

汽车自适应巡航控制系统研究现状与发展趋势

吴光强^{1,2}, 张亮修¹, 刘兆勇¹, 郭晓晓¹

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 东京大学 生产技术研究所, 东京 153-8505)

摘要: 作为传统定速巡航的升级, 自适应巡航控制 (adaptive cruise control, ACC) 系统可以提高驾驶舒适性和行车安全性。论文概述了 ACC 系统的发展历程, 从环境感知技术、驾驶员跟车行为特性、车辆动力学建模、ACC 系统控制算法、ACC 系统功能扩展等方面对近年来 ACC 系统的最新研究成果进行了详细论述, 在此基础上讨论并展望了 ACC 系统研究的共性问题与发展趋势。

关键词: 自适应巡航控制; 环境感知; 驾驶员跟车特性; 车辆动力学建模; 控制算法

中图分类号: U27

文献标志码: A

Research Status and Development Trend of Vehicle Adaptive Cruise Control Systems

WU Guangqiang^{1,2}, ZHANG Liangxiu¹, LIU Zhaoyong¹, GUO Xiaoxiao¹

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Tokyo 153-8505, Japan)

Abstract: As the upgraded system of traditional cruise control, the adaptive cruise control (ACC) system can improve the driving comfort and safety. The development stages of ACC system were explicated in this paper. The latest research achievements of ACC system in recent years were discussed in detail from the aspects of environmental perception, tracking behavior of driver, vehicle dynamic modeling, ACC system control algorithm, and function extension of ACC. Based on these achievements, the common problems of ACC were summarized and some viewpoints on the trend of the future developments were given.

Key words: adaptive cruise control; environment perception; driver tracking system; vehicle modeling; control algorithm

过 10 万人, 其中驾驶员人为原因 (疲劳、酒驾、误操作等) 所致事故逐渐升高^[1]。汽车交通事故引起的人员伤亡、经济损失、道路拥堵等已演变成重大社会问题。

为解决上述问题, 交通法规、安全技术等各种交通安全措施随之诞生并不断发展, 其中汽车安全技术是保障道路交通安全的关键。汽车安全技术分为被动安全技术和主动安全技术。从 20 世纪 80 年代开始的安全气囊、安全带等被动安全技术, 再到 90 年代逐渐出现且成为标配的制动防抱死系统 (anti-lock braking system, ABS)、电子稳定控制 (electronic stability control, ESC) 系统等主动安全技术, 都在一定程度上起到了保证人们财产安全的作用。进入 21 世纪, 汽车主动安全技术愈发被重视, 从预警系统、独立控制、集成控制、智能驾驶到无人驾驶等主动安全技术方面都获得了飞速发展, 其中自适应巡航控制 (adaptive cruise control, ACC)、车道偏离预警 (lane departure warning, LDW)、前方碰撞预警 (front collision warning, FCW) 等汽车先进驾驶辅助系统 (advanced driver assistance systems, ADAS) 成为防止交通事故的新一代前沿技术^[2]。

1 自适应巡航控制系统

自适应巡航控制 (ACC) 系统又称主动巡航控制系统, 是在传统定速巡航控制基础上结合了车距保持功能, 利用车载雷达探测前方行驶环境, 通过控制节气门和制动系统自动调整车速, 提高驾驶舒适性和安全性。

ACC 的历史可以追溯至 20 世纪 70 年代, 1971 年, 美国 EATON (伊顿) 公司便已从事这方面的开发, 其雏形是日本三菱公司提出的 PDC (preview

据统计, 我国交通事故造成的伤亡人数每年超

收稿日期: 2016-04-08

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB0100905); 上海汽车工业科技发展基金 (1526)

第一作者: 吴光强 (1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车现代设计理论与方法以及车辆动力学控制。

E-mail: wuguangqiang@tongji.edu.cn

distance control)系统. 1995 年三菱汽车在日本市场推出首款 ACC 系统,此后丰田、本田、通用、福特、戴姆勒、博世等公司也投入研发行列. 纵观 ACC 系统的发展历程,可以分为三个阶段:第一阶段为 20 世纪 90 年代初针对高速公路的 ACC 系统,主要实现定速巡航和安全车距功能;第二阶段为 20 世纪 90 年代末针对城市工况的 ACC 系统,即起-停巡航系统(stop & go cruise control, SG-ACC),实现自动起步、停车和低速跟车功能;第三阶段为 21 世纪初至今综合考虑燃油经济性、跟踪性能和驾驶员感受的多目标协调式 ACC 系统^[3]. 此外,ACC 的功能也在不断扩展,如将 ACC 与车道保持相结合^[4]、ACC 与避撞相结合^[5]、ACC 与车道变更相结合^[6]等,突破传统 ACC 仅纵向跟车功能局限,进一步实现汽车辅助安全驾驶.

目前,ACC 系统主要装备在各大汽车公司中高档轿车上,国内缺乏成熟的 ACC 生产制造商. 国内外科研机构、高等院校等对 ACC 技术进行了深入研究,并取得了阶段性的进展.

2 ACC 系统研究现状

2.1 环境感知

ACC 系统的环境感知可以通过毫米波雷达、摄像头、激光雷达等实现. 表 1 为环境感知传感器比较.

表 1 环境感知传感器比较

Tab.1 Comparison of sensors

ACC 传感器	探测范围	优点	缺点
毫米波雷达 (radar)	77 GHz, 200 m 24 GHz, 20 m	性能稳定,不易受天气影响; 探测距离远,直接获取距离和速度; 多目标跟踪能力强	图形识别受限;无法识别静止物体
激光雷达 (lidar)	360°扫描最远达到 150 m	方向性强,波束窄,识别能力和侧向探测能力强; 更大扫描范围	环境适应性较差; 探测距离有限,不能直接获取车速
视觉摄像头 (vision)	立体, 40~50 m 单目, 150~200 m	获取更多环境信息; 识别静态物体	信息处理需要时间; 恶劣天气时精度大大降低

目前环境感知研究热点主要有雷达与机器视觉融合、弯道工况前车跟踪和前方多车辆复杂行车环境目标选择及跟踪等.

文献[7]研究了车载雷达对前方目标车辆探测和追踪,并用 Kalman 滤波进行目标的有效性检验. 为了克服雷达传感器难以探测静止目标的限制,文

献[8]提出了利用雷达与机器视觉融合来实现前方物体识别,利用雷达判断前方障碍物的运行状态(静止/移动),利用机器视觉对车道线以及障碍物相对车道线的位置进行判断,然后融合上述信息对障碍物类型进行识别.

文献[9-10]研究了弯道行驶工况的车辆跟踪算法,其中文献[9]基于相关系数检验法对目标车辆进/出弯道及换道所对应的拟合回归方程进行拟合优度检验,并利用单回旋线道路模型对前车与自车的相对横向距离进行估计,基于 t 检验法对弯道工况中的本车道前车、邻车道前车及路边障碍物进行识别与区分. 如图 1 所示,文献[10]推导出前车进/出弯道时两车相对方位角和相对速度的关系为

$$\theta = \frac{(v_{lat}/v_0 - L/R_0)^2 - (L/R_0 - L/R)L/R_0}{2L(1/R - 1/R_0)} \quad (1)$$

式中: θ 为前车相对自车的方位角; v_{lat} 为相对速度的横向分量; v_0 为自车速度; L 为两车相对距离; R 为前车所在位置的道路半径; R_0 为自车所在位置的道路半径.

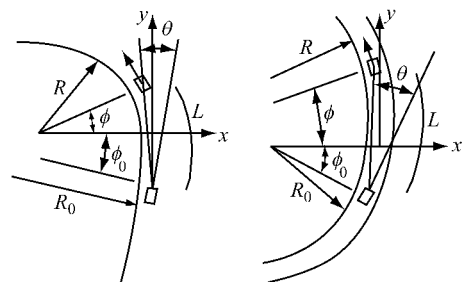


图 1 前车进/出弯道

Fig.1 Preceding vehicle ahead into/out curved road

针对汽车复杂的行车环境,文献[11]提出一种解决多车辆目标环境下的 ACC 算法,对由雷达、激光和摄像头获得的复杂交通场景建模,并通过混杂系统理论获得最优加速度. Moon 等^[12]针对多个车辆的交通环境提出目标车辆选择方法,如图 2 所示.

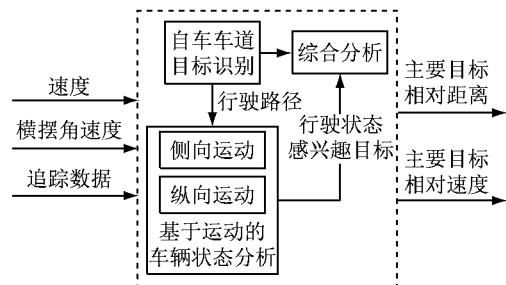


图 2 多车辆目标选择算法

Fig.2 Selection algorithm for multi-vehicle targets

对基于雷达/摄像头系统的车辆识别技术已经开展了较多的研究,但对于静态目标和复杂多变的行车环境(起伏坡道顶端、弯道、大雪、暴雨、结冰等),其环境感知的可靠性和鲁棒性仍是研究热点。

2.2 驾驶员行为特性

自适应巡航控制特性和驾驶员跟车特性的符合程度直接影响驾驶员乘坐感受.与 ACC 相关的驾驶员行为特性包括驾驶员期望车距特性和动态跟车特性。

2.2.1 驾驶员期望车距

驾驶员期望车距是指跟车过程中自车与前车保持的安全车距,该距离必须同时兼顾行车安全和道路交通效率两方面的要求,且能够真实反映实际驾驶员行车过程的心理和需求。

为了实现行车安全状态判断,国内外学者们提出了多种期望车距模型,文献[13]将期望距离模型总结为 3 种,并给出了各自的代表性表达式,分别为

$$D_{s,brk} = v_f t_d + \frac{v_f^2}{2a_{fmax}} + d_0 \quad (2)$$

$$D_{s,h} = v_f t_h + d_0 \quad (3)$$

$$D_{s,pre} = v_{rel} t_g - \frac{a_p t_g^2}{2} + X_{lim} \quad (4)$$

式中: $D_{s,brk}$ 为基于制动过程运动学分析的期望距离; v_f 为自车车速; t_d 为驾驶员和制动系统延迟时间; a_{fmax} 为自车最大制动减速度; d_0 为自车停止后与前车距离; $D_{s,h}$ 为基于车间时距的期望车距; t_h 为车间时距; $D_{s,pre}$ 为驾驶员预瞄安全车距; v_{rel} 为相对车速; t_g 为预瞄时间; a_p 为前车加速度; X_{lim} 为驾驶员主观感觉的界限车间距离.其中,车间时距车距模型应用最广。

车间时距按照是否可变,分为固定车间时距^[14]和可变车间时距^[15],固定车间时距比较简单,不能适应较为复杂的工况.文献[15-16]分别给出了考虑自车车速和相对车速的可变车间时距,分别为

$$t_h = h_2 + h_3 v_f \quad (5)$$

$$t_h = t_0 - c_v v_{rel} \quad (6)$$

式中: h_2, h_3, t_0, c_v 为参数. t_h 与自车车速或相对车速成正比。

期望车距按照形式可分为线性期望车距^[17]和非线性期望车距^[18].文献[19]通过高速公路大量行驶数据拟合,得出了指数形式的安全车距模型;美国 Michigan 智能交通研究所提出了二次曲线的安全车距模型。

韩国汉阳大学把驾驶员期望车距与自车车速的关系近似为二次函数形式,建立二次型期望车距模

型^[20]为

$$d_{des} = av_f^2 + bv_f + c \quad (7)$$

式中: d_{des} 为期望车距; a, b, c 为模型系数。

文献[3]认为式(7)中 a, b, c 缺乏明确的物理含义,将二次项在平均车速处 Taylor 展开,整理为各系数具有明确物理含义的二次型模型,即

$$d_{des} = rv_f(v_f - v_{fmean}) + \tau_h v_f + d_0 \quad (8)$$

式中: r 为二次项系数; τ_h 为车间时距; v_{fmean} 为跟车工况的平均车速。

由于驾驶员的多样性和复杂性,二次型非线性期望车距模型要比线性车距更加准确,在一定程度上体现驾驶员的跟车期望。

2.2.2 驾驶员动态跟车特性

驾驶员动态跟车特性是指动态跟车过程中,驾驶员采用的加速度与车间状态和车辆状态的关系,反映了驾驶员调整自车运动轨迹的操作习惯,在一定程度上反映驾驶员期望车距特性,是某一种类型的微观交通流模型。

据文献[21]介绍,20 世纪 50 年代 Gipps 等人通过研究驾驶心理机制,以刺激-反应原理解释动态跟车过程,建立了跟车模型,即

$$a_f(t+T) = \lambda \Delta v(t) \quad (9)$$

式中: a_f 为自车加速度; $\Delta v(t)$ 为相对速度; λ 为驾驶员控制增益; T 为驾驶员反应时间.实车实验数据表明, λ 随不同驾驶员、不同车距和车速而发生变化。

为描述微观交通流特性,GM 公司提出线性结构的跟车模型^[22]为

$$a_f = K_V \Delta v + K_D \Delta d \quad (10)$$

式中: K_V 和 K_D 为驾驶员控制增益; Δd 为车距误差。

吉林大学利用预瞄跟随理论^[23]和模糊决策理论^[24]建立驾驶员最优预瞄加速度模型,并建立一种适用于多种典型行驶工况的 ACC 算法.为描述驾驶员控制增益的时变非线性,文献[25]在分析驾驶员对跟踪误差敏感度基础上,建立具有准线性结构且参数物理含义明确的驾驶员跟车模型为

$$\begin{cases} a_f = S_{VE} k_V (v_p - v_f) + S_{DE} k_D (d - d_{des}) \\ S_{VE}^{-1} = k_{SVE} v_f + d_{SVE} \\ S_{DE}^{-1} = k_{SDE} v_f + d_{SDE} \end{cases} \quad (11)$$

式中: k_V 和 k_D 为名义控制增益; S_{VE} 和 S_{DE} 为驾驶员对车速误差和车距误差的敏感度; d_{SVE} 和 d_{SDE} 分别为常数项系数.驾驶员跟车系统结构如图 3 所示。

许多学者还研究了驾驶员跟车过程的固有特性,如加速工况和制动工况的不对称性^[26],起-停工

况与高速工况的不一致性^[27],拥堵交通流的特殊跟车特性^[28]等,相继提出了多种驾驶员跟车模型.这些模型结构复杂,参数众多,含非线性环节,可较好模拟驾驶员的跟车特性.此外,对驾驶员跟车行为的研究还涉及到驾驶员对车辆安全跟车状态的期望模式^[27],驾驶员年龄、性别、心理、驾驶经验等特征对驾驶员跟车行为影响^[28-29],人工智能理论和方法应用等.

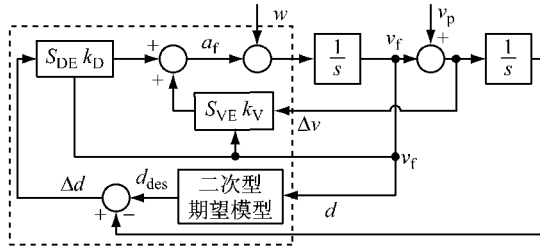


图3 驾驶员跟车系统结构

Fig.3 Driver tracking system

2.3 车辆动力学建模

车辆模型是控制系统设计、功能实现和仿真评价的基础.车辆模型根据复杂非线性程度和考虑因素不同,分为复杂车辆模型和简单车辆模型^[30].根据模型用途不同,分为仿真验证模型和控制器设计模型^[31].由于复杂车辆模型的高度非线性和复杂性,控制器设计模型要进行不同程度简化.

文献[32]建立了ACC系统纵向动力学模型,将理论分析模型和车辆实验数据结合,建立了模拟汽车主动避撞系统中车辆行驶复杂工况的纵向动力学模型.文献[33]采用线性化方法对比分析传动系统各部件对系统传递性的影响,总结出适合汽车纵向运动控制的简化数学模型,并应用灵敏度理论分析了系统传递特性对参数的敏感性.文献[34]建立了针对起-停巡航系统的纵向动力学模型.

考虑ACC系统的应用环境,车辆纵向动力学模型均给了不同程度的假设和简化^[3]:①忽略车辆横向和垂向运动;②发动机燃烧迟滞为一阶惯性环节,采用发动机速度特性描述发动机的转矩输出;③自动变速器的换档逻辑为节气门开度和车速的非线性函数;④忽略轮胎的滑移;⑤汽车左右完全对称,忽略前后轴载荷转移;⑥假设制动压力与制动力矩为固定增益关系,其动态特性由一阶惯性延迟环节描述.基于上述假设和简化,车辆纵向动力学模型为

$$\bar{T}_e = F_e(n, \alpha_t), T_e = \bar{T}_e \frac{1}{\tau_e s + 1} \quad (12)$$

$$I_e \dot{\omega}_e = T_e - T_c \quad (13)$$

$$I_t \dot{\omega}_t = T_c - \frac{T_{wp}}{i_g i_0}, \omega_w = \frac{\omega_t}{i_g i_0} \quad (14)$$

$$u = \omega_w r_{eff} \quad (15)$$

$$m \dot{u} = \frac{T_{wp}}{r_{eff}} - \frac{T_{wb}}{r_{eff}} - F_f - F_w - F_i \quad (16)$$

$$T_{wb} = \frac{K_b e^{-\tau_d s}}{\tau_b s + 1} p_{brk} \quad (17)$$

式中: \bar{T}_e 为发动机稳态输出扭矩; $F_e(*)$ 为发动机的稳态扭矩特性函数; n 为发动机转速; α_t 为节气门开度; T_e 为发动机动态输出扭矩; τ_e 为时间常数; s 为复变量; I_e 为与发动机转动部件相连的有效转动惯量; ω_e 为发动机飞轮角加速度; T_c 为离合器或液力变矩器传递力矩; I_t 为离合器从动部分和变速器传动轴等部件有效转动惯量; $\dot{\omega}_t$ 为离合器从动部分或液力变矩器涡轮等部件角加速度; ω_t 为离合器从动部分或液力变矩器涡轮等部件转动角速度; ω_w 为车轮角速度; i_g 为行星齿轮变速器速比为; i_0 为主减速器速比; u 为车速; r_{eff} 为轮胎有效半径; m 为整车质量; T_{wp} 为车轮驱动扭矩; T_{wb} 为车轮制动力矩; F_f 为车轮滚动阻力; F_w 为空气阻力; F_i 为坡度阻力; K_b 为制动系增益; p_{brk} 为制动压力; τ_b 为制动系时间常数; τ_d 为因制动压力传递延迟造成的时滞常数.

公式(12)~(17)给出的车辆纵向动力学模型仍存在发动机强静态非线性、液力变矩器非线性、变速器有级档位、二次型空气阻力和制动系时滞特性等问题.针对非线性问题,主要有两种处理方法:文献[35]采用非线性建模方案,利用滑模变结构控制等非线形设计方法处理纵向动力学模型中存在的非线性问题;还有一种是利用线性化方法将非线性对象转化为线性或准线性模型,如Taylor展开法^[36]、基于微分几何的输入输出线性化法^[37]以及逆模型法^[38]等.对于发动机等强非线性对象,Taylor展开法不可避免存在较大的线性化误差,而且理论上变速器有级档位无法使用Taylor展开.基于微分几何的输入输出线性化方法虽然理论上无线性化误差,但使用条件相对苛刻,不便于后续控制算法设计.逆模型方法无苛刻的应用条件,不要求被控对象光滑连续,能够补偿纵向动力学模型中的非线性,是解决车辆纵向非线性问题的有效措施.

逆模型方法需要建立车辆逆纵向动力学模型^[13,39],通常包括驱动/制动模式切换、期望发动机力矩和制动力矩计算、逆发动机模型和逆制动器模型组成.其中驱动/制动模式切换根据实车试验数据获得,取怠速工况下不同车速所能达到的最大减速度作为切换加速度,为避免节气门、制动器频繁切

换,通常在切换逻辑曲线上下两侧添加的缓冲层,如图 4 所示.

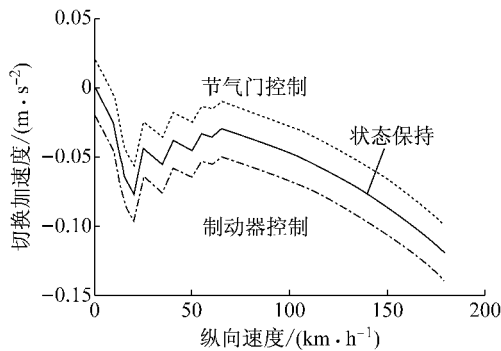


图 4 驱动/制动切换

Fig.4 Drive/brake switching

发动机逆模型和制动器逆模型是相对于发动机模型和制动器模型来说的,其中发动机逆模型根据发动机转速和需求扭矩,通过插值得到节气门开度,如图 5 所示;制动器逆模型根据纵向速度和纵向减速度得到制动压力,如图 6 所示.

由于车辆动力学模型与逆模型逆向相反,将车辆逆纵向动力学模型、执行器模型和车辆动力学模型组合在一起,形成具有线性输入输出特性的广义车辆纵向动力学系统,该系统输入为期望加速度,输出为实车加速度,输入输出增益近似为 1,如图 7 所示.

出为实车加速度,输入输出增益近似为 1,如图 7 所示.

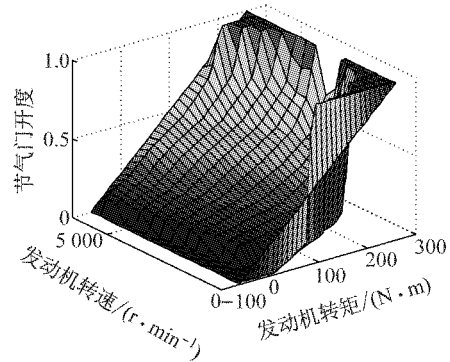


图 5 逆发动机模型

Fig.5 Reverse engine model

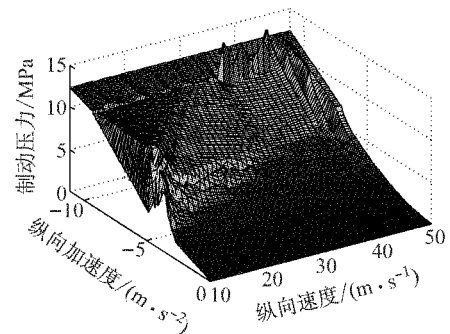


图 6 逆制动器模型

Fig.6 Reverse brake model

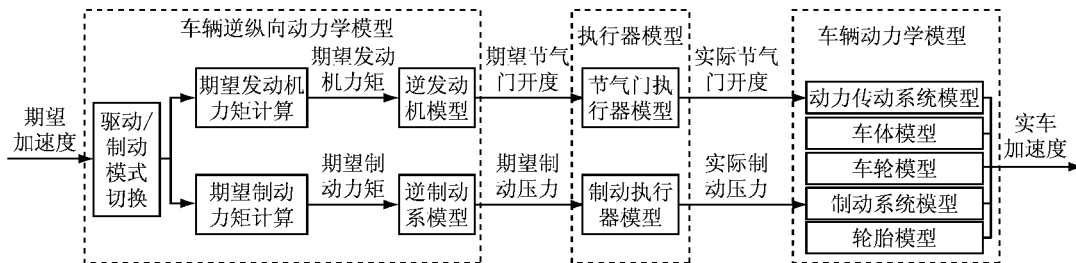


图 7 广义纵向车辆动力学模型

Fig.7 Generalized vehicle longitudinal model

为了获取准确的广义车辆纵向动力学系特性,多采用系统辨识方法来获取车辆特性,最终获得一阶惯性环节传递函数形式^[40]为

$$\ddot{x}(t) = \frac{K_G}{\tau s + 1}u(t) \quad (18)$$

式中: \ddot{x} 为车辆的实际加速度; u 为期望加速度,即ACC上层控制器计算得到的控制输入; K_G 和 τ 为传递函数的系统增益的时间常数.

上述仅建立了车辆特性的模型,还需结合车间状态,建立集成式纵向跟车模型^[3,37],作为后续控制器设计模型.车辆纵向动力学的复杂性使得逆模型建模存在较大困难,且模型误差会给控制器输出带来很大偏差;同时不同车辆之间的差异性使得控制

器难以在不同车辆上进行移植,对每种车型都需要建立相应模型,增加了设计难度和工作量.

2.4 ACC 系统控制算法

ACC工作模式如图 8 所示,可以实现速度控制(定速巡航)和距离控制(车距保持).距离控制根据行车工况的不同,分为稳态跟车、前车急减速、前车急加速、旁车切入、前车切出、远处接近前车、主动避撞 7 种模式^[41],而且要求模式切换时要平滑过渡.

如图 10 所示,ACC 控制多采用分层控制结构^[30],上层(或外层)控制重点描述驾驶员跟车行为特性,根据当前的行驶环境,以驾驶员跟车模型为依据,输出安全跟车所需期望加速度;下层(或内层)控

制依据上层得出的期望加速度或期望车速,通过节气门和制动器的切换控制,使得车辆的实际加速度能够追踪实现上层控制器期望加速度。

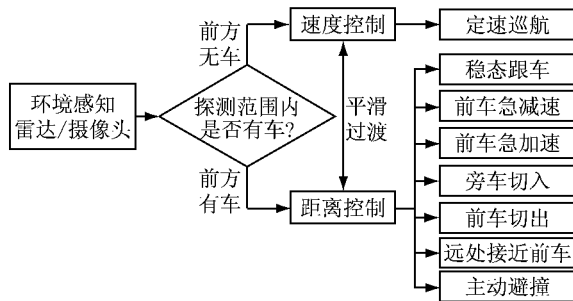


图 8 ACC 工作模式

Fig.8 ACC operating mode

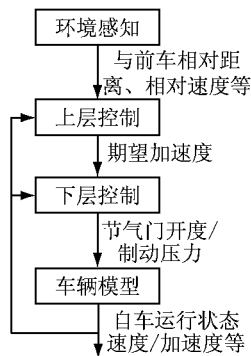


图 9 ACC 控制结构

Fig.9 ACC control structure

针对 ACC 车辆的定速巡航功能,多采用 PID (proportional, integrative, derivative)算法对其进行控制^[42]。而 ACC 车辆的距离控制以及速度控制与距离控制之间的平滑转换是 ACC 控制的难点,很多学者做了大量研究。典型控制算法有 PID 控制^[43]、基于固定车距模型设计的滑模变结构控制律^[44]、基于二次车距模型设计的非线性解耦控制律^[35]、自适应车间时距的线性二次型控制律^[45]、模型预测控制等。本文对近年来文献中涉及到的常用控制算法进行分析和归纳。

2.4.1 PID 控制

作为经典实用算法之一,PID 控制很早就被应用于 ACC 的定速和定距控制。如文献[43]利用 PID 算法调整 ACC 系统的间距误差和相对速度,通过零极点配置理论选取控制参数。文献[46]将 PI 控制和前馈思想相结合,设计了起-停 ACC 系统的下层控制,使得系统具有较快的响应速度,但鲁棒性较差。

2.4.2 最优控制

最优控制理论是在满足一定约束条件下,寻求

最优控制策略,使得性能指标取极大值或极小值。ACC 系统要求在满足安全车距、加速度等约束下,实现最佳跟车功能,是典型的最优控制问题。如文献[11]将多目标 ACC 控制问题转化为求解有限时间约束最优控制问题,通过动态规划方法求得最优反馈控制律。文献[47]针对起-停巡航控制,提出车距控制算法,取状态变量和控制量的二次型为性能指标,采用线性二次型最优控制理论确定理想加速度。

2.4.3 滑模变结构控制

滑模变结构控制(sliding mode control, SMC)根据系统所期望的动态特性设计滑模面,控制律使得系统从任意初始位置出发沿着滑模面到达系统原点。SMC 对于克服 ACC 系统的模型扰动、变量时滞等具有重要意义,在 ACC 系统中得到广泛应用。如文献[48]基于动态滑模方法设计可变时距的 ACC 系统,并分析了闭环系统的鲁棒稳定性。文献[49]利用 SMC 实现了混合动力汽车的自适应巡航控制。文献[50]在研究其加速度动态响应非线性特性的基础上,设计了一种基于 SMC 的模型匹配控制器。文献[51]从尽可能减少硬件成本而不影响期望性能和可靠性的角度,研究一种自动跟车终端滑模控制器,该控制器只用到传统雷达信息,不考虑前车加速度信息。

2.4.4 模糊逻辑与神经网络控制

模糊逻辑(fuzzy logic, FL)用于表达界限不清晰的定性知识与经验。人工神经网络(artificial neural networks, ANNs)能够根据环境的变化,对权值进行调整,改善系统的行为。由于 FL 和 ANNs 均具有非线性、自适应性等优点,被广泛应用于 ACC 系统。如文献[52]针对 ACC 和 SG-ACC,根据驾驶员经验提取出 13 条模糊规则,定义了速度误差、加速度、时间间距误差和导数 4 个模糊变量,分别设计了输出为节气门或制动的模糊控制器。文献[53]提出了一种基于自适应神经模糊推理系统的 ACC 预测系统,旨在减少车辆的能量损耗。文献[54]研究了熟练驾驶员在使用 ACC 时驾驶行为的适应过程,使用神经网络描述了基于反馈误差学习策略的驾驶员模型。文献[55]将模糊控制用于城市交通的 ACC 系统,并用遗传算法对其关键参数进行优化,弥补了单纯模糊控制难以解决 ACC 复杂任务的不足。

2.4.5 模型预测控制

模型预测控制(model predictive control, MPC)是 20 世纪 70 年代后期提出,近年来被广泛应用的

一种新型控制方法. 预测模型、滚动优化、反馈校正为预测控制的三个基本特征. 如文献[56]使用分段仿射系统的混合 MPC 方法解决跟车问题. 文献[57]把车辆的非线性动态模型进行线性化得到线性时不变模型, 将距离跟踪目标融入非线性 MPC.

清华大学在 MPC 应用和实用化方面做了较多研究. 文献[58]研究多目标 ACC 系统, 上层控制器基于 MPC 理论, 考虑最小误差、驾驶员感受和低油耗等多种约束条件, 使用二次规划方法得到最优控制律. 文献[59]提出 MPC 理论在 ACC 应用的 3 种实用化方法, 并在后续文献[60-61]中做了进一步的应用和验证. 针对混合动力车辆 ACC 控制, 文献[62]提出了具有稳态优化和动态协调的分层控制结构, 采用非线性 MPC, 优化协调安全性、舒适性和燃油经济性.

2.4.6 其他控制方法

文献[63]从 125 位驾驶员 1 809 个试验数据中分析得到实际行车车距特性, 采用量纲一的预警指标和碰撞时间的倒数估计驾驶场景, 设计了一种驾驶员可接受的全速域(full-rang) ACC 系统. 文献[64]将人为心理因素、车辆动态和控制理论融入到以人为中心的 ACC 系统设计中, 对比了人工驾驶和装备 ACC&FCW 辅助驾驶的实验结果.

为了克服目标车辆变化时车辆参数需要重新匹配的问题, 文献[65]提出了一种基于模型自由的巡航控制(model free cruise control, MFCC)策略. 文献[66]提出一种虚拟前车策略, 将 ACC 速度控制和距离控制统一变为距离控制的模式. 文献[67]提出了一种自适应巡航分层控制算法, 上层控制设计基于驾驶员稳态跟车特性的线性跟车算法和可供选择的安全车距模型, 下层控制研究基于逆查询表的速度闭环控制策略. 文献[41]在现有上、下位控制器的基础上增加模式切换层, 采用加速度加权平均算法提高模式切换的准确性和输出连续性.

ACC 系统的控制, 要求在满足安全车距、加速度限值、前车加速度不可控, 以及外界多种干扰的条件下, 实现最佳跟踪性能和舒适性要求. 在众多的控制方法中, MPC 控制能有效处理多个优化目标以及系统约束问题, 并能及时弥补模型失配、时变、干扰等引起的不确定性等, 比较适合 ACC 控制策略设计.

2.5 ACC 系统功能扩展

随着汽车主动安全技术的不断普及, ACC 系统与其他系统的集成控制具有较高的研究意义和实用

价值. 为了改善汽车动力学性能和辅助安全驾驶, 文献[68]将制动防抱死系统(ABS)、驱动防滑系统(ASR)、自适应巡航控制系统(ACC)进行有机的综合, 根据三者功能上的异同点, 提出了 ABS/ASR/ACC 集成控制策略和切换逻辑. 文献[9, 69]开展了 ACC 和直接横摆力矩控制(DYC)的协调控制研究, 利用最优控制算法或滚动时域控制提出一种基于 DYC 的弯道 ACC 纵向跟踪性和横向稳定性的协调控制方案. 文献[5]提出一种将自适应巡航(ACC)与防碰撞(CA)功能集成的系统, 利用紧急制动和车道变更策略避免车辆发生后撞. 文献[63]研究了一种考虑防碰撞功能的全速域 ACC 系统, 将行车环境分为安全、警告和危险 3 种模式.

近年来, 节能型 ACC 成为 ACC 系统应用和发展的一个重要分支, 也是多目标 ACC 的核心分支. 文献[60-61]提出经济型多目标 ACC 控制方法, 认为车辆油耗与自车加速度密切相关, 通过降低自车加速度可以有效提高车辆的燃油经济性, 并同时与车辆的跟车性和舒适性协同控制. 文献[70-71]分别开展了混合动力电动轿车和纯电动汽车的自适应巡航控制研究.

各大汽车公司也在研发 ACC 系统与其他系统集成或协调控制技术, 如通用正在开发结合了自动调整车速和保持车道的半自动驾驶技术“super cruise”, 可以在某些特定的驾驶条件下, 让车辆自动完成按车道行驶、制动以及速度控制等操作, 预计 2020 年前在部分凯迪拉克量产车型上率先投入使用.

3 ACC 研究的共性问题与发展趋势

ACC 已成为研究热点, 且取得了一定的研究进展, 但还有许多问题需要深入研究. 下面对其中的一些共性问题或技术难点进行总结, 并对未来 ACC 可能的发展趋势提出初步展望.

(1) ACC 系统难以识别静态目标, 道路的几何形状(倾斜、起伏坡道顶端、弯道等)和天气情况(大雪、暴雨、结冰等)都对 ACC 系统的功能起到限制作用. 因此, 将雷达和摄像头信息相融合, 开展复杂行车环境下的 ACC 环境感知技术研究是必要的.

(2) 因驾驶员跟车特性的多样性和非线性, 以及前车状态的不可预知性, 难以用统一或标准的安全距离模型和跟车模型来描述驾驶员的跟车行为特性, 而且还要兼顾驾驶员的乘坐感受. 因此, 基于大

量的驾驶员行为数据,开展驾驶员行为特性研究,使之能适应复杂多变的行驶环境,并有效地平衡行驶过程中的安全性、跟车性以及道路的通行能力,是未来 ACC 研究的重点。

(3)车辆建模过程均对车辆动力学系统进行了不同程度的简化处理,没有全面考虑发动机模型的动态特性、动力传动系统的非线性及建模的不确定性对动力学特性的影响。因此,分析汽车多系统耦合的复杂系统动力学行为产生机理,建立考虑汽车动力学系统时滞、时变、耦合和强非线性特性的车辆模型是未来 ACC 的研究方向之一。

(4)虽然针对城市环境的起-停 ACC 系统已经量产,但是对于前车紧急加速、紧急减速、前车切出、旁车切入等复杂多变的行车环境,ACC 系统的可靠性和鲁棒性还有待进一步提高,同时,ACC 车辆还要受到自车加速度限值约束、安全距离限值、前车加速度不可控等影响。因此,开展基于前车运动状态预测的多目标(跟车性、舒适性等)协同控制算法研究是必要的,同时节能型 ACC 逐渐成为人们关注的热点。

(5)目前,ACC 仅用于车辆纵向的定速巡航和定距跟随,功能相对独立,缺乏与其他系统集成或协同控制,如车道保持系统(LKA)、电子稳定控制系统(ESC)等。随着车载 ADAS 的不断普及,ACC 系统与其它 ADAS 系统的集成或协同控制是未来的发展趋势。

4 结语

首先从整体上介绍了 ACC 系统发展历程。然后对近年来 ACC 系统的研究现状进行了深入归纳分析,主要包括环境感知技术、驾驶员跟车行为特性、车辆建模、ACC 系统控制算法、ACC 系统功能扩展。最后,归纳 ACC 研究的共性问题与发展趋势。

参考文献:

- [1] TOROYAN T, IAYCH K, PEDEN M, *et al.* Global status report on road safety 2013: supporting a decade of action[R]. Geneva: World Health Organization, 2013.
- [2] 佐思汽车研究部. 全球汽车 ADAS 行业研讨[R]. 北京: 佐思汽车研究部, 2014.
ZC Auto Research. The global auto industry research ADAS [R]. Beijing: ZC Auto Research, 2014.
- [3] 李升波. 车辆多目标协调式自适应巡航控制[D]. 北京: 清华大学, 2009.
LI Shengbo. Vehicular multi-objective coordinated adaptive cruise control[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [4] 张翔. 2014 年汽车 ADAS 技术的最新进展[J]. 汽车电器, 2014 (8): 4.
ZHANG Xiang. The latest progress of auto ADAS in 2014[J]. Vehicle Electrical, 2014 (8): 4.
- [5] KIM D, MOON S, PARK J, *et al.* Design of an adaptive cruise control/collision avoidance with lane change support for vehicle autonomous driving [C] // ICCAS-SICE. Fukuoka: IEEE, 2009: 2938-2943.
- [6] DANG R, WANG J, LI S E, *et al.* Coordinated adaptive cruise control system with lane-change assistance[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16 (5):2373.
- [7] 刘志峰, 王建强, 李克强. 具有鲁棒特性的车载雷达有效目标确定方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(5): 875.
LIU Zhifeng, WANG Jianqiang, LI Keqiang. Robust vehicular radar target determination[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2008, 48(5): 875.
- [8] SHIMONURA N, FUJIMOTO K, OKI T, *et al.* An algorithm for distinguishing the types of objects on the road using laser radar and vision [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2002, 3(3):189.
- [9] 张德兆. 基于弯道行驶的车辆自适应巡航控制[D]. 北京: 清华大学, 2011.
ZHANG Dezhaoh. Vehicular adaptive cruise control on curved road[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [10] SHUNJI M, JERRY S, FAROOG I. Radar-based target tracking method: application to real road[C/CD]//SAE. [S. l.]: SAE, 2005-01-1478.
- [11] MÖBUS R, BAOTIC M, MORARI M. Multi-object adaptive cruise control [M] // Hybrid Systems: Computation and Control. Berlin: Springer, 2003.
- [12] MOON S, KANG H J, YI K. Multi-vehicle target selection for adaptive cruise control[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(11): 1325.
- [13] 侯德藻. 汽车纵向主动防撞系统的研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
HOU Dezaoh. Study on vehicle forward collision avoidance system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
- [14] ZHANG J, IOANNOU P. Longitudinal control of heavy trucks in mixed traffic: environmental and fuel economy considerations [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(1):92.
- [15] BROQUA F. Cooperative driving: basic concepts and a first assessment of "intelligent cruise control" strategies [C] // DRIVE Conference Advanced Telematics in Road Transport. Amsterdam: Elsevier, 1991:908-929.
- [16] YANAKIEV D, KANELLAKOPOULOS I. Variable time headway for string stability of automated heavy-duty vehicles [C] // Proceedings of the 34th Conference on Decision & Control. New Orleans: IEEE, 1995: 4077-4081.
- [17] YANAKIEV D, KANELLAKOPOULOS I. Longitudinal control of heavy-duty vehicles for automated highway systems[C]//Proc of the American Control Conference. Washington D C:IEEE, 1995:

- 3096-3100.
- [18] YANAKIEV D, KANELLAKOPOULOS I. Nonlinear spacing policies for automated heavy-duty vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1998, 47(4): 1365.
- [19] XU Q, HEDRICK K, SENGUPTA R, *et al.* Effects of vehicle-vehicle/roadside-vehicle communication on adaptive cruise controlled highway systems [C] // Vehicular Technology Conference. Birmingham; IEEE, 2002, 2: 1249-1253.
- [20] YI K, HAN D. A vehicle cruise control design based on human drivers driving pattern [C/CD] // Proc of 9th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics. Florida; [s. n.], 2005.
- [21] SIMONSSON S O. Car-following as a tool in road traffic simulation [C] // Vehicle Navigation and Information Systems Conference. Ottawa; IEEE, 1993: 150-153.
- [22] BRACKSTONE M, MADONALD M. Car-following; a historical review [J]. Transportation Research (Part F): Traffic Psychology and Behaviour, 1999, 2(4): 181.
- [23] 高振海, 管欣, 李谦, 等. 基于预瞄跟随理论的驾驶员跟随汽车目标速度的控制模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2004, 32(1): 1.
GAO Zhenhai, GUAN Xin, LI Qian, *et al.* Driver follower control model with vehicle target velocity based on preview follower theory [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology), 2004, 32(1): 1.
- [24] 管欣, 王景武, 高振海, 等. 基于驾驶员行为模拟的 ACC 控制算法[J]. 汽车工程, 2004, 26(2): 205.
GUAN Xin, WANG Jingwu, GAO Zhenhai, *et al.* An ACC control algorithm based on driver behavior model [J]. Automotive Engineering, 2004, 26(2): 205.
- [25] LI S, WANG J, LI K, *et al.* Modeling and verification of heavy-duty truck drivers' car-following characteristics [J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(1): 81.
- [26] MINDERHOUD M M, ZUURBIER F. Empirical data on driving behaviour in stop-and-go traffic [C] // Intelligent Vehicles Symposium. Parma; IEEE, 2004: 676-681.
- [27] VADEBY A M. Modeling of relative collision safety including driver characteristics [J]. Accident Analysis & Prevention, 2004, 36(5): 909.
- [28] CANALE M, MALAN S. Analysis and classification of human driving behavior in an urban environment [J]. Cognition Technology & Work, 2002, 4(3): 197.
- [29] LI G, LI S E, CHENG B. Field operational test of advanced driver assistance systems in typical Chinese road conditions; the influence of driver gender, age and aggression [J]. International Journal of Automotive Technology, 2015, 16(5): 739.
- [30] ZEESHAN Ali, ATANAS A P, GUY Charles. Model predictive control with constraints for a nonlinear adaptive cruise control vehicle model in transition manoeuvres [J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(6): 943.
- [31] RACHID A, RODOLFO O, MICHEL B. Combined longitudinal and lateral control for automated vehicle guidance [J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(2): 261.
- [32] 侯德藻, 高锋, 李志强, 等. 应用于汽车主动避撞系统的车辆纵向动力学模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(2): 258.
HOU Dezao, GAO Feng, LI Keqiang, *et al.* Vehicle longitudinal dynamic model for vehicle collision avoidance systems [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2004, 44(2): 258.
- [33] 高锋, 李志强, 连小珉. 用于汽车纵向运动控制的传动系统模型简化与分析[J]. 汽车工程, 2005, 27(3): 326.
GAO Feng, LI Keqiang, LIAN Xiaomin. Simplification and analysis of powertrain model for vehicle longitudinal motion control [J]. Automotive Engineering, 2005, 27(3): 326.
- [34] OHTSUKA H, VLACIC L. Stop and go vehicle longitudinal model [C] // Proc of the IEEE 5th Intl Conf on ITS. Singapore; IEEE, 2002: 206-209.
- [35] AXEL F, WERNER S. Nonlinear ACC in simulation and measurement [J]. Vehicle System Dynamics, 2001, 36(2-3): 159.
- [36] XU Z, IOANNOU P. Adaptive throttle control for speed tracking [J]. Vehicle System Dynamics, 1994, 23(1): 293.
- [37] 宾洋, 李志强, 王建强, 等. 低速行驶重型车辆的动力学系统建模与非线性控制[J]. 自动化学报, 2007, 33(3): 265.
BIN Yang, LI Keqiang, WANG Jianqiang, *et al.* Nonlinear dynamic modeling and control of low speed heavy-duty vehicles [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(3): 265.
- [38] YI K, MOON I K. A driver-adaptive stop-and-go cruise control strategy [C] // IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. Taipei; IEEE, 2004: 601-606.
- [39] 李朋, 魏民祥, 侯晓利. 自适应巡航控制系统的建模与联合仿真[J]. 汽车工程, 2012, 34(7): 622.
LI Peng, WEI Minxiang, HOU Xiaoli. Modeling and co-simulation of adaptive cruise control system [J]. Automotive Engineering, 2012, 34(7): 622.
- [40] RAJAMANI R. Vehicle dynamics and control [M]. New York: Springer, 2011.
- [41] 裴晓飞, 刘昭度, 马国成, 等. 汽车自适应巡航系统的多模式切换控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(10): 96.
PEI Xiaofei, LIU Zhaodu, MA Guocheng, *et al.* Multi-mode switching controller for vehicle adaptive cruise control system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(10): 96.
- [42] VAHIDI A, ESKANDARIAN A. Research advances in intelligent collision avoidance and adaptive cruise control [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2003, 4(3): 143.
- [43] ZHANG J, IOANNOU P A. Longitudinal control of heavy trucks in mixed traffic; environmental and fuel economy considerations [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(1): 92.
- [44] CHOI S B, HEDRICK J K. Vehicle longitudinal control using an adaptive observer for automated highway systems [C] // American Control Conference. Proceedings of the 1995. Seattle; IEEE, 1995: 3106-3110.
- [45] MOON S, YI K. Human driving data-based design of a vehicle adaptive cruise control algorithm [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(8): 661.
- [46] YI K, HONG J, KWON Y D. A vehicle control algorithm for stop-and-go cruise control [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (Part D): Journal of Automobile Engineering, 2001, 215(10): 1099.

- [47] YI K, MOON I, KWON Y D. A vehicle-to-vehicle distance control algorithm for stop-and-go cruise control [C] // Intelligent Transportation Systems. Oakland; IEEE, 2001; 478-482.
- [48] LU X Y, HEDRICK J K, DREW M. ACC/CACC-control design, stability and robust performance [C] // American Control Conference. Anchorage; IEEE, 2002;4327-4332 .
- [49] GANJI B, KOUZANI A Z, KHOO S Y, *et al.* Adaptive cruise control of a HEV using sliding mode control [J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(2): 607.
- [50] 宾洋,李克强,连小珉,等. 车辆起-停巡航控制系统的加速度跟踪控制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005,45(2): 247.
BIN Yang, LI Keqiang, LIAN Xiaomin. Acceleration tracking control of stop and go cruise control systems[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2005, 45(2): 247.
- [51] LI S E, DENG K, LI K, *et al.* Terminal sliding mode control of automated car-following system without reliance on longitudinal acceleration information[J]. Mechatronics, 2015, 30:327.
- [52] NARANJO J E, GONZALEZ C, GARCIA R, *et al.* ACC+stop & go maneuvers with throttle and brake fuzzy control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(2):213.
- [53] KHAYYAM H, NAHAVANDI S, DAVIS S. Review: adaptive cruise control look-ahead system for energy management of vehicles[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(3): 3874.
- [54] HIROSHI O. Analysis and modeling of human driving behaviors using adaptive cruise control [J]. Applied Soft Computing, 2001, 1(3):237.
- [55] ALONSO L, PÉREZ-ORIA J. Genetic optimization of fuzzy adaptive cruise control for urban traffic[M]//Fuzzy Modeling and Control: Theory and Applications. Amsterdam; Atlantis Press, 2014; 255-271.
- [56] CORONA D, De SCHUTTER B. Adaptive cruise control for a SMART car: a comparison benchmark for MPC-PWA control methods [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(2):365.
- [57] SHAKOURI P, ORDYS A, ASKARI M R. Adaptive cruise control with stop & go function using the state-dependent nonlinear model predictive control approach [J]. ISA Transactions, 2012, 51(5):622.
- [58] LI S, LI K, RAJAMANI R, *et al.* Model predictive multi-objective vehicular adaptive cruise control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(3): 556.
- [59] 李升波,王建强,李克强,等. MPC实用化问题处理及在车辆ACC中的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(5):645.
LI Shengbo, WANG Jianqiang, LI Keqiang, *et al.* Processing of MPC practical problems and its application to vehicular adaptive cruise control systems[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2010,50(5):645.
- [60] LI S E. Economy-oriented vehicle adaptive cruise control with coordinating multiple objectives function[J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(1):1.
- [61] LI S E, JIA Z, LI K, *et al.* Fast online computation of a model predictive controller and its application to fuel economy — oriented adaptive cruise control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(3):1199.
- [62] CHEN T, LUO Y, LI K. Multi-objective adaptive cruise control based on nonlinear model predictive algorithm[C]// IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. Beijing; IEEE, 2011;274-279.
- [63] MOON S, MOON I, YI K. Design, tuning, and evaluation of a full-range adaptive cruise control system with collision avoidance[J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(4): 442.
- [64] FANCHER P, BAREKET Z, ERVIN R. Human-centered design of an acc-with-braking and forward-crash-warning system[J]. Vehicle System Dynamics, 2001, 36(2-3):203.
- [65] KIM H, YI K. Design of a model reference cruise control algorithm[R]. Detroit; SAE, 2012.
- [66] KIM S G, TOMIZUKA M, CHENG K H. Smooth motion control of the adaptive cruise control system by a virtual lead vehicle[J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, 13(1): 77.
- [67] 裴晓飞,刘昭度,马国成,等. 一种汽车巡航控制的分层控制算法[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(5): 479.
PEI Xiaofei, LIU Zhaodu, MA Guocheng, *et al.* A hierarchical control algorithm of automobile cruise system[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(5): 479.
- [68] 裴晓飞,刘昭度,齐志权,等. ABS/ASR/ACC集成系统车载实验平台开发[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2011, 35(3): 500.
PEI Xiaofei, LIU Zhaodu, QI Zhiquan, *et al.* Development of in-vehicle experiment platform for ABS/ASR/ACC integrated system [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2011, 35(3): 500.
- [69] CHO W, MOON S, LEE C, *et al.* Intelligent vehicle safety control based on index plane [C] // AVEC'10 Proceedings. Loughborough; AVEC, 2010; 127-134.
- [70] 罗禹贡,陈涛,周磊,等. 奔腾智能混合动力电动车自适应巡航控制系统[J]. 机械工程学报, 2010, 46(6):2.
LUO Yugong, CHEN Tao, ZHOU Lei, *et al.* Adaptive cruise control system of besturn intelligent hybrid electric vehicle [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(6):2.
- [71] 党睿娜,李升波,王建强,等. 兼顾节能与安全的电动车ACC系统[J]. 汽车工程, 2012, 34(5): 379.
DANG Ruina, LI Shengbo, WANG Jianqiang, *et al.* Adaptive cruise control system of electric vehicles considering both economy and safety. [J]. Automotive Engineering, 2012, 34(5): 379.