、成熟度各异，因此未来研究趋势及发展潜力有所不同：

（1）细模块化路线实现难度低，计算效率高，是当前落地应用最佳选择，但其在最优性方面的存在固有缺陷，随着新兴技术的发展，该路线终将被取代。

（2）泛集成化路线能够保证规划控制的最优性，因此成为优于细模块化路线的选择。泛集成化路线目前处于落地应用初级阶段，其未来研究趋势在于开发更加高效的控制算法与计算技术。

（3）全集成化路线能够更好地应用于强随机、高动态的真实复杂交通场景。然而，受计算能力所限，该路线的相关研究处于理论阶段，未来需优化模型架构与求解算法，进而释放其应用潜力。

**重要参考文献**

1. 李克强, 戴一凡, 李升波, 等. 智能网联汽车 (ICV) 技术的发展现状及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(01): 1-14.
2. Swaroop D, Hedrick J K. String stability of interconnected systems[J]. IEEE transactions on automatic control, 1996, 41(3): 349-357
3. Cui L, Chen Z, Wang A, et al. Development of a Robust Cooperative Adaptive Cruise Control With Dynamic Topology[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021.
4. Yang H, Rakha H, Ala M V. Eco-cooperative adaptive cruise control at signalized intersections considering queue effects[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 18(6): 1575-1585.
5. Ploeg J, Serrarens A F, Heijenk G J. Connect & Drive: design and evaluation of cooperative adaptive cruise control for congestion reduction[J]. Journal of Modern Transportation, 2011, 19(3): 207-213.
6. Milanés V, Shladover S E, Spring J, et al. Cooperative adaptive cruise control in real traffic situations[J]. IEEE Transactions on intelligent transportation systems, 2013, 15(1): 296-305.
7. Naus G J L, Vugts R P A, Ploeg J, et al. String-stable CACC design and experimental validation: A frequency-domain approach[J]. IEEE Transactions on vehicular technology, 2010, 59(9): 4268-4279.
8. Van Arem B, Van Driel C J G, Visser R. The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics[J]. IEEE Transactions on intelligent transportation systems, 2006, 7(4): 429-436.
9. Bhoopalam A K, Agatz N, Zuidwijk R. Planning of truck platoons: A literature review and directions for future research[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 107: 212-228.
10. Lai J, Hu J, Cui L, et al. A generic simulation platform for cooperative adaptive cruise control under partially connected and automated environment[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 121: 102874.

**联系人：**胡笳，马万经（同济大学）