

分布式驱动电动汽车动力学控制发展现状

孙鹏¹, 张辉^{1,2}, 张乔乔¹, 王凯¹

- (1. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西省西安市 710048;
2. 清华大学电机系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

Review on Vehicle Dynamics Control of Distributed Drive Electric Vehicle

SUN Peng¹, ZHANG Hui^{1,2}, ZHANG Qiaoqiao¹, WANG Kai¹

- (1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments,
Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Distributed drive electric vehicles using wheel motor as the driving motor, the wheel speed and torque can be obtained by motor feedback, which can realize the independent control of the driving wheel and have obvious advantages in the automobile dynamic control. The dynamic control system is the most essential object of electric vehicle research, which involves the control strategy and the object is very extensive. In this paper, from the dynamic steering system, direct yaw stability control system, anti-skid dynamics, integrated dynamic control and other aspects of a review. This paper focuses on the research of hot four wheel independent steering, electronic differential, direct yaw moment control and dynamic anti-skid, etc. are highlighted.

KEY WORDS: distributed drive electric vehicle; dynamics control; 4WIS; ED; anti-slip; integrated dynamics control

摘要: 分布式驱动电动汽车采用轮毂电机作为驱动电机, 车轮的转速和转矩可通过电机反馈得出, 能实现驱动轮的独立控制, 在汽车动力学控制中有明显的优势。动力学控制系统是电动汽车最本质的研究对象, 其涉及控制策略和对象十分广泛。本文分别从动力学转向系统、直接横摆稳定控制系统、防滑动力学、集成动力学控制等方面进行综述。就研究热点四轮独立线控转向、电子差速、直接横摆力矩控制、动力学防滑等进行着重介绍。

关键词: 分布式驱动电动汽车; 动力学控制; 四轮独立线控转向; 电子差速; 防滑; 集成动力学

1 引言

电动汽车 (Electric Vehicle, EV) 以电为动力能源, 其零排放、高能量传递效率等优点越来越受到人们的青睐, 正挑战着传统的内燃机汽车的市场地位^[1]。分布式驱动电动汽车采用轮毂电机独立驱动车轮, 简化了机械结构, 还可实现电机转矩的精确测量与驱动力矩的快速响应, 从而能够更好的运用车辆动力学原理。分布式驱动电动汽车是未来电动汽车的发展方向, 其结构如图 1 所示。

汽车动力学控制一直是车辆工程的研究热点, 分布式驱动电动汽车为提高动力学控制系统的安全性和操稳性提供了独特的优势。在动力学转向中引入四轮独立转向系统, 可实现更多、更灵活转向运动模式。特别是采用线控技术和电子差速策略, 使得整车底盘空间利用效率和传动效率得到提高。直接利用轮毂电机的驱动力矩分配来实现车辆的横摆稳定性控制, 采用基于质心侧偏角和横摆角速度的直接横摆力矩控制, 从而降低非期望横摆力矩, 保证车辆稳定行驶。在动力学防滑系统中, 滑转率和滑移率是两个判断车辆状态的重要参量, 使其工作在最优区间是防滑控制的目标。防滑系统的控制策略及约束函数一直是研究的关键所在。防抱死制动系统 (ABS) 和电子稳定性控制系统 (ESC) 可在附着极限工况下维持车轮和整车的稳定, 是汽车主动安全的重要技术。动力学控制中各子系统具有强耦合性, 但都只针对各种的控制目标, 解决多个动力学控制间的协调问题, 多目标的动力学集成控制已经是一个非常重要的研究方向。

基金项目: 国家自然科学基金(51277150, 51307140); 陕西省教育厅产业化培养(14JF020); 电力系统国家重点实验室开放基金(SKLD16KZ01)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (51277150, 51307140); Industrialization Cultivation Item of Shaanxi Province Educational Department (14JF020); State Key Lab of Power System of Tsinghua University (SKLD16KZ01)

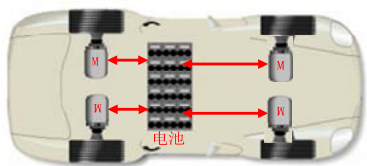


图1 分布式驱动电动汽车结构示意图

2 动力学转向系统进展

2.1 四轮独立转向系统

电动汽车四轮独立转向（Four wheel Independent steering, 4WIS）可实现四个车轮转向角独立控制，有效提高车辆行驶时的操作稳定性和机动灵活性，得到广泛关注和研究。线控和四轮独立转向相结合，取消汽车传统转向的梯形机构，采用4个高性能转向控制器分别控制4个伺服电机带动车轮进行转向，实现多种运动工况（如图2所示），代表着电动汽车转向系统的发展方向^[2]。

现阶段4WIS技术的研究在如火如荼的进行，与线控技术的结合更是热点所在，但目前尚未出现两者技术结合的产品车，各科研团队推出的概念车和试验车性能技术不断升级。由克莱斯勒集团设计的吉 Hurricane 能够通过复杂的转向配置和动力传递机制实现原地转向^[3]。文献[4]提出一种自适应控制，通过线控转向系统实现理想的转向。基于对线控系统的进一步研究，文献[5]提出一种滑动模式控制方案，构建二阶转向系统。这项研究有助于更好地了解使用详细建模的线控转向系统中组件之间的相互作用。香港中文大学开发的多模式转向运动四轮轮毂电机电动车 OK-1，通过对该车四个驱动轮驱动电机和转向轮转向电机的控制，实现原地转向和横向移动。4WIS 与线控技术相结合的转向系统，转向结构、驱动方式、控制策略、整车布局都差异与传统汽车，所以对其进行研究可以从以上方面考虑。一般采用总体结构如图3所示。



图2 多种运动模式示意图

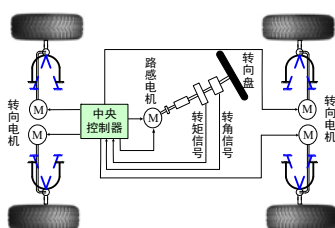


图3 4WIS 电动汽车结构示意图

2.2 电子差速系统

分布式驱动电动汽车需要引入电子差速（Electronic differential, ED）控制器代替传动的机械差速装置，减小非期望横摆力矩，保证汽车转向行驶的稳定性的。

根据控制量的不同。电子差速模型可以划分为转速控制和转矩控制。文献[6]以转速为控制量，根据 Ackermann 转向模型计算出四个独立驱动电机的基本转速，公式（1）所示，运用双模控制结合 PI 控制电机转速，再用 BP 神经网络修正四电机转速，控制轮毂电机转动。文献[7]以转矩为控制量，控制输入量为转向盘转角和输入转矩，根据实际工况，计算出各驱动轮所需的驱动力矩，将滑转率控制在一定范围内，通过滑模控制算法合理分配各驱动电机的电磁转矩，提高车辆行驶稳定性。电子差速系统在四轮调速控制、驱动转向等研究中都取得了实际的研究成果，与多种控制理论相结合可以实现更优越的稳定性控制。

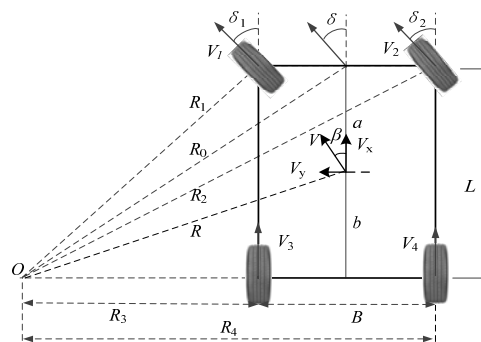


图4 Ackermann 汽车转向模型

$$\begin{cases} V_1 = \frac{V\sqrt{L^2 + (L/\tan\delta - B/2)^2}}{\sqrt{b^2 + (L/\tan\delta)^2}} \\ V_2 = \frac{V\sqrt{L^2 + (L/\tan\delta + B/2)^2}}{\sqrt{b^2 + (L/\tan\delta)^2}} \\ V_3 = \frac{V(L/\tan\delta - B/2)}{\sqrt{b^2 + (L/\tan\delta)^2}} \\ V_4 = \frac{V(L/\tan\delta + B/2)}{\sqrt{b^2 + (L/\tan\delta)^2}} \end{cases} \quad (1)$$

其中， V_1 - V_4 为4个车轮沿轮方向的纵向速度， δ 为前轮转向角；

3 直接横摆稳定性控制系统

近年来由于动力装置升级发展，车辆在稳定性的要求上有所提高。在低速情况下，常规车辆可以依靠防抱死制动和牵引力控制系统^[8]来保证减速和加速阶段的一维运动稳定性。在高速换向时，车辆偏转轴线上产生一个较大的力矩变化。但由于轮胎的纵向和横向牵引力是非线性的，当饱和时，轮胎

将迅速恶化^[9]，而失去其推进功能，带来甩尾、偏移等失稳现象。直接横摆稳定性控制以调节车身姿态为目标，直接利用轮毂电机的驱动力矩分配来实现车辆的横摆稳定性控制。

在车辆的稳定性研究中，横摆角速度和质心侧偏角是描述其运动状态的两个重要物理参数。文献[10]对电动汽车横摆稳定采用了滑模控制，设计对于横摆稳定性、最小侧偏角、整车性能最优的不同目标下三种控制器，横摆角速度控制器、质心侧偏角控制器、联合控制器。文献[11]在四轮独立驱动电动汽车基于横摆力矩鲁棒的运动稳定性控制研究中，提出一种两自由度的直接横摆力矩控制（Direct yaw moment control, DYC）方案。基于DYC和横摆力矩观测器建立一个封闭鲁棒控制架构，系统可有效克服随机扰动。非线性控制、模型预测控制等也取得了不错的研究成果。

现阶段的4WID电动汽车的直接横摆稳定性控制大多采用了分层的结构，方法相对简单。文献[12]设计了一种包括车辆动力学模型设计层、补偿横摆力矩制定层及驱动力分配层的驱动力分层控制策略（如图5所示），并快速控制原型试验，验证设计的控制策略的有效性。在基于模型预测控制的横摆稳定性控制器，反馈最优控制的侧倾稳定性控制器的基础上，底层四轮驱动转矩协调分配采用空间运动解耦，实现了兼顾整车横摆稳定运动^[13]。分层控制结构大致雷同，但在控制策略、动力学分析等方面有所区别。

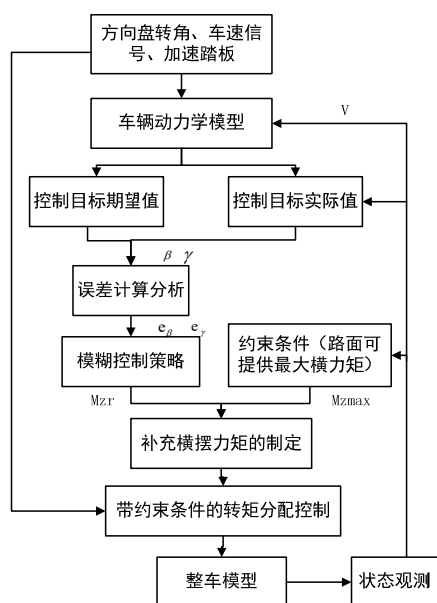


图5 整车驱动力分层控制策略结构示意图

4 防滑动力学进展

车辆在输出转矩过大或者冰雪湿滑路面行驶时，驱动容易发生滑转、滑移，对于分布式驱动电动汽车易导致其驱动力不均衡，造成整车失去动力性和操稳性。但轮毂电机控制将直接影响驱动轮的运行，这使得防滑控制简单方便。

4.1 防滑转控制系统

电动汽车输出转矩过大或在低附着系数路面时都可能致使轮胎产生滑转现象。驱动防滑系统常见的是将驱动轮的滑转率控制在最优滑转率附近^[14]，保证驱动轮拥有最佳纵向驱动力的同时，保证有一定的抵抗侧向干扰的能力。

防止车辆滑转或减轻滑转状况是所有研究者的主要控制目标，在控制变量选取中可以直接利用滑转率进行判断，也可由驱动电机的转速，角加速度和电磁转矩等直接体现轮速的电机参量进行判断。文献[15]以滑转率作为防滑控制变量，控制过程直接，效果明显。但实际不同路况下峰值系数对应的滑转率即最优滑转率存在差别，由滑转率定义式（2）得，车速和轮速的测量精度不够，将间接地影响到整个控制效果。文献[16]把轮速或轮加速度作为控制变量，进入滑转路面后，轮速因为地面附着力骤降而升高，但轮速的变化需要一段时间，把轮速作为控制变量会导致整个防滑控制相对滞后。轮加速度相位比轮速相位靠前90°，意味着控制角加速度，可以提前得到轮速的变化趋势，有利于提高控制的时效性。

$$\lambda = \begin{cases} \frac{V_i - V}{V_i}, V_i \geq V \text{ (加速)} \\ \frac{V - V_i}{V}, V_i \leq V \text{ (减速)} \end{cases} \quad (2)$$

其中， V 为轮胎中心速度即车速； V_i 为驱动轮轮速即轮胎切向速度。 $V_i \geq V$ ，定义为滑转率； $V_i \leq V$ ，定义为滑移率。

针对不同的控制变量，国内外学者提出不同的控制方法。比例积分微分控制作为经典控制方法，对于控制对象一定的系统其控制参数也将确定，这对于一定工况下的车轮防滑系统是简单有效的，常以车轮滑转率为控制变量^[15]。但实际路况并非一成不变，控制参数需要在线调整才能适应多变的控制系统。逻辑门限值控制常以车轮角速度或角加速度为主要门限，车轮滑转率为辅助门限。它的优势是

不需要控制对象的精确数学模型,缺点是门限值需要经过多次实验或者由经验确定^[17]。复合控制充分利用了不同控制方法的优缺点,使得控制效果更加准确、迅速和稳定。文献[18,19]采用了PID+模糊控制的方法去分别控制转速和滑转率,既能获得模糊控制所具有的对不确定和非线性对象的快速控制能力,提高了系统鲁棒性,同时又利用PID控制器来提高系统的稳态性能,保证电动汽车加速和调速均优良的性能,如图6所示。模型跟踪控制、滑模变结构控制、自适应控制在防滑系统中也取得了广泛的研究成果。

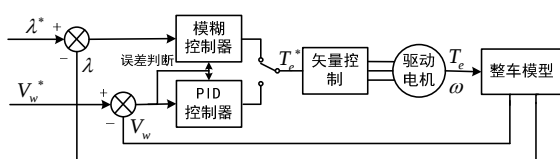


图5 模糊+PID复合控制系统结构原理图

4.2 防滑移控制系统

由于分布式驱动电动汽车的轮胎滑移率对其操稳性的影响非常明显,并可通过驱动力矩和制动力矩进行调节,因此成为汽车动力学控制系统常用的被控变量,定义式为(2)。ABS和ESC可在附着极限工况下维持车轮和整车的稳定,是汽车主动安全的重要技术。电机具有驱/制动两种工作模式,通过驱/制动力矩的控制,使轮胎滑移率迅速收敛于目标滑移率。ABS的应用已十分普遍,ESC系统对轮胎力的控制更为灵活。

电动汽车的滑移率控制系统要同时控制四个车轮的滑移率,它是一个非线性、时变性、机理复杂、多目标、带约束的系统。滑移率控制系统设计的控制方法,除传统的逻辑门限值控制、以经典控制理论为基础的PID控制外,还包括最优控制、自抗扰控制、滑模变结构控制、模糊智能控制,以及一些非线性控制方法等^[20-21]。文献[22]中设计一个鲁棒自适应滑移率控制器和一个力矩分配器,来有效分配电机的驱动力矩和制动器上的制动力矩。文献[23]采用非线性模型预测控制,综合考虑电机最大力矩约束和整车性能,通过构建目标函数并求解这个约束优化问题,最终得到优化后的输出力矩命令以保证车辆稳定。在分布式驱动电动汽车防滑移的控制系统中,如何对于制动力矩合理分配是一个很具前景的研究点。

5 集成动力学控制

5.1 动力学系统集成控制

分布式驱动电动汽车动力学特性不再受到机械结构的制约,而是通过控制的手段予以体现,可实现多种动力学控制。但由于车辆动力学各个方向上强耦合性和各个子系统只针对各种的控制目标,很难相互协调,传感器数量多,结构复杂。动力学集成控制对此有很大的研究空间。

集成控制可分为基于协调控制的集成控制方法和基于集中控制的集成控制方法^[24]。基于协调控制的方法在各子系统的上一层加入协调控制器,综合考虑各子系统之间的耦合关系,确定总体控制目标。文献提出车辆纵向力与侧向力集成控制,用滑模控制决策出车辆所需施加的总的力和力矩,提高车辆在各种工况下的行驶稳定性。文献[25]为提高电动汽车制动能量回馈效率,前后轮制动力合理分配,提出集成能量回馈优化与防抱死控制的分层控制方法。基于集中控制方法省去子系统的控制器,在整车层面的中央控制器设计全局动力学优化目标,结合车辆状态集中控制。中央控制器压力剧增,要求控制算法集成程度高,整车模型精确。

5.2 动力学系统运动状态估测

车辆状态估测旨在确定车辆行驶过程中的状态参量,其作为动力学集成控制系统中的一项关键技术,有着至关重要的影响。如在电动汽车ED控制和ABS系统都需要车辆纵向速度和轮速的准确反馈,在横摆稳定性控制系统和ESC中需实时获取车辆的质心侧偏角和横摆角速度,这些都依赖于运动状态估测技术的完备。

现阶段,简单低成本电子陀螺仪等传感器广泛的应用于测量车身横摆角速度。质心侧偏角可以通过纵向车速间接计算,目前的研究重点在于对纵向车速和侧向车速的估计^[26]。文献[24]研究并建立了基于Unscented卡尔曼滤波理论的车辆状态估算算法,估计精度和收敛速度的显著提高。文献[28]基于双无轨卡尔曼滤波理论搭建一种全线控电动汽车运动状态估计联合轮毂电机参数辨识的观测器,参数自适应辨识不仅能提高运动状态的估计精度,还可以检测出系统可能存在的故障。龙贝格观测器,滑模观测器等也常用于状态估测的研究中。所构建的车辆模型,轮胎模型及参数匹配度都将影响状态估测的准确度和实时性,要合理权衡各种约束条件。

6 结论

分布式驱动电动汽车是未来电动汽车发展的着手点,以分布式驱动为背景的电动汽车动力学控制作为最本质的研究对象,具有广阔的前景。本文就其动力学控制的转向控制、直接横摆稳定性控

制、防滑控制、集成动力学控制进行了发展现状介绍。

分布式驱动电动汽车动力学控制与传统汽车动力学控制相比,控制目标基本一致,但在控制策略和对象上显得更为灵活多样。分布式驱动的四轮独立线控转向使得电动汽车可实现更多的运动工况,转向结构发生改且目前并不统一。电子差速是转向调速的重要控制策略,存在限制条件,需结合其他的控制方式使车辆更符合驾驶员的意图行驶。直接横摆稳定性控制通过单独驱/制动每个车轮,产生的直接偏转力矩来改善车辆的横向稳定性,在此,车辆模型和轮胎模型的建立格外重要。分布式驱动防滑和制动防抱死在控制参量、策略和算法的研究上有独特优势。集中控制可以结合以上多种动力学控制目标,实现最优和协调控制,减少系统冗余。动力学系统的运动状态估测为各子控制系统提供输入与反馈,也是更好实现集中控制的前提。

参考文献

- [1] 葛平淑,徐国凯,张涛.轮式电动汽车驱动系统关键技术[M].北京:电子工业出版社,2015.
- [2] 朱小春,董铸荣,贺萍等.线控转向电动汽车运动控制系统的研究[J].机电工程,2014,31(6):779-782
- [3] [Online].Available:http://www.jeep.com/jeep_life/news/jeep/hurricane_concept.html
- [4] Y. Yamaguchi and T. Murakami, "Adaptive control for virtual steering characteristics on electric vehicle using steer-by-wire system," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 5, pp. 1585-1594, May 2009.
- [5] H. Wang et al., "Sliding mode control for steer-by-wire systems with AC motors in road vehicles," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 3, pp. 1596-611, Mar. 2014.
- [6] 郭建龙,陈世元.电动车用多电机独立轮式驱动的协调运行分析[J].微特电机, 2007, No.192(1):13-16.
- [7] 赵艳娥,张建武.轮毂电机驱动电动汽车电子差速系统研究[J].系统仿真学报,2008, No.175(18): 4767-4771.
- [8] D. Yin and J.-S. Hu, "Active approach to electronic stability control for front-wheel drive in-wheel motor electric vehicles," Int. J. Automot. Tech-nol., vol. 15, pp. 979-987, 2014.
- [9] N. Mutoh and Y. Nakano, "Dynamics of front-and-rear-wheel-independent-drive-type electric vehicles at the time of failure," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 3, pp. 1488-1499, Mar. 2012.
- [10] He J, Xiong L, Yu Z, et al. Study on stability control of 4WD EV based on sliding mode control[C]// Tencon 2013 - 2013 IEEE Region 10 Conference. IEEE, 2014:1-4.
- [11] Hu J S, Wang Y, Fujimoto H, et al. Robust Yaw Stability Control for In-wheel Motor Electric Vehicles[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, PP(99):1-1.
- [12] 朱绍鹏,林鼎,谢博臻,等. 电动汽车驱动力分层控制策略[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(11):2094-2099.
- [13] 房丽爽. 汽车横摆与侧倾稳定性集成控制研究[D]. 吉林大学, 2016.
- [14] 李亮,康铭鑫,宋健,等. 汽车牵引力控制系统的变参数自适应 PID 控制[J]. 机械工程学报, 2011, 47(12): 92-98
- [15] TUR O, USTUN O, TUNCAY R. An Introduction to regenerative braking of electric vehicles as anti-lock braking system[C]. Intelligent Vehicles Symposium, 2007, IEEE, 2007: 944-948.
- [16] Yoichi Hori. Future Vehicle driven by Electricity and Control-Research on Four Wheel Motored " UOT Electric March II " [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2004, 5(51): 954-962.
- [17] MUTOHN, HAYANO Y, YAHAGI H, et al. Electric braking control methods for electric vehicles with independently driven front and rear wheels[J]. IEEE-Transactions On Industrial Electronics, 2007, 54(2): 1168-1176.
- [18] 林辉. 轮毂电机驱动电动汽车联合制动的模糊自整定 PID 控制方法研究[D]. 吉林大学, 2013.
- [19] 汤东胜,吴光强,董华林.电动汽车矢量控制的模糊-PID 复合控制方式[J].汽车工程,2003,25(1): 61-64.
- [20] Yuan L, Chen H, Ren B T. Model predictive slip control for electric vehicle with four in-wheel motors [C]//34th Chinese Control Conference. 2015:7895-7900.
- [21] 张艳芬. FSAE 纯电动赛车驱动防滑控制研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2015.
- [22] 张金柱,张洪田,孙远涛.电动汽车稳定性的横摆力矩控制[J].电机与控制学报,2012,16(6):75-80.
- [23] 袁磊. 四轮轮毂驱动电动汽车滑移率控制系统研究[D]. 吉林大学, 2016.
- [24] 陈国迎. 四轮独立线控电动汽车试验平台搭建与集成控制策略研究[D]. 吉林大学, 2012.
- [25] 周磊, 罗禹贡, 李克强,等. 电动汽车回馈制动与防抱死制动集成控制[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2009(5):728-732.
- [26] 肖峰. 轮毂电机驱动电动汽车状态估计及直接横摆力矩控制研究[D]. 吉林大学, 2016.
- [27] 宋攀. 全线控四轮独立转向/驱动/制动电动汽车动力学集成控制研究[D]. 吉林大学, 2015.

作者简介: 张辉(1963), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 新型电力储能、可再生能源发电及电动汽车驱动技术, zhangh@xaut.edu.cn;

孙鹏(1994), 男, 硕士研究生, 主要从事四轮独立驱动/转向电动汽车方面的研究, 1300061655@qq.com;