

基于信息一致性的自主车辆变车距队列控制

闫茂德, 宋家成, 杨盼盼[†], 朱 旭

(长安大学 电子与控制工程学院, 西安 710064)

摘 要: 针对目前自主车辆队列控制中采用的间距策略存在间距调节灵活性不足、道路利用率欠佳等问题, 提出一种基于信息一致性的自主车辆变车距队列控制方法. 首先, 结合车速与车辆制动时间的动态关系, 设计一种变时间间隔策略. 在此基础上, 基于信息一致性理论, 提出一种车间距可随车速自适应变化的自主车辆队列控制算法. 仿真结果表明, 所提算法不仅可以实现自主车辆的变车距队列控制, 且车间距离的调节具有较好的灵活性, 尤其在低速行驶时, 可有效减少道路占用量, 提高道路利用率.

关键词: 自主车辆; 队列控制; 变时间间隔策略; 信息一致性; 变车距

中图分类号: U491.255

文献标志码: A

Consensus based platoon for autonomous vehicles with time varying inter-vehicle distance

YAN Mao-de, SONG Jia-cheng, YANG Pan-pan[†], ZHU Xu

(School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The existing spacing policies in autonomous vehicle platoon control have the disadvantages of poor flexibility and insufficient road utilization, therefore, an information consensus based platoon control algorithm with varying inter-vehicle space is proposed. Firstly, a new inter-vehicle spacing policy, namely time varying headway(TVH) strategy, is designed according to the dynamic relationship between vehicle speed and braking time. Then, a vehicle platoon control algorithm based on the information consensus theory is proposed to achieve the adaptive variation of inter-vehicle space with vehicle speed. The simulation results show that the control algorithm can not only realize the platoon for autonomous vehicles with time varying inter-vehicle distance, but also has better flexibility in vehicle platoon control. Particularly, in low speed, the algorithm can greatly reduce road occupancy as well as improving road utilization rate.

Keywords: autonomous vehicle; platooning control; time varying headway strategy; information consensus; varying inter-vehicle space

0 引 言

近年来,日益严重的城市道路拥堵问题促使各国政府、汽车工业界及学术界对自动化公路系统投入了极大的关注^[1]. 自主车辆队列控制作为缓解交通拥堵的有效措施,是目前自动化公路系统的研究热点,其目的是使汽车通过信息交互实现紧密编队行驶,同时保证队列稳定性及合理的安全距离^[2]. 其中,安全间距控制在提高道路容量、减缓道路压力中发挥了关键作用^[3-4].

对于车队安全间距控制问题的研究,目前主要围绕固定间距(CS)和固定时间间隔(CTH)两种策略展开^[5]. Santhanakrishnan等^[3]通过对CS策略进行分析,

发现其虽然可以保证队列稳定性,但存在道路容量欠佳,道路利用率低的问题;Swaroop等^[4]对两种策略的队列稳定性进行分析,指出CS策略必须通过信息共享才能保证队列稳定;Li等^[6]提出了一种基于信息一致性的固定间距自主车辆队列控制算法,但在车辆低速行驶时,道路利用率不足;Yanakiiev等^[7]采用CTH策略对重载汽车的队列控制进行研究,发现在速度为25 m/s时,时间间隔需大于1 s才能保证队列稳定性,而在低度运行时,该时间间隔过大,道路利用率降低;Bayar等^[8]对CTH策略下交通容量和能源消耗情况进行了分析,指出参考驾驶员行驶参数给出的距离策略比CTH策略具有更佳的交通容量和更低

收稿日期: 2016-11-07; 修回日期: 2017-03-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61473233); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(310832171004, 310832163403).

作者简介: 闫茂德(1974—),男,教授,从事自主车辆队列控制及多移动机器人编队控制等研究;宋家成(1993—),男,硕士生,从事自主车辆队列控制的研究.

[†]通讯作者. E-mail: yangpanpan1985@126.com

的能源消耗; Bernardo等^[9-10]在车队恒速运动情况下, 给出一种基于CTH策略的车辆队列控制算法。

本文针对CS策略和CTH策略存在的间距调节灵活性不足及道路利用率欠佳的问题, 设计一种时间间隔随车辆速度变化的变时间间隔策略(TVH), 使车辆在不同速度下维持不同的时间间隔, 从而提高道路利用率, 并进一步提出一种基于信息一致性的自主车辆变间距队列控制算法。仿真结果表明, 本文所提的算法可以保证队列收敛到期望的车间间距, 跟随者的速度最终可以收敛到领航者的稳态速度, 且给出的间距策略相比于CS策略和CTH策略具有更合理的安全距离, 尤其是在低速时, 可有效缩短车间距, 提高道路容量。

1 系统模型及问题描述

1.1 车辆模型

考虑一组由 N 辆汽车组成的车辆纵向编队, 如图1所示, 汽车被组织成一个纵向队列, 最左端为领航者, 其他为跟随者, 所有车辆之间通过无线通信的方式(V2V、4G等)共享各自的运动信息(如位置、速度、加速度等)。

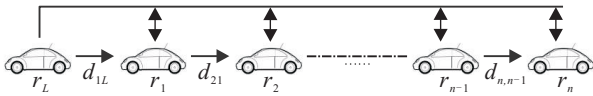


图1 自主车辆队列网络拓扑结构

不失一般性, 假设跟随者车辆在运动过程中遵循以下动力学模型:

$$\begin{cases} \dot{r}_i(t) = v_i(t), & i = 1, 2, \dots, N; \\ \dot{v}_i(t) = u_i(t), & i = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $r_i(t) \in \mathbf{R}$ 为车辆 i 在 t 时刻的位置; $v_i(t) \in \mathbf{R}$ 为其速度; $u_i(t) \in \mathbf{R}$ 为加速度, 在此作为控制输入。

领航者的动力学模型可以描述为

$$\begin{cases} \dot{r}_L(t) = v_L(t), \\ \dot{v}_L(t) = u_L(t). \end{cases} \quad (2)$$

其中: $r_L(t) \in \mathbf{R}$ 为领航者 L 在 t 时刻的位置, $v_L(t) \in \mathbf{R}$ 为其速度, $u_L(t) \in \mathbf{R}$ 为控制输入。

车辆在行驶过程中需要根据其他车辆的运动状态来调整自己的速度和位置, 所有车辆之间通过信息流相互耦合。在此, 用 a_{ij} 表示任意两车之间的耦合关系, 若车辆 i 和 j 有信息交互, 则 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$ 。需要说明的是, 本文仅考虑两车均可获取彼此的运动信息, 即 $a_{ij} = a_{ji}$ 。

1.2 问题描述

如图1所示, 车辆队列具有如下数学结构:

$$\delta_i = r_i - r_{i-1} - d_{i,i-1}. \quad (3)$$

其中: $d_{i,i-1}$ 为期望的车间距离; δ_i 为期望车间距离与实际距离的误差, 控制目标是使所有 δ_i 趋于零。

根据式(1)和(2), 使车辆队列保持期望的安全距离和相同速度的问题可以描述为使所有车辆的位置和速度趋近于下式的信息一致性问题, 即

$$\begin{cases} r_i(t) \rightarrow \frac{1}{g_i} \left\{ \sum_{j=0}^N a_{ij} \cdot (r_j(t) + d_{ij}(t)) \right\}, \\ v_i(t) \rightarrow v_L(t), \end{cases} \quad (4)$$

其中 $g_i = \sum_{j=0}^N a_{ij}$ 是车辆 i 的度。

车辆队列在行驶过程中, 车间距离必须保持在安全的范围内, 合理的安全距离 $d_{i,i-1}$ 可以增加交通容量, 有效减缓交通拥堵, 提高道路利用率(即在特定时刻、特定长度的道路区间内, 已被车辆利用的道路长度与区间道路总长度的比值得以提升)^[2]。目前的间距策略虽然可以保证车辆队列安全地行驶, 有效避免交通事故发生, 但由于安全距离固定, 距离调节灵活性不足, 难以适应复杂道路的行驶工况。因此, 本文假设车辆间距 $d_{i,i-1}$ 可随车辆队列的运动状态自适应变化, 进而研究车间距可变情况下的自主车辆队列控制方法。

2 车辆间距策略

车辆间距策略, 即选用合适的距离函数作为车辆间距控制目标, 其目的是保证前后车在行驶和紧急制动过程中不相撞的基础上, 尽可能提高道路利用率。目前国内外主要采用CS策略和CTH策略两种形式, 分别如下所示。

固定间距(CS)策略:

$$d_{i,i-1} = m_1, \quad (5)$$

其中 $m_1 > 0$ 为两车之间的安全距离, 为常数。

固定时间间隔(CTH)策略:

$$d_{i,i-1} = m + p \times v. \quad (6)$$

其中: $m > 0$ 为两车静止时需要保持的最小距离, $p > 0$ 为两车之间需要保持的时间间隔。

对于CS策略, 假设车辆在高速行驶时需要保持 m_1 的安全距离, 而车速降低时, 辆车之间所需的安全距离随之减少, 若仍保持距离 m_1 行驶, 则道路不能被有效利用; 对于CTH策略, 两车之间维持固定的时间间隔。事实上, 当车速降低时, 车辆所需的制动时间随之减少, 若继续采用固定的时间间隔, 将造成车辆间距过大, 道路利用率降低; 若考虑到时间间隔可随速度动态变化, 则可以减少车辆间距。

鉴于此, 对CTH策略进行优化, 设计一种变时间

间隔策略(TVH),将固定时间间隔用一个与速度有关的时变时间间隔代替,即

$$p = p_0 + p_1 \times v_L, \quad (7)$$

其中 $p_0, p_1 > 0$ 为正实数.

为保障车辆队列行驶的安全性,并提高道路利用率,在此对变时间间隔进行如下限定:

$$p = \text{sat}(p_0 + p_1 \times v_L) = \begin{cases} 1.5, & p_0 + p_1 \times v_L \geq 1.5; \\ p_0 + p_1 \times v_L, & p_0 + p_1 \times v_L < 1.5; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (8)$$

将式(7)代入(6),有

$$d_{i,i-1} = m + p_0 \times v_L + p_1 \times v_L^2. \quad (9)$$

可见,所设计的车辆间距策略是一个与速度有关的二次光滑曲线,其在形式上与参考驾驶员行为所得的间距策略 $d_{i,i-1} = A + T \times v + G \times v^2$ 类似^[11]. 这样,通过参数的选取可以保证其在能源消耗和变距平滑性两方面的优点. 此外,通过选取适当的 p_0 和 p_1 , 可以将其转化为CS策略($p_0 = 0, p_1 = 0$)和CTH策略($p_0 = p, p_1 = 0$). 因而,本策略更为普适,其他两种策略可视为本策略的特例.

3 基于信息一致性的车辆队列控制

车辆队列控制的目的是使车间距收敛到期望距离,车辆的速度收敛到领航者的速度,即 $r_i(t) - r_j(t) \rightarrow d_{ij}, v_i(t) \rightarrow v_j(t) \rightarrow v_L(t)$. 在此,提出一种基于信息一致性的车辆队列控制算法:

$$u_i(t) = \dot{v}_i(t) - \frac{1}{g_i} \sum_{j=1}^N a_{ij} [(r_i(t) - r_j(t) - d_{ij}(t)) + \beta(v_i(t) - v_j(t)) - k_i [(r_i(t) - r_L(t) - d_{iL}) + \gamma(v_i(t) - v_j(t))]]. \quad (10)$$

其中: k_i 表示车辆 i 与领航者的连通性,如果第 i 辆车能够从领航者获得信息,则 $k_i > 0$, 否则 $k_i = 0$; $\beta > 0$ 和 $\gamma > 0$ 为控制参数.

定义状态误差如下:

$$\tilde{r}_i(t) = [\tilde{r}_1(t), \dots, \tilde{r}_i(t), \dots, \tilde{r}_n(t)]^T, \quad (11)$$

$$\tilde{v}_i(t) = [\tilde{v}_1(t), \dots, \tilde{v}_i(t), \dots, \tilde{v}_n(t)]^T. \quad (12)$$

其中: $\tilde{r}_i(t) = r_i(t) - r_L(t) - d_{iL}(t), \tilde{v}_i(t) = v_i(t) - v_L(t)$. 则误差方程可以描述为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{r}}_i(t) = \tilde{v}_i(t), \\ \dot{\tilde{v}}_i(t) = -\frac{1}{g_i} \sum_{j=1}^N a_{ij} [(\tilde{r}_i(t) - \tilde{r}_j(t)) + \beta(\tilde{v}_i(t) - \tilde{v}_j(t))] - k_i(\tilde{r}_i(t) + \gamma\tilde{v}_i(t)). \end{cases} \quad (13)$$

对于一个自主车辆队列系统,若每辆汽车的初始位置和速度已知,则有如下定理.

定理1 如果所有车辆之间是连通的,即 $a_{ij} = 1, k_i > 0 (i \neq j)$, 则采用式(10)的控制律,跟随者的状态可以直接或者间接地被领航者车辆的状态影响,并收敛到期望状态,即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\tilde{r}_i(t)\| = \|r_i(t) - r_L(t) - d_{iL}\| = 0,$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\tilde{v}_i(t)\| = \|v_i(t) - v_L(t)\| = 0.$$

换言之,若车辆队列采用控制律(10)纵向编队行驶,则其纵向间距 $r_i(t) - r_L(t)$ 将收敛于期望距离 d_{iL} , 同时跟随者的速度 $v_i(t)$ 将收敛于期望的速度 $v_L(t)$.

证明 对于误差方程(13),定义Lyapunov函数

$$V(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \tilde{v}_i(t)^2 + \sum_{i=1}^N k_i \int_0^{\tilde{r}_i(t)} s ds + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{a_{ij}}{g_i} \int_0^{\tilde{r}_i(t) - \tilde{r}_j(t)} s ds. \quad (14)$$

对式(14)求导,得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \sum_{i=1}^N \tilde{v}_i(t) \left[-\frac{1}{g_i} \sum_{j=1}^N a_{ij} ((\tilde{r}_i(t) - \tilde{r}_j(t)) + \beta(\tilde{v}_i(t) - \tilde{v}_j(t))) - k_i(\tilde{r}_i(t) + \gamma\tilde{v}_i(t)) \right] + \\ & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{a_{ij}}{g_i} (\tilde{v}_i(t) - \tilde{v}_j(t)) (\tilde{r}_i(t) - \tilde{r}_j(t)) + \sum_{i=1}^N k_i \tilde{v}_i(t) \tilde{r}_i(t). \end{aligned} \quad (15)$$

整理后得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & \sum_{i=1}^N \tilde{v}_i(t) \left[-\frac{1}{g_i} \sum_{j=1}^N a_{ij} \beta (\tilde{v}_i(t) - \tilde{v}_j(t)) - k_i \gamma \tilde{v}_i(t) \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

进一步有

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{a_{ij}}{g_i} \beta (\tilde{v}_i(t) - \tilde{v}_j(t))^2 - \sum_{i=1}^N k_i \gamma \tilde{v}_i(t)^2 \leq 0. \end{aligned} \quad (17)$$

如果 $\dot{V}(t) = 0$, 则由式(17)可得

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{a_{ij}}{g_i} \beta (\tilde{v}_i(t) - \tilde{v}_j(t))^2 - \sum_{i=1}^N k_i \gamma \tilde{v}_i(t)^2 = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

由于 $a_{ij} > 0, k_i > 0$, 由式(18)可知 $\tilde{v}_i = \tilde{v}_j = 0$, 从而有 $\dot{\tilde{v}}_i = \dot{\tilde{v}}_j$. 进一步可得

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{v}}_i(t) = & -\frac{1}{g_i} \sum_{j=1}^N a_{ij} [(\tilde{r}_i(t) - \tilde{r}_j(t)) + \beta(\tilde{v}_i(t) - \tilde{v}_j(t))] - k_i(\tilde{r}_i(t) + \gamma\tilde{v}_i(t)). \end{aligned} \quad (19)$$

从而有

$$\dot{v}_i(t) = -\frac{1}{g_i} \sum_{j=1}^N a_{ij}(\tilde{r}_i(t) - \tilde{r}_j(t) - k_i \tilde{r}_i(t)) = 0. \quad (20)$$

基于式(20),有

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \tilde{r}_i(t) \dot{v}_i(t) = & \\ - \sum_{i=1}^N \tilde{r}_i(t) \left[\frac{1}{g_i} \sum_{j=1}^N a_{ij}(\tilde{r}_i(t) - \tilde{r}_j(t) - k_i \tilde{r}_i(t)) \right]. & \end{aligned} \quad (21)$$

进一步化简为

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \tilde{r}_i(t) \dot{v}_i(t) = & -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij}(\tilde{r}_i(t) - \tilde{r}_j(t))^2 - \\ & \sum_{i=1}^N k_i \tilde{r}_i^2(t) = 0. \end{aligned} \quad (22)$$

由式(22)可知, $\tilde{r}_i(t) = \tilde{r}_j(t) = 0$.

根据 Lyapunov 稳定性判据可知,对于所有跟随者,当 $t \rightarrow \infty$ 时, $r_i(t) - r_L(t) - d_{iL} \rightarrow 0, v_i(t) - v_L(t) \rightarrow 0$,意味着

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \|\tilde{r}_i(t)\| &= \|r_i(t) - r_L(t) - d_{iL}\| = 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|\tilde{v}_i(t)\| &= \|v_i(t) - v_L(t)\| = 0. \quad \square \end{aligned}$$

4 仿真实验及分析

为了验证本文所提出的自主车辆变间距队列控制算法的有效性,在 Matlab 下展开仿真研究.

4.1 仿真设置

在此,给出车辆队列从启动加速到匀速巡航,再到减速制动的一个完整过程.领航者的期望速度可由下式表示:

$$\begin{cases} v_L(t) = 20 \times \sin((\pi/200) \times t), & t < 100; \\ v_L(t) = 20, & 100 \leq t \leq 500; \\ v_L(t) = 20 \times \sin((\pi/200) \times t), & 500 \leq t < 600; \\ v_L(t) = 0, & t \geq 600. \end{cases}$$

选择由6辆汽车组成的车辆队列系统(包括1个领航者和5个跟随者)进行仿真研究.领航者的初始状态为 $r_L(0) = 15, v_L(0) = 0$;5个跟随者的初始状态分别为 $r_i(0) = [12; 10; 8; 3; 0], v_i(0) = [0; 0; 0; 0; 0]$;系统控制参数 $\beta = 2, \gamma = 2$;连通系数 $k_i = 1, a_{ij} = 1$;间距策略参数 $m = 3, p_0 = 0.0019, p_1 = 0.0448$.

4.2 仿真结果

图2和图3分别给出了6辆车的位移曲线和跟随者与领航者的距离曲线.可以看出:在车辆队列恒速

行驶时,车辆间能够保持稳定的安全距离;而当车速发生改变时,车间距会依式(9)动态变化,能够在保证车辆不发生碰撞的前提下尽可能缩短车间距,达到提高道路利用率的目的.

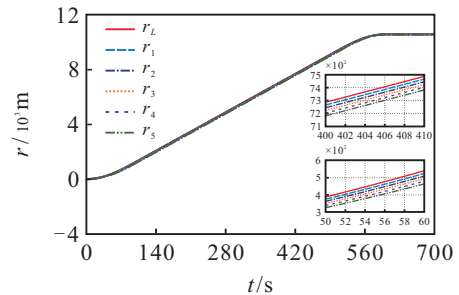
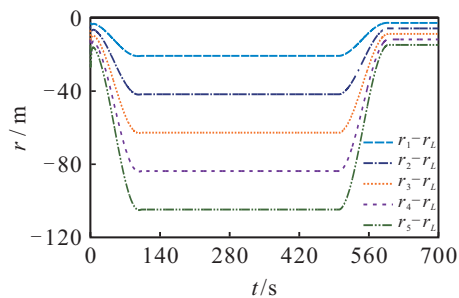
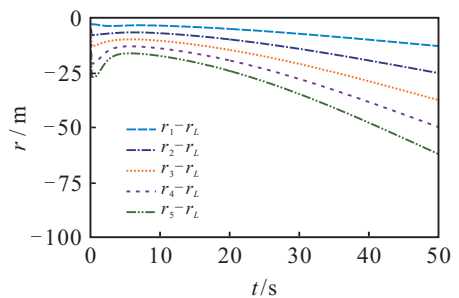


图2 TVH策略下的车辆位移曲线



(a) 跟随者与领航者的距离曲线



(b) 局部放大图

图3 TVH策略下跟随者与领航者的距离曲线

图4给出了领航者和5个跟随者的速度曲线.从中可以看出,跟随者的速度会渐近趋近于领航者的速度,并在领航者速度稳定时,与其速度一致.

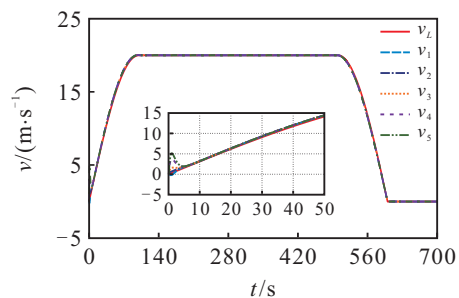


图4 TVH策略下车辆的速度曲线

4.3 对比分析

为验证本文所提策略的优势,在相同条件下对3种策略进行对比研究,仿真参数见表1.

表1 车辆间距策略参数

参数	CS策略	CTH策略	TVH策略
m	21	0	3
p_0	0	1.05	0.0019
p_1	0	0	0.0448

在此,给出如下两个评价指标,以对本文所提策略的性能进行更客观地评价分析。

1) 道路占用量: 整个车辆队列在编队运行时所占用的道路长度。

表2 各个时刻3种距离策略的道路占用量

	时间/s								
	20	40	60	80	250	530	550	570	590
CS策略	104.999	105	105	105	105	105	105	105	105
CTH策略	334.674	63.627	86.359	100.646	105	92.786	72.994	46.063	24.628
TVH策略	24.29	48	76.254	98.085	104.79	84.524	58.045	32.464	16.997

表3给出了车辆队列在行驶中,各时刻领航者后200m道路空间上的车辆容纳量。可以看出,相比其他两种策略,TVH策略在相同距离内可容纳更多车辆,特别是在车速较低时优势更为明显。究其原因,是由于TVH策略可针对不同车速对时间间隔进行调整,在低速时保持较小的时间间隔,车辆间距被缩小;反之,随着车速的提升,时间间隔增大,车辆间距随之加大,但仍优于其他两种间距策略。

表3 各个时刻200m距离的道路容纳量

	时间/s							
	20	40	60	80	250	530	550	570
CS策略	9	9	9	9	9	9	9	9
CTH策略	30	16	11	10	9	10	13	20
TVH策略	42	21	13	10	9	11	16	29

由此可见,本文所提算法不仅可以实现自主车辆的队列控制,且相比于传统间距策略,在间距调节方面具有更好的灵活性,并能有效降低道路占用量,提升道路利用率。

5 结论

本文针对自主车辆的队列控制问题,设计了一种更为灵活的间距策略(TVH),使车辆间距可随车速自适应变化。在此基础上,提出了一种基于信息一致性的车辆队列控制算法,实现了自主车辆的变车距队列控制。相比于CS策略和CTH策略,本文所提间距策略具有更合理的安全距离,特别是在车速较低时,可以有效减小车辆队列对道路的占用量,增大道路的容纳量,提高道路利用率。

参考文献(References)

- [1] Shladover S E. Path at 20-history and major milestones[J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2007, 8(4): 584-592.
- [2] Ioannou P. Adaptive cruise control systems[J]. IEEE

2) 道路容纳量: 一段固定长度道路上容纳车辆的数量。

表2给出了车辆队列在行驶过程中对道路的占用情况(单位为m)。可以看出,相比CS策略和CTH策略,TVH策略在车辆队列行驶过程中对道路的占用量显著降低,特别是车速较低时,对道路的占用量更小。事实上,就目前拥堵的城市路况而言,车辆在绝大多数时处于低速行驶状态,因而,TVH策略更符合当前城市交通的实际情况,更有助于提高道路利用率。

- Trans on Intelligent Transportation Systems, 2003, 4(3): 113-114.
- [3] Santhanakrishnan K, Rajamani R. On spacing policies for highway vehicle automation[J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2000, 3(4): 198-204.
- [4] Swaroop D, Hedrick J K, Chien C C. A comparison of spacing and headway control laws for automatically controlled vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 1994, 23(8): 597-625.
- [5] Guo X, Wang J, Liao F, et al. Distributed adaptive integrated-sliding-mode controller synthesis for string stability of vehicle platoons[J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(9): 2419-2429.
- [6] Li Y, Li K, Zheng T. Evaluating the performance of vehicular platoon control under different network topologies of initial states[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2016, 450: 359-368.
- [7] Yanakiev D, Kanellakopoulos I. Nonlinear spacing policies for automated heavy-duty vehicles[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 1998, 47(4): 1365-1377.
- [8] Bayar B, Sajadi-Alamdari S A, Viti F. Impact of different spacing policies for adaptive cruise control on traffic and energy consumption of electric vehicles[C]. The 24th Mediterranean Conf on Control and Automation. Athens: IEEE, 2016: 1349-1354.
- [9] Bernardo M D, Falcone P, Salvi A. Design, analysis, and experimental validation of a distributed protocol for platooning in the presence of time-varying heterogeneous delays[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2016, 24(2): 413-427.
- [10] Bernardo M D, Salvi A, Santini S. Distributed consensus strategy for platooning of vehicles in the presence of time-varying heterogeneous communication delays[J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(1): 102-112.
- [11] Fancher P, Bareket Z, Peng H, et al. Research on desirable adaptive cruise control behavior in traffic streams[Z]. Ann Arbor: University of Michigan Transportation Research Institute(UMTRI), 2002.

(责任编辑: 齐 霁)