

# A review of the research literature on the criterion of human-machine co-driving right switch

Bing ZHOU, Qianxi PAN, Hao FENG

State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, China  
Email: zhou\_bingo@163.com, 471055862@qq.com, 1743697431@qq.com

**Abstract:** This paper puts forward the concept of man-machine co-driving from the development characteristics and trends of intelligent vehicle technology. This paper discusses the classification method of human-machine co-driving intelligent vehicle control switch from the aspects of initiator, mandatory and object of study, and discusses the current research status of human-machine co-driving control switch criterion. From the physiological characteristics of driver, vehicle dynamics, the intention of driving, the game theory analyzes the aspects such as man-machine were driving middleman for features and its influence on safety control switch, summarizes the control switch of the experimental study on the method and the human-computer interaction forms, points out the control switch the problems existing in the research and development direction in the future. Analysis results show that the in-depth analysis and understanding complex intelligent control system of motor vehicles and drivers' driving mechanism, discusses the vehicle dynamics for intervention rule constraints, and to explore the conflict and the interaction mechanism between the two, setting up human driving theory system, research the switching mechanism of emergency conditions, is the development direction of man-machine were driving.

**Keywords:** Man-machine co-drive; Automatic drive; Switching time; Game theory

## 人机共驾驾驶权切换准则研究文献综述

周兵, 潘倩兮, 冯浩

汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南大学, 长沙, 中国, 410000  
Email: zhou\_bingo@163.com, 471055862@qq.com, 1743697431@qq.com

**摘要:** 本文从智能汽车技术发展特点和趋势提出了人机共驾的概念; 从切换的发起者与强制性、研究对象等方面论述了人机共驾智能汽车控制权切换的分类方法, 并讨论了当前对于人机共驾驾驶权切换准则的研究现状; 从驾驶人的生理特征、车辆动力学、驾驶意图、博弈论等方面剖析了人机共驾中人因的特性及其对控制权切换安全性的影响, 总结了控制权切换的试验研究方法和人机交互形式, 指出了控制权切换研究存在的问题和未来发展方向。分析结果表明: 深入剖析和理解复杂车辆智能控制系统和驾驶员的驾驶机理, 探讨车辆动力学对于介入准则的约束, 探索两者之间的冲突与交互机制, 建立人机共驾理论体系, 探讨紧急工况下的切换机理, 是人机共驾的发展方向。

**关键词:** 人机共驾; 自动驾驶; 切换时机; 博弈论

### 1 引言

近十几年来, 计算机网络技术、通信技术以及人工智能技术的发展速度十分迅猛, 给各行各业都带来了颠覆性的改变, 汽车行业也不例外。当前阶段, 汽车行业正迎来百年不遇的机遇与变革, 以“电动化、智能化、网联化”为基础的智能汽车成为汽车行业研究的一大热点。

为了更好地对智能汽车进行分类及研究, 美国汽车工程师学会 (SAE) 按照自动化及智能程度的高低将其分为“手动驾驶、驾驶辅助、部分自动化、有条件自动化、高度自动化和完全自动化”六个阶段, 并用“L0~L5”的方式来分别表示<sup>[1]</sup>。而人机共驾智能汽车的应用范围是 L2、L3 级这两个阶段, 距离真正意义上的“无人驾驶”还存在很大的发展空间。因此, 目前智能汽车研究的主流方向是人机协同控制, 即驾驶员与驾驶控制器、驾驶辅助系统形成“人机共驾”的驾驶格局。

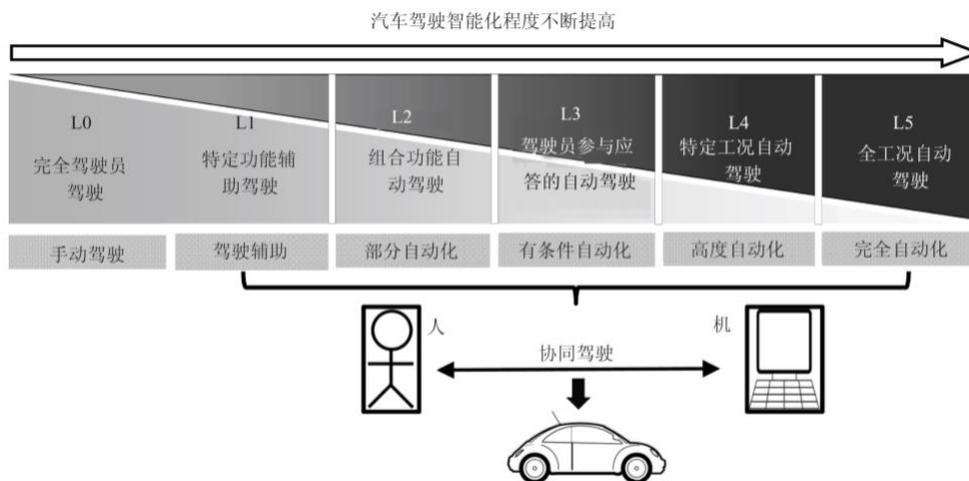


Figure 1. The level classification of intelligent vehicle  
图 1. 智能汽车的级别分类

人机共驾指的是在车辆处于非完全自动驾驶的条件下，驾驶员和智能汽车控制系统都可以对自动驾驶汽车进行控制的阶段，这意味着驾驶辅助控制器和驾驶员共同享有对汽车的决策和控制权<sup>[2]</sup>。因此，人机共驾中的驾驶权分配问题成为了人机共驾中的最主要的问题。一般情况下，认为人机共驾过程中的控制权分配是一个动态的过程，驾驶员与控制器所获得的车辆驾驶权大小会随着车辆所处的不同环境而不断变化，最终目的是在保证车辆安全的前提下尽量提高驾驶员的舒适性以及操纵性。对于驾驶权的动态过程的描述，很多学者采用了不同的数学模型、算法和分类排序模型，但还未形成统一的确定方法。

## 2 正文

### 2.1 人机共驾的出现原因

计算机、人工智能等新技术的兴起，直接推动了人机共驾甚至无人驾驶汽车的出现。在新技术与资本浪潮的推动下，谷歌、特斯拉等公司率先推出自动驾驶系统，之后宝马、梅赛德斯和奥迪等传统汽车厂商也相继发布了功能相似的自动驾驶系统，使得智能驾驶成为了汽车行业最前沿的发展方向之一。但是，自动驾驶技术目前极为不成熟，在驾驶人接受度和行驶安全性等众多方面还存在许多亟待解决的问题，由无人驾驶车辆造成的交通事故率也居高不下。据谷歌统计报告显示<sup>[2]</sup>，在从 2014 年 9 月至 2015 年 11 月共 15 个月的测试中，智能汽车在自动驾驶时主动脱离自动驾驶状态有 272 次，自动驾驶汽车在每百万英里的事数、每百万英里的受伤人数以及单次事故平均受伤人数等指标上均高于传统汽车，这些说明目前的车辆驾驶仍离不开人工干预。因此，在无人驾驶难度大、发展不成熟的情况下，人机共驾成为了当前各汽车制造以及研发公司研究的主要方向。

除此之外，汽车安全性的提高需求也推动了人机共驾的出现。2016 年我国发生道路交通事故 864.3 万起，造成死亡人数约为 6.3 万。可见，我国交通事故发生及伤亡率仍居高不下。当由于驾驶员疲劳或者行车环境恶劣等内、外因素导致车辆处于危险工况的时候，仅靠驾驶员很难在短时间内进行一系列的正确操作，容易使车辆进入横摆角速度异常、后轮侧滑、严重偏离正常车道等失稳工况，从而造成交通事故。为了在危险工况下对驾驶员发出预警并使驾驶员在紧急工况下做出正确的操作，人机共驾成为了降低交通事故的发生率的一种主要手段。

通过实现人机共驾，能够使车辆在控制器作用下进行合理操作来应对危险工况，从而保障驾驶员的生命与财产安全。同时，驾驶员的减小驾驶负担需求以及提高舒适性的要求也推动着人机共驾的出现。人机共驾作为一种典型的人在回路中的协同混合增强智能系统，驾驶人与智能辅助控制器之间存在很强的互补性。通过人机共驾，可以减轻驾驶人的驾驶负担，不必长时间地注意路况等信息，将驾驶任务分配一部分给辅助控制系统，从而提高驾驶过程中的舒适性。

### 2.2 人机共驾的研究现状

人机协同控制驾驶车辆的研究内容大致分为三类，即增强驾驶员感知能力的智能驾驶辅助、基于特定场景的人机驾驶权切换和人机共驾车辆的驾驶权动态分配。目前，人机共驾的研究已经取得一些可喜的成果，如 Andrew Gray 等人<sup>[3]</sup>研制出了一种用于预防意外道路偏离的预测控制器，其可以检测并避免道路偏离，同时在车辆正常行驶情况下避免不必要的干预，大大降低了车辆偏离正常行驶道路的可能性；Vicente Milanés 等人<sup>[4]</sup>研制出了一种基于立体视觉系统、模糊逻辑的控制器来模拟人类行为从而实现自动化超车，大大降低了车辆超车时的危险性，并且已经在雪铁龙商用车中验证了良好的效果；Markus Zimmermann 等人<sup>[5]</sup>提出了变道场景下人机共驾的交互概念，并设计出了用于实车的多模式系统，以显示器为介质来直接、显著地提高人机交互的程度，改善车辆行驶安全性。国内学者也在利用实车、驾驶模拟器不断实验，深入探索驾驶员建模、切换型人机共驾行为评价等方面的研究<sup>[6]</sup>。

总体来说，当前人机共驾的主要研究内容是驾驶权的切换方式以及对其动态分配过程的描述。

### 2.3 人机共驾的驾驶权切换方法

人机共驾的过程中，最主要的内容就是驾驶权的分配与协同方式。如果在车辆驾驶权切换过程中出现了冲突，极有可能造成车辆失控等严重后果。目前，根据人机共驾过程中驾驶权切换的发起者和强制性，可以将驾驶权切换类型分为三种<sup>[7]</sup>，即人发起的可选择切换、人发起的强制性切换、系统发起的强制性切换。而从切换准则的研究对象来说，人机共驾的切换准则研究可以分为基于驾驶员生理及心理状态的切换准则研究、基于驾驶风格与驾驶意图的切换准则研究以及综合考虑驾驶员-道路-车辆状态的切换准则研究。

基于驾驶员生理、心理的介入准则研究，目前主要是通过测量并提取驾驶员的生理特征来表征驾驶员状态，在此基础上判断是否需要切换驾驶模式。汪选要<sup>[8]</sup>提出了一种反映驾驶员生理与心理特征的车道保持神经肌肉动力学转向模型，并基于 PID 控制和滑模控制理论提出 LDAS 的转角转矩双闭环控制，基于模糊控制理论设计人机共驾的共控系数模糊控制器。Weihua Sheng<sup>[9]</sup>提出并开发了一个基于驾驶员睡意检测的手动驾驶和自动驾驶自动切换的框架。严利鑫<sup>[10-11]</sup>通过实车试验采集了人一车一路多源特征信息，用驾驶人主观经验将驾驶模式划分为人工驾驶、警示辅助、自动驾驶三种状态，并利用采集的驾驶人血流量脉冲（BVP）和皮肤电导（SC）值进行 K 均值聚类，将驾驶人当前合适的驾驶模式自动聚类为三级，研究结果可为人机共驾智能车驾驶模式决策提供依据。

在人机共驾的过程中，许多研究员也开始将驾驶风格与驾驶意图作为人机共驾切换考虑的一项重要的判断依据。周孝吉<sup>[12]</sup>建立了 ANP-BP 神经网络能力评价模型，对驾驶员基准驾驶能力进行了估计，基于动态时窗和驾驶风险度，建立了实时驾驶能力评估模型，研究了基于驾驶能力裕度的人机共驾驾驶权交接机制。喻愷<sup>[13]</sup>基于线性最优二次型方法建立了典型驾驶意图下的驾驶操纵序贯链优化目标函数，通过求解目标函数得到驾驶人操纵行为对车辆运动状态的改变量，并结合运动学 CA 模型提出了驾驶操纵行为短时预测模型。

综合考虑驾驶员、车辆状态、周围环境来确定人机共驾介入时机也是当前的热点以及主要方向。博弈论在此方面有较多的应用。Kaiming Yang<sup>[14]</sup>提出了一种基于 stackelberg 的共享控制方案来描述驾驶员-自动化交互，其中驾驶员和电动助力转向（EPS）系统交互模式是根据 Stackelberg 博弈原理设计的，驾驶员是领导者，EPS 是追随者。Xuewu Ji<sup>[15]</sup>采用动态博弈论这一新的设计方法，对驾驶员与 AFS 之间的共享转向控制进行建模。采用线性二次动态优化方法，推导了非合作纳什、非合作 Stackelberg、合作帕累托均衡转向控制策略和 AFS 控制器，模拟了驾驶员目标路径与 AFS 高度一致性和低一致性两种不同的驾驶场景，并给出了相应的仿真结果。刘瑞<sup>[16]</sup>提出一种基于非合作模型预测控制（MPC）的智能汽车人机共驾策略，建立了驾驶员和控制系统两者共同控制车辆的人机共驾系统模型，得到了驾驶员和控制系统的代价函数，并求解了非合作 MPC 人机共驾策略的纳什均衡解。最后，通过驾驶员和控制系统置信度矩阵的更新实现了驾驶权的逐渐交接，同时保证驾驶员实时在环。

此外，模糊控制、二次优化、以及模型预测控制等方法均有文献进行研究。Abdelkader Merah<sup>[17]</sup>提出了一种基于模糊逻辑的切换策略，该策略具有高效的控制律，能够根据驾驶员的状态和车辆在道路上的定位，保证一定程度的连续和可变共享。Anh-Tu Nguyen<sup>[18]</sup>研究了智能车辆在保持车道和避障两种情况下，驾驶员与保持车道辅助系统之间的共享横向控制问题。通过在道路车辆系统中引入实测的权重参数，可以根据驾驶员的实时驾驶活动设计辅助控制动作。Stephen M. Erlien<sup>[19]</sup>提出了近似于车辆轨迹的在线连续线性化非线性动力学的实时模型预测控制器，与人类驾驶员共享控制。

除此之外，文献[20-21]提出了 H2-Preview 优化控制问题以及包含控制论驾驶员模型的 DVR 模型，来分析驾驶员行为不确定时的车辆稳定性能。基于该模型，他们设计出了一种驾驶转向辅助系统从而实现人和系统对转向盘的控制共享。

## 3 结语及展望

近年来,随着技术的进步,对于驾驶员的大脑神经活动、眼部反应、血压、肌肉等驾驶时的生理特征研究也趋于细致。但是,对于驾驶辅助系统的被动介入时机的研究(如ESP和AFS的介入),对于如何结合车辆本身的动力学约束来建立更为精确的“人-车-路”模型从而得到更为合适的介入时机的研究依然较少;当前的人机交互方式大多只停留在感知、决策或执行等单一层面,难以应对未来人机共驾系统“多层次、多维度交互与协同”的需求。因此,深入剖析和理解复杂车辆智能控制系统和驾驶员的驾驶机理,探讨车辆动力学对于介入准则的约束,探索两者之间的冲突与交互机制,建立人机共驾理论体系,搭建人机共驾系统测试验证平台,是人机共驾的发展方向。另外,人机共驾介入的应用场景也比较单一,大多数文献关注于平稳、渐进的切换驾驶权,缺少对于紧急工况下快速的切换驾驶权的研究。

总体来说,人机共驾的介入准则的研究仍处于起步阶段,未来的道路还需要我们大家去探索、去发现。通过对驾驶员、控制器、控制律等主要内容的研究,可以逐渐建立起人机共驾的体系,并为未来自动驾驶的研究奠定坚实的基石。

## 参考文献 (References)

- [1] HU Yun-Feng, QU Ting, LIU Jun, et al. Human-machine Cooperative Control of Intelligent Vehicle: Recent Developments and Future Perspectives[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(07):1261-1280.  
胡云峰, 曲婷, 刘俊, 施竹清, 朱冰, 曹东璞, 陈虹. 智能汽车人机协同控制的研究现状与展望[J]. 自动化学报, 2019, 45(07):1261-1280.
- [2] WU Chao-zhong, WU Hao-ran, LYU Neng-chao. Review of Control Switch and Safety of Human-computer Driving Intelligent Vehicle[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(06):131-141.  
吴超仲, 吴浩然, 吕能超. 人机共驾智能汽车的控制权切换与安全性综述[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(06):131-141.
- [3] Gray A, Ali M, Gao Y, et al. A unified approach to threat assessment and control for automotive active safety[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(3): 1490-1499.
- [4] Milanés V, Llorca D F, Villagrà J, et al. Intelligent automatic overtaking system using vision for vehicle detection[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(3): 3362-3373.
- [5] Zimmermann M, Bauer S, Lütteken N, et al. Acting together by mutual control: Evaluation of a multimodal interaction concept for cooperative driving[C]//2014 international conference on collaboration technologies and systems (CTS). IEEE, 2014: 227-235.
- [6] Xu Chao. Evaluation of Cooperative Driving Behavior Based on the Virtual Driving[D]. Jilin University, 2018.  
徐超. 基于虚拟驾驶的切换型人机共驾行为评价[D]. 吉林大学, 2018.
- [7] Lu Z, Happee R, Cabral C D D, et al. Human factors of transitions in automated driving: A general framework and literature survey[J]. Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, 2016, 43: 183-198.
- [8] WANG Xuan-yao, WANG Qi-dong, GAO Zhen-gang, et al. Man-machine Shared Driving Based Lane Departure Avoidance Control[J]. Automotive Engineering, 2017, 39(07): 839-848.  
汪选要, 王其东, 高振刚, 王家恩. 基于人机共驾的车道偏离防避控制[J]. 汽车工程, 2017, 39(07): 839-848.
- [9] Sheng W, Ou Y, Tran D, et al. An integrated manual and autonomous driving framework based on driver drowsiness detection[C]//2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2013: 4376-4381.
- [10] YAN Li-xin, WU Chao-zhong, HE Yi, et al. Research on Impact Factors Extraction for Driving Mode of Intelligent Vehicle[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(01): 120-127.  
严利鑫, 吴超仲, 贺宜, 黄珍, 朱敦尧. 人机共驾智能车驾驶模式决策属性析取研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(01): 120-127.
- [11] YAN Li-xin, HUANG Zhen, WU Chao-zhong, et al. Intelligent Vehicle Driving Mode Selection Based on Dangerous Situation Recognition[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(08):139-146+154.  
严利鑫, 黄珍, 吴超仲, 秦玲巧, 朱敦尧, 冉斌. 基于危险态势识别的智能车驾驶模式选择[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(08):139-146+154.
- [12] ZHOU Xiao-ji. Research on Driver Characteristics and Driving Capacity Real-time Evaluation[D]. Chongqing University, 2018.  
周孝吉. 驾驶员特性和实时驾驶能力评估研究[D]. 重庆大学, 2018.
- [13] YU Kai, PENG Li-qun, DING Xue, et al. A Study on the Short-time Forecasting Method of Operation Behaviors of Drivers for Man-machine Cooperative Driving[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2019, 37(01):42-48+57.  
喻恺, 彭理群, 丁雪, 贺宜. 面向人机协同共驾的驾驶行为短时预测方法研究[J]. 交通信息与安全, 2019, 37(01):42-48+57.
- [14] Yang K, Ji X, Nishimura Y, et al. Application of Stackelberg Game Theory for Shared Steering Torque Control in Lane Change Maneuver[C]//2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). IEEE, 2018: 138-143.
- [15] Ji X, Liu Y, Liu Y, et al. Game-theoretic modelling of shared steering control between driver and AFS considering different human-machine goal consistency[C]//IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2017: 4577-4582.
- [16] LIU Rui, ZHU Xi-chan, LIU Lin, et al. Cooperative Driving Strategy Based on Non-cooperative Model Predictive Control[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2019, 47(07):1037-1045.  
刘瑞, 朱西产, 刘霖, 马志雄. 基于非合作模型预测控制的人机共驾策略[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(07):1037-1045.
- [17] Merah A, Hartani K, Draou A. A new shared control for lane keeping and road departure prevention[J]. Vehicle System Dynamics, 2016, 54(1): 86-101.
- [18] Nguyen A T, Sentouh C, Popieul J C. Driver-automation cooperative approach for shared steering control under multiple system constraints: Design and experiments[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 64(5): 3819-3830.
- [19] Erlien S M, Funke J, Gerdes J C. Incorporating non-linear tire dynamics into a convex approach to shared steering control[C]//2014 American Control Conference. IEEE, 2014: 3468-3473.
- [20] Saleh L, Chevrel P, Claveau F, et al. Shared steering control between a driver and an automation: Stability in the presence of driver behavior uncertainty[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(2): 974-983.
- [21] Mars F, Deroo M, Hoc J M. Analysis of human-machine cooperation when driving with different degrees of haptic shared control[J]. IEEE transactions on haptics, 2014, 7(3): 324-333.