

汽车控制的研究现状与展望

陈虹^{1,2} 宫洵² 胡云峰² 刘奇芳² 高炳钊² 郭洪艳²

摘要 汽车控制技术是推动汽车工业可持续发展的重要保障. 在全球汽车行业竞争日益激烈的背景下, 如何通过理论与方法的创新, 提高我国汽车控制系统的自主研发能力, 完成从消费大国向制造强国的过渡是我们目前面临的重大挑战. 本文主要围绕汽车动力总成系统、主动安全系统及新能源汽车中的关键控制问题展开论述, 总结国内外的研究状况, 提炼共性问题, 对汽车控制的发展趋势给出了一些观点.

关键词 汽车控制, 发动机, 传动系, 主动安全, 新能源汽车

引用格式 陈虹, 宫洵, 胡云峰, 刘奇芳, 高炳钊, 郭洪艳. 汽车控制的研究现状与展望. 自动化学报, 2013, 39(4): 322–346

DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.00322

Automotive Control: the State of the Art and Perspective

CHEN Hong^{1,2} GONG Xun² HU Yun-Feng² LIU Qi-Fang² GAO Bing-Zhao² GUO Hong-Yan²

Abstract Automotive control technology plays a significant role for the sustainable development of the auto-industry. Under gradually fierce circumstance of competition around the world, how to strengthen our capacity of independent research and development of auto-control technology through the innovation of theory and method presents a grand challenge of our time. This paper introduces the state of the art of automotive control focusing on the power-train control, active safety control and new energy vehicles control, then summaries their common problems and finally puts forward a series of perspective for the future researches.

Key words Automotive control, engine, drive-line, active safety, new energy vehicles

Citation Hong Chen, Xun Gong, Yun-Feng Hu, Qi-Fang Liu, Bing-Zhao Gao, Hong-Yan Guo. Automotive control: the state of the art and perspective. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(4): 322–346

电子控制已经成为汽车满足越来越严格的节能减排标准以及提高动力性和安全性的核心使能技术(Enabling technology). 近年来, 汽车电子占整车制造成本的比例越来越高, 据统计, 汽车产品创新的 90% 源于电子控制技术^[1]. 随着节能减排以及动

力性和安全性要求的逐渐提高, 新型执行器和动力源被不断引入汽车系统中. 图 1 给出了 2006 年~2010 年中国汽车电子市场规模和增长, 即使是金融海啸最严重的 2008 年, 汽车电子市场规模依然增长了 11.3%, 可见中国汽车电子市场潜力巨大.

收稿日期 2012-11-09 录用日期 2012-11-26
Manuscript received November 9, 2012; accepted November 26, 2012

国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB821202), 国家高技术研究和发展计划(863 计划)(2012AA11071), 国家自然科学基金(61034001, 90820302, 51005093), 教育部“长江学者和创新团队发展计划”创新团队(IRT1017), 吉林省科技发展计划重大专项(20116001)资助

Supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (2012CB821202), National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA11071), National Natural Science Foundation of China (61034001, 90820302, 51005093), the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT1017), and the Jilin Provincial Science and Technology Department (20116001)

本文为黄琳院士约稿
Recommended by Academician HUANG Lin

1. 汽车仿真与控制国家重点实验室 长春 130025 2. 吉林大学控制科学与工程系 长春 130025

1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Changchun 130025 2. Department of Control Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025

该文的英文版同时发表在 *Acta Automatica Sinica*, vol. 39, no. 4, pp. 322–346, 2013.

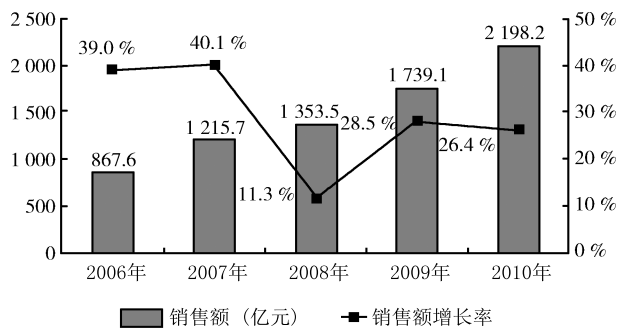


图 1 中国汽车电子发展趋势

Fig. 1 Automotive electronic development trend in China

表 1 给出了中国汽车电子产品供应商份额的分布情况, 从表中可看出, 巨大的汽车电子市场基本掌控在国外汽车电子公司手中, 仅德国博世、大陆、日本电装和美国德尔福的市场占有率就达到 40%.

表 1 汽车电子市场状况

Table 1 Automotive electronics market situation

排名	企业名称	销售额 (亿元)	销售额份额 (%)
1	博世	225.0	11.6
2	德国大陆 (含西门子 VDO)	237.4	10.8
3	电装	215.4	9.8
4	德尔福	169.3	7.7
5	伟世通	79.1	3.6
6	法雷奥	79.1	3.6
7	天合集团	52.8	2.4
8	现代莫比斯	57.1	2.6
9	江森自控	28.6	1.3
10	航盛	26.4	1.2
	其他	998.0	45.4
	合计	2 198.2	100

数据来源: 赛迪顾问 2011.2

对已经进入世界汽车产量前三位的中国来说, 许多关键、核心的电控技术均需从国外引进, 高昂的引进和改造费不仅损害了消费者利益, 也严重地损害了我国自主汽车企业的利益. 这使得我国自主汽车企业不但无法和跨国汽车集团竞争, 还有可能存在被逐渐边缘化的危险.

技术的空心化折射出的是基础理论研究和应用基础研究的薄弱. 因此, 提炼汽车控制中的共性基础科学问题, 从理论和方法角度进行汽车控制的自主研究, 对提升我国汽车核心技术和提高汽车行业的自主创新能力具有重要的现实意义, 而且对于缺少核心技术的我国汽车产业在人才储备上也有着深远的意义.

1 汽车控制研究现状

电控系统在汽车上无处不在, 大到发动机动力总成控制系统, 小到车窗防夹、雨刮器控制系统, 应该说汽车的各方面性能越来越依赖控制技术的发展. 在这里, 我们不可能把如此复杂的汽车电控系统各个部分都进行细致的概括和总结, 本文主要介绍汽车中控制问题比较集中且最为重要的四个控制系统的发展现状, 包括: 1) 发动机控制系统; 2) 传动系控制系统; 3) 主动安全控制系统; 4) 新能源汽车控制系统.

1.1 发动机控制系统

汽车发动机控制的研究始于上世纪 70 年代末期, 采用电子控制的初衷是提高车辆的燃油经济性、动力性以及降低排放. 随着对发动机性能要求越来越高, 相关法律法规的日益苛刻, 促使新技术和新设计不断应用到发动机中. 发动机控制系统直接决定着汽车的整车性能和排放水平, 因此发动机控制

得到了普遍关注并取得了大量的研究成果. 发动机控制系统是由多个子控制模块构成的复杂系统, 如图 2 所示. 发动机的最基本控制问题包括: 1) 空燃比控制; 2) 电子节气门控制; 3) 怠速控制; 4) 点火正时控制; 5) 爆震检测与控制; 6) 车载诊断系统 (On-board diagnostics, OBD) 与安全性诊断、标定. 下面分别介绍各控制系统的研究现状.

1.1.1 空燃比控制

空燃比是影响汽油机性能的决定性因素, 控制不精确会导致汽油机的动力性和经济性下降, 有害气体的排放增加^[2]. 为满足汽车平稳运行和低排放的严格要求, 每一个工作循环都需要提供精确的混合气配制. 要实现理论空燃比, 进入气缸空气量是计算喷油量的基础.

在电喷汽油机中, 绝大多数采用的是在稳态工况下以 map 为基础的空燃比控制 (Air-fuel ratio control, AFRC) 策略^[3]. 然而, 由于此种方法在瞬态时没有考虑进气真空度波动、燃油的湿壁效应、发动机控制系统中存在的响应时间延迟的影响, 会导致控制精度低. 随着控制理论及传感器技术的发展, 使空燃比精确控制成为可能. 文献 [4] 结合空燃比控制的特点, 在对发动机实际工作过程和所建均值模型分析的基础上, 提出基于模型的空燃比控制策略, 分别考虑稳态和瞬态的特性, 对四冲程四气缸的火花塞点火式汽油发动机空燃比模型进行控制研究. 文献 [5] 构建了发动机稳态及瞬态时的进气状态观测器和燃油动态补偿器, 通过卡尔曼滤波算法的理论分析和大量的仿真实验, 建立了稳态进气观测器的改进 Sage 自适应算法和瞬态进气观测器的预测算法. 文献 [6] 利用一种基于神经网络模型的模型预测控制方法对空燃比进行控制, 这种方法可以在线处理模型非线性和参数不确定性. 文献 [7] 将发动机各工况点排气成分和空燃比之间的相关关系作为神经网络的输入和输出, 建立训练样本, 经训练样本学习, 建立神经网络非线性映射能力, 用其内插、外推的泛化实现以排气成分来分析空燃比. 文献 [8] 基于自适应方法设计两个自适应控制器, 一个是基于前馈自适应来设计, 另外一个结合 Posicast 控制器的反馈和前馈自适应方法. 文献 [9] 采用了滑模观测器对于实际发动机空燃比系统中无法直接测量得到的混合气浓度进行估计, 设计基于趋近率的滑模控制器对空燃比进行控制. 分缸空燃比控制近年来也日渐兴起, 文献 [10] 利用多速采样技术, 将燃油传输动态和废气动态结合起来建立发动机模型, 基于一阶前馈提出一种新的分缸空燃比输入观测器设计方法. 文献 [11] 基于氧传感器信号频谱分析, 介绍一

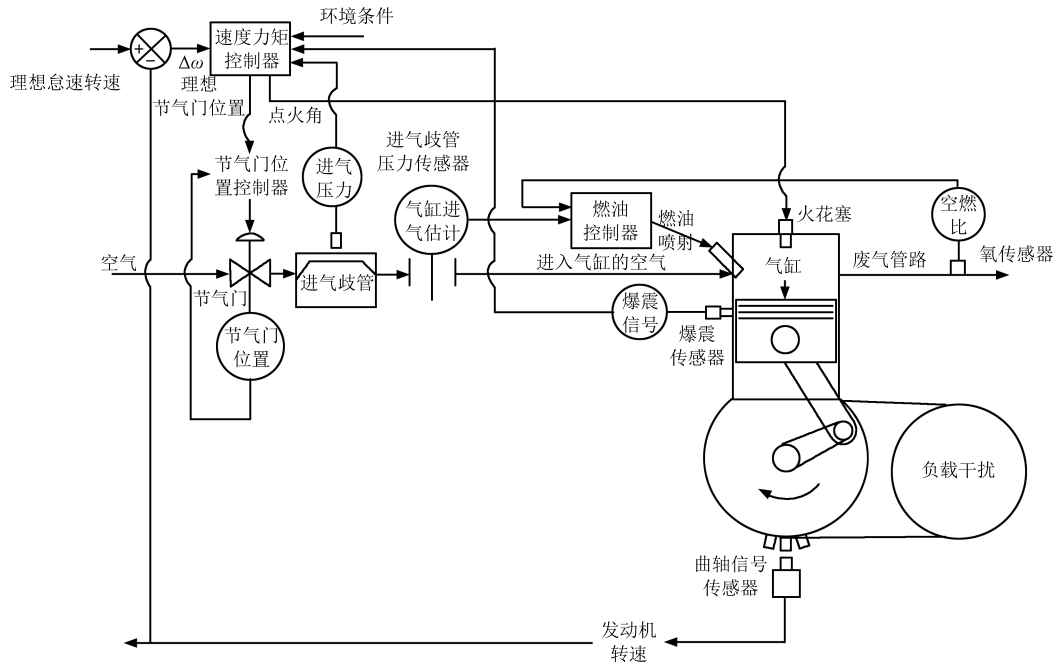


图 2 发动机控制系统示意图

Fig. 2 Engine control system

种新的闭环分缸空燃比控制器的设计方法。

近年来也有很多学者开始对稀燃发动机、均质压缩燃烧发动机 (Homogeneous charge compression ignition, HCCI)、燃油分层直喷发动机等一些新式发动机空燃比控制策略进行研究并取得了一些成果. 如在稀燃发动机空燃比控制上, 国内有人采用滑模-神经网络控制方法^[12], 国外有人利用线性参数可变方法来设计控制器^[13], 均取得了很好的控制效果. 文献 [14] 采用动态递归神经网络预测 HCCI 发动机每循环的进气量, 通过氧传感器闭环和瞬态工况中的油膜补偿, 实现对 HCCI 发动机稳态及瞬态工况下空燃比的精确控制。

1.1.2 电子节气门控制

电子节气门是发动机管理系统中的重要部件, 是实现发动机全电控的基础, 现在得到了极为广泛的应用. 电子节气门控制 (Electronic throttle control, ETC) 系统如图 3 所示, 电子节气门开度并不完全由加速踏板位置决定, 而是控制单元根据当前行驶状况下整车对发动机的全部扭矩需求, 计算出节气门的最佳开度, 从而控制电机驱动节气门到达相应的开度, 使发动机工作在最佳状态, 提高汽车的动力性、安全性及舒适性。

为了保证电子节气门能够保留机械直连式节气门的优良响应特性且节气门挡板不碰撞限位块, 要求节气门快速响应、零超调、精度在 $\pm 2\%$ 以内. 最佳节气门开度是根据加速踏板的位置信息, 以及发动

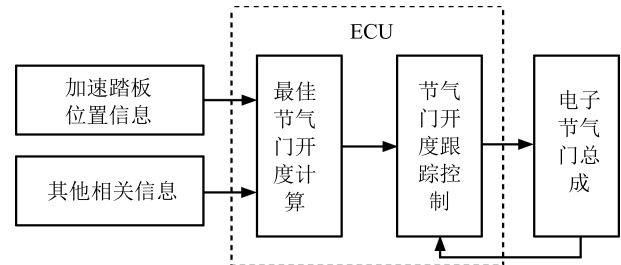


图 3 电子节气门控制系统示意图

Fig. 3 Electronic throttle control system

机的工作模式和工作状态, 通过一定的计算方法, 得到一个与之相应的节气门目标开度^[15]. 节气门开度控制模块通过控制节气门开度来跟踪节气门目标开度, 通常最简单的控制方法是采用传统的 PID 控制方法^[16], 然而电子节气门本身是一个具有强非线性的系统, 采用单一的 PID 控制策略, 其闭环系统的鲁棒性、控制性能很难得到可靠的保证. 文献 [17] 提出了一种基于自适应模型的滑模控制方法, 将模型参数通过辨识的手段进行实时修正, 这种模型充分考虑了非线性、产品差异及干扰等因素的影响, 具有很好的鲁棒性. 但存在计算量过大、辨识效果不佳等不足之处. 文献 [18] 基于免疫反馈控制率和模糊逻辑推理自适应能力, 提出了一种模糊免疫自适应 PID 控制方法. 此方法的控制效果优于一般的 PID 控制, 并且具有很好的鲁棒性和自适应能力. 文献 [19] 在考虑节气门转轴摩擦非线性及跛行回家

导致的死区非线性情况下, 利用自适应的估计算法来估计直流电动机的转子阻力, 以及蓄电池电压和跛行回家位置, 采用调整参数的 PID 控制算法, 实现了节气门的位置的精确控制. 文献 [20] 提出了带约束时间最优控制的方法, 使用摩擦力模型对摩擦力进行了细致的刻画, 但是这种控制方法对模型过度依赖, 当模型精度随着实际控制对象的特性变化时, 其控制性能变差. 文献 [21] 提出了一种基于前馈和误差校正的控制算法, 应用 Backstepping 方法设计电子节气门的控制律, 能够很好地满足电子节气门跟踪控制的性能要求, 并利用输入-状态稳定 (Input-to-state stability, ISS) 理论证明了控制算法具有鲁棒性, 同时给出了控制器参数选取的指导性原则.

1.1.3 怠速控制

怠速控制 (Idle speed control, ISC) 的基本功能是确保在离合器没有接合的状态下稳定、可靠地工作, 不受其他条件变化的影响, 如电气系统、空调压缩机、自动变速箱齿轮啮合、助力转向等. 发动机怠速控制的实质就是通过怠速执行器调节进气量, 同时配合喷油量 (即空燃比) 及点火提前角的控制, 改变怠速工况燃料消耗所发出的功率, 以稳定或改变怠速转速.

目前在怠速控制中应用最多的控制策略是对空气量调节的比例积分 (PI) 控制和点火的比例反馈控制. 文献 [22-24] 将模糊控制应用到了发动机燃油喷射、点火、怠速控制等系统中. 文献 [25] 应用神经网络自学习功能将模糊系统和专家经验两者结合起来对发动机怠速工况进行控制, 解决发动机时变性、非线性和模型不确定性的问题. 在怠速控制时, 由于该 map 输入输出具有非线性关系, 进而导致阶跃特性, 文献 [26] 使用神经网络处理输入输出关系, 得到具有连续性的输出, 解决阶跃特性. 由此可见, 汽车发动机怠速控制研究的重点已经从传统的控制向无需精确模型、对环境 and 被控对象参数不敏感的专家系统^[27]、前馈控制^[28-29]、滑模控制^[30-31]、优化控制^[32] 等方向转移. 文献 [33] 采用输入输出线性化和滑模控制策略, 并与经典的 PID 控制、线性二次型调节器控制方法进行了精细的对比实验. 文献 [34] 基于线性矩阵不等式 (Linear matrix inequality, LMI) 的鲁棒控制的方法设计了带约束的 H_∞ 怠速控制器. 文献 [35] 利用混合系统模型来描述四缸火花点火汽油发动机系统所具有的物理规律和状态约束, 并采用具有处理约束能力的预测控制策略对系统进行控制. 在保证满足系统约束的同时, 使发动机转速尽可能稳定在给定的参考值. 文献 [36] 将发动机怠速控制问题归结为具有输入和状态约束的

最优化问题. 基于线性规划, 利用线性预测控制方法设计控制器来控制发动机转速. 针对同样的问题, 文献 [37] 采用基于准无限时域的非线性模型预测控制方法来控制发动机转速, 使之尽可能的逼近期望值. 由此可知, 在满足约束条件下, 采用预测控制方法对发动机怠速进行控制, 是一个值得进一步探索的策略.

1.1.4 点火正时控制

点火系统的首要任务是保证在规定时间内点燃混合气, 而点火控制的基本功能是根据曲轴位置传感器和转速、水温、电压等信号计算出点火时刻和通电时间, 并将此计算结果送至点火电子驱动电路, 在规定时间内点燃混合气, 完成相应的扭矩需求.

在点火正时的闭环控制中, 气缸内压力及点火正时通常被用来作为系统的反馈量^[38-39]. 文献 [40] 针对气体燃料发动机, 基于径向基函数 (Radial basis function, RBF) 神经网络方法研究最优点火控制问题, 所设计的点火控制系统能够满足气体燃料发动机的要求, 控制性能得到了较大的提高. 文献 [41] 为估计点火正时的大小, 将点火提前角作为输出设计了模糊专家系统, 可保证点火提前角的估计精度在 $\pm 5\%$ 以内. 文献 [42] 提出了一种应用图像处理技术来优化点火 map 图的方法, 应用此方法也可以调节、修改或重构一些其他的 map 图. 文献 [43] 应用一个简单的能够体现火焰传播现象的微分方程模型, 根据燃烧室内热力学特性的变化来调整点火时间, 不需要任何缸内的传感器. 同时, 文中给出了一个保证燃烧动态发生在最优的时刻 End-point 匹配条件.

1.1.5 爆震检测与控制

爆震是一种非正常的燃烧, 是缸内局部混合气在正常燃烧火焰前锋到达之前自燃造成的, 爆震对发动机的危害很大. 造成爆震最主要有以下几点原因: 点火角过于提前、引擎过度积碳、引擎温度过高、空燃比不正确、燃油辛烷值过低.

目前, 国内外爆震检测应用比较成熟的方法可以归纳为以下四种检测方法: 燃烧室内气体压力检测、机体振动检测、离子电流检测和爆震声音检测, 其中前两种方法最为实用. 由于爆震的测试方法和信号采集方法不一样, 所以目前还没有一种准确的、信号处理简单的、适合进行实时控制的爆震强度评价指标^[44]. 当前发动机上都是通过安装爆震传感器来检测发动机是否发生爆震, 爆震信号的处理分为硬件和软件两种: 设计硬件数字滤波器可以降低后续 CPU 处理的负荷, 然而软件数字滤波器也日渐成为一种降低 ECU 硬件成本的趋势. 爆震信号分析

方法有低通滤波和放大、FIR/IIR 滤波、快速傅里叶变换和离散小波变换等^[45-46]。实际的爆震控制策略都是通过推迟点火时间(点火提前角)而改善爆震的^[44]。在产生爆震前,微机自动减少点火提前角,使点火时刻保持在爆震边界曲线的附近,从而提高发动机的功率,降低燃料的消耗^[47]。文献[48]利用检测缸内压力波对爆震判别与控制进行了研究,采用经过爆震频率带通滤波后的缸内压力波的峰值作为衡量爆震强度的指标,通过试验确定判别爆震发生的阈值。文献[49]提出了近年来国外开始研究的一种新型爆震检测方法,即离子流探测方法。将大量离子流探测器安装在整个燃烧室的内壁,包括进气与排气气门盖,同时利用两个燃烧压力传感器,可以检测到爆震起始的精确位置。目前这种方法也应用在许多高级轿车上,如奔驰 600-137。文献[50]介绍了 BOSCH 汽油机电喷系统爆震识别及爆震控制的策略,分析讨论了带有爆震控制的发动机管理系统在协调发动机动力性、经济性与爆震安全性等方面的优势,试验研究了不同爆震情况下的发动机性能及排放的差异,以及系统过量空气系数和进气温度与爆震边界点火提前角的关系。

1.1.6 发动机的安全性诊断

近年来,随着国家对汽车尾气排放法规的要求不断提高,与排放相关零部件运行状态的实时监控技术越来越受到广泛关注。车载诊断系统(OBD)能够记录与排放相关的系统或部件发生故障时的故障信息,以便于故障源的查找。主要包括传感器或执行机构故障检测、失火故障检测、爆震检测、电子节气门故障检测及燃油蒸发检测等。

OBD 系统并非完全依赖于直接测量信息,部分部件的故障源识别需通过算法实现。文献[51]针对现代军事涡扇发动机,将模糊逻辑的方法用于气路的故障诊断问题。在有测量噪声的情况下,实现了发动机气路部件的故障检测,同时该方法可以扩展到多故障的分离问题中。基于非线性主元分析(Principal component analysis, PCA)的方法,文献[52]研究了柴油发动机的气路漏气故障识别问题,提出的方法能够有效地识别气路发生小面积漏气的故障。文献[53]结合增强学习与神经网络的方法,用于发动机的失火检测。文献[54]利用滑模观测器估计气缸偏差力矩,通过将输入估计问题转化为控制跟踪问题,实现了对发动机失火的实时检测。文献[55]提出了一种应用统计学方法来进行敲缸检测的方法。文献[56]用不含隐层的神经网络实现了汽车发动机的故障诊断,实时性较好。文献[57]将图形模型和解析模型结合给出了诊断结果,充分利用所获信息。文献[58-59]将数据驱动方法用于发动机各部位的

故障诊断,来提高故障检测的实时性。文献[60]利用滑模对发动机的参数进行在线辨识,用于检测发动机当前的工作状态以进行性能估计或诊断。文献[61]则使用三种数据融合方法:贝叶斯融合、联合优化融合和动态融合用于发动机性能监测及故障诊断。目前用于汽车发动机的故障诊断算法只针对部分故障提供解决诊断方法。

1.1.7 以扭矩需求为中心的发动机动力总成控制

从上面列出的发动机控制问题可知,传统发动机运行时,作为控制参数的气缸充气量、燃油质量和点火正时都被认为是控制指令而直接执行,当各种可能互相矛盾的需求同时出现时,彼此之间很难协调。对于新增的附加功能或扩展功能,发动机控制的一些设定值需要重新校验与标定,控制算法需要修改,这造成发动机控制系统的可扩展性低、灵活性差。由于发动机控制系统复杂性的增加以及变速箱和车辆动态控制系统的集成化,致使国内外研发机构转向了以扭矩需求为中心的发动机动力总成控制的研究。

德国 Bosch 公司率先提出了一种基于扭矩的发动机控制方案,并在 BoschME7 发动机控制系统中应用^[62]。英国 Ricardo 公司提出了以扭矩为中心的发动机动力总成控制方案,并应用于 BMW540 的 4.4 升 8 缸汽油机控制^[63]。文献[64]提出了一种执行机构(如节气门位置、点火提前角、凸轮移相位置等)可协调的发动机扭矩控制方案,从而满足驾驶员或车辆子系统的扭矩需求。文献[65]给出了一种带有不同执行机构的发动机扭矩控制结构,为不同配置的发动机扭矩控制提供实施方案。这种常用的结构适用于传统的发动机(如固定凸轮火花点火、进气道燃油喷射等)和更加复杂的发动机(如有凸轮轴定位、涡轮增压、直喷、主动燃油管理系统等)。文献[66]在此基础上提出了一种涡轮增压发动机的扭矩控制方案。文献[67]提出了一种发动机扭矩控制方案,如图 4 所示,中心扭矩请求模块首先对各部分的扭矩需求进行优先级判断和运行效率协调,然后利用得到的控制参数实现指定的扭矩输出。文献[68-69]介绍了集发动机和传动系于一体的动力总成管理以及动力总成控制的标准和接口,可协调的动力总成控制现如今在汽车工业中已成为标准。

在以扭矩为中心的发动机动力总成控制框架下,研究人员进行了各子系统的具体控制研究。文献[70]以发动机扭矩或车辆的扭矩为主要参数,通过扭矩变化来协调匹配发动机、变速箱、制动和车辆动态控制之间的关系。文献[71]以电控单体泵控制系统为基础,提出了适用于整车控制的基于扭矩控制的油量控制算法,为车载多 ECU 的扭矩速度控制提供

较多的扭矩传递接口,为系统的整车开发提供了开放式的平台.文献[72]提出了三种直喷发动机扭矩控制方案,分别是反馈线性化、非线性模型预测控制和增益调度 LQ 最优控制,通过比较分析表明基于非线性模型预测控制的发动机扭矩控制的响应效果好.在以扭矩需求为中心的框架下,文献[73]提出了带有内部 EGR 和 VVT 的汽油发动机的气路控制方法,通过轨迹规划对发动机扭矩输出和空燃比进行管理.文献[74]在带有 EGR 的 HCCI 柴油机管理上利用类似的方法进行气路控制,管理进入气缸的空气量和排出气缸的废气量.通过在 ECE 驾驶循环条件下的实验验证,说明此方法扭矩响应误差较小,可保证精确的空燃比控制,从而减少污染物的排放.

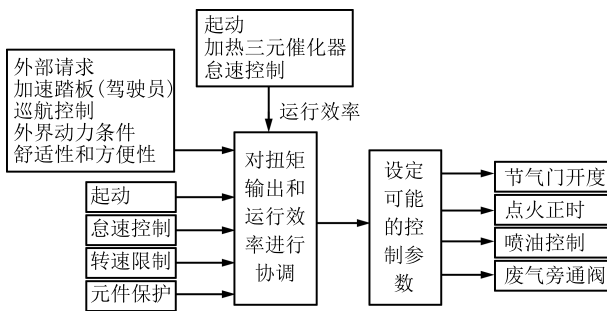


图4 基于扭矩的发动机控制系统示意图

Fig.4 Torque-based engine control system

1.2 传动系控制

传动控制系统是在发动机控制系统基础上实现汽车经济性、动力性的重要系统.其中传动系统主要由离合器、变速器、传动轴和差速器等组成,其中离合器和变速器是传动系统中最为主要的机构.目前已经成功装配应用到车辆上的自动变速器种类有液力式自动变速器(Automatic transmission, AT)、无级自动变速器(Continuous variable transmission, CVT)、机械式自动变速器(Automated mechanical transmission, AMT)和双离合式自动变速器(Dual clutch transmission, DCT).不同的自动变速器具有各自不同的特点及相应的控制问题,目前对自动变速器控制的主要研究方向有起步过程控制、换挡过程控制、冲击抑制控制和驱动轴力矩/离合器压力估计等.下面就这些典型的控制问题做一些介绍.

1.2.1 起步过程控制

起步过程是车辆将发动机产生的力矩传递到车轮带动车辆运动的瞬态过程,车辆起步过程的平顺性和快速性是评价车辆驾驶舒适性和动力性的重要

指标.对于 AT 和 CVT 来说,由于自动变速箱和发动机之间存在液力变矩器,能够充分吸收起步过程带来的冲击.但是对于 AMT 和 DCT 来说,车辆起步过程的冲击要通过离合器精确控制来降低,这一过程实际上是离合器分离结合的过程,其目标是保证离合器能够尽快结合的同时不至于使发动机熄火,并且在该过程中获得尽量小的滑摩损失和良好的动力性能^[75].

一般 AMT 车辆中采用的是干式离合器,对于干式离合器的啮合控制,目前已经有许多方法,例如基于 map 的标定^[76]、模糊控制^[77]等.文献[78]基于工程应用成熟的 PID 控制器对离合器滑摩速度进行给定值的跟踪控制.实际上在离合器的啮合过程中需要满足不同且相互矛盾的性能指标,如短的滑摩时间、小的滑摩功和小的换挡冲击.针对这样的情况,优化的方法可以用来解决多目标的控制问题,例如模型预测控制^[79]、线性二次型优化控制^[80].文献[81]采用基于数据的预测控制实现车辆起步过程的控制,解决了机理建模难的问题,同时采用预测控制能够显式的考虑约束.文献[82]给出了优化在线求解速度问题的解决方案.离合器啮合控制的另外一个难点是摩擦片的摩擦系数是时变的^[83],文献[84]对啮合过程中离合器接合点进行了辨识.

AT 由于载有液力变矩器使得起步比较平滑,但对于 DCT 来说,起步过程是个难点. AMT 车辆的起步控制策略可以适用于干式离合器的 DCT 变速器车辆.可是,一个重要的不同点在于低速情况下, DCT 的两个离合器可共同提供车辆的驱动力完成起步过程(但当车辆达到某一确定速度时两离合器不应该共同工作以避免锁死).针对此问题,状态切换的混合控制^[85-87]是一种解决方案,但这种方法仍有待将来的研究与考证. AMT 和 DCT 起步过程中另外一个研究重点是摩擦片的虚拟温度传感器技术,实际上在起步过程中摩擦片的滑摩会使摩擦片表面的温度发生变化,进而导致摩擦片摩擦系数的变化,同时离合器的磨损与接触面的温度有很大关系,因此基于机理建立可靠、自主的传感器温度模型^[88]对于改进起步控制性能和降低离合器的磨损是很有必要的.

1.2.2 换挡过程控制

自动变速箱的产生减轻了驾驶员驾驶工作量,但是随着人们对车辆驾驶性能要求的不断提高,换挡过程控制成为改善换挡品质的重要途径.

AMT 由于自身结构的特点,换挡过程存在动力中断,驾驶舒适性受到影响.虽然换挡过程按照车辆的状态可分为多个阶段,但有些研究为降低换挡时间一般将换挡过程直接分为三个阶段^[89]:力矩控制

阶段、速度同步阶段和力矩恢复阶段。在同步阶段之后,当离合器啮合时,摩擦力矩能够对牵引力的中断起到一定的补偿作用,从而降低中断时间。换挡过程中,升档和降档的控制策略不同,为了尽可能地减小换挡时间,要求发动机速度尽可能快。在离合器结合阶段,虽然已经达到同步器速度但是仍然不满足无冲击条件^[90],这时候快速而光滑(冲击小)的控制离合器的啮合就变成了一个具有挑战性的问题。

AMT 的换挡冲击一般出现在两个阶段:1)在换挡过程结束时,如果离合器结合过快或是发动机的力矩恢复太快都会引起明显的换挡冲击^[90-91];2)如果离合器分离的时机没有掌握好,传动轴中积聚的弹性势能会导致传动系的剧烈振动,引起较强的冲击。针对第二个阶段,如果能够获得驱动轴中传递的力矩,就可以判断出最佳的离合器分离的时机,从而减少换挡冲击并缩短换挡时间。通常,车辆中不会安装力矩传感器,驱动轴力矩可由估计的方法得到。为了抑制由于牵引力下降引起的传动系统振荡,文献[92-93]指出牵引力的中断应该在驱动轴力矩控制到零的情况下进行。在文献[93]中,通过估计驱动轴上的力矩制定离合器分离闭环控制策略,使得离合器的分离能够在最优的时刻完成。在啮合控制过程中,为了减少换挡冲击和滑摩功,引进动力集成控制^[94]是很有效的方法。文献[93]采用MPC控制算法对离合器啮合过程中的约束和多目标控制问题进行了处理,通过跟踪给定的参考轨迹能够实现换挡的平顺性。文献[79]引进混合控制的思想解决换挡控制过程中从滑动模态切换到啮合状态引起的冲击问题。

DCT 和 AT 的换挡过程通过将转矩从一个离合器转移到另一个离合器上实现,其一般分为转矩相和惯性相两个阶段^[95-96]。在转矩相,发动机输出的转矩从逐渐分离的离合器转移到逐渐结合的离合器上,对离合器分离和结合时间的精确控制至关重要。此时,离合器转速变化不是很明显,为实现转矩在两离合器间的平顺过渡,对即将分离的离合器的操作应当模仿单向离合器的操作,即当传递的转矩方向发生变化时实现分离。在文献[94]中,通过设计离合器分离控制算法以实现单向离合器的功能,通过对将分离的离合器进行控制使其对一较小的参考速度进行跟踪,这一控制目标可以有效的阻止离合器牵制现象的发生。如果对施加在将要分离的离合器上的压力控制不当,可能会导致粘滑现象的发生^[97],进而导致传动系振动。文献[98]提出了离合器正时控制策略,把将要结合和分离的离合器进行分别控制,但是,这种策略需要获得精确的离合器压力和驱动轴转矩。实际上,文献[94,98]所提出的控

制方法可以结合使用,以提高换挡质量和换挡转矩相的控制鲁棒性。在惯性相,将要结合的离合器不断滑摩直至转速同步,在这个阶段,离合器的滑摩控制对换挡品质(包括平顺性和快速性)有很大影响,因此离合器滑摩过程控制是首要问题。滑摩过程中可采用离合器速度控制^[90]、发动机速度控制^[94]和力矩跟踪控制^[99]来保证换挡质量。与起步过程类似,换挡过程也应考虑尽量短的滑摩时间,尽量少的摩擦损失以及尽可能小的换挡冲击,因此基于算法的优化控制也能够用于惯性相控制^[96,100],但由于换挡时间的限制,此类研究尚在探索阶段。

相对于采用罚函数的方式进行多目标优化,还有一种思路可用于变速器的滑摩控制,即利用跟踪控制实现单一控制目标:使离合器转速跟踪设计好的目标值。这种方法没有直接考虑换挡品质的多个控制目标,期望的换挡时间和换挡冲击可以通过设计合适的目标轨迹来实现,实施起来比较容易,而且可以保证各种工况下离合器可靠的同步,对持续时间较短的换挡过程,这种设计思路得到了广泛应用^[101-102]。此外,为了应对传动系存在的非线性(例如发动机特性和行驶阻力特性)和不确定性(例如液压执行机构的时变特性),滑模控制^[103]、二自由度控制^[104]和 μ 综合^[105]也得到了很广泛的关注。

与此同时,基于力矩的换挡控制也已经展开了研究^[99,106],文献[99]提出了平均力矩的概念,同时设计控制器对离合器进行控制满足期望的驱动轴力矩。文献[107]针对AT自动变速箱提出了力矩相和惯性相的无缝控制,在力矩相和惯性相交过渡过程中引起的“力矩急降(Torque hole)”可以通过在力矩相主动增加发动机的转速来消除,这种思想也同样适合于DCT的换挡控制。事实上,从控制的角度来说,从力矩相到惯性相的瞬态过渡过程是离合器从静态到滑摩的状态切换,混杂控制^[85]或许可以解决这一控制问题进而大大的减少标定的工作量。

1.2.3 冲击抑制控制和离合器压力/力矩估计

由于车辆动力传动系部件的弹性变形,包括离合器的扭转弹簧变形、驱动轴的扭转弹性变形等,在传动系中经常会发生弹性共振。这种弹性共振会使乘坐人员产生不适的感觉,同时还影响车辆纵向行驶性能^[90]。为了降低或消除不期望的振动,冲击抑制控制成为研究的重点。针对这一问题,往往需要车辆传动系主动控制^[108-109],如在瞬态过程中(例如急踩油门和急松油门),通常主动改变发动机力矩来衰减传动系的振动。

对于由于离合器弹性势能积聚引起的较大换挡冲击,驱动轴力矩能否准确获得是实现良好冲击抑制

的关键. 虽然驱动轴是传动系的重要部件, 但是其力矩传感器^[110] 或是高精度编码器^[111] 由于成本和耐久性的原因却不能产品化到车辆, 因此采用适当的方法对驱动轴上的力矩进行估计就显得非常的重要. Luenberger 估计器^[112] 和 Kalman 滤波器^[113] 已经用于驱动轴力矩的估计, 但是由于传动系是一个高度非线性和不确定的系统, 所提到的线性估计器很难在全工况下获得准确的力矩信息. 文献 [114] 提出采用滑模方法设计驱动轴力矩估计器, 与此同时文献 [115] 采用自适应滑模方法对液力变矩器的涡轮力矩进行估计. 文献 [116] 提出了一种新型的驱动轴力矩估计器用来估计卡车的驱动轴力矩, 该估计器考虑到了建模误差和外部扰动, 引进 ISS 理论来调节估计器参数, 保证系统稳定.

离合器压力也是变速器控制需要获得的重要物理量, 尽管压力传感器已经在 DCT 湿式离合器中使用, 但是由于成本高而未能在 AT 中普遍使用, 因此采取有效的估计方法对离合器的压力进行估计是很必要的. 针对这一问题, 文献 [117–118] 在 ISS 理论框架下设计了离合器压力降维观测器, 其中模型的不确定性作为扰动输入, 估计器的设计保证了误差系统是 ISS 稳定的, 同时由于观测器的降阶和增益的时不变使得所设计的观测器容易实现.

1.2.4 速比控制

速比控制 (Speed ratio control) 是针对无级变速箱而言的, 与有级自动变速箱相比, 无级自动变速箱 CVT 能够实现发动机转速和轮速的无级变速, 能够使发动机的转速保持为恒定转速, 使发动机始终工作在高效区域内. 由于 CVT 力矩的传递通过摩擦和离心力实现, 传递效率没有齿轮变速箱高并且燃油经济性也不那么明显. 受其传递效率和功率密度的限制 CVT 常常用于低功率和中等功率的车辆中. 由于 CVT 有不同的机械结构, 因此不存在换挡冲击的控制问题, 但对于 CVT 来说, 主要控制的问题是如何保持最佳的夹紧力、提供快速的速比控制, 以最大限度地提高燃油经济性. 将 CVT 和行星排结合在一起就能够实现包括零速比在内的无级变速, 称为 IVT (Infinitely variable transmission). 对于 CVT 的速比控制, 已经开展了一些研究, 如改进 PID 算法^[119]、广义模型预测控制^[120]、模糊控制^[121] 等. 当行星齿轮空转时, 速比控制变得不足, 加入输出力矩控制很有必要^[122]. 为了得到在不同工况下均令人满意的燃油经济性, 常常将 CVT 的速比控制和发动机的控制结合起来形成集成控制^[123–124].

1.3 车辆主动安全控制系统

汽车的安全性从总体上来说分为主动安全性和被动安全性. 从发展趋势看, 如何主动避免事故发生

更具有积极意义, 因而车辆主动安全控制的研究和开发日益引起汽车研发人员的重视. 图 5 概括了汽车主动安全及被动安全技术具体包含的内容^[125].

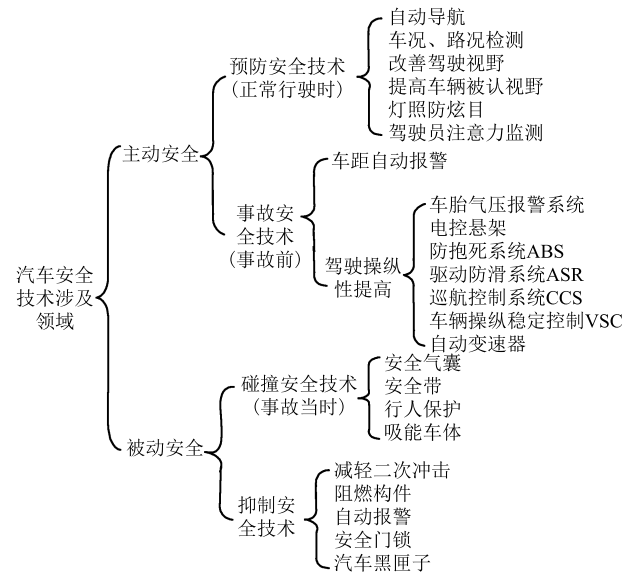


图 5 汽车主动安全性概念

Fig. 5 The concept of automobile active safety

在人、车辆和环境三者之间的闭环系统中, 驾驶员相当于一个控制器, 为了防止这个“控制器”的不稳定和误操作, 还需要增加一个更可靠的控制器以监测人、车、环境状况, 这就需要对汽车主动安全技术中驾驶操纵性进行深入而细致的研究. 自 20 世纪 80 年代以来, 各种提高驾驶操纵性的主动安全装置也相继问世, 先后出现了制动防抱死系统 (Anti-lock brake system, ABS)、驱动防滑系统 (Acceleration slip regulation, ASR)、车辆操纵稳定控制系统 (vehicle stability control, VSC) 等. 下面对主要的驾驶操纵稳定性控制系统的原理及现状进行介绍.

1.3.1 制动防抱死系统

当汽车在行进过程中紧急制动时, 如果前轮出现抱死现象, 虽然汽车基本上沿直线行驶, 但是将会失去转向控制能力; 如果后轮发生抱死, 汽车的制动稳定性就会变差, 在很小的侧向力作用下, 汽车就会发生甩尾等危险现象. 此外, 当车轮出现抱死现象时, 轮胎局部剧烈摩擦会导致使用寿命大大缩短^[126]. 为解决上述问题, 制动防抱死技术应运而生.

ABS 技术的一个核心问题就是控制方法的研究. 由于车辆系统本身的复杂性、实际制动工况的不确定性、控制系统的实时性要求等因素的影响, 目前国际上普遍采用的仍是逻辑门限值方法^[127–128]. 该控制策略易于实现、可实施性好、应用成熟, 但其门

限值的获得需要通过大量道路试验来确定,不同车辆需要不同的匹配技术,开发周期长,在控制过程中逻辑门限值总是处于波动状态,因此控制效果不是很好,制动距离也稍长。

轮胎在不同路面状况下的摩擦系数都存在最大值,轮胎在路面的摩擦系数最大时的滑移率称为最佳滑移率。由于不同路面情况下的最佳滑移率不同,因此 ABS 系统的最为重要的目标就是设计一个可以实时调节轮胎滑移率至最佳滑移率的控制器。近年来,国内外学者对基于滑移率的 ABS 控制算法进行了很多理论研究,其中实现连续控制的最简单算法是 PID 控制^[129-131]。然而采用滑移率作为控制目标必须获得实时路面附着系数变化情况^[132-133],从而自动的改变控制目标以跟踪路面附着系数的变化,使制动效能始终在最佳状态。因此,简单的 PID 控制器不能满足 ABS 在全工况的使用要求。由于车辆系统的非线性和时变性,运用经典和现代控制理论设计 ABS 系统控制算法比较复杂,而且精确的车辆-路面关系模型难以建立,导致控制性能不佳。模糊控制能够简化控制系统的不确定性和复杂性,使它在 ABS 控制策略研究中的应用逐步得到重视^[134-136]。由于模糊控制避免了复杂数学模型对控制实时性的不利因素,所以基于这种思路的 ABS 控制系统能进一步减小制动距离,方向稳定性好。而且此系统不需要测量车速和估计参考车速,只需轮速传感器信号,节约了成本,提高了系统的可靠性。但该方法缺少理论基础,没有有效通用的计算方法,只能依据专家知识构成的控制规则,反复测试,缺少自学习能力,在实车应用受到一定程度的限制。

汽车防抱死制动控制系统除要求系统抗干扰能力强及可靠性高以外,一个重要的特点是控制过程要求快速,这样对控制算法有很大的限制,复杂的算法无法满足快速这一要求^[137]。此外汽车制动过程具有明显的非线性、时变性和不确定性等特点,所以滑模变结构控制在汽车 ABS 控制中得到较为广泛的应用^[138-140]。众所周知,滑模变结构控制存在抖动的缺点,如何消除抖动是滑模变结构控制研究的重要课题^[141-142]。文献[141]基于汽车 ABS 的滑模变结构控制器的设计采用饱和函数替代符号函数以消除系统的抖振,这种方法虽然削弱了系统的抖振,但它破坏了系统的结构,同时也就削弱了滑模变结构控制的鲁棒性优点。文献[142]采用改进的指数趋近率的滑模变结构控制的方法设计了汽车 ABS 控制器,可以兼有抖振小及鲁棒性好的优点。自适应控制可以实时估计路面状况的变化,然后根据估计和识别的结果进行参考滑移率的校正,控制效果较好,在 ABS 控制中也有较为广泛的应用^[143-144]。

1.3.2 驱动防滑系统

相比于汽车制动过程,在车辆的驱动过程中,如果驱动力过大,或者路面附着系数较小,同样会使车辆驱动力矩超过轮胎与路面间的附着极限,导致驱动轮的过度滑转。这不但会降低汽车的驱动性能,加剧轮胎磨损,增大传动系统载荷和驾驶员负担,增加燃油消耗,而且损害车辆的操纵性、稳定性和安全性。驱动防滑系统就是要解决这一系列问题,它是 ABS 思想在汽车驱动过程的延伸。由于驱动防滑系统是通过调节驱动车轮的牵引力实现驱动车轮防滑控制的,因此也被称为牵引力控制系统 (Traction control system, TCS)^[145]。

自 20 世纪 80 年代中期开始,国际上便开始了对汽车驱动防滑控制方法及策略的研究。文献[146]通过减少气缸供油量来实现汽车驱动时的最佳滑移率控制。文献[147]通过调节离合器结合程度来限制驱动轮的过度滑转,并申请了专利。文献[148]通过调节燃油供给量来调节发动机的输出扭矩,使驱动轮的滑转率控制在最佳范围内并获得最佳驱动力,并进一步将电子驱动防滑系统安装在 volvo76Turbo 汽车上进行实车试验。文献[149]在原有 ABS/ASR 的基础上开始大批量生产两种不同控制方式的汽车驱动防滑控制系统,均获得了良好的控制效果。在牵引力控制系统的研发中,控制方法是决定驱动防滑控制系统控制品质的关键因素。文献[150]基于路面附着系数估计,采用模糊控制器对电动汽车单轮牵引力控制进行了研究。文献[151]在车辆速度估计的基础上采用鲁棒切换控制方法将两轮驱动汽车的牵引力控制问题扩展到四轮驱动汽车。

目前我国在 ASR 技术的研究方面目前还处在初期的理论研究和探索阶段,还尚未开发出有实用化的 ASR 产品。从有关资料来看,国内 ASR 技术研究的侧重点目前主要倾向于控制策略和控制算法、逻辑等方面的理论研究。国内汽车驱动防滑控制的主要方法有逻辑门限值控制^[152]、PID 控制^[153]和变结构控制^[154]等。总体来说,国内在 ASR 控制算法方面的研究多以制动力控制为主、发动机扭矩输出控制为辅,在配合离合器、变速器、防滑差速方面的研究还没有实质性的进展。就现在大多数 ASR 控制策略的研究来看,还存在控制精度和其他诸多问题,距离产品化研究还有一定的差距。所以说,国内 ASR 技术的研究与开发和国外比起来还属于刚刚起步阶段。

1.3.3 车辆稳定控制系统

车辆在实际行驶过程中的工况十分复杂,引起失稳的原因也很复杂,因此汽车稳定控制的研究日益

受到研究人员的重视. 在国外, 日本和欧美等国对汽车稳定性控制的命名各不相同, 比如日本丰田称其为 VSC (Vehicle stability control), 欧洲企业称之为 ESP (Electronic stability program), 在美国称之为 VDC (Vehicle dynamic control). 但是, 其稳定性控制的核心目标是一致的.

最初的汽车稳定性控制概念是在 ABS 和 ASR 基础上加以算法改进, 使之能部分解决汽车的稳定性问题^[155]. 上世纪 90 年代初, 通过对车辆稳定性的理论分析, 人们提出了直接对汽车横摆运动进行控制的概念, 即直接横摆力矩控制 (Direct yaw control, DYC)^[156], 标志着汽车稳定性控制概念的出现. DYC 通过采集方向盘转角的信息来判断驾驶员的转向意图, 并通过制动力或驱动力在车轮上的分配来控制汽车的横摆运动, 直接控制汽车的稳定性. 1995 年之后, 随着 BOSCH、BMW、TOYOTA 等公司相继推出了使用横摆角速度和侧向加速度传感器的新一代汽车稳定性控制系统, 汽车稳定性控制的基本形式得到了确认. 在这一阶段, 基于这种组成结构的汽车稳定性控制算法开始大量出现, 其中 BOSCH 的 ESP 是其中比较典型的控制方法之一^[157], 它采用车辆实际运动状态与车辆理想运动状态的误差反馈来决策汽车的横摆力矩, 并通过差动制动或对发动机控制实现对汽车横摆运动的调节, 这一控制方法也是现代汽车稳定性控制中比较常用的控制方法^[158].

近几年来, 有一些学者开始尝试用现代控制理论的一些方法进行汽车的稳定性控制, 并取得了一些成果. 文献 [159] 采用模糊控制理论来对车轮的滑移率进行分配, 进而控制车身的横摆角速度和质心侧偏角; 文献 [160] 采用滑模控制对车辆的横摆稳定性控制进行研究, 并通过 Backstepping 方法得到车辆的制动力矩. 文献 [161] 采用非线性模型预测控制方法对提高车辆的横摆稳定性及操纵性进行研究, 并对控制器进行了软件在环仿真研究. 文献 [162–163] 在考虑方向盘转角物理约束的情况下, 基于 MPC 方法对自主车辆的主动前轮转向控制进行了研究, 并在车辆运行的不同工况对控制器的控制效果进行了仿真验证. BOSCH 根据文献 [164] 开发了基于线性二次型最优控制原理的汽车电子稳定程序 ESP, 该系统已在多种车型上得到实际应用.

在国内, 车辆稳定控制的研究还处在起步阶段, 吉林大学、清华大学、同济大学等高校都在开展这方面的研究工作. 文献 [165] 采用了最优控制方法研究 VDC 和 ABS 的共同工作问题. 文献 [166] 采用模糊控制器讨论了车辆稳定性控制中直接横摆力矩控制问题. 文献 [167] 对电子机械制动汽车稳定性控

制系统的控制问题进行了研究, 并申请了专利. 文献 [168] 采用层次化整车稳定性控制方法和加权二乘法优化分配算法, 通过纵向力在约束范围内的合理分配形成直接横摆力矩, 改善车辆的行驶姿态.

1.3.4 主动悬架控制

悬架设计的好坏对车辆的总体性能有着重要的影响, 因为行驶中的汽车, 会由于路面的凸凹不平等因素激起汽车的振动, 影响驾驶员和乘客的乘坐舒适性, 损坏车辆的零部件和运载的货物. 悬架设计时主要考虑的性能指标有: 尽量使乘客不受路面不平的影响 (乘坐舒适性); 抑制轮胎的振动以维持轮胎与路面的接触 (操纵稳定性); 保持悬架动行程在允许的范围内以免撞击限位块从而破坏乘坐舒适性 (机械约束)^[169].

主动悬架的思想从 1954 年由美国通用公司提出到现在的广泛应用, 与其相对应的控制算法一直在不断地发展. 文献 [169] 综述了 1997 年之前主动悬架控制的研究状况, 并详细地讨论了最优控制在主动悬架控制系统中的应用. 在文献 [170] 中, 通过线性参变控制器与非线性 Backstepping 控制器的结合, 设计了自适应的主动悬架控制器并达到了理想的控制效果. 预瞄控制可以使车辆在提前知道前方路面信息的情况下调节悬架参数, 使得悬架达到最好的减振效果. 文献 [171] 中基于半车悬架模型设计了一个预瞄控制器, 并对系统进行稳定性和舒适性评价. 由于主动悬架系统中存在很多的不确定性和干扰, 近年来, H_∞ 主动悬架控制受到了广泛的关注, 并将悬架的控制问题归结为约束系统的干扰抑制问题^[172–173]. 这些方法的共同点就是全部性能要求加权后, 合并为一个单一的目标函数 (H_2 或 H_∞), 再求其最小得到一个最优控制器. 文献 [169] 对于主动悬架优化问题中加权系数的选择进行了详细的讨论, 表明在处理相互矛盾的性能要求时, 选择适当的加权并不容易. 事实上在这些性能要求中, 只有乘坐舒适性需要优化, 而表征其他性能的变量只要求不超出相应的限定范围即可. 因此, 文献 [174] 将悬架的控制问题归结为有时域硬约束的干扰抑制问题, 将相互冲突的性能要求进行分别描述, 将安全性相关的要求 (轮胎不离开地面和悬架动行程在允许范围内不撞击限位块等) 描述为必须满足的时域硬约束, 将乘坐舒适性等描述为需要最小化的 H_∞ 指标. 这种问题描述更加符合实际情况并且提高了满足安全性要求的控制优先级. 与此同时, 在多目标控制的框架下, 文献 [175] 和 [176] 分别提出了基于 LMI 的 H_2 /广义 H_2 状态反馈和输出反馈控制策略. 文献 [177] 在文献 [174] 的研究基础上, 同时考虑悬架系统

中执行器的非线性动态、外部干扰和时域约束,设计了 H_∞ 与 Backstepping 相结合的主动悬架控制器. 文献 [178] 对主动悬架的相关控制问题进行了综述, 结合混合动力和纯电动汽车的发展, 提出了未来主动悬架控制需要解决的一些问题.

1.3.5 自动驾驶控制

随着科技的日益进步, 车辆的自动驾驶不再是人们不可企及的梦想. 对自动驾驶车辆的定义也从底层控制实现的自主发展到了决策层面的自主. 我们这里所说的自动驾驶车辆是指装备了自动驾驶系统, 能够在无人干预情况下进行自动驾驶的车辆. 一个理想的自动驾驶系统可以像驾驶员一样, 依据车辆的运动状态以及所处环境的变化实时改变车辆运动行为. 自动驾驶的概念从诞生到现在, 随着科技的不断发展, 其概念也被不断的赋予新的内涵. 从最初的路线跟踪自动驾驶到现在的基于多感知系统的自动驾驶系统. 相对于由驾驶员操纵的汽车而言, 无人自动驾驶车辆具有以下几个显著的优点: 1) 自主车辆的驾驶行为具有可预测性; 2) 自主车辆更加节能环保; 3) 减少交通事故的发生; 4) 缓解交通压力.

最早的自动驾驶车辆于 1977 年诞生在日本的 Tsukuba 机械工程实验室, 在时速 30 km/h 情况下通过跟踪地面标注的白线来实现自动驾驶. 到了 20 世纪 80 年代, 基于视觉导航的自主车辆在德国慕尼黑联邦国防军大学问世, 该研究由奔驰汽车公司和德国慕尼黑国防军大学联合进行. 项目由 Ernst Dickmanns 教授具体负责, 其团队于 1994 年研发的 VaMP 以及 Vita-2 型自主车辆实现了在巴黎三车道高速公路环境中的自动驾驶, 自动驾驶速度高达 130 km/h^[179]. 第二年, 由其改装的奔驰 S 级轿车更是完成了从慕尼黑到哥本哈根长达 1600 公里的往返自动驾驶, 人工干预仅为 5%. 美国在自动驾驶车辆的研究起步较早, 其自主车辆的研究项目初期主要由军方和一些大型汽车公司组织建立, 其中包括 DARPA 的 ALV 项目、DEMO-II 计划、DEMO-III 计划等^[180]. 其中, 由卡耐基-梅隆大学在政府、军方、及汽车企业等多方面的资助下, 进行了 Navlab 系列多辆自主车辆的研制开发^[181]. 其中 Navlab-5 进行了横穿美国大陆的, 长达近 5000 公里的自动驾驶实验, 整个行程中 98.2% 的路程由自动驾驶系统完成. 意大利帕尔马大学的 Alberto Broggi 教授领导了 ARGO 自主车辆研究, 其研发的自主车辆 Lancia Thema 完成了历时 6 天长达 2000 公里的测试工作, 其中人为干预仅占 6%, 平均时速为 96 km/h^[182]; 2010 年 Alberto Broggi 教授带领的团队完成了另一项自动驾驶实验, 他们所研制的自动驾驶车辆经过 80 多天 13000 公里的行驶, 横跨

欧亚大陆, 从意大利帕尔玛行驶到中国上海, 并在上海世博会上参展^[183].

国内对自动驾驶汽车的研究是从 20 世纪 80 年代末期开始的. 其中, 以国防科技大学的研究成果较为丰硕. 1991 年研制的汽车自动驾驶系统实现了低速工况下的自动驾驶. 2000 年, 以 BJ2020 为平台的自动驾驶汽车实现了 75 km/h 的高速公路车道跟踪实验. 2003 年, 由国防科学技术大学和中国第一汽车集团公司联合开发的以红旗车为平台的自动驾驶系统实现了 170 km/h 的高速公路车道跟踪实验, 并具有了自主超车功能^[184]. 2011 年 7 月其研制的红旗 HQ3 无人驾驶汽车完成了从长沙到武汉 286 公里的正常天气情况自动驾驶实验, 能够实现自主巡航、自主超车等功能, 整个行驶过程中人工干预里程不到总里程的百分之一. 与同期国际研究成果相比, 该成果标志着中国汽车自动驾驶技术已经达到了国际先进水平. 目前, 国内许多院校及研究机构都在从事自动驾驶车辆的研究工作, 其中包括清华大学、南京理工大学、西安交通大学、湖南大学、军事交通学院等. 近几年, 许多国家为了加快推进自动驾驶车辆关键技术的成熟与发展, 纷纷举办各类自主车辆大赛, 比如美国国防部高级研究计划局 (DARPA) 举办的 Grand Challenge 大赛, 奖金额高达 200 万美元^[185-186]. 我国在国家自然科学基金委主办下, 已经于 2009 年~2012 年连续四年举办了“中国智能车未来挑战赛”.

自动驾驶技术的研究内容涉及模式识别、行为决策、导航规划、路径及轨迹规划、智能控制以及系统错误检测等方面, 如图 6 所示. 从各个功能模块负责完成的任务来划分, 可大致分为: 感知决策系统和规划与控制系统. 其中, 规划与控制模块的作用是对给定或规划的路线进行跟踪控制. 驾驶控制作为自动驾驶车研究的一个重点, 受到了很多研究人员的关注, 也取得了很多的研究成果^[187]. 另外, 自主车辆驾驶稳定性问题, 也一直是车辆控制研究的主要问

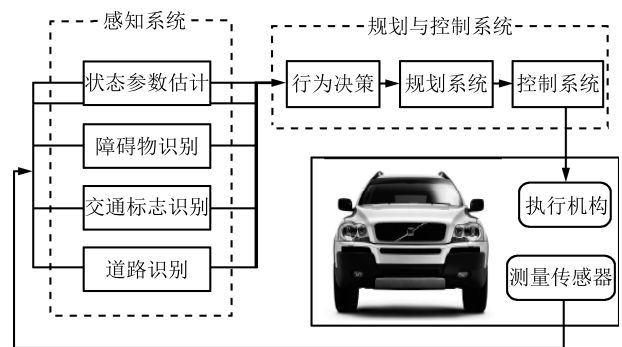


图 6 自主车辆控制系统结构示意图

Fig. 6 Autonomous vehicles control system

题, 其控制方法可参照前文。

随着自动驾驶技术的发展与进步, 其部分技术已经走进了我们的生活进入实用化阶段。比如, 自适应巡航控制^[188]、自主起/停系统^[189-190]、车道跑偏报警^[191-192]以及自动泊车^[193]等。这些汽车的新生功能均来自于对自动驾驶技术的研究。显然, 新技术的应用使车辆变的更智能, 提高了安全性、舒适性及燃油经济性, 减少了车辆事故的发生, 同时也减少了对环境的破坏和污染, 某些技术的应用还可以缓解目前紧张的交通环境。从汽车电控系统到主动安全系统, 车辆驾驶自动化的发展历程还远远没有结束, 但是, 我们可以预见的是汽车智能驾驶已经成为未来汽车的一个重要发展方向。

在这里还有一个问题需要指出, 以上所述的汽车主动安全电控系统可以有效实施的前提是准确地获得汽车行驶状态, 然而考虑到生产成本因素和实际应用等多方面的原因, 很多车辆稳定性控制所需的状态信息都无法通过带有标准配置的车载传感器直接测量得到, 使得车辆行驶状态信息存在缺失。随着控制理论的发展, 研究人员更倾向于利用车辆上已装备的传感器获得车辆状态信息, 进行汽车状态参数估计, 行驶状态估计问题也成为了一项极具应用价值的研究工作。其中主要的估计方法有 Kalman 滤波法^[194-195]、神经网络与模糊逻辑方法^[196-197]、滚动优化估计方法^[198]和非线性方法^[199]等, 在这里不一一赘述。

1.4 新能源汽车控制

能源枯竭、环境污染已经成为当前社会亟需解决的问题。电动汽车以其独特的节能环保的优势引起越来越多的国家的重视。发展以电能为核心能源的新能源汽车是缓解全球范围内能源危机, 减少污染的重要途径之一。为了顺应这个潮流, 电动汽车、混合动力汽车得到了飞速的发展, 开发电动汽车控制技术是今后汽车工业发展的必然方向。新能源汽车的关键控制问题主要包括: 混合动力汽车扭矩需求管理、电动汽车电池管理系统、电机驱动控制、能量回收控制。

1.4.1 混合动力汽车扭矩需求管理与优化

混合动力汽车 (Hybrid electrical vehicle, HEV) 至少包含两个动力供给装置和辅助的能量转换器。通常, 其配备一个内燃机、电动机和一个辅助的电力储存系统, 如电池或超级电容^[200]。不同的行驶工况 (起步、定速巡航、减速制动、爬坡等), HEV 的内燃机和电动机均运行在不同的工作状态。通过使用高效率电机和电能储存系统, 以及优化车辆运行和发动机操作, 可以有效降低燃油消耗和减

少空气污染。能源管理策略要解决的核心问题正是如何合理配置发动机和电气设备的输出动力, 既要满足驾驶员对整车驱动力的需求, 同时又要优化发动机、电动机、蓄电池以及整车的效率, 而且动力分配过程还受到发动机最高转速、电动机最高转速、发动机最大功率、电动机最大功率、电动机最小功率 (发电机最大功率) 等条件的限制, 属于受约束的优化问题^[201-202]。

随着开发的深入进行, 除了能量优化管理技术, 扭矩动态协调控制越来越引起人们的重视。扭矩动态协调控制主要针对高度瞬态过程, 例如混合动力模式切换、车辆起步、加减速等工况, 对发动机、电机、离合器进行扭矩的综合控制。文献 [70, 203] 针对并联式混合动力汽车, 以发动机扭矩或车辆的扭矩为主要参数, 通过扭矩变化来协调匹配发动机、变速箱、制动和车辆动态控制之间的关系。文献 [204] 基于并联式混合动力汽车不同的工作模式及时变的发动机扭矩需求得到了相应的能源管理策略。针对混合动力汽车中内燃机与电机之间存在的动力耦合和分离过程中能量管理策略的复杂性, 提出了基于模糊逻辑控制的扭矩管理策略。文献 [205-206] 中指出, 在使用 AMT 的并联式混合动力汽车中, 离合器作为发动机和电机的动力耦合装置, 在驱动模式切换, 如由 EV 模式切换到 PHEV、CV 模式时, 需要启动发动机并接合离合器以便将发动机动力平稳地接入驱动系统。同时, 在换挡时, 需要协调控制动力传动系统快速、平顺地完成换挡过程。不论是能量优化管理技术还是扭矩动态协调控制都可以看作基于扭矩管理的动力总成控制。扭矩管理策略以扭矩作为最主要的控制变量, 在发动机和电动机之间对扭矩而不是对功率进行合理的分配^[203, 207]。

串联式混合动力汽车中, 发动机与车轮之间没有机械动力耦合。与并联式混合动力汽车相比, 串联式混合动力电动汽车可以避免并联型和混联型的机械装置和控制系统的复杂性^[208-209], 同时可在提高发动机燃油经济性及环保性的前提下缓解现行车载电源续航里程有限的不足。在简单的开关式规则控制中, 发动机工作在一恒定的最优点, 如何充分利用以上串联式混合动力汽车的结构特点, 从系统优化的角度优化辅助功率单元 (Auxiliary power unit, APU) (主要是发动机) 的运行是串联式混合动力汽车能量分配策略的关键。另一方面, 由于动态变化过程中 APU 存在动态能量损失, 在实际能量分配策略的优化中必须考虑 APU 的动态行为^[210-211]。增程式电动车是以电动机为主, 发动机为辅工作的串联式混合动力汽车^[212-213], 发动机的唯一作用是发电。所谓增程式电动汽车, 就是当车载电池电量消耗

至最低临界限值时, 增程器将自动启动并为其继续提供电能, 以实现高达数百公里的续驶能力. 另外, 增程式电动汽车的电池容量只需纯电动汽车的 40% 左右, 极大地降低了成本.

1.4.2 电动汽车电池管理系统

动力电池是电动车上最常用的储能设备. 动力电池作为电动车的主要能源, 其性能和工作状态对整车而言是至关重要的. 为确保动力电池组的良好性能, 利用动力电池的能量, 延长电池的使用寿命, 对其进行有效的管理和控制显得尤为重要. 电池管理相当复杂, 它需要反映电池的若干信息, 其中包括电池的电荷状态 (State of charge, SOC)、电池的健康状态 (State of health, SOH) 和寿命管理.

传统的汽车在行驶时通过油表来显示汽车的续驶里程, 而电动汽车中需要计算电池组的电荷状态 (SOC). SOC 是电池状态的重要参数, 用来诊断电池的健康状态和判断电池是否过充放电等的重要依据之一, 但是由于蓄电池本身是个复杂的、封闭的电化学反应系统, 且影响 SOC 估算的因素很多, 所以对于 SOC 准确估算的难度较大, 是动力电池研究领域的热点问题^[214]. 目前, SOC 估算方法主要有放电实验法、开路电压法、内阻法、安时法、模糊逻辑、神经网络法、卡尔曼滤波等. 由于传统的放电实验法、开路电压法、内阻法具有很大的局限性, 很少应用于实际汽车动力电池的 SOC 估计^[215-217]. 安时法也因为它的局限性与其他方法组合使用. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室对安时法进行了改进, 该方法以安时法为主线, 引入开路电压法与卡尔曼滤波法来改进安时法的不足^[218]; 近年来又相继提出了许多在线预测 SOC 的算法并得到了广泛应用, 如模糊逻辑算法^[219-220]、神经网络算法^[221]、卡尔曼滤波估计算法^[222-223]. 卡尔曼滤波算法适应于电流波动比较剧烈的 SOC 估计, 很适合应用在电动汽车上. 如果电池模型比较准确, 卡尔曼滤波算法可以很快收敛到电池 SOC 真值附近, 对电池 SOC 估算的初值要求不高. 文献 [224] 中提出用自适应卡尔曼滤波来处理在未知噪声环境下的锂离子电池 SOC 的估计问题, 从而克服相同条件下传统的卡尔曼滤波的发散现象, 并与扩展卡尔曼滤波的估计结果进行比较, 结果表明自适应卡尔曼滤波的 SOC 估计误差低于扩展卡尔曼滤波的估计误差. 文献 [225] 在安时法的基础上结合自适应卡尔曼滤波对镍氢电池 SOC 进行估计, 并与放电实验法得出的 SOC 参考值进行比较, 该方法的估计误差远低于单独使用安时法时的误差. 神经网络方法^[221] 具有非线性的基本特性, 具有并行结构和学习能力, 适合于 SOC 的在线估计. 神经网络方法适用于各种电池,

缺点是需要大量的参考数据进行训练, 估计误差受到训练数据和训练方法的很大影响. 近期又出现了线性模型法^[226]、支持向量回归算法^[227-228] 以及滑模法^[229-230].

由于电池长期使用必然发生老化或劣化, 因而必须测量电池的寿命状态, 也称为健康状态 (SOH). SOH 是电池使用一段时间后其实际容量与标称容量的比值, 用来判断电池老化后的实际状态, 实际表现在电池内部某些参数 (如内阻、容量等) 的变化上. 传统的 SOH 的预测估计方法主要有电池放电电压 Coup de fouet 分析方法^[231]、电池阻抗分析方法、电池充放电操作状态分析方法等^[232-233]. 近年来, 人们在传统方法的基础上, 又提出了一些新的研究方法. 文献 [234] 提出了寿命衰减模型, 该模型一般只用于作电池寿命衰减的定性分析; 文献 [235] 根据大量试验数据推导出了锂离子电池的循环寿命经验模型, 该模型由于考虑电池的很多物理因素, 因此, 并不能很好地适应不同电池; 文献 [236] 提出了锂离子电池容量衰减的数学模型; 文献 [237] 提出了基于模糊逻辑的 SOH 估计算法, 通过交流阻抗来估计 SOH. 文献 [238] 提出了一种基于等效电路模型的在线估计 SOH 的方法, 由于电池老化过程中等效电路模型参数也随着变化, 利用电池端电压和电流估计变化的参数, 进而获得 SOH. 文献 [239] 提出在等效电路模型的基础上, 利用自适应估计器获得电路参数, 进而计算得到电池 SOH. 文献 [240] 提出用模糊逻辑的方法估计铅酸电池的 SOH. 文献 [241] 中提出用扩展卡尔曼滤波器 (Extended Kalman filter, EKF) 算法估计等效电路参数, 以电压、电流、温度等三个电池参数作为分类算法特征向量, 并用二次判别分析法得到 SOH. 文献 [242] 中提出一种用子空间状态估计的方法来计算 SOH.

1.4.3 电动汽车电机驱动控制

电动汽车相对于传统的汽车, 特殊之处就在于增加了电池-电机系统. 目前, 比较适合汽车动力的电机主要有: 交流感应电机、永磁电动机、开关磁阻电机和多态电机^[243-245]. 对于新能源汽车而言, 电机驱动系统的控制至关重要, 一个好的电机系统的控制策略, 会使整车性能得到大大提高. 目前, 对于驱动电机控制策略的研究, 是电动汽车领域研究的一个热点. 截至目前, 感应电机的调速控制方法已有很多, 大体可分为恒压频比 (V/f) 控制、转差频率控制、矢量控制 (Vector control, VC) 和直接转矩控制 (Direct torque control, DTC) 等.

V/f 控制和转差频率控制是相对简单的交流调速方法, 在工业领域上有着广泛的应用^[246]. 这两种控制策略都是以脉宽调制 (Pulse width modula-

tion, PWM) 方式作为其实现的技术方式, 控制曲线会随负载变化而变化, 转矩响应慢, 不适用于频繁加速减速场合, 因此这种控制方法不适用于电动车的驱动系统。

矢量控制 (VC) 又称为磁场定向控制 (Field oriented control), 它是 1975 年由德国西门子公司的 Blaschke^[247] 提出的一种基于坐标变换的高性能感应电机控制方式, 它可以在很大程度上提高感应电机的传动效率, 在电池容量相同的条件下, 使用这样的驱动系统的汽车, 其续航里程更长。由于矢量控制交流电机在性能上可以和直流电机相媲美, 矢量控制系统是 20 年来实际应用最为广泛的高性能交流调速系统, 在电动车和混合动力汽车的交流驱动系统中的应用也是最成熟的, 动态性能好, 调速范围宽^[248]。矢量控制有两个比较突出的缺点: 1) 对电机参数的依赖性很大, 电机参数的估算准确与否直接影响控制性能的好坏; 2) 转子磁场的定向需要使用坐标变换, 计算量比较大。

同矢量控制不同, 直接转矩控制 (DTC) 摒弃了解耦的思想, 取消了旋转坐标变换, 直接对电机进行控制, 它是一种发展较快的新兴的电机高性能控制方法。1985 年, 直接转矩控制技术由德国鲁尔大学的 DePenbrock 教授提出^[249], 首见于异步电动机, 它是继矢量控制之后感应电机调速控制技术又一个重大突破。直接转矩控制具有如下特点: 1) 相比矢量控制, 不需要进行坐标变换, 直接通过控制转矩差和定子磁通差就能确定电压矢量; 2) 采用 Bang-Bang 控制; 3) 与 PWM 技术并用来进行转矩控制; 4) 动态响应快, 控制性能优良, 适用于电动车和机车牵引传动^[250-251]。由于直接转矩系统采用了 Bang-Bang 控制, 由此而产生了转矩脉动, 限制了系统的调速范围; 5) 系统未能彻底摆脱电机参数的影响, 低速控制性能不好。为提高性能和改进这些缺点, 各国学者经过十多年的共同努力, 取得了长足的进步。文献 [251] 针对电动车在行驶过程中出现的各种复杂工况, 提出了包含空间电压向量和定子磁链优化的永磁式同步电机直接转矩控制方法。文献 [252] 选择无刷直流电机作为低成本电动车的驱动系统, 利用克里格 (Kriging) 预测算法来估计电机转矩, 并作为控制器的反馈, 提高了系统的快速性。文献 [253] 介绍了电压空间矢量调节和离散电压空间矢量调制方法的直接转矩控制。文献 [254] 采用分段解析模糊控制器选择逆变器的开关状态, 使系统启动阶段转矩反应更快, 超调量也更小。

凡是高性能交流电机控制系统, 包括矢量控制系统、直接转矩控制系统或者其他系统, 都需要转速反馈。然而速度传感器的使用带来了系统成本增

加、可靠性降低、体积增大及易受工作环境影响等缺点。因此, 无速度传感器控制技术是交流电机调速控制的重要课题^[249]。基于无速度传感器技术, 直接转矩控制方法中的转速估计主要借助于直接计算法^[255-256]、模型参考自适应法 (MRAS)^[257-258]、卡尔曼滤波算法^[259]、神经网络法^[260]、滑模变结构法^[261]。

1.4.4 电动汽车制动能量回收控制

在城市循环工况下, 汽车的平均时速较低, 负荷率起伏变化大, 需要频繁的启动与制动, 汽车制动过程中的能量绝大部分以热能的形式散失到空气中, 如果对该部分损失的能量加以回收利用, 车辆的续航能力会大大提高。制动能量回收是在保证车辆行驶稳定性的前提下, 将电动汽车制动或减速时的一部分机械能经再生系统转换为其他形式的能量, 并经功率转化装置存储于储能单元中, 同时产生一定的制动阻力使车辆减速制动。

制动能量回收系统是 EV/HEV 中重要的系统之一, 其性能主要依赖于该系统的控制策略。制动能量控制系统的设计需要参考整车的动力传递结构, 其目标通常是提高能量的回收率和优化驾驶员感受和车辆稳定性^[262]。在研究制动能量回收控制时, 还需要考虑汽车在能量回收时的一些约束条件: 1) 蓄电池组的状态 SOC; 2) 汽车低速能量回馈的平顺性; 3) 电机的发电功率不能超过蓄电池可以接收的最大功率; 4) 逆变器的温度、电压和电流, 油门和制动系统的状态。

回收的能量如果不能得到良好的利用, 那么能量回收则毫无意义。因此, 制动力分配是制定再生制动控制策略要研究的首要问题, 它直接影响到制动能量回收效果。文献 [263-264] 提出了三种制动力分配控制策略, 即: 并联再生制动控制策略、理想再生制动控制策略和最大能量回收控制策略, 并在城市循环工况下分别对控制策略进行了仿真分析。日本 Eco-Vehicle 使用的制动控制器直接接收主缸压力信号, 然后计算车辆上的回收制动力, 并将结果作为电信号发送给车辆控制器, 车辆控制器将实际参与能量回收制动, 然后将结果反馈到制动控制, 通过对压力控制阀的调节, 实现对制动压力的控制^[265]。文献 [266] 以驾驶员的制动意图和制动能量回收率为设计指标, 基于最优控制理论和 PI 控制理论设计了一套有效的制动力模型, 从提高能量回收率的角度来看, 最优控制方法更适合该系统。文献 [267] 根据混合动力汽车的不同行驶工况, 设计了能够得到最大回收制动扭矩的控制策略, 达到了最优刹车效率的同时获得了最大的能量收益。文献 [268] 研究了

车辆在低摩擦系数下转弯时的制动能量回收控制策略,考虑到制动时的约束条件以及过大的横摆力矩会使车辆稳定性受到影响,设计了 MPC 控制器,在保证车辆稳定行驶的同时,得到了最大的制动回收能量.文献 [269] 以二象限的 DC-DC 直流斩波器驱动结构为模型对 PWM 微观过程进行了解析,提出一种理论上可行的恒定回馈电流再生制动控制策略.

在再生制动系统与常规制动、ABS 系统兼容方面,文献 [263] 针对制动能量回收系统与 ABS 系统兼容的问题,通过精确设计电机制动门限,能够区分制动力分配,从而利用调节电机制动转矩和制动器制动转矩来实现车轮的防抱死控制和电机回馈能量.文献 [270] 通过电机制动控制系统和传统的 ABS 液压控制系统进行协调控制,在确保制动安全性的前提下,对非紧急制动状态条件下以及在不同路面附着条件下紧急制动情况下的能量回收进行了研究.在电动车能量回收系统中,再生制动力矩是一个非常重要但是不可测量的物理量,文献 [271] 利用测量轮速建立了再生制动力矩观测器,并基于此观测器建立了制动力矩跟踪控制器.

2 汽车控制的共性问题与展望

综上,汽车控制技术取得了令人瞩目的进展,然而汽车控制系统由多个功能独立但动力学关联耦合的子系统组成,每部分的动力学机理复杂、性能指标相互影响.同时大量新技术的广泛应用,满足了汽车的节能减排、动力性及安全性,但引入了诸多新型电控执行器,增加了控制自由度和动力学耦合的复杂程度,使得电控系统的设计、标定和实验更加困难,对传统控制理论和方法的应用提出了新的挑战.总之,汽车控制中还存在很多重要且尚未解决的问题需要从事汽车控制的科研人员去探索和认知,下面我们将对其中的一些共性问题进行总结,针对这些问题,对未来汽车控制可能的发展趋势提出初步的展望:

1) 由于汽车控制系统存在复杂的能量转化过程,新技术的应用又引入了诸多新型电控执行器,增加了动力学耦合的复杂程度,因此很难通过质量、能量和力(矩)守恒等物理与化学的基本定律建立精确的机理模型.即使能够建立模型,也会由于模型阶次太高,不能适用于控制系统的分析与设计.另外,车辆系统中还存在大量的不确定因素,如环境温度压力、路面摩擦系数、装载量、路面坡度、样机与规模化产品的差异、零部件老化及磨损等.针对难于机理建模的、动力学强耦合的、不确定因素多的复杂系统,可以研究有效利用大量离线/在线数据的系统分析与控制方法.因此基于数据/机理混合的建模与

控制方法是未来汽车控制的发展方向,具有明确的应用价值和科学意义.

2) 随着节能减排标准等级的不断提高,汽车动力总成控制要求也必然提高,但汽车行驶的起停、加速、制动、匀速、驻车等方式,使得发动机必须在启动、怠速、加速、断油等多个工况下交替运行,传动系的变速箱需要换挡实现力矩和转速之间的匹配.而且车辆性能相互影响,如动力性、燃油经济性、排放性、舒适性等往往存在冲突.因此多目标多工况协调和优化控制成为汽车控制的一个关键内容.

3) 汽车在运行过程中状态变化非常迅速,各个物理部件之间都有信号进行传递,彼此相互耦合,要求汽车的控制算法应具有很高的实时性,即控制器的计算速度要尽可能的快.然而汽车模型阶次高、非线性强,给车辆控制的算法硬件化带来了巨大的设计挑战.目前实际工程主要以逻辑门限值设计及 PID 加 map 前馈方法为主,其他高级算法,从模型到算法本身的设计并不完善,很多算法在实现过程中受到精确性、可行性、复杂性的制约,具有一定的局限性.因此,如何利用非线性控制理论和算法简化,研究快速、集成的在线控制方法是汽车控制未来发展的一个趋势.

4) 目前汽车控制的仿真研究,大多停留在功能设计与验证阶段,进行的往往是单纯的控制器的离线仿真验证,一些实车试验也仅仅是在常规工况下进行的.然而为了更全面的验证控制器的有效性,有些实车试验需要在极为恶劣的环境下进行,带有一定的危险性,同时,由汽车电控系统 V 模式的开发流程可知,控制算法在用于实车之前需要进行实时性验证.因此搭建能够反映各种车辆实时运行状况的高保真硬件在环仿真平台,是验证汽车控制方法实时性和可靠性的必要手段.

5) 另外,对于汽车这样一个大规模控制系统,包含不同种类的控制器的,如 PID 控制器,前馈加反馈控制器等.控制器设计是否合理及参数调整是否得当对汽车控制的性能起到了决定性作用.建立汽车控制方法评价体系是评价各种控制方法优劣的有效手段,也是目前亟待解决的问题.

6) 自动驾驶技术的发展让汽车变得更加智能,车辆智能驾驶对交通安全、汽车节能起到了至关重要的作用.在严峻的道路交通安全形势下,开发基于“人-车-路”状况综合分析的新一代汽车主动安全系统,实现机器智能与人类智能的优势互补、有机协同,是全面提高汽车驾驶的安全性的重要途径.在此基础上,根据道路信息和交通状况对汽车按技能最优模式操控,开发在相同运输条件下能源消耗最小的智能节能技术对于缓解我国能源短缺状况具有重

要的意义。

7) 残酷的市场竞争压力使得“降低成本”成为企业永恒的主题, 这里包括电控系统的低成本开发和生产低成本的车载电子控制单元 (Electronic control unit, ECU)。目前, 就发动机电控系统的开发而言, 需要做大量的实验来标定和整定控制器。因此, 需要理论与方法的基础创新, 建立有理论指导的高效标定方法和实验方法, 缩短开发周期, 减少实验次数, 进而降低开发成本。另一方面, 车载低成本 ECU 要求控制算法的低成本计算, 如何做到电控系统的低成本开发和算法的低成本计算都是富有挑战和科学意义的。

近年来, 汽车控制行业对自主创新认识逐步深刻, 我们的目标越来越清晰, 虽然任重道远, 但前途光明, 希望将来能有更多的学者从事汽车控制领域的研究。

References

- Isermann, R. Mechatronic systems — innovative products with embedded control. *Control Engineering Practice*, 2008, **16**(1): 14–29
- Liu Xiao-Liang, Wang Sheng-Chang, Li Mao-Yue. Research on air-fuel ratio control and time delay. *Highways and Automotive Applications*, 2008, (2): 11–14
(刘晓亮, 王生昌, 李茂月. 汽油机空燃比控制和时间延迟的研究. 公路与汽运, 2008, (2): 11–14)
- Hou Zhi-Xiang, Wu Yi-Hu, Shen Qun-Tai. Advanced control strategies for engine transient air/fule ratio. *Transactions of CSICE*, 2003, **21**(5): 369–373
(侯志祥, 吴义虎, 申群太. 车用汽油机过渡工况空燃比的先进控制策略. 内燃机学报, 2003, **21**(5): 369–373)
- Jia Xiu-Min. Air-fuel Ratio Control Based on State Observer [Master dissertation], Jilin University, China, 2009
(贾秀敏. 基于状态观测器的空燃比控制 [硕士学位论文], 吉林大学, 中国, 2009)
- Zou Bo-Wen. Research on Model-based Control Technology on Air-fuel Ratio of Gasoline Engine [Ph.D. dissertation], Zhejiang University, China, 2006
(邹博文. 基于模型的汽油机空燃比控制技术的研究 [博士学位论文], 浙江大学, 中国, 2006)
- Wang S W, Yu D L, Gomm J B, Page G F, Douglas S S. Adaptive neural network model based predictive control for air-fuel ratio of SI engines. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2006, **19**(2): 189–200
- Gao You-Shan. Air-fuel ratio precision mapping with combustion products components. *Vehicle and Power Technology*, 2008, (1): 22–26
(高有山. 基于排气成分的空燃比精确映射检测. 车辆与动力技术, 2008, (1): 22–26)
- Yildiz Y, Annaswamy A, Yanakiev D, Kolmanovsky I. Adaptive air fuel ratio control for internal combustion engines. In: Proceedings of the 2008 American Control Conference. Seattle, USA: IEEE, 2008. 2058–2063
- Qu Ling. Analysis and Research on Automotive Engine Air-Fuel Ratio Control Strategy [Master dissertation], Harbin Institute of Technology, China, 2009
(曲玲. 汽车发动机空燃比控制方法的分析与研究 [硕士学位论文], 哈尔滨工业大学, 中国, 2009)
- He B, Shen T L, Kako J, Ouyang M G. Input observer-based individual cylinder air-fuel ratio control: modelling, design and validation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, **16**(5): 1057–1065
- Cavina N, Corti E, Moro D. Closed-loop individual cylinder air-fuel ratio control via UEGO signal spectral analysis. *Control Engineering Practice*, 2010, **18**(11): 1295–1306
- Wang Li, Liu De-Xin. Sliding mode-neural network control for air-fuel ratio of lean burn gasoline engine and experiment research. *Journal of Tianjin University*, 2006, **39**(S1): 51–56
(王莉, 刘德新. 稀燃汽油机空燃比滑模 — 神经网络控制及实验. 天津大学学报, 2006, **39**(增): 51–56)
- Zhang F, Grigoriadis K M, Franchek M A, Makki I H. Transient lean burn air-fuel ratio control using input shaping method combined with linear parameter-varying control. In: Proceedings of the 2006 American Control Conference. Minnesota, USA: IEEE, 2006. 3290–3295
- Zhou Neng-Hui, Xie Hui, Zhao Hua, Chen Tao. Air/fuel ratio control of gasoline HCCI engine based on neural network. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, **40**(6): 1–5
(周能辉, 谢辉, 赵华, 陈韬. 基于神经网络的汽油 HCCI 发动机空燃比控制策略. 农业机械学报, 2009, **40**(6): 1–5)
- Mckay D, Nichols G, Schreurs B. Delphi electronic throttle control systems for model year 2000; diver features, system security, and OEM benefits, ETC for the mass market. In: Proceedings of the 2000 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 2000. 2000-01-0556
- Yang C. Model-based analysis and tuning of electronic throttle controllers. In: Proceedings of the 2004 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 2004. 2004-01-0524
- Hashimoto E, Ishiguro T, Yasui Y, Akazaki S. High reliability electronic throttle system design. In: Proceedings of the 2003 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 2003. 2003-01-0708
- Chen L F, Chen R. A fuzzy immune PID controller for electronic throttle. In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Computational Intelligence and Design. Changsha, China: IEEE, 2009. 72–75
- Ingram G, Franchek M, Balakrishnan V. Spark ignition engine mass air flow control for precise torque management. In: Proceedings of the 2003 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 2003. 2003-01-0624
- Vašak M, Baotić M, Morari M, Petrović I, Perić N. Constrained optimal control of an electronic throttle. *International Journal of Control*, 2006, **79**(5): 465–478
- Song Tong-Hao. Electronic Throttle Control Based on Backstepping [Master dissertation], Jilin University, China, 2009
(宋同好. 基于 Backstepping 的电子节气门控制 [硕士学位论文], 吉林大学, 2009)
- Jin W W, Jin D M, Zhang X. VLSI design and implementation of a fuzzy logic controller for engine idle speed. In: Proceedings of the 7th International Conference on Solid-State and Integrated Circuits Technology. Beijing, China: IEEE, 2004, **3**: 2067–2070
- Mohtadi A R, Torabi H, Osmani M. Design of neuro-fuzzy controller for idle speed control. In: Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Neural Networks. Sofia, Bulgaria: WSEAS Press, 2008. 181–185

- 24 Zhang Zhen-Dong, Zhou Ping, Zhang Min. Research on idle speed fuzzy control algorithm for an electronically controlled engine. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2000, **31**(6): 75–77
(张振东, 周萍, 张旻. 电控发动机怠速控制模糊算法研究. 农业机械学报, 2000, **31**(6): 75–77)
- 25 Zhao Guang-Zhou, Yang Zhi-Jia. The application of neural network fuzzy controller in engine idle speed control. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2000, **21**(1): 59–62
(赵光宙, 杨志家. 应用神经网络模糊控制器的发动机怠速控制. 内燃机工程, 2000, **21**(1): 59–62)
- 26 Cao J L, Yin J M, Shin J S, Lee H H. BP network modified by particle swarm optimization and its application to online-tuning PID parameters in idle-speed engine control system. In: Proceedings of the 2009 ICROS-SICE International Joint Conference. Fukuoka, Japan: IEEE, 2009. 3663–3666
- 27 Han Yi-Lun, Zhang Cui-Ping, Yang Qing-Fu. Study on gasoline engine idle speed control based on expert system. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2003, **24**(1): 35–38
(韩以仑, 张翠平, 杨庆佛. 基于专家系统的汽车发动机怠速控制的仿真实验研究. 内燃机工程, 2003, **24**(1): 35–38)
- 28 Scillieri J J, Buckland J H, Freudenberg J S. Reference feed-forward in the idle speed control of a direct-injection spark-ignition engine. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, **54**(1): 51–61
- 29 Scillieri J J, Buckland J H, Freudenberg J S. Use of feed-forward in idle speed control for a direct injection spark ignition engine during lean burn. In: Proceedings of the 2002 American Control Conference. Anchorage, USA: IEEE, 2002. 1419–1424
- 30 Alt B, Blath J P, Svaricek F, Schultalbers M. Multiple sliding surface control of idle engine speed and torque reserve with load torque estimation. In: Proceedings of the 10th International Workshop on Variable Structure Systems. Antalya, Turkey: IEEE, 2008. 47–54
- 31 Alt B, Blath J P, Svaricek F, Schultalbers M. Control of idle engine speed and torque reserve with higher order sliding modes. In: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Control Applications. Saint Petersburg, Russia: IEEE, 2009. 363–369
- 32 Sun P, Powell B, Hrovat D. Optimal idle speed control of an automotive engine. In: Proceedings of the 2002 American Control Conference, Illinois, USA: IEEE, 2002. 1018–1026
- 33 Jergaard K, Nielsen S, Vesterholm T, Hendicks E. Advanced nonlinear engine idle speed control systems. In: Proceedings of the 1994 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 1994. 940974.
- 34 Guo Hong-Zhi. Gasoline Engine Control Strategy on Idle Working Condition [Ph. D. dissertation], Jilin University, China, 2009
(郭宏志. 汽油发动机怠速工况下控制方法的研究 [博士学位论文], 吉林大学, 中国, 2009)
- 35 Li Shu. Idle Speed Controller for SI Engines Based on Hybrid Systems Model [Ph. D. dissertation], Jilin University, China, 2010
(李殊. 基于混合系统模型的 SI 汽油发动机怠速控制 [博士学位论文], 吉林大学, 中国, 2010)
- 36 Li S, Chen H, Ma M M. Model predictive control based on linear programming for engine idle speed control. In: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Changchun, China: IEEE, 2009. 1167–1172
- 37 Li S, Chen H, Yu S Y. Nonlinear model predictive control for idle speed control of SI engine. In: Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control, and 28th Chinese Control Conference. Shanghai, China: IEEE, 2009. 6590–6595
- 38 Zhu G G, Daniels C F, Winkelman J. MBT timing detection and its closed-loop control using in-cylinder pressure signal. In: Proceedings of the 2003 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 2003. 2003-01-3266
- 39 Haskara I, Zhu G, Winkelman J. IC engine retard ignition timing limit detection and control using in-cylinder ionization signal. In: Proceedings of the 2004 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 2004. 2004-01-2977
- 40 Cui H W. Research of optimizing ignition control system in gaseous fuel engine based on RBF neural network. In: Proceedings of the 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Changsha, China: IEEE, 2008. 399–403
- 41 Tien H, Vishy K. Fuzzy expert system to estimate ignition timing for hydrogen car. In: Proceedings of the 5th International Symposium on Neural Networks. Beijing, China: Springer Verlag, 2008. 570–579
- 42 Bober T, Shih F Y. Image processing-based methodology for optimizing automotive ignition timing. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, **58**(1): 85–92
- 43 Hillion M, Chauvin J, Petit N. Open-loop combustion timing control of a spark-ignited engine. In: Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control. Cancun, Mexico: IEEE, 2008. 5635–5642
- 44 Wu Ping-You, Huang He, Cheng Qing. The engine knock analysis and control. *Transactions on Transmission Technology*, 2003, **17**(3): 36–38, 6
(吴平友, 黄河, 程庆. 汽油发动机爆震分析与控制. 传动技术, 2003, **17**(3): 36–38)
- 45 Du Zhi-Wei, Tian Yi. Design and realization of spark ignition automotive engine knock sensor signal process circuit. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2007, **4**(2): 79–81
(杜志伟, 田奕. 燃油喷射汽车发动机爆震传感器信号处理电路的设计与实现. 华北科技学院学报, 2007, **4**(2): 79–81)
- 46 Wang Yan-Yan, Yang Jian-Guo, Song Bao-Yu. Knock signal analysis for gasoline engines based on discrete wavelet transform. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, **35**(10): 1166–1169
(王彦岩, 杨建国, 宋宝玉. 基于 DWT 的汽油机爆震信号分析. 北京航空航天大学学报, 2009, **35**(10): 1166–1169)
- 47 Wan Man-Ying, Wang Jun-Xiong, Deng Zhen-Quan, Shi Xi-Ju. Vehicle engine knock analysis and control. *Noise and Vibration Control*, 2001, **21**(3): 43–47
(万曼影, 王俊雄, 邓真全, 施锡钜. 汽车发动机的爆震分析与控制. 噪声与振动控制, 2001, **21**(3): 43–47)
- 48 Cai Chang-Gui, Huang Shao-Jiong. Gasoline engine knock control based on spark control arithmetic. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2006, (8): 200–202
(蔡昌贵, 黄韶炯. 基于点火控制算法的汽油机爆震控制. 农机化研究, 2006, (8): 200–202)

- 49 Yuichi S, Masato N, Daijiro T, Ei T. SI engine combustion flame propagation measurement and knocking analysis by ion current probes including moving intake and exhaust valve faces. In: Proceedings of the 2007 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 2007. 2007-01-1420
- 50 Chen Xian-Zhang, Xie Yue-Xiao, Yang Dong-Lai, Zhang Miao. The strategy and experimental research on knock control of an EFI gasoline engine. *Automotive Engineering*, 2005, **27**(1): 31–34
(陈贤章, 谢悦孝, 杨东来, 张淼. 电喷汽油机爆燃控制的策略及试验研究. *汽车工程*, 2005, **27**(1): 31–34)
- 51 Ogaji S O T, Marinai L, Sampath S, Singh R, Prober S D. Gas-turbine fault diagnostics: a fuzzy-logic approach. *Applied Energy*, 2005, **82**(1): 81–89
- 52 Wang X, Kruger U, Irwin G W, McCullough G, McDowell N. Nonlinear PCA with the local approach for diesel engine fault detection and diagnosis. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, **16**(1): 122–129
- 53 Murphey Y L, Chen Z H, Feldkamp L A. An incremental neural learning framework and its application to vehicle diagnostics. *Applied Intelligence*, 2008, **28**(1): 29–49
- 54 Wang Y S, Chu F L. Real-time misfire detection via sliding mode observer. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2005, **19**(4): 900–912
- 55 Stotsky A A. Statistical engine knock detection. *Automotive Engines*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009
- 56 Wang M H, Chao K H, Sung W T, Huang G J. Using ENN-1 for fault recognition of automotive engine. *Expert Systems with Applications*, 2010, **37**(4): 2943–2947
- 57 Luo J H, Pattipati K R, Qiao L, Chigusa S. An integrated diagnostic development process for automotive engine control systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 2007, **37**(6): 1163–1173
- 58 Antony D. Application of a data-driven monitoring technique to diagnose air leaks in an automotive diesel engine: a case study. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, **21**(2): 795–808
- 59 Namburu S M, Chigusa S, Prokhorov D, Qiao L, Choi K, Pattipati K. Application of an effective data-driven approach to real-time time fault diagnosis in automotive engines. In: Proceedings of the 2007 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, USA: IEEE, 2007. 1–9
- 60 Butt Q R, Bhatti A I. Estimation of gasoline-engine parameters using higher order sliding mode. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, **55**(11): 3891–3898
- 61 Choi K, Singh S, Kodali A, Pattipati K R, Sheppard J W, Namburu S M, Chigusa S, Prokhorov D V, Qiao L. Novel classifier fusion approaches for fault diagnosis in automotive systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, **58**(3): 602–611
- 62 Gerhardt J, Hönninger H, Bischof H. A new approach to functional and software structure for engine management systems — BOSCH ME7. In: Proceedings of the 1998 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 1998. 980801
- 63 Heintz N, Mews M, Stier G, Beaumont A J, Noble A D. An approach to torque-based engine management systems. In: Proceedings of the 2001 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 2001. 2001-01-0269
- 64 Livshiz M, Chynoweth S J, Kaiser J M, Clutz R H, Dibble D L. Coordinated Engine Torque Control, USA. Patent 7021282B1, June 2006
- 65 Livshiz M, Kao M H, Will A. Engine torque control variation analysis. In: Proceedings of the 2008 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 2008. SAE 2008-01-1016
- 66 Livshiz M, Babcock D J, Dulzo J R, Ritzten E. Torque Control of Turbocharged Engine, USA. Patent 7395147, July 2008
- 67 Lin Jian-Sheng, Huang He. Study of the torque control strategy in EFI. *Drive System Technique*, 2006, **20**(1): 24–27
(林建生, 黄河. 对基于转矩控制策略的电喷系统的研究. *传动技术*, 2006, **20**(1): 24–27)
- 68 Mencher B, Jessen H, Kaiser L, Gerhardt J. Preparing for CARTRONIC interface and new strategies for torque coordination and conversion in a spark ignition engine management system. In: Proceedings of the 2001 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE 2001. 2001-01-0268
- 69 Sans M. Generic integrated power train management IPM? interface as a standard. In: Proceedings of the 2001 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 2001. 2001-01-1326
- 70 Keller F, Streib M, Holzinger O, Leonhard R, Golzer T. Electronic System for a Motor Vehicle, US Patent 5351776, October 1994
- 71 Yu Shi-Tao, Zhou Xing-Li, Yang Xiao-Feng, Gong Yuan-Ming, Yang Lin, Zhuo Bin. Research on torque based control simulation model for electronic unit pump diesel engine. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2006, **27**(2): 29–32
(于世涛, 周兴利, 杨晓峰, 龚元明, 杨林, 卓斌. 基于扭矩控制的电控单体泵柴油机仿真模型的研究. *内燃机工程*, 2006, **27**(2): 29–32)
- 72 Ali A, Blath J P. Application of modern techniques to SI-engine torque control. In: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Control Applications. Munich, Germany: IEEE, 2006. 2405–2410
- 73 Leroy T, Chauvin J, Petit N. Motion planning for experimental air path control of a variable-valve-timing spark ignition engine. *Control Engineering Practice*, 2009, **17**(12): 1432–1439
- 74 Chauvin J, Corde G, Petit N, Rouchon P. Motion planning for experimental airpath control of a diesel homogeneous charge-compression ignition engine. *Control Engineering Practice*, 2008, **16**(9): 1081–1091
- 75 Ryu W, Cho N, Yoo I, Song H, Kim H. Performance analysis of a CVT clutch system for a hybrid electric vehicle. *International Journal of Automotive Technology*, 2009, **10**(1): 115–121
- 76 Lei Y L, Gao B Z, Tian H, Ge A L, Yan S. Throttle control strategies in the process of integrated powertrain control. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 2005, **18**(3): 429–433
- 77 Tanaka H, Wada H. Fuzzy control of clutch engagement for automated manual transmission. *Vehicle System Dynamics*, 1995, **24**(4–5): 365–376
- 78 Slicker J M, Chan K W. Method and Apparatus for Slip Mode Control of Automatic Clutch, USA. Patent 5630773, May 1997
- 79 Bemporad A, Borrelli F, Morari M. Robust model predictive control: piecewise linear explicit solution. In: Proceedings of the 2001 European Control Conference. Porto, Portugal: Acadule de Engenharia da Universidade do Porto, 2001. 939–944
- 80 Dolcini P, Bechart H, Canudas de Wit C. Observer-based optimal control of dry clutch engagement. In: Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control. Seville, Spain: IEEE, 2005. 440–445

- 81 Lu X H, Chen H, Wang P, Gao B Z. Design of a data-driven predictive controller for start-up process of AMT vehicles. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2011, **22**(12): 2201–2212
- 82 Glielmo L, Vasca F. Optimal control of dry clutch engagement. In: Proceedings of the 2000 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 2000. 2000-01-0837
- 83 David J, Natarajan N. Design of an optimal clutch controller for commercial trucks. In: Proceedings of the 2005 American Control Conference. Portland, USA: IEEE, 2005. 1599–1606
- 84 Liu C H. Touch Point Identification for Vehicle Master Clutch, USA. Patent 6022295, November 1998
- 85 Bemporad A, Morari M. Robust model predictive control: a survey. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 1999, **245**: 207–226
- 86 Balluchi A, Benvenuti L, Ferrari A, Sangiovanni-Vincentelli L A. Hybrid systems in automotive electronics design. *International Journal of Control*, 2006, **79**(5): 375–394
- 87 van der Heijden A C, Serrarens A F A, Camlibel M K, Nijmeijer H. Hybrid optimal control of dry clutch engagement. *International Journal of Control*, 2007, **80**(11): 1717–1728
- 88 Watson M, Byington C, Edwards D, Amin S. Dynamic modeling and wear-based remaining useful life prediction of high power clutch systems. *STLE Tribology Transactions*, 2005, **48**(2): 208–217
- 89 Pettersson M, Nielsen L. Gear shifting by engine control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2000, **8**(3): 495–507
- 90 Dolcini P, de Wit C C, Béchart H. Lurch avoidance strategy and its implementation in AMT vehicles. *Mechatronics*, 2008, **18**(5–6): 289–300
- 91 Horn J, Bamberger J, Michau P, Pindl S. Flatness-based clutch control for automated manual transmissions. *Control Engineering Practice*, 2003, **11**(12): 1353–1359
- 92 Pettersson M. Driveline Modeling and Control [Ph.D. dissertation], Linköping University, Sweden, 1997
- 93 Gao B Z, Lei Y L, Ge A L, Chen H, Sanada K. Observer-based clutch disengagement control during gear shift process of automated manual transmission. *Vehicle System Dynamics*, 2011, **49**(5): 685–701
- 94 Goetz M, Levesley M C, Crolla D A. Dynamics and control of gearshifts on twin-clutch transmissions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2005, **219**(8): 951–963
- 95 Ishihara T. *Automotive Engineering Handbook 9, Drivetrain*. Tokyo: Sankaido Publishing, 1980
- 96 Haj-Fraj A, Pfeiffer F. Optimal control of gear shift operations in automatic transmissions. *Journal of the Franklin Institute*, 2001, **338**(2–3): 371–390
- 97 Crowther A, Zhang N, Liu D K, Jeyakumaran J K. Analysis and simulation of clutch engagement judder and stick-slip in automotive powertrain systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2004, **218**(12): 1427–1446
- 98 Gao B Z, Chen H, Tian L, Sanada K. A nonlinear clutch pressure observer for automatic transmission: considering drive-shaft compliance. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Transactions of the ASME*, 2012, **134**(1): 1–8
- 99 Walker P D, Zhang N, Tamba R. Control of gear shifts in dual clutch transmission powertrains. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, **25**(6): 1923–1936
- 100 Haj-Fraj A, Pfeiffer F. A model based approach for the optimisation of gearshifting in automatic transmissions. *International Journal of Vehicle Design*, 2002, **28**(1–3): 171–188
- 101 Cho D. Nonlinear Control Methods for Automotive Powertrain Systems [Ph.D. dissertation], Massachusetts Institute of Technology, USA, 1988
- 102 Gao B Z, Chen H, Sanada K, Hu Y F. Design of clutch-slip controller for automatic transmission using backstepping. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, **16**(3): 498–508
- 103 Yokoyama M. Sliding mode control for automatic transmission systems. *Journal of the Japan Fluid Power System Society*, 2008, **39**(1): 34–38
- 104 Gao B Z, Chen H, Sanada K. Two-degree-of-freedom controller design for clutch slip control of automatic transmission. In: Proceedings of the 2008 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 2008. 2008-01-0537
- 105 Sanada K, Kitagawa A. A study of two-degree-of-freedom control of rotating speed in an automatic transmission, considering modeling errors of a hydraulic system. *Control Engineering Practice*, 1998, **6**(9): 1125–1132
- 106 Minowa T, Ochi T, Kuroiwa H, Liu K Z. Smooth gear shift control technology for clutch-to-clutch shifting. In: Proceedings of the 1999 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 1999. 1999-01-1054
- 107 Brown L T, Hrovat D D. Transmission Clutch Loop Transfer Control, USA. Patent 4790418, December 1988
- 108 Berriri M, Chevrel P, Lefebvre D. Active damping of automotive powertrain oscillations by a partial torque compensator. *Control Engineering Practice*, 2008, **16**(7): 874–883
- 109 Lu X H, Chen H, Zhang H Y, Wang P, Gao B Z. Design of model predictive controller for anti-jerk during tip-in/out process of vehicles. In: Proceedings of the 30th Chinese Control Conference. Yantai, China: 2011. 3395–3400
- 110 Umbach F, Acker H, von Kluge J, Langheinrich W. Contactless measurement of torque. *Mechatronics*, 2002, **12**(8): 1023–1033
- 111 Merry R J E, van de Merry M J G, Steinbuch M. Velocity and acceleration estimation for optical incremental encoders. *Mechatronics*, 2010, **20**(1): 20–26
- 112 Baumann J, Torkzadeh D D, Ramstein A, Kiencke U, Schlegl T. Model-based predictive anti-jerk control. *Control Engineering Practice*, 2006, **14**(3): 259–266
- 113 Pettersson M, Nielsen L. Diesel engine speed control with handling of driveline resonances. *Control Engineering Practice*, 2003, **11**(3): 319–328
- 114 Masmoudi R A, Hedrick J K. Estimation of vehicle shaft torque using nonlinear observers. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1992, **114**(3): 394–400
- 115 Yi K, Shin B K, Lee K L. Estimation of turbine torque of automatic transmissions using nonlinear observers. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2000, **122**(2): 276–283
- 116 Gao B Z, Chen H, Ma Y, Sanada K. Design of nonlinear shaft torque observer for trucks with automated manual transmission. *Mechatronics*, 2011, **21**(6): 1034–1042
- 117 Gao B Z, Chen H, Zhao H Y, Sanada K. A reduced-order nonlinear clutch pressure observer for automatic transmission. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, **18**(2): 446–453

- 118 Gao B Z, Chen H, Li J, Tian L, Sanada K. Observer-based feedback control during torque phase of clutch-to-clutch shift process. *International Journal of Vehicle Design*, 2012, **58**(1): 93–108
- 119 Jiang Qiang, Liu Hong-Yi, Yang Xin-Hua, Cheng Yue. Research on the speed ratio control for the EM-CVT based on the improved PID algorithm. *Journal of Mechanical Transmission*, 2012, **36**(5): 14–17
(蒋强, 柳洪义, 杨新桦, 程越. 基于改进PID算法的EM-CVT 速比控制研究. 机械传动, 2012, **36**(5): 14–17)
- 120 Liu J G, Zhou Y S, Cai Y C, Su J Y, Zou N W. The application of generalized predictive control in CVT speed ratio control. In: Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics. Jinan, China: IEEE, 2007. 649–654
- 121 Xue D L, Zhang Y K, Zheng L Z, Zhang B Y. Speed ratio control of metal V-belt type CVT. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2003, **34**(3): 8–11
- 122 Sun Z X, Hebbale K. Challenges and opportunities in automotive transmission control. In: Proceedings of the 2005 American Control Conference. Portland, USA: IEEE, 2005. 3284–3289
- 123 Uchida M, Katakuta S, Yasuoka M, Yoshino T. An integrated control algorithm for an SI Engine and CVT. *SAE paper*, 1999. 1999-01-0752
- 124 Kim T, Kim H. Integrated engine-CVT control considering powertrain response lag in acceleration. *KSME International Journal*, 2000, **14**(7): 764–772
- 125 Huang Ning-Jun. Automotive active safety technology in qualitative change. *Light Vehicles*, 2000, (2): 32–35
(黄宁军. 质变中的汽车主动安全技术. 轻型汽车技术, 2000, (2): 32–35)
- 126 Liao Chuan-Jin, Qin Xiao-Hu, Huang Xi-Yue. The state of arts of human-centered vehicle active safety technology. *Computer Simulation*, 2004, **21**(9): 152–156
(廖传锦, 秦小虎, 黄席樾. 以人为中心的汽车主动安全技术综述. 计算机仿真, 2004, **21**(9): 152–156)
- 127 Wang Wei-Da, Ding Neng-Gen, Zhang Wei, Yu Gui-Zhen, Xu Xiang-Yang. Research and verification of the logic threshold self-adjusting control method for ABS. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, **46**(22): 90–95
(王伟达, 丁能根, 张为, 余贵珍, 徐向阳. ABS 逻辑门限值自调整控制方法研究与试验验证. 机械工程学报, 2010, **46**(22): 90–95)
- 128 Zhang Q, Liu G F, Wang Y K, Zhou T T. Study of calculation method of wheel angular acceleration in ABS system. In: Proceedings of the 2004 International Conference on Information Acquisition. Hefei, China: IEEE, 2004. 147–150
- 129 Li Xiang-Gui. PID control strategy and simulation analysis of ABS system. *Mechanical Research and Application*, 2011, (5): 20–22, 25
(李香桂. 汽车 ABS 系统的 PID 控制策略及仿真分析. 机械研究与应用, 2011, (5): 20–22, 25)
- 130 Sharkawy A B. Genetic fuzzy self-tuning PID controllers for antilock braking systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2010, **23**(7): 1041–1052
- 131 Zhang Feng, Luo Ying-Hong. Fuzzy PID and simulation analysis of vehicle ABS system. *Mechanical and Electrical Information*, 2011, (9): 92–93
(张风, 罗映红. 汽车 ABS 模糊 PID 控制方法的仿真研究. 机电信息, 2011, (9): 92–93)
- 132 Zhang Xiang-Wen, Wang Fei-Yue. Influence of the tire dynamic friction property on the vehicle ABS control system. *Automobile Technology*, 2010, (12): 26–32
(张向文, 王飞跃. 轮胎动态摩擦特性对汽车 ABS 控制系统的影响. 汽车技术, 2010, (12): 26–32)
- 133 Fang Y, Chu L, Sun W F, Shang M L, Zhou F K, Guo J H. Identification and control of split- μ road for antilock braking system. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Computer Control. Shenyang, China: IEEE, 2010. 298–301
- 134 Wang W Y, Li I H, Chen M C, Su S F, Hsu S B. Dynamic slip-ratio estimation and control of antilock braking systems using an observer-based direct adaptive fuzzy-neural controller. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(5): 1746–1756
- 135 Mirzaei A, Moallem M, Dehkordi B M, Fahimi B. Design of an optimal fuzzy controller for antilock braking systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006, **55**(6): 1725–1730
- 136 Xu Ming-Tao, Li Jin-Song, Jin Zhi-Yang. Stimulation research on algorithms of automobile ABS fuzzy control based on slip ratio. *Agricultural Equipment and Vehicle Engineering*, 2010, (2): 21–23
(许明涛, 李劲松, 金志扬. 基于滑移率的汽车 ABS 模糊控制算法仿真研究. 农业装备与车辆工程, 2010, (2): 21–23)
- 137 Zhang Xiang-Wen, Wang Fei-Yue. Studies on adaptive fuzzy sliding mode control algorithm for the vehicle ABS. *Automobile Technology*, 2009, (10): 25–30
(张向文, 王飞跃. 汽车 ABS 自适应模糊滑模控制算法研究. 汽车技术, 2009, (10): 25–30)
- 138 Jing H H, Liu Z Y, Chen H. A switched control strategy for antilock braking system with on/off valves. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, **60**(4): 1470–1484
- 139 Shim T, Chang S Y, Lee S. Investigation of sliding-surface design on the performance of sliding mode controller in antilock braking systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, **57**(2): 747–759
- 140 Kayacan E, Oniz Y, Kaynak O. A grey system modeling approach for sliding-mode control of antilock braking system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(8): 3244–3252
- 141 Garg A, Pavlovic V, Huang T S. Bayesian networks as ensemble of classifiers. In: Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition. Quebec City, Canada: IEEE, 2002. 779–784
- 142 Mao Yan-E, Jing Yuan-Wei, Zhang Si-Ying, Zhou Zhen-Hui, Wang Yan. On variable structure control with sliding mode for automotive anti-lock braking systems. *Journal of System Simulation*, **20**(5): 1243–1245, 1288
(毛艳娥, 井元伟, 张嗣瀛, 周振辉, 王艳. 汽车 ABS 滑模变结构控制方法的研究. 系统仿真学报, 2008, **20**(5): 1243–1245, 1288)
- 143 Zhao Zhi-Guo, Fang Zong-De, Li Jie. Research on adaptive sliding mode controller for anti-lock braking system (ABS). *Mechanical Science and Technology*, 2002, **21**(1): 6–9
(赵治国, 方宗德, 李杰. 防抱制动系统参数自适应滑模变结构控制器的研究. 机械科学与技术, 2002, **21**(1): 6–9)
- 144 Liu Bo. An Investigation of Vehicle Anti-lock Braking System Based on Adaptive Sliding Mode Control Method [Master dissertation], National University of Defense Technology, China, 2006
(刘波. 基于自适应滑模控制方法的车辆防抱死制动系统的研究 [硕士学位论文], 国防科学技术大学, 中国, 2006)

- 145 Tong K F. Simultaneous Plant/Controller Optimization of Traction Control for Electric Vehicle [Master dissertation], University of Waterloo, Waterloo, 2007
- 146 Emig R, Sehramm H. Electronic traction control for commercial vehicles-the logical expansion of ABS. In: Proceedings of the 1987 International Conference on New Development in Powertrain and Chassis Engineering. Strasbourg, Germany: Verein Deutscher Ingenieure, 1987. 431-445
- 147 Alrfed S, Demel H. ASR-traction control, state of the art and some prospects. SAE, 1990. 900204
- 148 Lennon W K, Passino K M. Intelligent control for brake systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1999, **7**(2): 188-200
- 149 Bosch Technical Instruction. Braking System for Passenger Cars, Technical Report, Bosch Company, Germany, 1995
- 150 Colli V D, Tomassi G, Scarano M. "Single wheel" longitudinal traction control for electric vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2006, **21**(3): 799-808
- 151 Deur J, Pavković D, Burgio G, Hrovat D. A model-based traction control strategy non-reliant on wheel slip information. *Vehicle System Dynamics*, 2011, **49**(8): 1245-1265
- 152 Zhao Zhi-Guo, Gu Jun, Yu Zhuo-Ping. Study of acceleration slip regulation strategy for four wheel drive hybrid electric car. *Journal of Mechanical Engineering* 2011, **47**(14): 83-98
(赵治国, 顾君, 余卓平. 四轮驱动混合动力轿车驱动防滑控制研究. 机械工程学报. 2011, **47**(14): 83-98)
- 153 Li Jing, Li You-De, Zhao Jian, Song Da-Feng. A research on fuzzy PI control for traction control system. *Automotive Engineering*, 2004, **26**(3): 287-290, 330
(李静, 李幼德, 赵健, 宋大风. 牵引力控制系统模糊 PI 控制方法研究. 汽车工程, 2004, **26**(3): 287-290, 330)
- 154 Guo Kong-Hui, Wang De-Ping. A preliminary theoretical study on anti slip regulation. *Journal of Jilin University of Technology (Natural Science Edition)*, 1997, **27**(3): 1-5
(郭孔辉, 王德平. 汽车驱动防滑控制理论的初步研究. 吉林工业大学学报 (自然科学版), 1997, **27**(3): 1-5)
- 155 Yasui Y, Tozu K, Hattori N, Sugisawa M. Improvement of vehicle directional stability for transient steering maneuvers using active brake control. In: Proceedings of the 1996 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 1996. 960485
- 156 Koibuchi K, Yamamoto M, Fukada Y, Inagaki S. Vehicle stability control in limit cornering by active brake. *JSAE Review*, 1996, **16**(3): 323-323
- 157 Daily R, Bevely D M. The use of GPS for vehicle stability control systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, **51**(2): 270-277
- 158 Zheng S B, Tang H J, Han Z Z, Zhang Y. Controller design for vehicle stability enhancement. *Control Engineering Practice*, 2006, **14**(12): 1413-1421
- 159 Boada B L, Boada M J L, Díaz V. Fuzzy-logic applied to yaw moment control for vehicle stability. *Vehicle System Dynamics*, 2005, **43**(10): 753-770
- 160 Zhou H L, Liu Z Y. Vehicle yaw stability-control system design based on sliding mode and Backstepping control approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, **59**(7): 3674-3678
- 161 Canale M, Fagiano L, Razza V. Vehicle lateral stability control via approximated NMPC: real-time implementation and software-in-the-loop test. In: Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference. Shanghai, China: IEEE, 2009. 4596-4601
- 162 Borrelli F, Falcone P, Keviczky T, Asgari J, Hrovat D. MPC-based approach to active steering for autonomous vehicle systems. *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*, 2005, **3**(2-4): 265-291
- 163 Falcone P, Tseng H E, Borrelli F, Asgari J, Hrovat D. MPC-based yaw and lateral stabilisation via active front steering and braking. *Vehicle System Dynamics*, 2009, **46**(supplement): 611-628
- 164 Anton T, Zanten V. Bosch ESP systems: 5 years of experience. In: Proceedings of the 2000 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 2000. 2000-01-1633
- 165 Wang De-Ping, Guo Kong-Hui. Research on the principle and tactics of vehicle dynamics stability control. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2000, **36**(3): 97-99
(王德平, 郭孔辉. 车辆动力学稳定性控制的控制原理与控制策略研究. 机械工程学报, 2000, **36**(3): 97-99)
- 166 Tang Y M. The Research of Electronic Stability Program Control Based on Direct Yaw Moment Control [Master dissertation], Changan University, China, 2009
- 167 Li Jing, Zhang Jian, Yang Kun, Wang Kun, Wei Qing, Wu Zhen-Xin. Development of ECU software and hardware-in-the-loop simulation for stability control of vehicle with electro-mechanical brake. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2011, **41**(4): 893-897
(李静, 张建, 杨坤, 王坤, 魏青, 吴振昕. 电子机械制动汽车稳定性控制电控单元软件开发及硬件在环试验. 吉林大学学报 (工学版), 2011, **41**(4): 893-897)
- 168 Xiong Lu, Yu Zhuo-Ping, Jiang Wei, Jiang Zao-Yun. Research on vehicle stability control of 4WD electric vehicle based on longitudinal force control allocation. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, **38**(3): 417-421, 426
(熊璐, 余卓平, 姜炜, 蒋造云. 基于纵向力分配的轮边驱动电动汽车稳定性控制. 同济大学学报 (自然科学版), 2010, **38**(3): 417-421, 426)
- 169 Hrovat D. Survey of advanced suspension development and related optimal control applications. *Automatica*, 1997, **33**(10): 1781-1817
- 170 Fialho I, Balas G J. Road adaptive active suspension design using linear parameter-varying gain-scheduling. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2002, **10**(1): 43-54
- 171 Li Y, Liu S J. Preview control of an active vehicle suspension system based on a four-degree-of-freedom half-car model. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Changsha, China: IEEE, 2009, **1**: 826-830
- 172 Tuan H D, Ono E, Apkarian P. Nonlinear H_∞ control for an integrated suspension system via parameterized linear matrix inequality characterization. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2001, **9**(1): 175-185
- 173 Smith M, Wang F C. Controller parameterization for disturbance response decoupling: application to vehicle active suspension control. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2002, **10**(3): 393-407
- 174 Chen H, Guo K H. Constrained H_∞ control of active suspension: an LMI approach. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, **13**(3): 412-421
- 175 Chen Hong, Ma Miao-Miao, Sun Peng-Yuan. Multi-objective control design for active suspensions: an LMI approach. *Acta Automatica Sinica*, 2006, **32**(3): 550-559
(陈虹, 马苗苗, 孙鹏远. 基于 LMI 优化的主动悬架多目标控制. 自动化学报, 2006, **32**(3): 550-559)

- 176 Chen Hong, Ma Miao-Miao, Sun Peng-Yuan. H_2 /generalized H_2 output feedback control for active suspensions. *Control Theory and Applications*, 2007, **24**(5): 790–794
(陈虹, 马苗苗, 孙鹏远. 主动悬架 H_2 /广义 H_2 输出反馈控制. 控制理论与应用, 2007, **24**(5): 790–794)
- 177 Ma M M, Chen H. Disturbance attenuation control of active suspension with non-linear actuator dynamics. *IET Control Theory and Application*, 2010, **5**(1): 112–122
- 178 Cao D P, Song X B, Ahmadian M. Editors' perspective: road vehicle suspension design, dynamics, and control. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 2011, **49**(1–2): 1–34
- 179 Dickmanns E D, Müller N. Scene recognition and navigation capabilities for lane changes and turns in vision-based vehicle guidance. *Control Engineering Practice*, 1996, **4**(5): 589–599
- 180 Gge D W. A brief history of unmanned ground vehicle (UGV) development efforts. *Unmanned Systems*, 1995, **13**: 9–32
- 181 Sukthankar R, Hancock J, Baluja S, Pomerleau D, Thorpe C. Adaptive intelligent vehicle modules for tactical driving. In: Proceedings of the 1996 AAAI-1996 Workshop on Intelligent Adaptive Agents. Portland, USA: The Robotics Institute, 1996. 13–22
- 182 Broggi A, Bertozzi M, Fascioli A, Lo C, Piazzini B. The ARGO autonomous vehicle's vision and control systems. *International Journal of Intelligent Control and Systems*, 1999, **3**(4): 409–441
- 183 Bertozzi M, Broggi A, Cardarelli E, Fedriga R I, Mazzei L, Porta P P. VIAC expedition toward autonomous mobility. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2011, **18**(3): 120–124
- 184 Sun Zhen-Ping. An Intelligent Control System for Autonomous Land Vehicle [Ph. D. dissertation], National University of Defense Technology, China, 2004
(孙振平. 自动驾驶汽车智能控制系统 [博士学位论文], 国防科学技术大学, 中国, 2004)
- 185 Iagnemma K, Buehler M. Editorial for journal of field robotics — special issue on the DARPA grand challenge, part 1. *Journal of Field Robotics*, 2006, **23**(8): 461–462
- 186 Iagnemma K, Buehler M. Editorial for journal of field robotics — special issue on the DARPA grand challenge, part 2. *Journal of Field Robotics*, 2006, **23**(9): 655–656
- 187 Shladover S E. Review of the state of development of advanced vehicle control systems. *Vehicle System Dynamics*, 1995, **24**(6–7): 551–595
- 188 Yamamura Y, Seto Y, Nishira H, Kawabe T. An ACC design method for achieving both string stability and ride comfort. *Journal of System Design and Dynamics*, 2008, **2**(4): 979–990
- 189 Yi K, Hong J, Kwon Y D. A vehicle control algorithm for stop-and-go cruise control. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2001, **215**(10): 1099–1115
- 190 Zhou Liang, Li Ke-Qiang, Lian Xiao-Min, Ukawa H, Handa M, Idonuma H. Vehicle-to-vehicle distance control algorithm for stop-go cruise control system. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, **44**(8): 1138–1141
(周亮, 李志强, 连小珉, Ukawa H, Handa M, Idonuma H. “起—停”巡航控制系统的纵向车距控制方法. 清华大学学报 (自然科学版), 2004, **44**(8): 1138–1141)
- 191 Wu Mo, An Xiang-Jing, He Han-Gen. On vision-based lane departure detection approach. *Journal of Image and Graphics*, 2007, **12**(1): 110–115
(吴沫, 安向京, 贺汉根. 基于视觉的车道跑偏检测方法研究及仿真. 中国图象图形学报, 2007, **12**(1): 110–115)
- 192 Parag H B. Driver-Adaptive Lane Departure Warning Systems [Ph. D. dissertation], Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 1999
- 193 Muller B, Deutscher J, Grodde S. Trajectory generation and feedforward control for parking a car. In: Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications. Munich, Germany: IEEE, 2006. 163–168
- 194 Dakhllallah J, Glaser S, Mammari S. Tire-road forces estimation using extended Kalman filter and sideslip angle evaluation. In: Proceedings of the 2008 American Control Conference. Seattle, USA: IEEE, 2008. 4597–4602
- 195 Baffet G, Charara A, Lechner D, Thomas D. Experimental evaluation of observers for tire-road forces, sideslip angle and wheel cornering stiffness. *Vehicle System Dynamics*, 2008, **46**(6): 501–520
- 196 Matuško J, Petrović I, Perić N. Neural network based tire/road friction force estimation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2008, **21**: 442–456
- 197 El Hajjaji A, Chadli M, Oudghiri M, Pages O. Observer-based robust fuzzy control for vehicle lateral dynamics. In: Proceedings of the 2006 American Control Conference. Minneapolis, USA: IEEE, 2006. 4664–4669
- 198 Zhao H Y, Chen H. Estimation of vehicle yaw rate and sideslip angle using moving horizon strategy. In: Proceedings of the 6th World Congress on Control and Automation. Dalian, China: IEEE, 2006. 1828–1832
- 199 Zhao Lin-Hui, Liu Zhi-Yuan, Chen Hong. Approach to non-linear estimation of vehicle state. *Journal of System Simulation*, 2009, **21**(6): 1710–1718
(赵林辉, 刘志远, 陈虹. 一种车辆状态的非线性估计方法研究. 系统仿真学报, 2009, **21**(6): 1710–1718)
- 200 Ehsani M, Gao Y M, Gay S E, Emadi A. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory and Design*. Boca Raton: CRC, 2004
- 201 Sundström O, Soltic P, Guzzella L. A transmission-actuated energy-management strategy. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, **59**(1): 84–92
- 202 Chen Z, Mi C C. An adaptive online energy management controller for power-split HEV based on dynamic programming and fuzzy logic. In: Proceedings of the 2009 Vehicle Power and Propulsion Conference. Dearborn, United States: IEEE, 2009. 335–339
- 203 Streib H M, Leonhard R. Hierarchical control strategy for powertrain functions. In: Proceedings of the 1992 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 1992. 925052
- 204 Shen Ming-Xing, Yang Nong-Lin. Modeling and simulation of fuzzy logic control strategy on parallel hybrid electrical vehicle. *Machinery and Electronics*, 2006, (12): 50–53
(沈明星, 杨农林. PHEV 模糊逻辑控制策略的建模与仿真. 机械与电子, 2006, (12): 50–53)
- 205 Staffan J. Shunt and Shuffle Evaluation for Vehicle Powertrains [Master dissertation], Chalmers University of Technology, Swedish, 2004
- 206 Staffan J, Eirik L, Stefan P. Objective evaluation of shunt and shuffle in vehicle powertrains. In: Proceedings of the 7th International Symposium on Advanced Vehicle Control. Arnhem, Netherlands: Nature Science, 2004

- 207 Gu Yan-Chun, Yin Cheng-Liang, Zhang Jian-Wu. Investigation to coordinated torque control strategy of parallel hybrid electric vehicles. *Journal of System Simulation*, 2007, **19**(3): 631–636
(古艳春, 殷承良, 张建武. 并联混合动力汽车扭矩协调控制策略仿真研究. 系统仿真学报, 2007, **19**(3): 631–636)
- 208 Miller J M. Power electronics in hybrid electric vehicle applications. In: Proceedings of the 2003 Applied Power Electronic Conference and Exposition. Miami Beach, USA: IEEE, 2003. 23–29
- 209 Ishikawa K, Suda K, Sasaki M, Miyazaki H. A 600 V driver IC with new short protection in hybrid electric vehicle IGBT inverter system. In: Proceedings of the 17th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. Sanata Barbara, USA: IEEE, 2005. 59–62
- 210 Guo Jun, Li Xue-Feng, Tang Guang-Di, Liu Wen-Zhou. Optimization control method of series hybrid electric vehicle APU. *Bus Technology and Research*, 2009, **31**(4): 13–15
(郭俊, 李雪峰, 唐广迪, 刘文洲. 串联式混合动力汽车 APU 优化控制方法. 客车技术与研究, 2009, **31**(4): 13–15)
- 211 Sun Feng-Chun, Shen Tong-Quan, Cheng Xi-Ming, Mou Bing-Heng. Identification for the auxiliary power unit in a hybrid electric vehicle. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, **27**(9): 777–781
(孙逢春, 沈同全, 程夕明, 牟炳恒. 混合动力电动汽车辅助功率单元模型辨识. 北京理工大学学报, 2007, **27**(9): 777–781)
- 212 Wu Shao-Jian, Tao Yuan-Fang. Concept and design of extended range electric vehicles. *Mechanical Engineering and Automation*, 2010, (5): 209–210, 213
(吴韶建, 陶元芳. 增程式电动汽车的概念与设计. 机械工程与自动化, 2010, (5): 209–210, 213)
- 213 Wolschendorf J, Rzemien K, Gian D J. Development of electric and range-extended electric vehicles through collaboration partnerships. In: Proceedings of the 2010 SAE World Congress. Detroit, USA: 2010. 2010-01-2344
- 214 Cheng K W E, Divakar B P, Wu H J, Ding K, Ho H F. Battery-management system (BMS) and SOC development for electrical vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, **60**(1): 76–88
- 215 Lin Cheng-Tao, Wang Jun-Ping, Chen Quan-Shi. Methods for state of charge estimation of EV batteries and their application. *Battery Bimonthly*, 2004, **34**(5): 376–378
(林成涛, 王军平, 陈全世. 电动汽车 SOC 估计方法原理与应用. 电池, 2004, **34**(5): 376–378)
- 216 Piller S, Perrin M, Jossen A. Methods for state-of-charge determination and their applications. *Journal of Power Sources*, 2001, **96**(1): 113–120
- 217 You Shuang. SOC Estimating of Ni/MH Battery Band Using Neural Network [Master dissertation], Tianjin University, China, 2007
(游双. 镍氢电池组 SOC 神经网络估算策略研究 [博士学位论文], 天津大学, 中国, 2007)
- 218 Lin Cheng-Tao, Chen Quan-Shi, Wang Jun-Ping, Huang Wen Hua, Wang Yan Chao. Improved Ah counting method for state of charge estimation of electric vehicle batteries. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2006, **46**(2): 247–251
(林成涛, 陈全世, 王军平, 黄文华, 王燕超. 用改进的安时计量法估计电动汽车动力电池 SOC. 清华大学学报 (自然科学版), 2006, **46**(2): 247–251)
- 219 Salkind A J, Fennie C, Singh P, Atwater T, Reisner D E. Determination of state-of-charge and state-of-health of batteries by fuzzy logic methodology. *Journal of Power Sources*, 1999, **80**(1–2): 293–300
- 220 Xu L, Wang J P, Chen Q S. Kalman filtering state of charge estimation for battery management system based on a stochastic fuzzy neural network battery model. *Energy Conversion and Management*, 2012, **53**(1): 33–39
- 221 Chan C C, Lo E W C, Shen W X. The available capacity computation model based on artificial neural network for lead-acid batteries in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 2000, **87**(1–2): 201–204
- 222 Domenico D D, Fiengo G, Stefanopoulou A. Lithium-ion battery state of charge estimation with a Kalman filter based on an electrochemical model. In: Proceedings of the 2008 IEEE Conference on Control Applications. San Antonio, USA: IEEE, 2008. 702–707
- 223 Dai Hai-Feng, Wei Xue-Zhe, Sun Ze-Chang. Estimate state of charge of power lithium-ion batteries used on fuel cell hybrid vehicle with method based on extended Kalman filtering. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, **43**(2): 92–95, 103
(戴海峰, 魏学哲, 孙泽昌. 基于扩展卡尔曼滤波算法的燃料电池车用锂离子动力电池荷电状态估计. 机械工程学报, 2007, **43**(2): 92–95, 103)
- 224 He H W, Xiong R, Zhang X W, Sun F C, Fan J X. State-of-charge estimation of the lithium-ion battery using an adaptive extended Kalman filter based on an improved thevenin model. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, **60**(4): 1461–1469
- 225 Wang J P, Guo J G, Ding L. An adaptive Kalman filtering based state of charge combined estimator for electric vehicle battery pack. *Energy Conversion and Management*, 2009, **50**(12): 3182–3186
- 226 Ehret C, Piller S, Schroer W, Jossen A. State-of-charge determination for lead-acid batteries in PV-applications. In: Proceedings of the 2000 European Photovoltaic Solar Energy Conference. Glasgow, UK: SIGLE, 2000. 1–4
- 227 Pei Sheng, Chen Cheng-Quan, Lin Cheng-Tao. Study on estimating method for battery state of charge based on support vector regression. *Chinese Journal of Power Sources*, 2007, **31**(3): 242–243, 252
(裴晟, 陈成全, 林成涛. 基于支持向量回归的电池 SOC 估计方法研究. 电源技术, 2007, **31**(3): 242–243, 252)
- 228 Hansen T, Wang C J. Support vector based battery state of charge estimator. *Journal of Power Sources*, 2005, **141**(2): 351–358
- 229 Kim I S. Nonlinear state of charge estimator for hybrid electric vehicle battery. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, **23**(4): 2027–2034
- 230 Kim I S. A technique for estimating the state of health of lithium batteries through a dual-sliding-mode observer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, **25**(4): 1013–1022
- 231 Bose C S C, Laman F C. Battery state of health estimation through coup de fouet. In: Proceedings of the 2000 Telecommunications Energy Conference. Phoenix, USA: IEEE 2000. 597–601
- 232 Damlund I. Analysis and interpretation of AC-measurements on batteries used to assess state-of-health and capacity-condition. In: Proceedings of the 1995 IEEE Telecommunications and Energy Conference. Hague, Netherlands: IEEE, 1995. 828–833

- 233 Cox D C, Perez-Kite R. Battery state of health monitoring combining conductance technology with other measurement parameters for real-time battery performance analysis. In: Proceedings of the 2000 IEEE Telecommunications and Energy Conference. Phoenix Arizona, USA: IEEE, 2000. 342–347
- 234 Jordy C, Liska J L, Saft M. Life duration of saft Ni-MH batteries for EV application. In: Proceedings of the 1999 Electrical Vehicles Symposium. Beijing, China: EVS16, 1999. 10
- 235 Ning G, Haran B, Popov B N. Capacity fade study of lithium-ion batteries cycled at high discharge rates. *Journal of Power Sources*, 2003, **117**(1–2): 160–169
- 236 Ramadass P, Haran B, Whit R, Popov B N. Mathematical modeling of the capacity fade of li-ion cells. *Journal of Power Sources*, 2003, **123**(2): 230–240
- 237 Salkind A J, Fennie C, Singh P, Atwater T, Reisner D E. Determination of state-of-charge and state-of-health of batteries by fuzzy logic methodology. *Journal of Power Sources*, 1999, **80**(1–2): 293–300
- 238 Tanaami A, Morimoto M. On-line estimation of SOH for lead-acid battery. In: Proceedings of the 2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Taipei, China: IEEE, 2009. 1552–1555
- 239 Chiang Y H, Sean W Y. Dynamical estimation of state-of-health of batteries by using adaptive observer. In: Proceedings of the 2009 International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System. Shenzhen, China: IEEE, 2009. 110–115
- 240 Singh P, Kaneria S, Broadhead J, Wang X, Burdick J. Fuzzy logic estimation of SOH of 125Ah VRLA batteries. In: Proceedings of the 26th Annual International Telecommunications Energy Conference. Chicago, USA: IEEE, 2004. 524–531
- 241 Barlak C, Özkazanc Y. A classification based methodology for estimation of state-of-health of rechargeable batteries. In: Proceedings of the 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering. Bursa, Turkey: IEEE, 2009. 101–105
- 242 Gould C R, Bingham C M, Stone D A, Bentley P. New battery model and state-of-health determination through subspace parameter estimation and state-observer techniques. *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, 2009, **58**(8): 3905–3916
- 243 Chan C C, Chau K T. An advanced permanent magnet motor drive system for battery-powered electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1996, **45**(1): 180–188
- 244 Chan C C, Chau K T. An overview of power electronics in electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1997, **44**(1): 3–13
- 245 Liu Chang-Li. Choice for motor of EV drive systems. *Automotive Technology*, 1996, (5): 59–62
(柳长立. 电动汽车驱动系统的电动机选择. 汽车技术, 1996, (5): 59–62)
- 246 Bose B K. *Power Electronics and Variable Frequency Drives: Technology and Applications*. New York: Wiley-IEEE Press, 1996
- 247 Li Yong-Dong. *AC Motor Digital Control System*. Beijing: China Machine Press, 2003
(李永东. 交流电机数字控制系统. 北京: 机械工业出版社, 2003)
- 248 Li Hua-De. *Automatic Control System of Electric Traction*. Beijing: China Machine Press, 2009
(李华德. 电力拖动自动控制系统. 北京: 机械工业出版社, 2009)
- 249 Li Chong-Jian. Study of control system for AC drives. *Power Electronics*, 2004, **2**(1): 20–23
(李崇坚. 交流电机变频调速控制系统的探讨. 电力电子, 2004, **2**(1): 20–23)
- 250 Singh B, Jain P, Mittal A P, Gupta J R P. Direct torque control: a practical approach to electric vehicle. In: Proceedings of the 2006 IEEE Power India Conference. New Delhi, India: IEEE, 2006. 842–845
- 251 Xu J Q, Ouyang M G, Tang R Y. Study on direct torque control of permanent magnet synchronous motor in electric vehicle drive. In: Proceedings of the 9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control. Istanbul, Turkey: IEEE, 2006. 774–777
- 252 Liu X, Ma C B, Li M, Xu M. A kriging assisted direct torque control of brushless DC motor for electric vehicle. In: Proceedings of the 7th International Conference on Natural Computation. Shanghai, China: IEEE, 2011. 1705–1710
- 253 Casadei D, Serra G, Tani A. Implementation of a direct control algorithm for induction motors based on discrete space vector modulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2000, **15**(4): 769–777
- 254 He Xin-Jun, Zhang Yue-Qin, Zhang Wen-Xi. Grey-fuzzy controller applied in direct torque control of induction motors. *Journal of Hunan Institute of Engineering*, 2011, **11**(3–4): 9–12
(何新军, 张跃勤, 张文希. 分段解析灰色模糊控制在直接转矩控制中的应用. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2011, **11**(3–4): 9–12)
- 255 Chen Bao-Lin, Hu Yu-Wen. Speed-sensorless direct torque control system of an induction motor. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2000, **21**(3): 277–278
(陈宝林, 胡育文. 异步电动机的无速度传感器直接转矩控制系统研究. 航空学报, 2000, **21**(3): 277–278)
- 256 Dybkowski M, Orłowska-Kowalska T. Application of the stator current-based MRAS speed estimator in the sensorless induction motor drive. In: Proceedings of the 13th International Power Electronics and Motion Control Conference. Poznan, Poland: IEEE, 2008. 2306–2311
- 257 He Zhi-Wei, Wang Yong, Xue Feng. Adaptive speed estimation of induction motor and its application in DTC system. *Electric Drive*, 1999, **3**(27): 15–26
(何志伟, 王勇, 薛峰. 感应电动机自适应速度辨识及其在直接转矩控制系统中的应用. 电气传动, 1999, **3**(27): 15–26)
- 258 Yusivar F, Uchida K, Haratsu H, Wakao S, Onuki T. Speed adaptive observer for sensorless IM drive using combined reference frames. In: Proceedings of the 15th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. New Orleans, USA: IEEE, 2000. 127–132
- 259 Shi K L, Chan T F, Wong Y K, Ho S L. Speed estimation of an induction motor drive using an optimized extended Kalman filter. *IEEE Transactions on Industry Electronics*, 2002, **49**(1): 124–133
- 260 Crus P P, Rivas J J. A small neural network structure application in speed estimation of an induction motor using direct torque control. In: Proceedings of the 32nd IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. Vancouver, Canada: IEEE, 2001. 823–827

- 261 Rodic M, Jezernik K, Sabanovic A. Speed sensorless sliding mode torque control of induction motor. In: Proceedings of the 35th IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy. Rome, Italy: IEEE, 2000. 1820–1827
- 262 Nakamura E, Soga M, Sakai H A. Development of electronically controlled brake system for hybrid vehicle. In: Proceedings of the 2002 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 2002. 2002-01-0300
- 263 Gao Y M, Ehsani M. Electronic braking system of EV and HEV integration of regenerative braking, automatic braking forces control and ABS. In: Proceedings of the 2001 SAE World Congress. Detroit, USA: SAE, 2001. 2001-01-2478
- 264 Ehsani M, Gao Y M, Bulter K L. Application of electrically peaking hybrid (ELPH) propulsion system to a full-size passenger car with simulated design verification. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1999, **48**(6): 1779–1787
- 265 Hakiia M, Taichi T, Shoda M, Koizumi T, Ashikaga T, Shimizu H. Brake system of “Eco-Vehicle”. In: Proceedings of the 14th International Electric Vehicle Symposium and Exposition. Orlando, USA: IEVS, 1997
- 266 Li Peng. Regenerative Braking Control Strategy Simulation for a Mild HEV [Master dissertation], Tsinghua University, China, 2006
(李蓬. 轻度混合动力电动汽车制动能量回收控制策略仿真 [硕士学位论文], 清华大学, 中国, 2006)
- 267 Cikanek S R, Bailey K E. Regenerative braking system for a hybrid electric vehicle. In: Proceedings of the 2002 American Control Conference. Anchorage, USA: IEEE, 2002. 3129–3134
- 268 Falcone P, Pakazad S K, Solyom S. Predictive approaches to rear axle regenerative braking control in hybrid vehicles. In: Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control. Shanghai, China: IEEE, 2009. 7627–7632
- 269 Zou Ji-Yong. Study on Control Strategy for Electric Vehicle [Ph. D. dissertation], Tianjin University, China, 2007
(邹积勇. 电动汽车控制策略研究 [博士学位论文], 天津大学, 中国, 2007)
- 270 Peng Dong. Study on Combined Control of Regenerative Braking and Anti-Lock Braking System for Hybrid Electric Vehicle [Ph. D. dissertation], Shanghai Jiao Tong University, China, 2007
(彭栋. 混合动力汽车制动能量回收与 ABS 集成控制研究 [博士学位论文], 上海交通大学, 中国, 2007)
- 271 Yu X P, Shen T L, Li G Y, Hikiri K. Regenerative braking torque estimation and control approaches for a hybrid electric truck. In: Proceedings of the 2010 American Control Conference. Baltimore, USA: IEEE, 2010. 5832–5837



陈虹 吉林大学控制科学与工程系教授。1997 在德国斯图加特大学获工学博士学位。主要研究方向为预测控制, 鲁棒控制, 非线性控制和汽车控制。本文通信作者。E-mail: chenh@jlu.edu.cn
(**CHEN Hong** Professor at Jilin University. She received her Ph.D. degree from the University of Stuttgart,

Germany in 1997. Her research interest covers model predictive control, nonlinear control, optimal and robust control, and automotive control. Corresponding author of this paper.)



宫洵 吉林大学控制科学与工程系博士研究生。主要研究方向为发动机控制。E-mail: gongxun10@mails.jlu.edu.cn
(**GONG Xun** Ph. D. candidate in the Department of Control Science and Engineering, Jilin University. His main research interest is engine control.)



胡云峰 吉林大学控制科学与工程系讲师。2012 年获得吉林大学控制理论与控制工程专业博士学位。主要研究方向为汽车发动机控制。E-mail: huyunfeng83125@126.com
(**HU Yun-Feng** Lecturer in the Department of Control Science and Engineering, Jilin University. He received

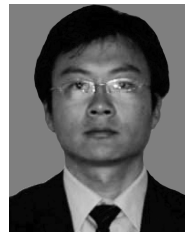
his Ph. D. degree from Jilin University in 2012. His main research interest is engine control.)



刘奇芳 吉林大学控制科学与工程系博士研究生。主要研究方向为车辆传动控制, 发动机控制。E-mail: liuqf11@mails.jlu.edu.cn

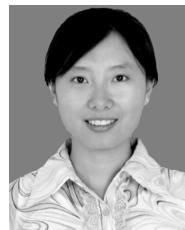
(**LIU Qi-Fang** Ph. D. candidate in the Department of Control Science and Engineering, Jilin University. Her research interest covers engine control

and powertrain control.)



高炳钊 吉林大学车辆工程系副教授。2009 年获得吉林大学控制理论与控制工程专业博士学位。主要研究方向为车辆传动控制。E-mail: gaobz@jlu.edu.cn
(**GAO Bing-Zhao** Associate professor at Jilin University. He received his Ph. D. degree in control theory and engineering from Jilin University in 2009.

His main research interest is vehicle powertrain control.)



郭洪艳 吉林大学控制科学与工程系讲师。2010 年获得吉林大学控制理论与控制工程专业博士学位。主要研究方向为车辆主动安全控制, 车辆状态参数估计。E-mail: guohongyan220@163.com
(**GUO Hong-Yan** Lecturer in the Department of Control Science and Engineering, Jilin University. She received

her Ph. D. degree from Jilin University in 2010. Her research interest covers vehicle active safety control and vehicle state and parameters estimation.)