

电动汽车动力学控制研究进展

徐国卿^{1,2,3} 徐 坤² 李卫民²

¹ (香港中文大学 香港新界沙田)

² (中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

³ (同济大学 上海 201804)

摘 要 近年来随着全球资源、环境问题日益严峻,节能、环保的电动汽车得到快速发展。电动汽车采用电机驱动系统,具有转矩快速响应、易于精确测量、可实现动力分散控制、可实现制动能量回收等优点。充分挖掘并利用这些优点可显著提升车辆动力学控制性能。文中从电动汽车动力学控制运行参数的识别、动力学控制结构与方法两个角度综述了十多年来的研究成果,重点介绍了轮胎-路面接触条件识别方法、驱动防滑控制方法等。对车辆横向动力学控制,包括电子差速控制、直接横摆控制、底盘集成控制等研究现状也做了总结。最后对未来电动车辆动力学控制的发展方向作了几点展望。

关键词 电动汽车; 动力学; 牵引力控制; 参数识别; 研究进展

An Overview of Dynamic Control for Electric Vehicles

XU Guo-qing^{1,2,3} XU Kun² LI Wei-min²

¹ (The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong)

² (Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055)

³ (Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract With the increasing concerns of global warming and resource constraints, electric vehicles (EVs) have made great progress during the past decade. The electric driving system of EVs has distinct advantages, such as quick response, easy measurement, and precise control of motor torque, available flexible driving architecture, and regenerative braking, etc. Such advantages can be used to improve the performance of vehicle dynamic control. This paper presents the recent research efforts on electric vehicle dynamic control in terms of parameters estimation and dynamic control scheme and methodology, especially focusing on the tire-road friction estimation, novel traction control methods. The lateral dynamic control including the electrical differential control, direct yaw moment control, and the integrated chassis control is proposed. Several prospects for vehicle dynamic control are proposed.

Keywords electric vehicle; dynamic control; traction control; parameter estimation; overview

1 引 言

车辆动力学控制系统以整车及动力部件的动力学方程为基础,以操纵稳定性参数(如整车横摆角速度、质心侧偏角和车轮滑移率等)为控制目标,通过

合理的控制策略实现对汽车的纵、横向动力学控制,是提高车辆操纵性与稳定性的关键。学术界和企业界相继开发出面向不同控制目标的动力学控制系统,如驱动防滑系统(traction control systems, TCS)、防抱死制动系统(antilock braking system, ABS)、直接横摆力矩控制(direct yaw moment control,

徐国卿, 教授, 博士生导师, 研究方向为电动汽车、先进能量处理与智能控制技术。E-mail: gq.xu@siat.ac.cn。徐坤, 博士研究生, 研究方向为非线性动力学控制与智能系统。李卫民, 高级工程师, 研究方向为能量变换与智能集成控制技术。

DYC)、主动后轮转向(active rear steering, ARS) 控制、四轮转向(four wheel steering, 4WS) 控制等。

近年来随着全球资源和环境问题日益严峻, 电动汽车以节能环保的突出优势得到了快速发展^[1,2]。电动汽车采用电驱动系统, 与传统汽车相比, 电驱动系统的诸多优势可被用来研究新型的动力学控制结构与方法^[3], 并显著提升面向节能与安全的车辆动力学控制性能。

(1) 转矩快速响应。传统汽车的发动机转矩响应时间为几百毫秒左右, 且其动力学控制基于发动机动态响应特性与车辆惯性进行控制。电动汽车电气化执行部件的突出优点是控制精确, 控制周期短, 响应速度快(可快达几毫秒), 这对提升动力学控制性能具有重要意义。

(2) 转矩易于精确测量。传统汽车发动机转矩测量需要外加传感器, 而电机输出转矩通过电流测量即可容易实现, 且测量精度、频率更高。

(3) 可实现动力分散控制。传统汽车四轮驱动需要复杂的机械系统, 且不能对每个车轮的力矩单独控制。电动汽车利用轮毂电机可实现每个车轮独立驱动, 进而可精确控制每个车轮的力矩, 使整车控制性能大大提升。此外, 采用轮毂电机的动力分散方式还可降低底盘, 省去复杂的机械系统, 传动效率得到提高, 有利于实现汽车底盘系统的电子化、主动化。

(4) 可实现制动能量回收。传统汽车制动过程通过机械摩擦消耗动能, 无法实现制动过程动能的回收。电动汽车驱动电机具有四象限工作能力, 可工作在发电状态, 将动能进行转化向储能系统进行充电, 进而提高能量利用效率。有研究表明, 采用合适的回馈制动控制策略, 电动汽车续航里程可提升25%左右, 这对一次充电续航里程有限的电动汽车意义重大^[4]。

此外, 传统汽车领域与车辆安全相关的技术被国外牢牢掌握。近年来国外一些研究机构和汽车企业已开始认识到电动汽车电驱动系统的新特性, 纷纷加强对新型动力学控制方法的研究。电动汽车是实现中国汽车产业转型升级的重大机遇。2011年我国发布的《国家“十二五”科学和技术发展规划》指出, 新能源汽车“全面实施‘纯电驱动’技术转型战略”, “全面掌握核心技术”。电动汽车向纵深发展必须改变动力学控制薄弱自主知识产权的现状。电动汽车的动力学控制具有的新特点与新优势, 提供了在电动车

辆高端核心控制领域实现技术跨越的发展机遇。

本文介绍了近年来电动汽车动力学控制的研究进展。第2部分首先揭示电动汽车牵引力控制的基本原理, 然后介绍牵引力控制关键运行参数的研究现状、新型牵引力控制的代表性研究成果。第3部分介绍了电动汽车的横向动力学控制研究进展。第4部分对未来电动汽车动力学控制的研究进行了总结与展望。

2 纵向动力学控制进展

2.1 纵向动力学控制的稳定性

多能源动力系统使电动汽车成为不同于传统汽车的复杂机电系统。电机的驱动转矩通过减速器、离合器、差分器驱动车轮旋转。车轮在驱动力与轮胎-地面接触摩擦阻力的作用下旋转, 由于该阻力产生自路面与轮胎的接触, 具有强非线性与不确定。具体来讲, 轮胎-路面接触提供了两个水平方向的力, 即侧向力(横向力), 驱动力(纵向力)。这两个力的大小与滑移率密切相关。滑移率定义式如(1), 其中 ε 是避免分母为零的小数, 摩擦系数 μ 是当前轮胎-路面接触下滑移率的函数。描述摩擦系数与滑移率的关系的研究很多, 最著名的是魔术公式^{[6]-[8]}。图1描绘了不同路面下摩擦系数与滑移率的关系。

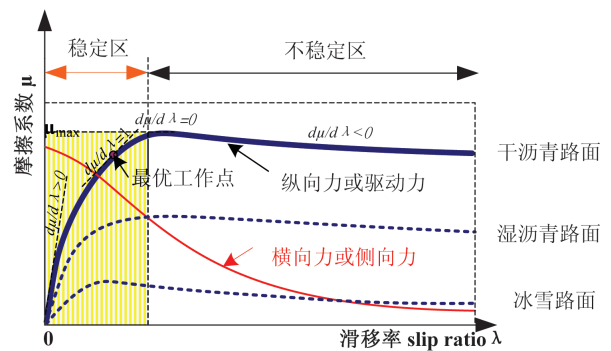


图1 摩擦系数与滑移率在不同路面条件下的关系

$$\lambda = (V_{\omega} - V) / \max(V_{\omega}, V, \varepsilon) \quad (1)$$

$$F_d(\lambda) = \mu(\lambda)N \quad (2)$$

图1中, 开始阶段 μ 随 λ 的增加而增加, 直到在某个滑移率值下达到最大值 μ_{\max} , 纵向力由摩擦系数与法向载荷决定(2)。因此开始阶段滑移率的增加可导致摩擦系数增加, 使得驱动力增加, 直到在操作点 $d\mu/d\lambda=0$, 摩擦系数达到最大值。进一步增加滑移率将造成驱动力的减少, 这是一种不稳定的工作状态, 可引起车辆的不稳定加速甚至车轮的严重滑转。这种

不稳定的工作状态一旦出现，应当立即减小电机驱动力。称上述的 $d\mu/d\lambda=0$ 操作点对应的滑移率为最优滑移率。一旦当前滑移率超过最优滑移率，纵向力、侧向力均会立即减小，这两种力的迅速丢失会造成车辆的严重失稳状况。在图1中，称滑移率小于最优滑移率的区域为稳定区域，反之为不稳定区域。有些文献也将最优滑移率的取值定义为 $d\mu/d\lambda=1$ 。

纵向动力学控制的目的是保证车辆在任何情况下（尤其是低附着路面条件）工作在上述的稳定区域，避免打滑或抱死。因此可得牵引力控制的两个基本问题：（1）状态识别问题，即如何识别当前的工作点，包括当前的摩擦系数、滑移率、轮胎-路面接触；（2）控制问题，如何实施控制将工作点维持在稳定区域。

2.2 纵向动力学控制的运行参数识别

2.2.1 轮胎-路面接触的量化表征

运行参数是车辆牵引力控制所需的关键参数，可被用作预测车辆在某种路面行驶时是否打滑，以及在不发生打滑时预测发生打滑现象的可能性，我们称之为“轮胎-路面接触条件”估计。

一种判断“轮胎-路面接触条件”的量化表征是最大摩擦系数 μ_{max} 。在车辆纵向动力学控制中，摩擦系数为 $\mu = F_x/N_z$ ，其中 F_x 为作用在轮胎上的纵向力， N_z 为作用在轮胎上的法向载荷。最大摩擦系数 μ_{max} 是所有可能值 $|\mu|$ 中的最大值。另一种量化表征是应用最优滑移率 λ_{opt} 。在摩擦系数-滑移率曲线中，对给定的轮胎-路面接触，最大摩擦系数对应的工作点即是最优滑移率对应的工作点。与此类似，应用斜率 $d\mu/d\lambda$ 也可量化表征不同“轮胎-路面接触条件”下的运行状态。上述三个量化标准本质是一致的，可根据控制策略的不同选取不同的控制变量。

目前“轮胎-路面接触条件”识别的方法大体上分为基于原因的（cause-based）、基于效果的（effect-based）两种方法^{[9]-[12]}。

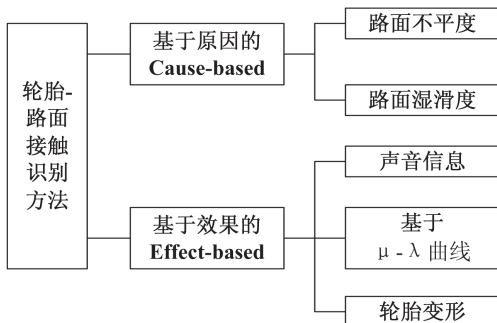


图2 轮胎-路面接触估算方法

2.2.2 基于原因的方法

基于原因的方法，通过设法测量得到能引起摩擦变化的关键信息（车速、轮胎类型、车轮负载等），依据以往经验或摩擦模型预测当前的最大摩擦系数大小。这种方法需要专用传感器^{[11][12]}，例如利用声学器件、光学器件，并依据不同路面反射的不同信息，通过测量这些信息的变化来识别打滑情况；或直接采用压力传感器直接测量轮胎变形来识别打滑情况。然而这些方法需要专用的传感器，价格昂贵，对环境敏感，短期内无法应用到实际商用车中。

2.2.3 基于效果的方法

基于效果的方法，通过测量作用在车辆、轮胎上的摩擦力引起变化的其他参数，依据这些间接信息估计最大的摩擦系数等^[13-16]。目前应用较多的是基于 $\mu - \lambda$ 曲线的识别方法。该方法无需专用的测量设备（只需车辆动力学控制常规传感器），具有较高的实用价值。研究分两类：一类是平均摩擦系数估计的方法，假定每个车轮-路面接触的摩擦系数相同；另一类是对每个车轮-路面接触条件进行估计。

基于效果的方法一方面也需要几种成本较高的传感器（加速度、力传感器、横摆速率传感器等），且计算负担较重。此外，由于受到传感器（例如轮速、车速）传感器分辨率低的制约，观测器的整体响应频率也较低，无法满足电动汽车快速动力学控制所需的状态参数的快速识别，也进一步限制了利用电驱动转矩快速响应来提升动力学控制快速响应的能力。

仅仅识别 μ 与 λ 的当前值还无法用于车辆驱动防滑的控制，须进一步进行滑动状态的识别。一种方法是得到 $\mu - \lambda$ 曲线的斜率^[23-27]，不稳定区域对应斜率为负，而稳定牵引区域对应滑移率大于零。另一种方法是最优滑移率识别^[20, 28-32]。

2.3 纵向动力学控制策略

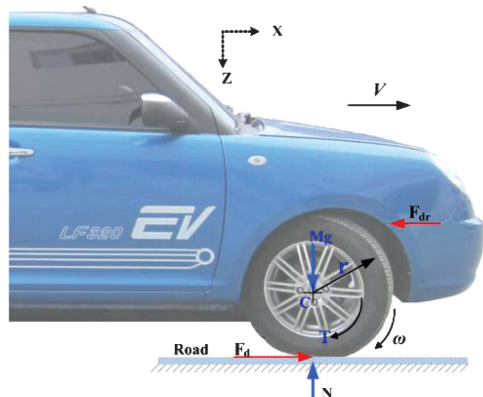


图3 单轮车辆模型

过去十多年来，电动汽车新型纵向动力学控制的研究取得重要进展。采用中央电机集中驱动的电动汽车，其牵引力控制研究一般将车辆动力学模型等效为一个“单轮模型”，在此简化模型基础上研究新型牵引力控制策略。采用多电机分散驱动的电动汽车，一般有前轮（后轮）独立驱动、四轮独立驱动等模式，其动力学控制研究模型要复杂得多，多从横向稳定控制的角度开展研究。

2.3.1 模型跟踪控制

日本东京大学Hori等1998年提出了模型跟踪控制^[41-43]，该方法将车辆动力学看作一个可变的惯量系统，假定车轮越打滑惯量越小，该系统与名义系统比较的误差用于对牵引电机的转矩进行限制。该方法不需要车速信号，仅需要转矩、轮速信号作为输入，因此系统的可靠性提升。此外该方法最大优点是不受路面条件的限制，但要依据最坏稳定性来设计补偿增益，因此削弱了驱动防滑性能。该团队研制了“UOT Electric March”电动车，用于电动车TCS/ABS的原理性先期研究与验证，成功实现了车轮滑移率的模型跟踪控制和下面将提到的最优滑移率控制。

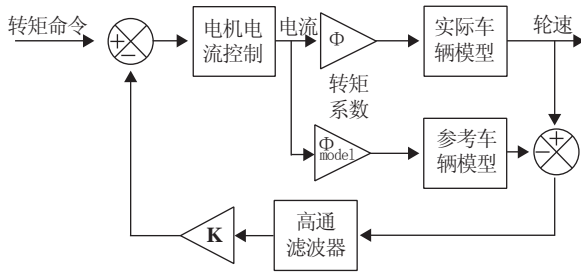


图4 MFC模型跟踪控制

2.3.2 最优滑移率控制

最优滑移率控制^[41, 42, 44]，首先利用路面识别算法识别出当前轮胎-路面接触条件下的最优滑移率，并将其作为滑移率控制的参考输入。为协调驾驶员的控制作用与最优滑移率的自动控制作用，在最优滑移

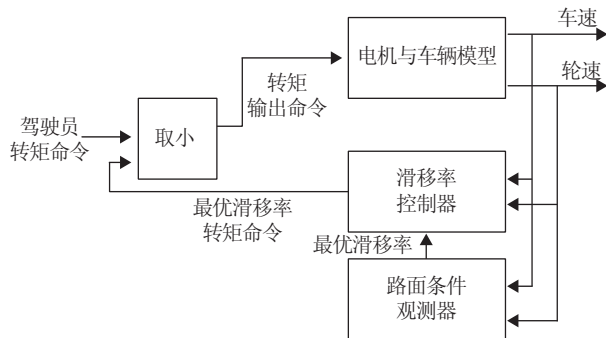


图5 最优滑移率控制

率控制结构中，增加一个转矩选择器，将驾驶员的操作产生的需求转矩与最优滑移率控制产生的需求转矩进行取小操作，作为电机转矩的给定值。因为转矩选择器的作用设置在滑移率闭环控制的内环，驾驶员对踏板的操作是不确定、非受控的，从自动控制角度看，驾驶员需求转矩是最优滑移率闭环控制器的非确定性干扰，对滑移率控制器扮演了强干扰的作用，使得系统的动态稳定性变差^[45, 46]。

2.3.3 附着斜率控制

附着斜率控制(adherence gradient control)是Colli等提出的一种新型牵引力控制方法^[47, 48]。附着斜率控制通过控制附着系数与滑移率的斜率($A=d\mu/d\lambda$)来保证车辆稳定运行。控制目标是附着斜率为1或者0（此时对应最理想的情况，即获得最大附着力）。控制器采用模糊控制器、滑模控制器两种方法来评估效果。附着斜率控制无需具体知道车辆行驶在何种路面，只利用摩擦系数变化率与滑移率变化率的比值来表征打滑程度并进行控制。但该方法在滑移率较小时斜率变化不明显，因此不适用小滑移率的控制。

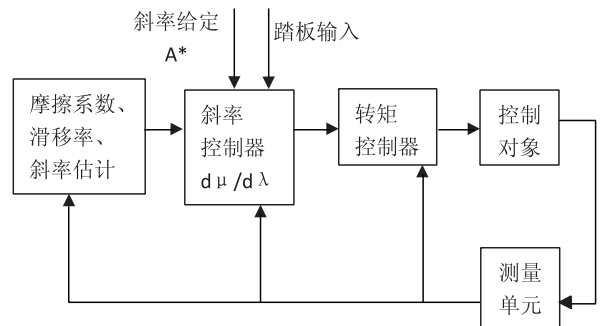


图6 附着斜率控制

2.3.4 最大可传递转矩控制

Yin等近年来提出了一种基于最大可传递转矩估

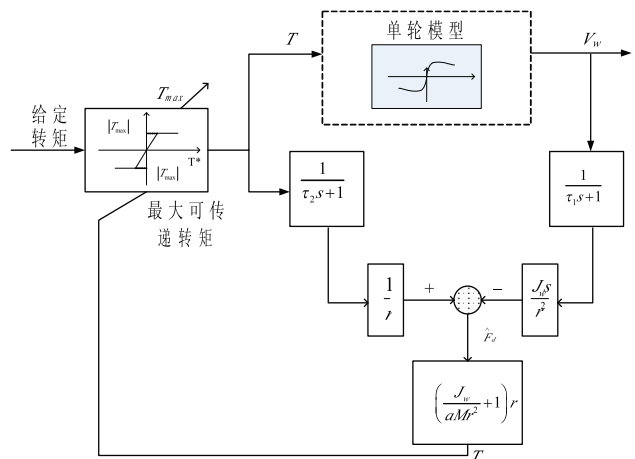


图7 MTE最大可传递转矩控制

计 (Maximum Transmissible Torque Estimation, MTTE) 的新型控制方法^[49-54]。该方法基于纯动力学模型, 并利用驱动电机估计出最大可传递转矩输出, 在此基础上设计一种新型控制结构, 通过直接限制转矩参考值防止车辆打滑。该方法本质上通过控制车辆加速度与车轮加速度的比例, 车轮滑移通过一个松弛因子 (设计值小于1) 间接实现控制^[27, 28]。

2.3.5 回馈制动

可利用电机实现能量回收同时提供部分制动力是电动汽车的另外一个优势, 但机械摩擦制动、电气回馈制动两种制动作用的存在也增加系统的复杂性和控制的难度, 目前的研究集中在探索两种制动作用的动态响应特性匹配问题, 解决两种制动作用的协调控制, 多约束条件下不可回馈能量的实时动态优化等问题^[55-63], 满足制动安全性、平顺性、舒适性的要求。

3 横向动力学控制进展

分布式驱动电动汽车利用轮毂电机可实现动力分散驱动, 即每个车轮的驱动力可精确控制, 由此可实现更优的控制目标, 是电动汽车发展的一个重要方向。各种动力分散驱动结构与控制策略是电动汽车新型动力学控制研究的一个热点。

3.1 电子差速控制

电子差速控制通过控制左右两个驱动轮驱动电机, 实现电动汽车差速转向, 控制变量是电机输出转矩或电机输出转矩。多数研究者倾向于针对转矩进行独立分配, 但由于转矩控制还涉及到驱动防滑控制, 因此这类电子差速的研究和驱动防滑的研究是紧密结合的。电子差速控制策略方面, 现有研究有基于滑模控制^[64, 65]、开关控制理论^[66]、神经网络等^[67-71]。此外, 还有一种利用新型电机结构来实现电子差速的研究方法, 这些新型电机有双转子轴向磁通电机、反相双转子电机、复合多相双转子电机等^[73, 74]。这种方法使驱动系统结构复杂, 不能充分发挥电动轮驱动的优势, 同时各车轮驱动力难以实现独立控制。

3.2 直接横摆转矩控制

直接横摆转矩控制 (DYC) 通过控制各轮的纵向力产生附加的横摆转矩, 保证车辆横向稳定性, 可提高大侧偏角和高侧向加速度时的操纵稳定性和主动安全性。四轮驱动电动汽车可快速、精确、独立控制各个车轮的驱动力和制动力, 在满足整车控制要求下通过转矩优化分配策略, 可进一步改善直接横摆力矩控制

(DYC) 下车体的稳定性和系统效率。

直接横摆转矩控制的控制变量可选单独控制横摆角速度、单独控制质心侧偏角及对质心侧偏角和横摆角速度进行联合控制。控制目标是尽量保持质心侧偏角最小, 同时使横摆角速度跟踪期望值, 以实现驾驶员的意图。质心侧偏角与横摆角速度联合控制策略能够将质心侧偏角控制在稳定范围内, 并能够很好地跟踪车辆的期望横摆角速度。

文献[75]中研究了两轮驱动电动汽车的操纵稳定性控制, 通过车轮纵向力的合理分配来产生直接横摆力矩, 建立了质心侧偏角前馈控制和质心侧偏角及横摆角速度的状态反馈控制模型。具体的控制分配算法有滑模控制^[76-78]、模糊控制^[79-81]、PID控制^[82]、最优控制^[83-88]、神经网络控制^[89]、预测控制^[90-92]等。

此外, 有学者还把能耗列为转矩分配优化的多目标之一^[86, 93]。文献[86]综合了能耗的经济性与行驶的稳定性的, 提出了一种最优车体系统能效的转矩分配策略, 系统能效目标函数中包含稳定性和经济性2个指标, 在横摆力矩需求、最大附着力和最大驱动力的约束条件下对目标函数进行求解, 满足稳定行驶的条件下尽量降低车辆的能量消耗。

3.3 底盘集成控制

因为车辆动力学存在多个系统, 各个控制系统的控制目标不一致, 对执行器的控制存在干涉, 或同一控制目标可以由多个控制系统完成, 为解决这些问题, 近年来, 车辆动力学集成控制 (integrated vehicle dynamics control, IVDC) (或底盘集成控制) 逐渐成为研究热点。集成控制需要对2个或2个以上的动力学子系统进行综合的控制, 消除各子系统干涉, 利用它们的功能互补, 综合性能将优于子系统。

文献[94]比较了3种侧向力和横摆力矩联合控制的方法: DYC+RWS, DYC+FWS和DYC+FWS+RWS, 并分析了原因。结果表明DYC+RWS和DYC+FWS联合控制方法都不能保证汽车的高稳定性和高响应性, 而DYC+FWS+RWS联合控制方法由于前后轮胎的平衡, 做到了汽车的高稳定性和高响应性, 且DYC+FWS+RWS联合控制方法, 更能充分利用各个轮胎的能力。

文献[95-97]都对DYC和4WS的联合控制进行了研究。文献[98]研究了DYC和AFS的集成控制, 研究表明其较之DYC单独控制, 更加能够表现出令人满意的跟踪性能和响应收敛。文献[42][99, 100]介绍了横摆力矩控制及其与车轮防滑控制结合下的横向运动控制。

近年来, 底盘集成控制逐渐地扩展到对整车的集

成控制,甚至包含了对人-车-路-路大闭环系统集成控制。扩展的集成控制可涵盖的车辆子系统有:驾驶辅助系统(如巡航控制)、主动安全(如ESC)和被动安全系统(如安全气囊)。

4 总结与展望

电驱动系统转矩快速响应、易于精确测量与控制、可实现动力分散驱动、可实现制动能量回收等突出特点,为电动汽车的动力学控制性能的提供了巨大的技术进步空间。本文梳理了近年来电动汽车动力学控制的研究进展情况,并侧重于纵向牵引力控制、横向稳定控制的介绍,限于篇幅,本文未涉及垂向动力学进展。近年来,充分发挥这些优势的新型动力学控制研究成果表明,智能化、集成化、电动化的车辆动力学控制是未来车辆动力学控制发展的重要趋势。

考虑到车辆动力学控制的非线性、不确定性,控制变量的多样化,控制策略的复杂性,对控制鲁棒性、实时性、高动态响应性的要求,电驱动系统的引入对车辆动力学带来的新的影响等等因素,相关问题仍尚需进一步深入研究解决。本文最后针对如何发挥电驱动系统优势提高车辆动力学控制性能,提出了两个研究展望。

4.1 参数识别

从电机为核心的机电控制系统的角度来看,轮胎-路面接触条件等效负载引起电机电气参数的变化,利用电动汽车的电气参数可反映当前的轮胎-路面变化信息。该方法省去了难以精确测量的车速信号,但由于仍然需要轮速信号(轮速的测量一般利用捕捉编码器的脉冲宽度来实现),也存在响应频率低的制约。研究只利用电气信号实现滑移率、摩擦系数的识别方法,为利用快速动力学参数的估计提供了一种思路。相比车速、轮速等利用脉冲来检测速度信号的方法,电气参数具有更快的检测速度,更适于担当快速响应的电执行部件的反馈信号。此外还可以少用或不用其他传感器,降低成本,提高可靠性。因此如何利用电气参数实现适应电气执行部件快速控制周期的关键参数的快速识别是关键。

4.2 快响应控制

现有的动力学控制模型只是将电机本身的控制作为动力学控制的一个串联环节,研究中往往将动力学控制与电机控制割裂开来。如果能研究出新型的控制模型,将电机本身的转矩控制与滑移率的控制进行有

效融合,有望使电动汽车的牵引、制动控制充分发挥出电执行部件快速转矩响应的优势,提高动力学控制的快速性、安全性。此外,由于电动车的动力学涉及到复杂的机电多域耦合,不确定、非线性特征明显,对机电耦合影响的分析缺乏深入、全面。由于电驱动系统的引入使得电动汽车这一复杂机电系统呈现多时间尺度(整车时间常数与电气时间常数相差两个数量级)的复杂特征,这由此带来了多时间常数并存的控制系统中的协调控制问题,传统控制结构与方法无法充分利用电机快速转矩响应的优势。因此也有必要深入研究多时间常数的存在对动力学控制的平顺性和稳定性的影响。

参考文献

- [1] Chan C C, Bouscayrol A, Chen K. Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: architectures and modeling [J]. Vehicular Technology IEEE Transactions, 2010, 59(2): 589-598.
- [2] Chan C C. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(4): 704-718.
- [3] Xu K, Xu G. Development and prospects for future electric vehicles [C] //The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exposition (EVS-25). Shenzhen, China, Nov. 2010.
- [4] Xu G, Li W, Xu K, et al. An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles [J]. Energies, 2011, 4: 1461-1477.
- [5] Li L, Wang Y F, et al. Integrated longitudinal and lateral tire/road friction modeling and monitoring for vehicle motion control [J]. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions, 2006, 7(1): 1-19.
- [6] Bakker E, Nyborg L, Pacejka H B. Tire modeling for use in vehicle dynamic studies [J]. 1987. SAE 870421.
- [7] Bakker E, Pacejka H B, Lidner L. A new tire model with an application in vehicle dynamics studies [J]. 1989, SAE Paper 890087.
- [8] Pacejka H B, Sharp R S. Shear force development by pneumatic tires in steady state conditions: a review of modeling aspects [J]. Veh. Syst. Dyn., 1991, 20(3/4): 121-176.
- [9] Müller S, Uchanski M, Hedrick K. Estimation of the maximum tire-road friction coefficient [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2003, 125(4): 607-618.
- [10] 余卓平,左建令,张立军.路面附着系数估算技术发展现状综述 [J]. 汽车工程, 2006,6.
- [11] Eichhorn U, Roth J. Prediction and monitoring of tyre/road friction [C] // XXIV FISITA Congress, London, GB, 2:67-74, June 7-11. "Safety, the Vehicle, and the Road." 1992.

- [12] Breuer B, Eichhorn U, Roth J. Measurement of tyre/road friction ahead of the car and inside the tyre [C] // Proceedings of AVEC'92 (International Symposium on Advanced Vehicle Control). 1992: 347-353.
- [13] Rajamani R, Piyabongkarn D, Lew J Y, et al. Algorithms for real-time estimation of individual wheel tire-road friction coefficients [C] // American Control Conference. 2006: 14-16.
- [14] Rajamani R, Phanomchoeng G, et al. Algorithms for real-time estimation of individual wheel tire-road friction coefficients [J]. Mechatronics, IEEE/ASME Transactions, 2011: 1-13.
- [15] Hsu L, Chen T. Vehicle full-state estimation and prediction system using state observers [J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2009, 58(6): 2651-2662.
- [16] Wang W, Li I, Chen M, et al. Dynamic slip-ratio estimation and control of antilock braking systems using an observer-based direct adaptive fuzzy-neural controller [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions, 2009, 56(5): 1746-1756.
- [17] Ma C, Xu M, Wang H. Dynamic emulation of road/tyre longitudinal interaction for developing electric vehicle control systems [J]. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 2011, 49(3): 433-447.
- [18] Zhao L, Liu Z, Chen H. Design of a nonlinear observer for vehicle velocity estimation and experiments [J]. Control Systems Technology, IEEE Transactions, 2011, 19(3): 664-672.
- [19] Rajamani R, Piyabongkarn N, Lew J, et al. Tire-road friction-coefficient estimation [J]. Control Systems, IEEE, 2010, 30(4): 54-69.
- [20] Sado H, Sakai S, Hori Y. Road condition estimation for traction control in electric vehicle [C] // Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 1999. ISIE '99, 2: 973-978.
- [21] Fujii K, Fujimoto H. Traction control based on slip ratio estimation without detecting vehicle speed for electric vehicle [C] // Power Conversion Conference-Nagoya. 2007, PCC '07: 688-693.
- [22] Furukawa K, Hori Y. Recent development of road condition estimation techniques for electric vehicle and their experimental evaluation using the test EV "UOT March and I and II" [C] // The 29th Annual Conference of the IEEE, Industrial Electronics Society. 2003, IECON 03, 1: 925-930.
- [23] Gustafsson F. Estimation and change detection of tire-road friction using the wheel slip [J]. IEEE, 1996: 99-104.
- [24] Gustafsson F. Monitoring tire-road friction using the wheel slip [J]. IEEE Control System, 1998: 42-49.
- [25] Lee C K, Karl H, Kyongsu Y. Real-time slip based estimation of maximum tire-road friction coefficient [J]. IEEE /ASME Transactions on Mechatronics, 2004, 9(2).
- [26] Yukio N, Hiroaki K, Major D J. Estimation of friction levels between tire and road [C] // SAE Paper. 2002- 01 - 1198.
- [27] Gustafsson F. Slip-based tire-road friction estimation [J]. Automatica 1997, 33(6): 1087 - 1099.
- [28] 沈俊, 宋健, 王会义. 用小波分析获取路面最佳滑移率的研究 [J]. 农业机械学报, 2007, 38(7): 29-31.
- [29] 刘国福, 张玘, 王跃科, 等. 一种基于模型的最佳滑移率计算方法 [J]. 公路交通科技, 2004, 21(7): 111-114.
- [30] 孙仁云, 李治. 基于变路面SBC最佳滑移率的研究 [J]. 中国机械工程, 2008(4).
- [31] 靳立强, 王庆年, 宋传学. 电动轮驱动汽车的最佳车轮滑移率实时识别 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2010(4).
- [32] 彭晓燕, 章兢, 陈昌荣. 基于RBF神经网络的最佳滑移率在线计算方法 [J]. 机械工程学报, 2011(14).
- [33] 宗长富, 潘钊, 胡丹, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的信息融合技术在车辆状态估计中的应用 [J]. 机械工程学报, 2009(10).
- [34] 刘力, 罗禹贡, 李克强. 基于归一化轮胎模型的路面附着系数观测 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009(5).
- [35] 杨财, 李亮, 宋健, 等. 基于轮胎力观测器的路面附着系数识别算法 [J]. 中国机械工程, 2009(7).
- [36] 赵林辉, 刘志远, 陈虹. 一种车辆状态滑模观测器的设计方法 [J]. 电机与控制学报, 2009(4).
- [37] 史俊武, 鲁统利, 李小伟, 等. 自动变速车辆低附着路面牵引力控制研究 [J]. 汽车工程, 2011(2).
- [38] 杨财, 宋健. ABS/TCS/AYC中参考车速和滑移率算法研究 [J]. 汽车工程, 2009(1).
- [39] 杨财, 宋健, 李亮, 等. 牵引力控制系统中最优驱动力矩控制 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008(11).
- [40] 杨福广, 李贻斌, 阮久宏, 等. 基于扩张状态观测器的路面附着系数实时估计 [J]. 农业机械学报, 2010(8).
- [41] Hori Y, Toyoda Y, Tsuruoka Y. Traction control of electric vehicle: basic experimental results using the test EV "uot electric march" [J]. Industry Applications, IEEE Transactions, 1998, 34(5): 1131-1138.
- [42] Sakai S, Sado H, Hori Y, et al. Motion control in an electric vehicle with four independently driven in-wheel motors [J]. Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, 1999, 4(1): 9-16.
- [43] Sakai S, Hori Y. Advantage of electric motor for anti skid control of electric vehicle [J]. Eur. Power Electron. 2001, 11(4): 26-32.
- [44] Hori Y. Future vehicle driven by electricity and control-research on four-wheel-motored [J]. UOT electric march II, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2004, 51(5): 954- 962.
- [45] Xu K, Xu G, Li W. Novel traction control based on driver's adaptive demanded slip ratio for electric vehicles [C] // The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exposition (EVS-25). Shenzhen, China, 2010.
- [46] Xu K, Xu G, Li W, et al. Anti-skid based on sliding mode control with novel structures for electric vehicles [C] // The 8th IEEE International Conference on Information and Automation (IEEE ICIA 2011). Shenzhen(China), 2011: 650- 655.

- [47] Colli V, Tomassi G, Scarano M. "Single wheel" longitudinal traction control for electric vehicles [J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2006, 21(3): 799-808.
- [48] Colli, V D, Tomassi, et al. Fuzzy longitudinal traction control [C] //Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference. 2005: 289- 294.
- [49] Yin D, Oh S, Hori Y. A novel traction control for EV based on maximum transmissible torque estimation [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2009, 56(6): 2086-2094.
- [50] Hu J S, Yin D, Hori Y, et al. Electric vehicle traction control: a new mtte methodology [J]. Industry Applications Magazine, IEEE, 2012,18(2):23-31.
- [51] Hu J S, Yin D J, Hori, et al. A new mtte methodology for electric vehicle traction control [C] //Electrical Machines and Systems. 2009. ICEMS 2009. International Conference on 2009:1-6.
- [52] Hu J S, Yin D J. MTTE-based motion stabilization control for in-wheel motor electric vehicles [C] //Proceedings of SICE Annual Conference (SICE). 2011:312-317.
- [53] Yin D J, Hori Y. A novel traction control of EV based on maximum effective torque estimation [C] //Vehicle Power and Propulsion Conference. 2008. VPPC 08. IEEE, 2008: 1-6.
- [54] Yin D J, Hori Y. A new approach to traction control of ev based on maximum effective torque estimation [C] // 34th Annual Conference of IEEE. Industrial Electronics, 2008:2764-2769.
- [55] 王国业, 刘昭度, 胡仁喜, 等. 基于等效滑移率变化率的汽车防抱制动系统模糊直接自适应控制 [J]. 机械工程学报, 2008(11).
- [56] Yao J, Zhong Z M, Sun Z C. A fuzzy logic based regenerative braking regulation for a fuel cell bus [C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. Beijing(China), 2006: 22-25,
- [57] Zhang J., Yin C, Zhang J. Design and analysis of electro-mechanical hybrid anti-lock braking system for hybrid electric vehicle utilizing motor regenerative braking [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(1): 42-49.
- [58] 王国业, 刘昭度, 胡仁喜, 等. 基于等效滑移率变化率的汽车防抱制动系统模糊直接自适应控制 [J]. 机械工程学报, 2008(11).
- [59] 周磊, 罗禹贡, 杨殿阁, 等. 基于滑移率试探的电动车辆制动控制策略 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008(5).
- [60] 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).
- [61] 赵玲, 孙仁云, 唐岚. 汽车ABS模糊控制最佳滑移率的研究 [J]. 机械设计与制造, 2010(3).
- [62] 赵国柱, 滕建辉, 魏民祥, 等. 基于模糊控制的电动汽车低速再生ABS研究 [J]. 中国机械工程, 2012(1).
- [63] 李文娟, 王旭东, 陈凤林. 制动系统动能转化建模与ABS自寻最优控制 [J]. 电机与控制学报, 2011(2).
- [64] Gair S, A Cruden, et al. Electronic differential with sliding mode controller for a direct wheel drive electric vehicle. Mechatronics [C] //Proceedings of the IEEE International Conference on. 2004.
- [65] 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, 2008, 20(18): 4767-4775.
- [66] 葛英辉, 倪光正. 新的轮式驱动电动车电子差速控制算法的研究 [J]. 汽车工程, 2005, 27(3): 340-343.
- [67] 沈勇, 吴新文. 基于复合神经网络模型的四轮独立驱动电动车控制 [J]. 汽车工程, 2004, 26(4): 458-460.
- [68] Lee J S, Ryoo Y J, Lim Y C, et al. A neural network model of electric differential system for electric vehicle [C] //Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. Nagoya: IEEE, 2000: 83-88.
- [69] 唐文武, 陈世元, 郭建龙. 基于BP神经网络的电动车电子差速器设计 [J]. 汽车工程, 2007, 29(5): 437-440.
- [70] Lee J-S et al. A neural network model of electric differential system for electric vehicle [C] //IEEE Industrial. Electronics Society, 26th Annual Conference, 2000, 1: 83-88.
- [71] Haddoun A, Benbouzid M E H, et al. Modeling, analysis, and neural network control of an EV electrical differential [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions. 2008, 55(6): 2286-2294.
- [72] P-P, F J, Cervantes,I et al. Stability of an electric differential for traction applications [J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions.2009, 58(7): 3224-3233.
- [73] Kawamura A, Hoshi N, Kim T W, et al. Analysis of anti-directional-twin-rotary-motor drive characteristics for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(1).
- [74] Kawanura A, Hoshi N, Kim T, et al. Analysis of anti-directional twin rotor motor drive characteristics for electric vehicles [J]. IEEE Trans. On IE, 1997, 44(1): 64-70.
- [75] Shino M , Nagai M. Independent wheel torque control of small-scale electric vehicle for handling and stability improvement [J]. JSAE Review, 2003, 24: 449-456.
- [76] Abe M. Vehicle dynamics and control for improving handling and active safety: from four-wheel steering to direct yaw moment control [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering part k-Journal of Multi-body Dynamics, 1999, 213(2): 87-101.
- [77] Abe M. Side-slip control to stabilize vehicle lateral motion by direct yaw moment [J]. SAE Review. 2001, 22: 413-419.
- [78] 赵艳娥, 张建武. 基于滑模控制的四轮驱动电动汽车稳定性控制 [J]. 上海交通大学学报, 2009, 10: 1526-1530
- [79] 王伟达, 丁能根, 等. 汽车DYC模糊PID控制方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(7): 873-876.
- [80] Tahami F, Farhangi S, et al. A fuzzy logic direct yaw-moment control system for all-wheel-drive electric vehicles [J]. Vehicle

- System Dynamics, 2004, 41(3): 1-19.
- [81] Tahami F, Kazemi R, Farhanghi S. A novel driver assist stability system for all-wheel-drive electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2003, 52(3): 683-692.
- [82] 靳立强, 王庆年, 宋传学. 四轮独立驱动电动汽车动力学控制系统仿真 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2004, 34(4): 5482553.
- [83] Ono E, Hattori Y. Vehicle dynamics integrated control for four-wheel-distributed steering and four-wheel distributed traction/braking system [J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(2): 139-151.
- [84] Mokhiamar O, Abe M. How the four wheels should share forces in an optimum cooperative chassis control [J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(3): 295-304.
- [85] 邹广才, 罗禹贡, 李克强. 四轮独立电驱动车辆全轮纵向力优化分配方法 [J]. 清华大学学报, 2009, 49(5): 111-115.
- [86] 续丹, 王国栋, 曹秉刚, 等. 独立驱动电动汽车转矩优化分配策略研究 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 03.
- [87] 余卓平, 张立军, 熊璐. 四驱电动车经济性改善的最优转矩分配控制 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 10: 79-85.
- [88] Park J H, Woo S A. H_{∞} yaw-moment control with brakes for improving driving performance and stability [C] //Proceedings of the 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Atlanta: IEEE, 1999: 747-752.
- [89] 高利, 李剑峰. 一种车辆主动横摆力矩的神经网络控制方法 [J]. 江苏大学学报(自然科), 2007, 28(1): 17-20.
- [90] Chang S Y, Gordon T J. Improvement of vehicle dynamics using model-based predictive control [C] //SAE Paper 2009-01-0427, 2009.
- [91] Anwar S. A predictive control algorithm for a yaw stability management system [C] //SAE Paper 2003-01-1284, 2003.
- [92] 杨建森, 李飞, 丁海涛, 等. 基于广义预测控制的汽车横摆稳定性控制 [J]. 农业机械学报, 2012, 01: 1-5+36.
- [93] 王博, 罗禹贡, 范晶晶, 等. 基于控制分配的四轮独立电驱动车辆驱动力分配算法 [J]. 汽车工程, 2010, 02: 128-132.
- [94] Mokhiamar O, Abe M. Active wheel steering and yaw moment control combination to maximize stability as well as vehicle responsiveness during quick lane change for active vehicle handling safety [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2002, 216(2): 115-124.
- [95] 祁永宁, 陈南, 等. 四轮转向车辆的直接横摆力矩控制 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2004, 34(4): 451-454.
- [96] 汪东明. 基于DYC控制的4WS汽车操纵稳定性研究 [J]. 现代机械, 2009, 6: 42-45.
- [97] Wang Y, Nagai M. Integrated control of four-wheel-steer and yaw moment to improve dynamic stability margin [C] // Proceedings 35th IEEE Conf. Decision and Control. 1996: 1783-1784.
- [98] Nagai M, Shino M. Study on integrated control of active front steer angle and direct yaw moment [J]. JSAE Review, 2002.23(3):309-315.
- [99] Sakai S-I, Hori Y. Advanced vehicle motion control of electric vehicle based on the fast motor torque response [C] // Proceedings of AVEC2000, pp. 729-736.
- [100] Sakai S-I, et al. Experimental studies on vehicle motion stabilization with 4 wheel motored EV [C] //Proceedings of The 18th. Electric Vehicle Symposium (EVS) [CD-ROM], Berlin, Germany, 2001.