考虑信号灯状态的电动汽车最优车速规划与避撞控制研究

廖光亮¹, 郑玲^{2,3*}, 张志达^{2,3}, 李以农^{2,3}, 余颖弘^{2,3}

1. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122;

2. 重庆大学机械与运载工程学院, 重庆 400044;

3. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044

* E-mail: zling@cqu.edu.cn

收稿日期: 2021-03-31; 接受日期: 2021-07-15; 网络版发表日期: 2021-09-28

国家自然科学基金(批准号: 51875061)、重庆市技术创新与应用发展专项(编号: cstc2019jscx-zdztzxX0032)和重庆市研究生科研创新项目(编号: CYB19063)资助

摘要 为减小智能电动汽车在城市工况下巡航中的能耗并避免追尾风险, 提出一种考虑信号灯状态信息的电动汽车节能与避撞分层控制系统. 上层基于信号灯状态信息和车辆动态模型进行车速规划, 在线滚动优化获得能耗最小的车辆参考速度序列; 下层结合参考车速序列和多目标函数实时计算车辆的最优加速度并进行避撞控制. 利用Matlab/Simulink平台搭建控制系统仿真模型, 并基于前方存在和不存在人类驾驶车辆的工况对所提出的控制系统进行有效性验证. 分析结果表明, 上层车速规划能根据道路交通信息变化, 得到最优参考速度, 改善电动汽车的能耗特性; 下层避撞控制能结合最优参考速度以及多目标函数评估结果, 计算车辆最优加速度控制输入. 可见, 所设计的系统可以保障电动汽车节能、安全地稳定行驶.

关键词 电动汽车, 交通配时, 能耗成本, 车速规划, 主动避撞, 分层控制

1 引言

近年来, 智能汽车的安全、节能驾驶已经成为汽车产业未来的发展趋势^[1,2], 利用道路交通信息降低汽车能耗水平、提高汽车主动避撞能力的安全节能驾驶技术受到极大关注^[3,4]. 智能交通系统(Intelligent transportation system, ITS)为车辆获取前方道路交通信息, 实现节能和安全驾驶成为可能^[5~8]. 可见, 针对以信号灯路口为代表的城市道路场景, 研究考虑信号灯状态

的电动汽车最优车速规划与避撞控制, 对电动汽车降低能量消耗、避免追尾事故, 实现安全与节能驾驶至关重要.

针对基于道路交通信息的节能驾驶技术, 国内外开展了广泛的研究. Guan等人^[9]结合信号灯预测模型和车辆传动系统特性, 通过优化车速和换挡来实现车辆的动态油耗控制. Kamal等人^[10,11]基于道路交通数据, 预测前车的速度和加速度, 通过控制主车以尽量小的加速度稳定行驶以实现节能的目标. Mandava等

引用格式: 廖光亮, 郑玲, 张志达, 等. 考虑信号灯状态的电动汽车最优车速规划与避撞控制研究. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 1134–1144
Liao G L, Zheng L, Zhang Z D, et al. Optimal speed planning and collision avoidance control for electric vehicles considering traffic lights (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 1134–1144, doi: 10.1360/SST-2021-0133

人^[12]提出在预先获取前方交通信号灯状态信息和配时信息的基础上对车辆进行动态速度规划,使车辆尽可能避免加速、减速和怠速状态,降低了车辆的油耗.张博等人^[13]提出了基于信号灯状态的最优车速规划方法,通过减少路口不必要的停车和制动操作,以降低油耗.辛喆等人^[14]提出了基于网联化的多交叉路口节能驾驶策略.Liu和He^[15]假设前方障碍车辆轨迹可预测,基于信号灯状态和前车轨迹信息,制定了基于规则的最大加速度-最大减速度-经济车速的加速度切换策略.

然而,以上研究大多采用恒定车速、最小加速度的方法来间接实现节能目标,并未充分结合道路及信号灯等限制信息制定最优行驶规则.此外,针对信号灯路口的车速规划与控制问题,现有成果或是基于理想的前方无障碍车辆阻挡的自由行驶模式,或是在障碍车辆轨迹可预测的前提下制定基于规则的加速度切换策略,控制动作生硬且难以兼顾车辆安全与节能驾驶.因此,基于前方障碍车辆约束和信号灯状态约束,综合考虑车辆安全、节能驾驶的车速规划与控制问题仍待进一步研究.

针对以上问题,为兼顾城市红绿灯交通场景下车辆的安全性与节能性,本文考虑信号灯状态信息和前方障碍车辆约束,提出一种上层DP (Dynamic programming)经济车速规划+下层MPC (Model predictive control)避撞控制的分层控制方法在线计算最优加速度控制输入,并设计多个工况以验证该方法的有效性.

2 系统建模

2.1 车辆动力学模型

以四轮独立驱动的智能电动汽车为研究对象,根据车辆纵向动力学模型可以推导车轮处的功率方程为^[16]

$$P_w = mv \cdot \left(a + g \cos(\varphi_s) \cdot \frac{\mu_r(\mu_1 v + \mu_2)}{1000} + g \sin(\varphi_s) + \frac{\rho_a A_f r_a v^2}{2m} \right), \quad (1)$$

式中, v , a 分别为车辆的行驶速度和加速度, P_w 为车轮处功率, ρ_a 为空气密度, A_f 为迎风面积, r_a 为风阻系数, φ_s 为道路坡度角, 城市道路下近似认为 $\varphi_s=0$, g 为重力加速度, m 为整车质量, μ_r , μ_1 , μ_2 分别为随路面类型、道

路条件和轮胎类型变化的滚动阻力系数. 驱动系统模型按照下式建立^[17]:

$$P_{mo} = \frac{P_w}{\eta_{ti} \eta_{dr}}, \quad (2)$$

式中, P_{mo} 为驱动电机的输出功率, η_{ti} 为驱动系统到车轮的传递效率, η_{dr} 为电机驱动系统效率.

2.2 车辆能耗模型

不考虑车辆再生制动系统, 即当能量由电机流向车轮时(车轮处功率为正)计算能量消耗, 反之(车轮处功率为负)设能量消耗恒为0. 因此, 参考文献^[18]并对能量计算方程进行改写, 可得车辆累计消耗能量为

$$E_c = \begin{cases} \int_{t_0}^{t_1} P_{mo}(t) dt, & P_{mo}(t) \geq 0, \\ 0, & P_{mo}(t) < 0, \end{cases} \quad (3)$$

式中, E_c 为车辆累计消耗能量, t_0 为当前时刻, t_1 为车辆通过路口的理想时刻, 二者之差即为剩余通行时间.

3 基于信号灯状态信息经济车速规划

Dedicated short range communication (DSRC)、Long term evolution (LTE)、WiFi、5G等^[19]通信技术使得车辆获取信号灯当前和周期状态、车辆位置、速度和加速度等信息成为可能. 本节针对城市智能交通场景, 在假设决策层已经对驾驶冲突进行消解的情况下, 对获取的红绿灯信息进行处理, 在车辆自由行驶模式下规划最经济的行驶车速.

3.1 信号灯信息预处理

将黄灯信号也视为红灯阶段^[12], 如图1所示, 红绿灯交替出现. 当车辆进入某一路段, 当前时刻 t_{im} 信号灯的状态可能是红灯或绿灯, t_{rk} , t_{gk} ($k=1, 2, \dots, n$) 分别表示第 k 循环红灯和绿灯开始时刻, ΔT_r , ΔT_g 分别表示红灯配时和绿灯配时.

在规划车速之前, 信号灯信息预处理单元首先应判断是否能在当前信号灯状态模式下通过路口. 若是, 则输出车辆位置、速度、剩余通行时间等信息到速度规划单元; 若否, 则继续判断是否能在下一状态模式下通过; 循环计算直至找到合适的状态模式并输出相应信息. 上述过程按照当前信号灯状态可分为两种模式

进行设计.

Case1 当前信号灯状态为绿灯(如图2).

$$v_{\text{ref}} = \frac{D_g}{t_r}, \quad (4)$$

式中, v_{ref} 为当前绿灯状态下的临界参考速度, t_r , D_g 分别为至绿灯变换节点的剩余通行时间 t_{sig} 和到达路口的剩余通行距离 D_{sig} 的值.

$$\begin{aligned} D_1 &= \frac{v_{\text{max}}^2 - v_0^2}{2a_{\text{pos}}}, \\ t_d &= \frac{v_{\text{max}} - v_0}{a_{\text{pos}}} + \frac{D_g - D_1}{v_{\text{max}}}, \\ D_2 &= v_0 t_r + 0.5a_{\text{pos}} t_r^2, \\ D_3 &= \frac{v_0^2}{2a_{\text{neg}}}, \\ t_e &= \frac{v_0}{a_{\text{neg}}} \left(1 - \sqrt{\frac{D_3 - D_g}{D_3}} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

式中, a_{pos} , a_{neg} 分别为车辆所能达到的最大加/减速度, v_{max} 为该路段最大限制速度, v_0 为当前车速, D_1 , t_d 分别为以最大加速度-匀速方式行驶的加速距离和通过路口时间, D_2 为以最大加速度方式行驶的行駛距离, D_3 , t_e 分别为以最大减速度方式行驶的零车速行驶距离和通过路口时间, 当且仅当 $D_3 - D_g > 0$ 时, t_e 存在实数解. 本文不考虑车辆的物理尺寸, 即不单独计算车辆头部驶入路口至车辆尾部驶离路口的距离和时间, 因此车辆在绿灯状态下到达路口且继续行驶即表示通过路口.

$$\begin{cases} \text{flag} = 1, & v_0 \geq v_{\text{ref}} \text{ 或 } t_d \leq t_r \text{ 或 } D_2 \geq D_g, \\ \text{flag} = -1, & (v_0 < v_{\text{ref}} \text{ 且 } t_d > t_r \text{ 且 } D_2 < D_g) \\ & \text{且 } D_3 > D_g \text{ 且 } t_e > t_r, \\ \text{flag} = 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\text{flag} = 1/0$ 分别表示能/不能在当前绿灯状态下通过路口, $\text{flag} = -1$ 表示红灯状态下通过路口, 车辆正常行驶禁止出现. 在Case1模式下, 若 $\text{flag} = 0$, 则将当前剩余绿灯时长 t_r 与下一红灯配时 ΔT_r 组合成新的红灯状态, 可称作虚拟红灯状态. 因此, 虚拟红灯状态的剩余通行时间 t_{sig} 的值更新为 $t_r + \Delta T_r$, 此时切换成Case2模式进行计算.

Case2 当前信号灯状态为红灯(如图3).

$$v'_{\text{ref}} = \frac{D_r}{t_g}, \quad (7)$$

式中, v'_{ref} 为当前红灯状态下的临界参考速度, t_g , D_r 分

图1 (网络版彩图)信号灯循环状态

Figure 1 (Color online) The state of the traffic light cycle.

图2 (网络版彩图)绿灯状态下信号灯信息处理

Figure 2 (Color online) Information processing under green light state.

图3 (网络版彩图)红灯状态下信号灯信息处理

Figure 3 (Color online) Information processing under red light state.

别为至红灯变换节点的剩余通行时间 t_{sig} 和到达路口的剩余通行距离 D_{sig} 的值.

$$t_u = \frac{v_0}{a_{\text{neg}}}, \quad (8)$$

$$D_4 = v_0 t_g - 0.5 a_{\text{neg}} t_g^2,$$

$$\begin{cases} \text{flag} = 1, & v_0 \leq v'_{\text{ref}} \text{ 或 } t_u \leq t_g \text{ 或 } (D_3 \geq D_r \text{ 且 } D_4 \leq D_r), \\ \text{flag} = -1, & v_0 > v'_{\text{ref}} \text{ 且 } D_3 \geq D_r \text{ 且 } D_4 > D_r, \\ \text{flag} = 0, & \text{其他}, \end{cases} \quad (9)$$

式中, t_u , D_4 分别为以最大减速度方式行驶的零车速行驶时间和 t_g 时长内的行驶距离, $\text{flag}=1/0$ 分别表示能/不能在当前红灯变换节点及节点后通过路口, $\text{flag}=-1$ 表示意义同上. 在Case2模式下, 若 $\text{flag}=0$, 则将当前剩余红灯时长 t_g 与下一绿灯配时 ΔT_g 组合成新的绿灯状态, 可称作虚拟绿灯状态. 因此, 虚拟绿灯状态的剩余通行时间 t_{sig} 的值更新为 $t_g + \Delta T_g$, 此时切换成Case1模式进行计算. 为此, 算法不断迭代直至找到 $\text{flag}=1$ 对应的状态模式并传递相应信息至车速规划单元, 为此构建上述信号灯信息预处理切换策略, 如图4所示.

3.2 实时经济车速规划

考虑车辆模型、驱动系统模型、能耗模型和获取了信号灯信息预处理数据后, 基于信号灯信息经济车速规划问题描述如下:

$$\begin{aligned} J &= \min_{a_i \in A_i} E_c, \\ \text{s. t. } s_{\min} &\leq s_N \leq s_{\max}, \\ 0 &\leq v_N \leq v_{\max}, \\ a_{\text{neg}} &\leq a_N \leq a_{\text{pos}}, \\ N &= 1 + \frac{t}{T_{\text{step}}}, \end{aligned} \quad (10)$$

图4 (网络版彩图)信号灯信息预处理切换策略

Figure 4 (Color online) Switching strategy of traffic light information preprocessing.

式中, E_c 为车辆累计消耗能量, 选取状态量 $\mathbf{x} = [s_N, v_N]^T$, 控制量 $\mathbf{u} = [a_N]^T$, N 为仿真步数, T_{step} 为每步的仿真时间, $s_{\max}$, $s_{\min}$ 分别为终点距离的约束上下限, 其值根据当前红绿灯状态的不同在剩余通行距离 D_g , D_r 的基础上实时进行调整. 为了避免车辆在临界和红灯状态下通过路口, 设置路程终值范围如下:

$$\begin{aligned} s_{\max} &= D + \beta_1, \\ s_{\min} &= D + \beta_2, \\ \beta_1 &= 0 \ \& \ \beta_2 = -\beta, \quad \text{if } \text{sig} = \text{red}, \\ \beta_1 &= \beta \ \& \ \beta_2 = 0, \quad \text{if } \text{sig} = \text{green}, \end{aligned} \quad (11)$$

式中, D 为临界剩余通行距离, β 为一较小的正数, 保证车辆必然在绿灯状态下通过路口, 本文取值为1 m; sig 为信号预处理单元确定的虚拟红绿灯目标状态. 动态规划是解决最优控制问题的强大数值方法^[20,21], 文献^[14]已详细阐述了动态规划方法的求解步骤, 在此不再赘述. 本文采用基于时间过程的动态规划方法, 并对其离散化.

4 考虑最优车速的主动避撞控制

障碍车辆为单独行驶的人类驾驶车辆, 由于不受速度规划引导, 文献^[15]采用的预测方法显然无法准确地获取其未来的速度轨迹, 只能通过传感器实时获取障碍车辆当前状态. 传统的阈值切换方法过度依赖人的驾驶经验^[22]且动作生硬, 不能很好地描述未来时域内的动态碰撞风险. 因此, 本文采用可预测的MPC方法设计下层控制器, 结合多目标函数评估结果滚动优化计算最优加速度控制输入, 使未来一段时间内的被控量与期望值的偏差最小.

4.1 预测模型

将车辆纵向运动学离散化模型^[15]表达成状态空间方程形式:

$$\mathbf{X}(\tau+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{X}(\tau) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}(\tau), \quad (12)$$

$$\mathbf{Y}(\tau) = \mathbf{C}_d \mathbf{X}(\tau), \quad (13)$$

式中, $\mathbf{A}_d = \begin{bmatrix} 1 & \delta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B}_d = \begin{bmatrix} 0 \\ \delta \end{bmatrix}$, $\mathbf{C}_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$. 选取状态变量为 $\mathbf{X} = [s, v]^T$, 控制变量 $\mathbf{u} = [a]$, 输出变量 $\mathbf{Y} = [s, v]^T$, δ 表示离散时间常数.

从状态空间方程可知, 通过 τ 时刻车辆的状态 $\mathbf{X}(\tau)$ 与此刻的控制输入 $\mathbf{u}(\tau)$ 可以计算出车辆下一离散时刻的车辆状态 $\mathbf{X}(\tau+1)$, 经过循环迭代可以求得车辆在预测步数 N_p 内的所有状态. 从任意 τ 时刻到 $\tau+N_p$ 时刻模型的输出可以表示为

$$\mathbf{Y}_p(\tau+N_p | \tau) = \tilde{\mathbf{A}}_d \mathbf{X}(\tau) + \tilde{\mathbf{B}}_d \mathbf{u}(\tau), \quad (14)$$

式中,

$$\mathbf{Y}_p(\tau+N_p | \tau) = [\mathbf{Y}(\tau), \mathbf{Y}(\tau+1), \dots, \mathbf{Y}(\tau+N_p)]^T,$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_d = [\mathbf{C}_d \mathbf{A}_d, \mathbf{C}_d \mathbf{A}_d^2, \dots, \mathbf{C}_d \mathbf{A}_d^{N_p-1}]^T,$$

$$\tilde{\mathbf{B}}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_d \mathbf{B}_d & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}_d \mathbf{A}_d^4 \mathbf{B}_d & \dots & \mathbf{C}_d \mathbf{A}_d^2 \mathbf{B}_d & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}_d \mathbf{A}_d^{N_p-1} \mathbf{B}_d & \dots & \mathbf{C}_d \mathbf{A}_d^{N_p-3} \mathbf{B}_d & \dots & \mathbf{C}_d \mathbf{A}_d^{N_p-N_c} \mathbf{B}_d \end{bmatrix}_{N_p \times N_c}.$$

4.2 预测时域

从式(14)可以看出, 预测步数 N_p 的选择直接影响控制器的性能. N_p 增大, 矩阵 $\tilde{\mathbf{A}}_d$, $\tilde{\mathbf{B}}_d$ 的维数随之增加, 影响计算时效性; N_p 减小, 控制器预测距离有限, 极端情况甚至导致车辆追尾事故. 本文针对常见城市道路, 任何情况下车辆都应符合道路交通安全规范^[12]: (a) 车辆只能正常行驶或驻车, 禁止倒车; (b) 车辆行驶速度区间为 $[0, v_{\max}]$. 不难推导最极端的情况为: 主车以道路最高限制速度行驶且前车静止不动, 主车全力制动后两车最终处于临界碰撞状态. 即:

$$v_r = a_{\text{neg}} \zeta_{\text{cr}}, \quad (15)$$

式中, ζ_{cr} 为临界碰撞时间. 因此预测时域应满足

$$N_p = \frac{\varphi \zeta_{\text{cr}}}{\delta}, \quad (16)$$

式中, φ 表示安全系数, 满足 $\varphi > 1$.

4.3 目标函数

目标函数所要达到的目的是: (a) 引导车辆按照最优参考速度行驶; (b) 维持加速度增益较小; (c) 阻止车辆靠近障碍物. 为此, 本文设计MPC优化目标函数为

$$J = \sum_{i=\tau}^{\tau+N_p} (\xi J_{\text{vel},i} + \psi J_{u,i} + \omega J_{\text{obs},i}), \quad (17)$$

式中, 第一项 $J_{\text{vel},i}$ 反映了车辆跟随最优速度行驶的能力; 第二项 $J_{u,i}$ 反映了对加速度控制量变化的约束; 第三项 $J_{\text{obs},i}$ 反映了主车与障碍车辆的碰撞风险; ξ , ψ , ω 分别为对应的权系数. 其中, $J_{\text{vel},i}$ 可表示为

$$J_{\text{vel},i} = (v_i - v_{\text{eco},i})^2, \quad (18)$$

式中, v_i , $v_{\text{eco},i}$ 分别为在第 i 步模型预测输出车速和上层规划车速. $J_{u,i}$ 可表示为

$$J_{u,i} = u_i^2, \quad (19)$$

式中, u_i 为第 i 步的加速度控制输入. 对于碰撞风险的描述, 一般多采用高斯分布函数. 为了合理量化碰撞风险, 本文综合考虑两车的相对距离和相对速度, 参考高斯函数形状因子表达式设计 $J_{\text{obs},i}$ 为

$$J_{\text{obs},i} = \frac{v_{ri}}{(s_i - s_{\text{obs},i})^2 + \sigma}, \quad (20)$$

式中, s_i , $s_{\text{obs},i}$ 分别为第 i 步模型预测位置和障碍车辆位置, v_{ri} 为车辆此时与障碍车辆的相对速度; σ 为给定的较小正数, 防止分式无意义.

4.4 约束集

车辆在行驶过程中, 系统约束主要源于以下几个方面.

(1) 最小避撞距离约束. 由于式(17)表示的优化目标是一种软约束, 为保证车辆任意情况的碰撞安全, 必须设置最小避撞距离硬约束, 设 ε_s 为最小安全距离阈值, 则应满足

$$s_i \leq s_{\text{obs},i} - \varepsilon_s. \quad (21)$$

(2) 速度约束. 车辆应符合道路交通安全规范限速:

$$0 \leq v_i \leq v_{\max}. \quad (22)$$

(3) 加速度约束. 为保证控制量可执行, 优化解应满足最大摩擦力约束和执行器能力约束:

$$\begin{cases} -a_{\text{neg}} \leq a_i \leq a_{\text{pos}}, \\ a_{\text{pos}} = \min(a_{\text{batt_pos}}, \mu g), \\ a_{\text{neg}} = \min(a_{\text{batt_neg}}, \mu g), \end{cases} \quad (23)$$

式中, $a_{\text{batt_pos}}$, $a_{\text{batt_neg}}$ 分别为由于电池功率和执行机构约束所能达到的汽车最大加/减速度.

5 分层控制系统架构

为减小智能电动汽车在城市工况下巡航中的能耗并避免追尾风险, 本文设计了车辆节能与避撞分层控制系统架构, 该架构分为信号灯信息预处理单元、车速规划单元和避撞控制单元. 信息预处理单元根据信号灯状态信息及配时信息实时匹配计算模式, 并在当前模式失效后自动进行模式切换, 以获取最佳剩余通行时间和距离; 车速规划单元根据获取的最佳剩余通行时间和距离信息, 采用动态规划方法实时规划自由行驶模式下的最优车速; 避撞控制单元结合参考车速序列和多目标函数计算并控制车辆加速度, 实现车辆的分层控制功能.

如图5所示, 本文将信号灯信息预处理单元和经济车速规划单元也进行了分层处理, 滚动求解的车速结果间接表达了信号灯信息、道路约束和车辆行驶状态之间的关联, 符合车-路协同控制的实际需要. 避撞控制单元在求解最优加速度控制序列时, 在目标函数第一项引入了车速规划单元计算的动态车速而非固定的参考速度, 相当于间接考虑了能量消耗, 同时规避了在目标函数中直接引入能量消耗指标带来的计算复杂性和求解非凸优化问题. 可见, 上层车速规划单元基于信号灯状态信息滚动优化出最优参考车速, 下层避撞控制单元综合最优参考车速和多目标函数实时计算最优加速度控制输入, 实现电动汽车节能、安全地稳定行驶.

图5 车辆分层控制系统工作流程

Figure 5 Workflow of vehicle hierarchical control system.

6 仿真验证

基于Matlab/Simulink平台, 搭建上层车速规划模型和下层避撞控制模型, 并借鉴文献[13]采用三角函数描述信号灯周期性变化特征, 分别针对不同的仿真工况对提出的控制模型的性能进行验证.

6.1 仿真工况1

为验证基于信号灯状态信息的车速规划算法的正确性, 本文选取车辆连续通过多个红绿灯路口作为仿真工况. 部分主要仿真参数如下^[16]: $m=1521 \text{ kg}$, $g=9.8 \text{ m/s}^2$, $\mu_r=1.75$, $\mu_1=0.0328$, $\mu_2=4.575$, $r_a=0.28$, $\rho_a=1.2256 \text{ kg/m}^3$, $\eta_{ti}=92\%$, $\eta_{dr}=91\%$, $a_{\text{pos}}=5 \text{ m/s}^2$, $a_{\text{neg}}=5 \text{ m/s}^2$, $v_{\text{max}}=20 \text{ m/s}$, $v_0=10 \text{ m/s}$, $T_{\text{step}}=0.05$, $\delta=0.05$; 使用MPC方法求解最优加速度时取 $N_p=80$, $N_c=40$.

道路及信号灯配时信息如表1所示. 本文对比实验选取文献[13]中基于规则的速度规划方法, 规则如下: 车辆优先以当前速度匀速通过路口, 若不满足通过条件, 则直接以尽可能小的加/减速度运动一段时间后匀速通过信号灯.

图6分别给出了车辆位移、速度和能量消耗随时间变化的曲线. 分析图6(a)可知, 在路段①中, 车辆接收到当前绿灯信号, 信息预处理单元处于Case1模式并判断车辆可以在当前绿灯周期通过路口, 选取当前绿灯变换节点时刻作为剩余通行时间, 传递到车速规划单元进行速度规划; 在路段③中, 车辆接收到当前绿灯信号, 信息预处理单元处于Case1模式并判断车辆无法在当前绿灯状态下通过路口, 故预处理单元自动将模式切换至Case2, 此时将当前剩余绿灯时长和下一红灯配时组合为虚拟红灯状态, 信息预处理单元判断此时车辆可以在虚拟红灯变换节点通过路口, 选取新的虚拟红灯变换节点时刻作为剩余通行时间传递到车速规划单元; 路段②、路段④接收到当前红灯信号, 处理

表1 道路设置及信号灯配时

Table 1 Road setting and signal timing

道路编号	道路长度 (m)	红灯配时 $\Delta T_r/\text{s}$	绿灯配时 $\Delta T_g/\text{s}$
①	500	30	40
②	200	30	40
③	1000	30	40
④	300	20	20

图6 (网络版彩图)车辆位移(a)、车辆速度(b)以及能量消耗(c)随时间变化曲线

Figure 6 (Color online) (a) Vehicle displacement curve; (b) vehicle speed curve; (c) vehicle energy consumption curve.

过程分别与路段①和③类似。以上结果表明了信号灯信息预处理单元模式切换逻辑的正确性。由图6(b)可以看出, 基于规则的速度规划方法虽然保证加速度更小, 但速度总是在0 m/s和20 m/s之间频繁跳动, 进入路段②后由于达到最大路段限速而不得不采取最大减速度紧急制动, 车辆最终在路口前停车等待5 s。基于DP的速度规划方法在仿真工况下速度都能保持在合理的范围, 并且规划的车速符合文献[14,23]提出的周

期性加速滑行操作节能控制策略, 证明了车速规划模型的正确性。

由图6(c)可见, 随着行驶距离的增加, 基于DP的速度规划方法在节能方面优势逐渐凸显。车辆行驶2000 m后, 基于规则的速度规划方法消耗能量0.3403 kw·h, 基于DP的速度规划方法为0.2222 kw·h, 因此该工况下相比于前者可节约34.7%的能量。这是因为基于规则的规划方法仅仅以通过信号灯为目标, 虽然较小的车辆加/减速度可以避免频繁的加减速波动, 在一定程度上间接减少了能量消耗, 但同时违背了加速滑行的最优节能操作方法; 而基于DP的规划方法直接以节能为目标, 在满足通过信号灯路口的同时尽量以最节能的方式行驶, 为此, 随着时间的增加, 基于DP方法的车辆能量消耗将会大大低于基于规则的方法。另外, 从曲线形状也可以看出, 基于DP的速度规划方法其能耗呈阶梯状上升趋势, 这也从侧面验证了随着行驶距离增加, 该方法在节能方面优势逐渐凸显。

6.2 仿真工况2

为验证考虑信号灯状态的电动汽车最优车速规划与避撞控制算法的正确性, 选取如下工况进行仿真实验: 两车初始距离 $\Delta s=100$ m, 主车初始车速 $v_0=1$ m/s, 前车初始车速 $v_1=12$ m/s, 经过两次减速至5 m/s, 再经过两次加速至20 m/s并保持不变。信号灯的循环周期 $T=60$ s, 其中30 s为绿灯, 30 s为红灯, 道路长度为1000 m; 其他参数同工况1。对比实验选取仅基于DP算法的经济车速规划控制方法(计算出经济车速后采用一阶差商计算加速度的值)和仅基于MPC算法的安全车速控制方法。

图7分别给出了车辆位移、相对距离、速度和能量消耗随时间变化的曲线。分析图7(a)可知, 基于DP方法, 车辆将于15 s左右与前车发生碰撞; 基于MPC方法, 车辆虽不会与前车发生碰撞, 但将于58 s左右紧急制动并最终停在路口等待下一绿灯。由图7(a)~(d)可以共同看出, 本文提出的分层控制器工作过程如下: 由于主车初始速度为1 m/s, 远小于前车车速12 m/s且两车相对距离较远(100 m), 下层避撞控制单元判断在预测时域内碰撞风险较小, 车辆主要按照上层车速规划单元计算的最优速度进行加速行驶; 随着主车速度增加且前车速度降低, 两车相对距离迅速减小, 碰撞风险持续上升, 18 s时两车相对速度高达-9 m/s且相对距离减

图 7 (网络版彩图) 车辆位移(a)、相对距离(b)、车辆速度(c)和车辆能耗(d)随时间的变化曲线

Figure 7 (Color online) (a) Vehicle displacement curve; (b) relative distance curve; (c) vehicle speed curve; (d) vehicle energy consumption curve.

小到40 m, 此时安全性目标超过经济性目标, 分层控制器主要按照碰撞风险评估结果给出减速指令; 60 s后, 信息预处理单元判断无法在当前红绿灯状态模式下通过路口且下层避撞控制单元判断此时碰撞风险较小, 因此控制器主动进行模式切换, 更新经济车速序列并执行。

分析图7(b)可知, 基于DP算法的主车由于只考虑无障碍车辆的自由行驶模式, 两车的距离不断缩短并最终在12 s时与前车发生碰撞。本文提出的基于信号灯状态信息和主动避撞的电动汽车分层控制方法和基于MPC的控制方法, 主车在经过短暂制动后都有效地避免了碰撞, 虽然基于MPC算法的主车与前车保持更近的相对距离, 但当前车刚好在红灯前通过路口时必然会引起主车的紧急制动以避免闯红灯, 不仅严重影响驾乘舒适性, 而且大大增加了额外的能量消耗。

由图7(c)可以看出, 基于DP算法的主车符合前述的加速滑行节能控制策略, 但是由于已与前车发生碰撞, 因此该节能策略在这一场景下显然没有任何意义。基于MPC算法的主车为了和前车保持适当的安全距

离, 在前车缓慢减速时以较大的减速度制动, 在前车加速时以较大的加速度保持跟随前车, 这种急加速/急减速操作势必会引起驾乘人员的不适, 也不符合文献[14,23]提出的节能策略。对于本文提出的分层控制方法, 在整个过程中都与前车保持着一定的安全距离, 避免了追尾事故的发生; 同时无论前车的运行状态如何, 主车都保持较小的加/减速度行驶。另外, 从整体上看, 基于分层控制的主车速度仍大致呈现出加速滑行的节能驾驶策略。其原因是车辆同时考虑到碰撞安全性和节能性, 在碰撞风险持续升高时以避免碰撞为主, 在保证碰撞风险降低时偏向于采用更节能的方式驾驶, 兼顾了安全性和节能性。

由图7(d)可以看出, 行驶1000 m后, 基于DP、MPC和分层控制方法的主车其能耗分别为0.1496, 0.2714, 0.2185 kw·h。因此, 相比于MPC方法, 该工况下本文提出的控制方法可节约19.5%的能耗。另外, 从分层控制方法能耗曲线可以看出, 该能耗呈现阶梯状上升趋势, 分析原因是车辆在避免追尾的同时仍尽量按照节能的速度行驶的结果, 即在保证安全性的前提下, 车辆每一

小段行驶距离都趋近于文献[14,23]提出的加速滑行节能控制策略,这也从侧面揭示了本文提出的分层控制方法在保证安全的前提下实现节能的真实原因。以上分析结果表明,本文提出的分层控制方法在保证避撞安全性的同时,可以最大限度地发挥节能优势,并减少停车等待时长,是一种安全、经济的控制方法。

7 结论

针对当前研究在前方障碍车辆影响的城市红绿灯交通场景下无法同时兼顾安全性和节能性问题,设计上层DP经济车速规划+下层MPC避撞控制的分层控制系统在线计算最优加速度控制输入。

(1) 基于信号灯信息、道路约束和车辆行驶状态等限制信息提出信号灯信息预处理方法,发现规划的经济车速符合车路协同控制的需要。同时,利用模式

匹配和切换的方式设计信号灯信息预处理单元,表现形式清晰新颖。

(2) 所设计的分层控制系统综合考虑了经济车速的时变性和障碍车辆轨迹的不可预测性,计算的最优加速度控制输入动作平滑,且能够引导电动汽车保持碰撞安全距离并明显降低能耗水平,克服标准DP和MPC方法无法兼顾安全性和节能性问题。

(3) 所设计的分层控制系统在保证避撞安全性的同时,可以最大限度地发挥节能优势,并减少停车等待时长,对提高电动汽车安全、节能驾驶性能具有重要的借鉴意义。

需要指出的是,本研究主要针对单车进行能耗优化,且在避撞控制部分仅考虑了纵向避撞方法。因此,如何实现多车与交通信号灯的协同优化,如何实现车辆的横向避撞和纵横向组合避撞,将在下一步工作中继续研究。

参考文献

- Li K Q, Dai Y F, Li S B, et al. State-of-the-art and technical trends of intelligent and connected vehicle (in Chinese). *J Autom Safety Energy*, 2017, 8: 1–14 [李国强, 戴一凡, 李升波, 等. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势. 汽车安全与节能学报, 2017, 8: 1–14]
- Guo J H, Luo Y G, Li K Q, et al. Coordinated path-following and direct yaw-moment control of autonomous electric vehicles with sideslip angle estimation. *Mech Syst Sig Process*, 2018, 105: 183–199
- Tang X L, Li S S, Wang H, et al. Research on energy control strategy based on hierarchical model predictive control in connected environment (in Chinese). *J Mech Eng*, 2020, 56: 119–128 [唐小林, 李珊珊, 王红, 等. 网联环境下基于分层式模型预测控制的车队能量控制策略研究. 机械工程学报, 2020, 56: 119–128]
- Ren Y, Zheng L, Zhang W, et al. A study on active collision avoidance control of autonomous vehicles based on model predictive control (in Chinese). *Autom Eng*, 2019, 41: 404–410 [任玥, 郑玲, 张巍, 等. 基于模型预测控制的智能车辆主动避撞控制研究. 汽车工程, 2019, 41: 404–410]
- Chen H, Guo L L, Gong X, et al. Automotive control in intelligent era (in Chinese). *Acta Autom Sinica*, 2020, 46: 1313–1332 [陈虹, 郭露露, 宫洵, 等. 智能时代的汽车控制. 自动化学报, 2020, 46: 1313–1332]
- Gao H B, Zhang X Y, Zhang T L, et al. Research of intelligent vehicle variable granularity evaluation based on cloud model (in Chinese). *Acta Electr Sinica*, 2016, 44: 365–373 [高洪波, 张新钰, 张天雷, 等. 基于云模型的智能驾驶车辆变粒度测评研究. 电子学报, 2016, 44: 365–373]
- Ozatay E, Onori S, Wollaege J, et al. Cloud-based velocity profile optimization for everyday driving: A dynamic-programming-based solution. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2014, 15: 2491–2505
- Mukhtar A, Xia L, Tang T B. Vehicle detection techniques for collision avoidance systems: A review. *IEEE Trans Intell Transp Syst*, 2015, 16: 1–21
- Guan T, Frey C W. Predictive fuel efficiency optimization using traffic light timings and fuel consumption model. In: *The Proceedings of 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*. IEEE, 2013. 1553–1558
- Kamal M A S, Mukai M, Murata J, et al. Model predictive control of vehicles on urban roads for improved fuel economy. *IEEE Trans Contr Syst Technol*, 2013, 21: 831–841
- Kamal M A S, Mukai M, Murata J, et al. Ecological driving based on preceding vehicle prediction using MPC. *IFAC Proc Volumes*, 2011, 44: 3843–3848
- Mandava S, Boriboonsomsin K, Barth M. Arterial velocity planning based on traffic signal information under light traffic conditions. In:

- International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 2009. 160–165
- 13 Zhang B, Guo G, Wang L Y, et al. Vehicle speed planning and control for fuel consumption optimization with traffic light state (in Chinese). *Acta Autom Sinica*, 2018, 44: 461–470 [张博, 郭戈, 王丽媛, 等. 基于信号灯状态的燃油最优车速规划与控制. *自动化学报*, 2018, 44: 461–470]
- 14 Xin Z, Yu Z, Guo Q Q, et al. Fuel-saving driving strategy for connected vehicles in multiple signalized intersections (in Chinese). *J Tsinghua Univ (Sci & Technol)*, 2018, 58: 684–692 [辛喆, 余舟, 郭强强, 等. 多交叉口工况的网联汽车最优节油驾驶策略. *清华大学学报(自然科学版)*, 2018, 58: 684–692]
- 15 Liu Q, He H. The velocity regulation of power consumption with traffic lights for electric vehicles. *Proc Institution Mech Engineers Part D-J Automobile Eng*, 2019, 233: 2312–2322
- 16 Fiori C, Ahn K, Rakha H A. Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation. *Appl Energy*, 2016, 168: 257–268
- 17 Rakha H A, Ahn K, Moran K, et al. Virginia tech comprehensive power-based fuel consumption model: Model development and testing. *Transp Res Part D Trans Envir*, 2011, 16: 492–503
- 18 Akhegaonkar S, Lydie, Glaser, et al. Smart and green ACC: Energy and safety optimization strategies for EVs. *IEEE Trans Syst Man Cyb Syst*, 2017, 48: 142–153
- 19 Zhen X Y. General situation and development suggestions of domestic intelligent connected vehicle (in Chinese). *Auto Engineer*, 2018, 260: 14–17 [甄晓阳. 国内智能网联汽车概况及发展建议. *汽车工程师*, 2018, 260: 14–17]
- 20 Dong H X, Yin G D, Zhuang W C, et al. Economic cruising velocity optimization using iterative dynamic programming of connected electric vehicle (in Chinese). *J Mech Eng*, 2021, 57: 121–130 [董昊轩, 殷国栋, 庄伟超, 等. 基于迭代动态规划的网联电动汽车经济性巡航车速优化. *机械工程学报*, 2021, 57: 121–130]
- 21 Zhuang W C, Qu L H, Xu S B, et al. Integrated energy-oriented cruising control of electric vehicle on highway with varying slopes considering battery aging. *Sci China Tech Sci*, 2020, 63: 155–165
- 22 Chen H, Zhuang W C, Yin G D, et al. Eco-driving control strategy of connected electric vehicle at signalized intersection (in Chinese). *J Southeast Univ (Nat Sci Ed)*, 2021, 51: 178–186 [陈浩, 庄伟超, 殷国栋, 等. 网联电动汽车信号灯控路口经济性驾驶策略. *东南大学学报(自然科学版)*, 2021, 51: 178–186]
- 23 Li S E, Hu X, Li K, et al. Mechanism of vehicular periodic operation for optimal fuel economy in free-driving scenarios. *IET Intelligent Transp Syst*, 2015, 9: 306–313

Optimal speed planning and collision avoidance control for electric vehicles considering traffic lights

LIAO GuangLiang¹, ZHENG Ling^{2,3}, ZHANG ZhiDa^{2,3}, LI YiNong^{2,3} & YU YingHong^{2,3}

¹ China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China;

² College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

³ State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, China

To reduce the energy consumption and avoid the risk of rear-end collisions for intelligent electric vehicles (EVs) during cruising under urban conditions, a hierarchical control system for energy saving and collision avoidance for EVs considering the information of traffic lights is proposed. The upper layer of the system plans the vehicle speed based on the aforementioned traffic information and a vehicle dynamic model and obtains the reference speed sequence with the minimum energy consumption through online rolling optimization; the bottom layer calculates the optimal acceleration of the vehicle in real-time along with the reference speed sequence and multiobjective function and performs collision avoidance control. Finally, the simulation model of the control system was built based on the Matlab/Simulink platform, and the effectiveness of the proposed control system was verified based on conditions of the presence and absence of human-driven vehicles in front of the EV. The upper layer can realize the optimal reference speed in vehicle speed planning according to the change in road traffic information and improve the energy consumption characteristics of the EV; the collision avoidance control by the lower layer can calculate the optimal acceleration control input by combining the optimal reference speed and the multiobjective function evaluation results. Thus, it is clear that the designed system can ensure energy-efficient, safe, and stable driving of EVs.

electric vehicle (EV), traffic timing, power consumption, vehicle speed planning, active collision avoidance, hierarchical control

doi: [10.1360/SST-2021-0133](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0133)