文章编号:1674-2974(2022)10-0034-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2022300

基于状态感知的UGV H_∞事件触发路径跟踪控制

孙洪涛[1,2†],张鹏飞[1],彭晨[2],丁飞[3]

(1. 曲阜师范大学 工学院,山东 日照 276826;
2. 上海大学 机电工程与自动化学院,上海 200444;
3. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室,湖南 长沙 410082)

摘 要:针对通信受限下的无人驾驶车辆路径跟踪控制问题,提出了一种基于状态感知的H_∞事件触发路径跟踪控制策略.首先,根据车辆的动力学行为建立了相应的路径跟踪控制模型;其次,基于对路径跟踪控制系统的状态实时感知,设计了一种新型的基于状态感知的事件触发通信策略(SS-ETC),可根据控制系统的状态对事件触发阈值进行动态自适应的调整;然后,在该动态事件触发通信策略下,结合时滞系统建模方法与Lyapunov稳定性理论,设计了基于状态感知的事件触发H_∞控制器.本文所提出的基于状态感知的动态事件触发通信策略能够根据控制系统的量测状态进行通信阈值的动态调整,有效地实现了自主车辆通信与控制的自适应协同设计.最后,通过仿真实验验证了所提出的动态事件触发控制策略的有效性.

关键词:无人驾驶车辆;事件触发通信;路径跟踪;H_∞控制

中图分类号:TP273 **文献标志码**:A

State-sensitive Based Event-triggered H_∞ Control for Path Tracking of Unmanned Ground Vehicle

SUN Hongtao[1,2†],ZHANG Pengfei[1],PENG Chen[2],DING Fei[3]

(1. College of Engineering, Qufu Normal University, Rizhao 276826, China;
2. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;
3. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper proposes a state-sensitive based event-triggered H_∞ control strategy to solve the problem of unmanned ground vehicle (UGV) path tracking control under communication restriction. Firstly, a corresponding path-tracking control model is established according to the dynamics of the connected vehicle. Secondly, a novel state-sensitive event-triggered communication (SS-ETC) strategy according to the state perception of path tracking in real time is proposed. Then, an event-triggered H_∞ controller is designed by combining the time delay system mod-

* 收稿日期:2021-10-07
基金项目:国家自然科学基金资助项目(62103229,62173218,61833011),National Natural Science Foundation of China(62103229,62173218,61833011);中国博士后科学基金资助项目(2021M692024),China Postdoctoral Science Foundation(2021M692024);上海科委国际合作项目(21190780300),International Corporation Project of Shanghai Science and Technology Commission (21190780300);山东省自然科学基金项目(ZR2021QF026),Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2021QF026)
作者简介:孙洪涛(1987—),男,山东临沂人,曲阜师范大学讲师,博士
† 通信联系人,E-mail: sht371322@163.com

eling method and Lyapunov stability theory. The proposed dynamic event-triggered communication strategy based on state perception can dynamically adjust the communication threshold according to the state measurements of the control system, and effectively realize the adaptive co-design of UGV communication and control. Finally, the effectiveness of the proposed dynamic event-triggered control strategy is verified by simulation experiments.

Key words: unmanned ground vehicle; event-triggered scheme; path tracking; H_∞ control

现代网联汽车运动控制通过通信网络将车辆的传感器、控制器和执行器密切结合[1-2]. 随着5G网络技术的蓬勃发展，网络化的应用变得越来越普遍，以网络控制技术为支撑的自主车辆控制成为当前研究的热点问题，如将驾驶安全性和制动能量回收相结合[3]，控制车辆急转弯时的稳定性[4]等. 由于网络控制系统在控制和通信方面的性能表现受频带宽、采样延迟和数据丢包的影响[5]，因此，在网联车辆设计中，通信与控制的协同设计问题不容忽视.

路径跟踪控制是自主车辆研究的核心，自主车辆的路径跟踪系统由通过无线网络连接控制器来完成路径跟踪任务. 在给定车辆位置并考虑设定点的情况下，路径跟踪控制器使用二次曲线方法来计算并向自主车辆的转向机构发送控制命令[6]. 目前，诸多控制策略已经被用来处理复杂道路情况的路径跟踪控制问题，如模糊控制[7]，MPC算法[8]和鲁棒控制方法[9]. 文献[10]介绍了一种结合局部路径规划和路径跟踪的MPC框架，同时控制器约束预测状态到两种安全包络内来避免车辆旋转或撞上障碍物；文献[11]提出了一种双隐层输出反馈神经网络快速非奇异终端滑模控制策略，以更准确、快速地实现自主车辆的路径跟踪任务；文献[12]提出了一种三层结构控制器，为每个车轮设计了自适应律，以完成路面情况未知和扰动未知的路径跟踪任务；文献[13]通过一种多核强化学习控制算法来提高异构数据样本函数的近似能力，从而实现路径跟踪的精确度和平滑度. 但这些方法并未考虑自主车辆路径跟踪中的通信约束，具有一定的保守性. 另外，周期性采样机制在路径跟踪控制上得到广泛应用，但由于周期性采样的机制会周期性的发送大量数据，容易造成大量的资源浪费，特别是自主车辆广泛采用无线网络传输，多传感器的数据传输易造成带宽受限现象，进而导致自主车辆路径跟踪性能下降. 为了在保证一定路径跟踪控制性能的同时有效节约有限的通信资源，减少数据传输并提高通信效率对于网络化的路径跟踪控制系统设计具有重要意义. 近年来，事件触发机制因在通信及计算资源节约方面的优势而受到广泛的关注. 例如，文献[14]提出了一种新颖的离散时间动态事件触发机制，控制输入更新之间的绝对误差；文献[15]提出具有时变切换拓扑的滤波网络上一类扇区有界非线性系统的分布式自适应事件触发策略；文献[16]研究了一种弹性事件触发控制算法适用于能量受限拒绝服务攻击的系统；文献[17]提出了一种具有记忆特征的事件触发策略来提高系统控制性能. 但从目前的研究来看，针对自主车辆的事件触发控制研究并不多见.

基于以上讨论，传统静态事件触发策略采用固定事件触发参数，无法动态调整通信阈值，现有的变阈值触发策略，如自适应事件触发控制、弹性事件触发控制主要是在调节过程中单调的减小触发参数来保证控制性能，难以实现系统的稳定性与通信效率的动态协同控制. 因此，本文的主要贡献点可以归纳为如下两个方面：

1）提出了一种新型的基于状态感知的事件触发通信策略，通过对系统状态的稳定性判断，动态调节事件触发参数，实现了路径跟踪控制系统中通信传输与控制性能的动态耦合；

2）基于所设计的SS-ETC策略，综合利用时滞系统分析方法和Lyapunov稳定性理论，设计了基于SS-ETC的H_∞事件触发控制器，实现了网络化路径跟踪控制与通信的协同设计.

本文的组织结构如下：第一部分主要针对自主车辆的动力学行为进行网络化路径跟踪控制系统的建模，并提出了基于状态感知的事件触发通信策略；第二部分给出了本文的主要结果，包括稳定性分析和事件触发控制器设计等；第三部分通过仿真实验验证了所提出的理论结果的有效性. 最后对本文进行了总结.

1 事件触发控制建模

1.1 车辆路径跟踪控制系统建模

如图 1 所示,可将自主车辆等效为一个两自由度的动力学模型,可按如下方式进行控制:

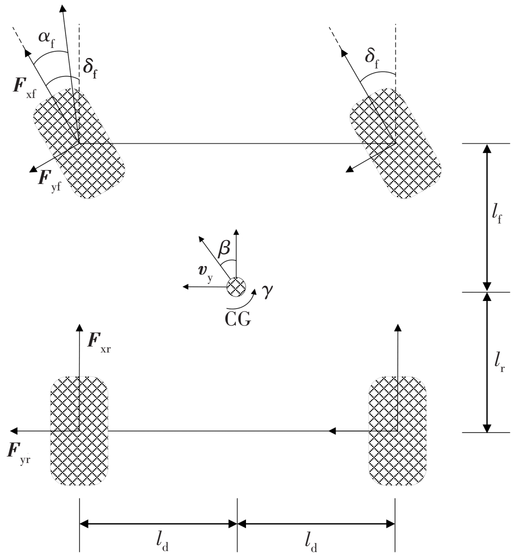

图 1 车辆的动力学模型

Fig.1 Dynamic model of vehicle

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{v}}_y &= \frac{1}{m}(\boldsymbol{F}_{yf}+\boldsymbol{F}_{yr})-\boldsymbol{v}_x\gamma+d_1(t)\\ \dot{\gamma} &= \frac{1}{\boldsymbol{I}_z}(l_f\boldsymbol{F}_{yf}-l_r\boldsymbol{F}_{yr})+\frac{1}{\boldsymbol{I}_z}\Delta M_z+d_2(t)\end{aligned} \tag{1}$$

式中:m 和 $\boldsymbol{I}_z$ 分别是车辆的质量和绕 z 轴的转动惯量;车辆重心(CG)的纵向速度为 $\boldsymbol{v}_x$,横向速度为 $\boldsymbol{v}_y$,横摆率为 $\boldsymbol{\gamma}$;$\boldsymbol{F}_{yf}$ 和 $\boldsymbol{F}_{yr}$ 分别是前轮和后轮的侧向力:$d_1(t)$ 和 $d_2(t)$ 代表系统中的不确定项,如侧向风力和轮胎滚动时的阻力等;ΔM_z 是左右车轮纵向轮胎力差产生的外偏航力矩,可表示为:

$$\Delta\boldsymbol{M}_z=\sum_{i=1}^{2}\boldsymbol{F}_{xi}\left[(-1)^i l_d\cos\delta_f+l_f\sin\delta_f+\sum_{i=3}^{4}(-1)^i l_d\boldsymbol{F}_{xi}\right] \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{F}_{xi}$ 是第 i 个轮胎的纵向力,l_d 是轮距的一半,l_f 和 l_r 表示从重心到前轴和后轴的距离.

同时,前胎和后胎的侧向力是轮胎滑移角的函数,可表示为:

$$\boldsymbol{F}_{yf}=C_f\alpha_f,\ \boldsymbol{F}_{yr}=C_r\alpha_r \tag{3}$$

式中:C_f 和 C_r 降低了前后轮胎的侧偏刚度,前后轮胎的滑移角 α_f 和 α_r 可表示为:

$$\alpha_f=\delta_f-\frac{l_f\gamma}{\boldsymbol{v}_x}-\frac{\boldsymbol{v}_y}{\boldsymbol{v}_x},\ \alpha_r=\frac{l_r\gamma}{\boldsymbol{v}_x}-\frac{\boldsymbol{v}_y}{\boldsymbol{v}_x} \tag{4}$$

式中:δ_f 指的是前轮转向角.

进一步,路径跟踪误差动力学模型如图 2 所示.

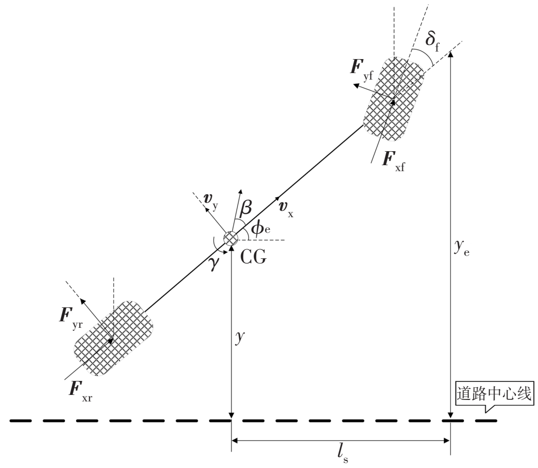

图 2 路径跟踪模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of path-tracking model

路径跟踪车辆模型可表示为:

$$\begin{aligned}\dot{\phi}_e &= \gamma-\boldsymbol{v}_x\rho_{ref}\\ \dot{y}_e &= \boldsymbol{v}_x(\beta+\phi_e)+l_s(\gamma-\boldsymbol{v}_x\rho_{ref})\end{aligned} \tag{5}$$

式中:ϕ_e 定义为车辆纵轴与期望路径中心线之间的夹角;y_e 定义为在预览距离 l_s 处相对于道路中心线的横向偏移;y 是从车辆重心到所需路径的横向偏移. y 、y_e 和 ϕ_e 之间的近似关系可表示为:

$$\tan\phi_e=\frac{y_e-y}{l_s} \tag{6}$$

设 ϕ_d 是道路中心线相对于全局坐标系的偏航角,则车辆的偏航角可推导为:

$$\phi=\phi_e+\phi_d \tag{7}$$

为了用纵向速度 $\boldsymbol{v}_x$ 去跟踪具有道路曲率 ρ_{ref} 的期望路径,绝对期望横摆率应为 $\boldsymbol{v}_x\rho_{ref}$,即 $\dot{\phi}_d=\boldsymbol{v}_x\rho_{ref}$. 最后,定义系统的状态向量 $\boldsymbol{x}=[\boldsymbol{v}_y,\gamma,\phi_e,y_e]^T$,并结合式(1)和式(5),自主车辆的路径跟踪控制模型的状态空间可表示为:

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t)+\boldsymbol{B}_\omega d(t) \tag{8}$$

式中:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}-\dfrac{C_f+C_r}{m\boldsymbol{v}_x} & -\dfrac{C_fl_f-C_rl_r}{m\boldsymbol{v}_x}-\boldsymbol{v}_x & 0 & 0\\ -\dfrac{C_fl_f-C_rl_r}{I_z\boldsymbol{v}_x} & -\dfrac{C_fl^2{}_f+C_rl^2{}_r}{I_z\boldsymbol{v}_x} & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 1 & l_s & \boldsymbol{v}_x & 0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}\dfrac{C_f}{m} & \dfrac{C_fl_f}{I_z} & 0 & 0\\ 0 & \dfrac{1}{I_z} & 0 & 0\end{bmatrix}^T$$

B_ω 是一个与外界扰动及曲率变化相关的 4×1 的常数矩阵.

1.2 SS-ETC 策略设计

为方便分析,首先给出如下假设.

假设 1 假设传感器是时间触发[18],并将采样周期表示为 h. 可以将采样序列表示为集合 $S_1 = \{0, h, 2h, \cdots, kh\}, k \in \mathbf{N}$.

假设 2 采样数据是否被发送是由所提出的事件触发通信策略的阈值决定的. S_2 表示预先设计 的事件发生器选择的传输序列, $S_2=\{0, t_1h, t_2h, \cdots, t_kh\}$, 显然, $S_2 \subseteq S_1$.

假设 3 控制操作由零阶保持器(ZOH)产生,其保持间隔 $t \in [t_kh + \tau_{t_k}, t_{k+1}h + \tau_{t_{k+1}})$, 其中 τ_{t_k} 是网络通信环境下的传输时延.

由于事件触发控制是基于采样误差的控制方式,定义 $e(i_kh)$ 表示当前采样时刻和最近传输的采样时刻之间的状态误差,即

$$e(i_kh) = x(i_kh) - x(t_kh) \tag{9}$$

式中: $i_kh = t_kh + l_h, l \in \mathbf{R}$.

基于上述定义,提出如下基于状态感知的事件触发通信策略

$$t_{k+1}h = t_kh + \min_{l} \{lh|e^{\mathrm{T}}(i_kh)\boldsymbol{\Phi}e(i_kh) \geqslant \frac{\sigma_\varepsilon}{\|x(t_kh)\| + \varepsilon}\chi(t_k)\} \tag{10}$$

式中: $\chi(t_k) = x^{\mathrm{T}}(t_kh)\boldsymbol{\Phi}x(t_kh)$; $\varepsilon > 0$ 为正标量; σ_ε 是关于 ε 事件触发参数; $\boldsymbol{\Phi}$ 是待求正定矩阵.

注 1 由于 $\|x(t_kh)\|$ 的引入,使得上述事件触发通信策略的通信参数(阈值)将由路径跟踪控制系统的状态 $\|x(t_kh)\|$ 动态确定. 容易看出,该事件触发策略具有如下特点.

1)事件触发参数 σ_ε 是依赖参数 ε 设定的,而 ε 的存在可避免事件触发函数分母为0,从而保证所设计的事件触发函数有意义.

2)由事件触发条件,即式(10)可知,该事件触发函数可自动提供最大触发阈值 $\frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon}$. 因此,如果 σ_ε 设计得当,在事件触发阈值自适应动态调整的同时,所有的事件触发传输均能够满足控制系统的稳定性条件.

3)如果 $\|x(t_kh)\|$ 变大,从控制系统上来说,系统将变得不稳定. 而此时,在 $\|x(t_kh)\|$ 的调节下,事件触发阈值将变小,使得状态传输频率增大,进而控制器的控制调节能力增强.

4)如果 $\|x(t_kh)\|$ 变小,从控制系统上来说,系统将趋于稳定. 在 $\|x(t_kh)\|$ 的调节下,事件触发阈值将变大,使得状态传输频率降低,进而节约通信资源.

1.3 SS-ETC 机制下的网络化路径跟踪控制模型

在采样控制架构下,基于状态反馈的路径跟踪控制可表示为:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{Ax}(t) + \boldsymbol{Bu}(t) + \boldsymbol{B}_\omega d(t) \\ z(t) = \boldsymbol{Cx}(t) + \boldsymbol{Du}(t) \\ \boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{Kx}(t_kh), t \in [t_kh + \tau_{t_k}, t_{k+1}h + \tau_{t_{k+1}}) \end{cases} \tag{11}$$

式中: $\boldsymbol{K}$ 是待设计的控制器增益.

根据文献[19]给出 $t \in [t_kh + \tau_{t_k}, t_{k+1}h + \tau_{t_{k+1}})$ 的虚拟采样区间划分方法可将相邻采样间隔表示为:

$$\Omega = \bigcup_{l=0}^{t_{k+1}-t_k-1} \Omega_l$$

式中: $\Omega_l = [i_kh + \tau_{t_k}, i_kh + h + \tau_{t_{k+1}}), i_kh = t_kh + lh$.

进一步,定义

$$\tau(t) = t - i_kh \tag{12}$$

对所有的 $t \in \Omega_l$, 那么分段函数满足 $\dot{\tau}(t) = 1$ 和 $0 \leqslant \tau_1 = \min\{\tau_{t_k}, \tau_{t_{k+1}}\} \leqslant \tau_t \leqslant h + \max\{\tau_{t_k}, \tau_{t_{k+1}}\} = \tau_2$

因此,

$$\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{Kx}[t - \tau(t) - e(i_kh)] \tag{13}$$

结合式(9)、(10)和(13),在 SS-ETC 机制下的闭环路径跟踪控制系统可进一步表示为:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{Ax}(t) + \boldsymbol{BKx}[t - \tau(t) - e(i_kh)] + \boldsymbol{B}_\omega d(t) \\ \text{满足:} \\ e^{\mathrm{T}}(i_kh)\boldsymbol{\Phi}e(i_kh) \geqslant \dfrac{\sigma_\varepsilon}{\|x(t_kh)\| + \varepsilon}\chi(t_k) \end{cases} \tag{14}$$

式中各个参数的定义由前述式(10)给出. 这里,对于 $t \in [t_0 - \tau_2, t_0)$, $x(t)$ 的初始状态定义为 $x(t_0)$.

基于所提出的 SS-ETC 机制,本文将通过设计控制器增益 $\boldsymbol{K}$ 使得网络化的自主车辆路径跟踪控制实现如下目标.

1)当不存在外界扰动[即 $d(t) = 0$]时,式(11)是渐近稳定的;

2)当存在外界扰动[即 $d(t) \neq 0$]时,式(11)能够保证 $\|z(t)\| \leqslant \gamma\|d(t)\|$.

为了后续证明方便,本小节给出如下有用的引理.

引理 1 (Jensen 不等式)对于任意对称正定矩阵 $\boldsymbol{M} > 0$, 标量 $\sigma > 0$ 和向量函数 $\boldsymbol{\omega}: [0, \sigma] \to \mathbb{R}$, 有下面的积分不等式成立:

$$[\int_0^\sigma \boldsymbol{\omega}(s)\mathrm{d}s]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}[\int_0^\sigma \boldsymbol{\omega}(s)\mathrm{d}s] \leqslant \sigma[\int_0^\sigma \boldsymbol{\omega}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{M}\boldsymbol{\omega}(s)\mathrm{d}s] \tag{15}$$

引理2 (Schur补引理)对于给定的对称正定矩阵,$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12}^{\mathrm{T}} & S_{22} \end{bmatrix} < 0$, 其中$S$是$r \times r$维的,则以下两个条件是等价的:

$$\begin{aligned} &(\mathrm{i}) S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^{\mathrm{T}} S_{11}^{-1} S_{12} < 0 \\ &(\mathrm{ii}) S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^{\mathrm{T}} < 0 \end{aligned} \tag{16}$$

引理3 对任意常数矩阵$\boldsymbol{R} \in \mathbb{R}^{n \times n}$和$\boldsymbol{U} \in \mathbb{R}^{n \times n}$,标量$0 \leqslant \tau_1 \leqslant \tau(t) \leqslant \tau_2$,向量函数$\dot{\boldsymbol{x}} = [-\tau_2, -\tau_1] \to \mathbb{R}^n$, 则下列积分不等式成立:

$$-(\tau_2 - \tau_1) \int_{t-\tau_2}^{t-\tau_1} \dot{\boldsymbol{x}}^{\mathrm{T}}(s) \boldsymbol{R} \dot{\boldsymbol{x}}(s) \mathrm{d}s \leqslant -\boldsymbol{\Gamma} \boldsymbol{\Xi} \boldsymbol{\Gamma} \tag{17}$$

式中:$\boldsymbol{\Gamma}^{\mathrm{T}} = \left[\boldsymbol{x}(t-\tau_1), \boldsymbol{x}(t-\tau_t), \boldsymbol{x}(t-\tau_2)\right]$, $\boldsymbol{x}(t-\tau_t)$表示存在时延下的状态向量,$\boldsymbol{x}(t-\tau_1)$表示最小时延下的状态向量,$\boldsymbol{x}(t-\tau_2)$表示最大时延下的状态向量.

$\boldsymbol{R}$和$\boldsymbol{U}$满足:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & * \\ \boldsymbol{U} & \boldsymbol{R} \end{bmatrix} > 0, \quad \Xi = \begin{bmatrix} \boldsymbol{R} & * & * \\ \boldsymbol{U} - \boldsymbol{R} & 2\boldsymbol{R} - \boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{U} & * \\ -\boldsymbol{U} & \boldsymbol{U} - \boldsymbol{R} & \boldsymbol{R} \end{bmatrix}$$

2 主要结果

在本节中,给出了SS-ETC机制下系统可实现稳定性的理论依据,并通过构造Lyapunov泛函,对系统稳定性进行证明.进而设计具有扰动抑制性能指标γ的H_∞控制器并求出状态反馈增益$\boldsymbol{K}$.

2.1 稳定性分析

定理1 对于给定的正实数$\tau_1, \tau_2, \gamma, \sigma_\varepsilon, \varepsilon$和状态反馈增益$\boldsymbol{K}$,在事件触发通信策略的作用下,如果存在实对称矩阵$\boldsymbol{P} > 0, \boldsymbol{\Phi} > 0, \boldsymbol{R}_i > 0, \boldsymbol{Q}_i > 0 (i = 1, 2)$和适当维数的矩阵$\boldsymbol{W}$和$\boldsymbol{U}$满足

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Psi}_{11} & * \\ \boldsymbol{\Psi}_{21} & \boldsymbol{\Psi}_{22} \end{bmatrix} < 0 \tag{18}$$

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_2 & * \\ \boldsymbol{U} & \boldsymbol{R}_2 \end{bmatrix} > 0 \tag{19}$$

式中:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\Psi}_{11} = [&(1,1) = \boldsymbol{P}\boldsymbol{A} + \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P} + \boldsymbol{Q}_1 - \boldsymbol{R}_1 - \frac{\pi^2}{4}\boldsymbol{W}, \\ &(2,1) = \boldsymbol{R}_1, (2,2) = \boldsymbol{Q}_1 - \boldsymbol{Q}_2 - \boldsymbol{R}_1 - \boldsymbol{R}_2, \\ &(3,1) = \boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P} + \frac{\pi^2}{4}\boldsymbol{W}, (3,2) = \boldsymbol{R}_2 - \boldsymbol{U}, \\ &(3,3) = \boldsymbol{U} + \boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} - 2\boldsymbol{R}_2 - \frac{\pi^2}{4}\boldsymbol{W} + \frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon}\boldsymbol{\Phi}, \\ &(4,2) = \boldsymbol{U}, (4,3) = \boldsymbol{R}_2 - \boldsymbol{U}, (4,4) = -\boldsymbol{R}_2 - \boldsymbol{Q}_2, \\ &(5,1) = -\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}, (5,3) = -\frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon}\boldsymbol{\Phi}, \\ &(5,5) = -\boldsymbol{\Phi} + \frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon}\boldsymbol{\Phi}, (6,1) = \boldsymbol{B}_w^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}, (6,6) = -\gamma^2\boldsymbol{I}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{\Psi}_{21} = \mathrm{col}\{\tau_1\boldsymbol{R}_1\ell_1, (\tau_1 - \tau_2)\boldsymbol{R}_2\ell_1, \tau_2\boldsymbol{W}\ell_1, \ell_2\} \\ &\boldsymbol{\Psi}_{22} = \mathrm{diag}\{-\boldsymbol{R}_1, -\boldsymbol{R}_2, -\boldsymbol{W}, -\boldsymbol{I}\} \\ &\ell_1 = [\boldsymbol{A}, 0, \boldsymbol{BK}, 0, -\boldsymbol{BK}, \boldsymbol{B}_\omega] \\ &\ell_2 = [\boldsymbol{C}, 0, \boldsymbol{DK}, 0, -\boldsymbol{DK}, 0] \end{aligned}$$

则系统(14)是渐近稳定的并具有γ的H_∞扰动抑制性能.

证 选取如下Lyapunov-Krasovskii泛函:

$$V(t, x_t) = \sum_{i=1}^{4} V_i(t, x_t), t \in [t_k h + \tau_k, t_{k+1}h + \tau_{k+1}) \tag{20}$$

式中:

$$\begin{aligned} &V_1(t, x_t) = \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}x(t) \\ &V_2(t, x_t) = \int_{t-\tau_1}^{t} \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{Q}_1 x(s)\mathrm{d}s + \int_{t-\tau_2}^{t-\tau_1} x^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{Q}_2 x(s)\mathrm{d}s \\ &V_3(t, x_t) = \tau_1 \int_{t-\tau_1}^{t}\int_{s}^{t} \dot{x}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{R}_1\dot{x}(s)\mathrm{d}v\mathrm{d}s + \\ &\qquad (\tau_1 - \tau_2)\int_{t-\tau_2}^{t-\tau_1}\int_{s}^{t} \dot{x}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{R}_2\dot{x}(s)\mathrm{d}v\mathrm{d}s \\ &V_4(t, x_t) = \tau_2^2 \int_{i_k h}^{t} \dot{x}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{W}\dot{x}(s)\mathrm{d}s - \\ &\qquad \frac{\pi^2}{4}\int_{i_k h}^{t} [x(s) - x(i_k h)]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}[x(s) - x(i_k h)]\mathrm{d}s \end{aligned}$$

沿着闭环系统(14)对上述Lyapunov函数进行求导得到:

$$\begin{aligned} &\dot{V}_1(t, x_t) = 2x^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{P}\dot{x}(t) \\ &\quad = 2x^{\mathrm{T}}(t)P[\boldsymbol{A}x(t) + \boldsymbol{BK}x(t - \tau(t)) - e(i_k h) + \boldsymbol{B}_\omega \mathrm{d}(t)] \\ &\dot{V}_2(t, x_t) = x^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{Q}_1 x(t) + x^{\mathrm{T}}(t-\tau_1)(\boldsymbol{Q}_2 - \boldsymbol{Q}_1)x(t-\tau_1) \\ &\dot{V}_3(t, x_t) = \tau_1^2\dot{x}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{R}_1\dot{x}(t) + (\tau_2 - \tau_1)^2\dot{x}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{R}_2\dot{x}(t) - \\ &\qquad \tau_1\int_{t-\tau_1}^{t}\dot{x}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{R}_1\dot{x}(s)\mathrm{d}s - (\tau_2 - \tau_1)\int_{t-\tau_2}^{t-\tau_1}\dot{x}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{R}_2\dot{x}(s)\mathrm{d}s \\ &\dot{V}_4(t, x_t) = \tau_2^2\dot{x}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{W}\dot{x}(t) - \\ &\qquad \frac{\pi^2}{4}[x(t) - x(t-\tau(t))]^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{W}[x(t) - x(t-\tau(t))] + \\ &\qquad e^{\mathrm{T}}(i_k h)\boldsymbol{\Phi}e(i_k h) - e^{\mathrm{T}}(i_k h)\boldsymbol{\Phi}e(i_k h) \end{aligned}$$

利用Jensen不等式和凸优化性质来处理上式的积分项$-\tau_1\int_{t-\tau_1}^{t}\dot{x}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{R}_1\dot{x}(s)\mathrm{d}s$和$-(\tau_2-\tau_1)\int_{t-\tau_2}^{t-\tau_1}\dot{x}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{R}_2\dot{x}(s)\mathrm{d}s$,

如果存在矩阵$\boldsymbol{U}$满足$\begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_2 & * \\ \boldsymbol{U} & \boldsymbol{R}_2 \end{bmatrix} > 0$,可以得到

$$-\tau_1\int_{t-\tau_1}^{t}\dot{x}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{R}_1\dot{x}(s)\mathrm{d}s \leqslant -\boldsymbol{\Gamma}_1^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_1 & * \\ -\boldsymbol{R}_1 & \boldsymbol{R}_1 \end{bmatrix}\boldsymbol{\Gamma}_1,$$

$$-(\tau_2 - \tau_1)\int_{t-\tau_2}^{t-\tau_1}\dot{x}^{\mathrm{T}}(s)\boldsymbol{R}_2\dot{x}(s)\mathrm{d}s \leqslant$$

$$-\boldsymbol{\Gamma}_2^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_2 & * & * \\ \boldsymbol{U} - \boldsymbol{R}_2 & 2\boldsymbol{R}_2 - \boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{U} & * \\ -\boldsymbol{U} & \boldsymbol{U} - \boldsymbol{R}_2 & \boldsymbol{R}_2 \end{bmatrix}\boldsymbol{\Gamma}_2$$

式中:$\boldsymbol{\Gamma}_1^{\mathrm{T}} = [x(t), x(t-\tau_1)]$, $\boldsymbol{\Gamma}_2^{\mathrm{T}} = [x(t-\tau_1),$

$x(t-\tau_t), x(t-\tau_2)]$.

此外，对于$t \in [t_k h + \tau_k, t_{k+1}h + \tau_{k+1})$，提出的事件触发通信策略可以保证

$$e^{\mathrm{T}}(i_k h)\boldsymbol{\Phi} e(i_k h) < \frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon}\{x^{\mathrm{T}}[t-\tau(t)] - e^{\mathrm{T}}(i_k h)\}\boldsymbol{\Phi}\{x^{\mathrm{T}}[t-\tau(t)] - e(i_k h)\} \tag{21}$$

定义

$$\varsigma^{\mathrm{T}}(t) = [x^{\mathrm{T}}(t), x^{\mathrm{T}}(t-\tau_1), x^{\mathrm{T}}(t-\tau_t), x^{\mathrm{T}}(t-\tau_2), e^{\mathrm{T}}(i_k h), \mathrm{d}^{\mathrm{T}}(t)]$$

易得

$$\dot{V}(t, x_t) \leqslant \varsigma^{\mathrm{T}}(t)\Psi\varsigma(t) - z^{\mathrm{T}}(t)z(t) + \gamma^2 \mathrm{d}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{d}(t) \tag{22}$$

这里$\Psi = \Psi_{11} - \Psi_{21}^{\mathrm{T}}\Psi_{22}^{-1}\Psi_{21}$, $\Psi_{11}, \Psi_{21}, \Psi_{22}$已在定理1中定义. 进而利用Schur补引理，可得到式(18). 利用Lyapunov函数法，我们可以得到当$\mathrm{d}(t) = 0$时系统是渐近稳定的；在零初始条件下，$\|z(t)\| \leqslant \gamma\|\mathrm{d}(t)\|$，系统具有$\gamma$的$H_\infty$扰动抑制性能.

证毕

2.2 控制器设计

基于定理1，我们得出了如下H_∞路径跟踪控制器的设计方法，并给出了事件触发参数与控制器协同设计算法.

定理 2 对于给定的正实数$\tau_2 > \tau_1, \sigma_\varepsilon > 0, \varepsilon > 0$和$\gamma$，在事件触发策略的作用下，如果存在实对称矩阵$\boldsymbol{X} > 0, \tilde{\boldsymbol{\Phi}} > 0, \tilde{\boldsymbol{R}}_i > 0, \tilde{\boldsymbol{Q}}_i > 0\ (i = 1, 2)$，适当维数的矩阵$\tilde{W}$, U和Y使下列线性矩阵不等式成立

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Psi}_{11} & * \\ \tilde{\Psi}_{21} & \tilde{\Psi}_{22} \end{bmatrix} < 0, \begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{R}}_2 & * \\ \tilde{\boldsymbol{U}} & \tilde{\boldsymbol{R}}_2 \end{bmatrix} > 0 \tag{23}$$

式中：

$$\begin{aligned}
\tilde{\Psi}_{11} = [&(1,1) = \boldsymbol{XA} + \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X} + \tilde{\boldsymbol{Q}}_1 - \tilde{\boldsymbol{R}}_1 - \frac{\pi^2}{4}\tilde{\boldsymbol{W}}, \\
&(2,1) = \tilde{\boldsymbol{R}}_1, (2,2) = \tilde{\boldsymbol{Q}}_1 - \tilde{\boldsymbol{Q}}_2 - \tilde{\boldsymbol{R}}_1 - \tilde{\boldsymbol{R}}_2, \\
&(3,1) = \boldsymbol{Y}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} + \frac{\pi^2}{4}\tilde{\boldsymbol{W}}, (3,2) = \tilde{\boldsymbol{R}}_2 - \tilde{\boldsymbol{U}}, \\
&(3,3) = \tilde{\boldsymbol{U}} + \tilde{\boldsymbol{U}}^{\mathrm{T}} - 2\tilde{\boldsymbol{R}}_2 - \frac{\pi^2}{4}\tilde{\boldsymbol{W}} + \frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon}\tilde{\boldsymbol{\Phi}}, \\
&(4,2) = \tilde{\boldsymbol{U}}, (4,3) = \tilde{\boldsymbol{R}}_2 - \tilde{\boldsymbol{U}}, (4,4) = -\tilde{\boldsymbol{R}}_2 - \tilde{\boldsymbol{Q}}_2, \\
&(5,1) = -\boldsymbol{Y}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}, (5,3) = -\frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon}\tilde{\boldsymbol{\Phi}}, \\
&(5,5) = -\tilde{\boldsymbol{\Phi}} + \frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon}\tilde{\boldsymbol{\Phi}}, (6,1) = \boldsymbol{B}_w^{\mathrm{T}}, (6,6) = -\gamma^2\boldsymbol{I}]
\end{aligned}$$

$$\tilde{\Psi}_{21} = \mathrm{col}\{\tau_1\boldsymbol{R}_1\ell_1, (\tau_1 - \tau_2)\boldsymbol{R}_2\ell_1, \tau_2\boldsymbol{W}\ell_1, \ell_2\}$$

$$\tilde{\Psi}_{22} = \mathrm{diag}\{\tilde{\boldsymbol{R}}_1 - 2\boldsymbol{X}, \tilde{\boldsymbol{R}}_2 - 2\boldsymbol{X}, \tilde{\boldsymbol{W}} - 2\boldsymbol{X}, -\boldsymbol{I}\}$$

$$\ell_1 = [\boldsymbol{A}, 0, \boldsymbol{BY}, 0, -\boldsymbol{BY}, \boldsymbol{B}_\omega]$$

$$\ell_2 = [\boldsymbol{CX}, 0, \boldsymbol{DY}, 0, -\boldsymbol{DY}, 0]$$

那么，控制系统在该方案下具有水平为γ的H_∞扰动抑制性能且反馈增益为$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{YX}^{-1}$.

证 通过定义$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{P}^{-1}$, $\tilde{\boldsymbol{Q}}_i = \boldsymbol{X}_i\boldsymbol{Q}_i\boldsymbol{X}_i$, $\tilde{\boldsymbol{R}}_i = \boldsymbol{X}_i\boldsymbol{R}_i\boldsymbol{X}_i$ $(i = 1, 2)$, $\tilde{\boldsymbol{\Phi}} = \boldsymbol{X\Phi X}$, $\boldsymbol{XWX} = \tilde{\boldsymbol{W}}$, $\boldsymbol{XUX} = \tilde{\boldsymbol{U}}$和$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{KX}$，分别对式(18)、式(19)左乘和右乘对角矩阵$\mathrm{diag}\{\boldsymbol{X}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{I}, \boldsymbol{R}_1^{-1}, \boldsymbol{R}_2^{-1}, \boldsymbol{W}^{-1}, \boldsymbol{I}\}$, $\mathrm{diag}\{\boldsymbol{X}, \boldsymbol{X}\}$及它们的转置，根据定理1，利用Schur补定理和锥补线性化方法$-\boldsymbol{XM}^{-1}\boldsymbol{X} \leqslant \boldsymbol{M} - 2\boldsymbol{X}$处理非线性项可得到式(23).

证毕.

在此基础上，给出了寻找事件触发参数σ_ε的协同设计算法如表1所示.

算法1 控制器参数算法设计

Tab.1 The algorithm design of controller parameters

1：设置正标量$\varepsilon, \tau_1, \tau_2\ (\tau_1 \leqslant \tau_2)$, γ和初始事件触发参数σ_ε，给出递增的步长$\Delta > 0$以及优化目标$\mathrm{top}t < 0$；
2：当$\mathrm{top}t < 0$；
3：$\sigma_\varepsilon = \sigma_\varepsilon + \Delta$；
4：解线性矩阵不等式(23)，如果存在可行的解$\boldsymbol{X}, \tilde{\boldsymbol{Q}}_i, \tilde{\boldsymbol{R}}_i (i = 1, 2)$满足线性矩阵不等式，然后进入下一步，否则返回第一步；
5：返回$\sigma_\varepsilon - \Delta$，并计算$\boldsymbol{K}$和$\tilde{\boldsymbol{\Phi}}$.

3 仿真验证

本节将参考文献[20]中所涉及的路径跟踪控制模型对所提出的事件触发控制方法进行有效性验证，具体车辆工况参数如下：

$\boldsymbol{v}_x = 25\ \mathrm{m/s}, m = 1\,500\ \mathrm{kg}, \boldsymbol{I}_z = 3\,240\ \mathrm{kg\cdot m^2}$,

$l_s = 0.8\ \mathrm{m}, l_f = 1.0\ \mathrm{m}, l_r = 1.6\ \mathrm{m}$,

$C_f = 160\,000\ \mathrm{N/rad}, C_r = 160\,000\ \mathrm{N/rad}$,

代入到式(8)，得到状态空间表达式(11)的系数矩阵：

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} -8.533\,3 & -22.440\,0 & 0 & 0 \\ 1.185\,2 & -7.032\,1 & 0 & 0 \\ 0 & 1.000\,0 & 0 & 0 \\ 1.000\,0 & 0.800\,0 & 25.000\,0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} 106.666\,7 & 0 \\ 49.382\,7 & 0.000\,3 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{B}_\omega = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

并设定初始状态为$x(0)=[-0.1\ 0.0\ -0.01\ 0.8]^{\mathrm{T}}$，扰动为$\mathrm{d}(t) = 0.1\mathrm{e}^{-0.1t}$. 显然，没有控制输入的情况下，该系统不能稳定.

网络延时$\tau_1 = 0.01$, $\tau_2 = 0.05$, $\varepsilon = 1$, $\gamma = 200$，采样周期$h = 0.001$ s. 利用Matlab的LMI工具箱求得

$\sigma_{\varepsilon} = 0.3$,

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} -0.0087 & -0.0476 & -0.5548 & -0.0195 \\ -0.6776 & 1.4857 & 21.5302 & -0.6546 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{bmatrix} 54.7342 & 5.3151 & -0.9901 & -3.5874 \\ 5.3151 & 32.6996 & -3.5304 & 17.9982 \\ -0.9901 & -3.5304 & 0.4046 & -1.9802 \\ -3.5874 & 17.9982 & -1.9802 & 11.8255 \end{bmatrix}$$

进一步，设仿真时间为$T = 5$ s，将得到的控制增益$\boldsymbol{K}$和设计的矩阵$\boldsymbol{\Phi}$进行如下仿真.

1)静态事件触发H_{∞}控制

在静态事件触发下，利用所设计的控制器，其路径跟踪的状态响应如图3，信号触发的时刻和分布间隔如图4所示.

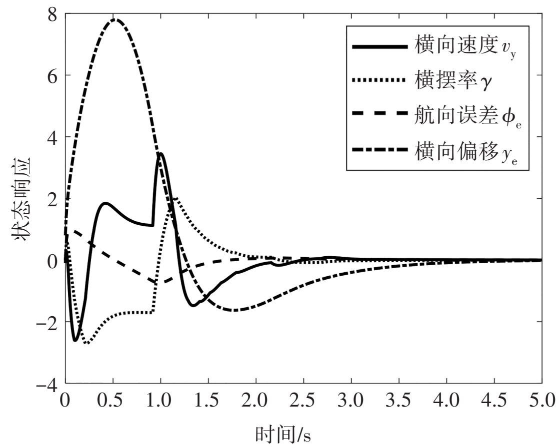

图3 静态ETC机制下的系统状态响应

Fig.3 System state response under static ETC mechanism

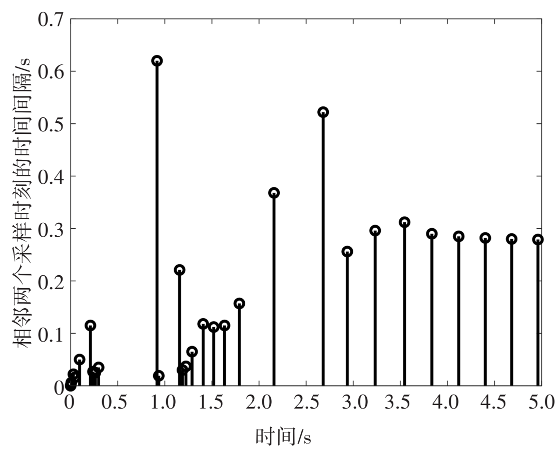

图4 静态ETC机制下的触发间隔

Fig.4 Trigger interval under static ETC mechanism

由图3可知，在该控制器作用下，系统是可以实现稳定的，但在稳定过程中存在较大幅度的波动.尤其通过横摆率(车辆绕重心左右晃动的频率)和横向速度(垂直于车辆期望路径方向的速度)的曲线变化可以看出车辆会出现较大幅度的晃动.由图4可知，在静态事件触发条件下，路径跟踪控制系统发送数据包29个，平均采样周期0.171 1 s.在系统不稳定的情况下，信号传输间隔较小，可实现对系统状态的快速调整；在系统稳定的情况下相邻信号传输间隔可提升到0.3 s.虽然车辆最终能够在扰动存在的情况下实现稳定，但是控制性能不理想.

2)SS-ETC机制下的事件触发H_{∞}控制

仍然采用相同的控制增益$\boldsymbol{K}$，在SS-ETC事件触发的条件下，得到图5所示仿真结果.从图5可以明显看出控制性能与图3相比有较大的改善，车辆能够在扰动存在的情况下以比较平稳的方式按照期望路线行驶.如图6所示，SS-ETC机制下的数据发送量为40次，平均采样周期0.124 7 s.与静态ETC机制相比，在系统处于不稳定的情况下0～0.5 s，信号触发时刻更加密集，因此数据包发送量大大增加；在系统稳定的情况下，相邻信号传输间隔可逐步提升到0.35 s，可以向控制器发送更少的数据包.

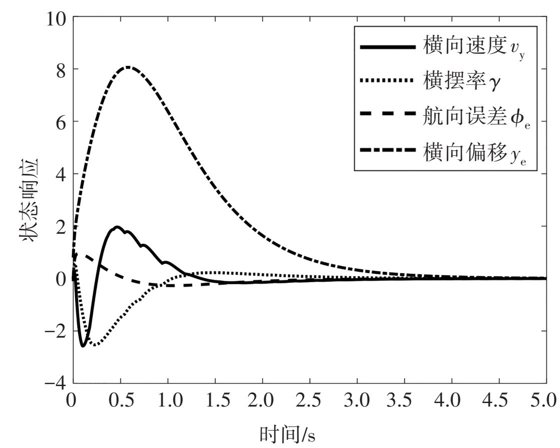

图5 SS-ETC机制下的系统状态响应

Fig.5 System state response under SS-ETC mechanism

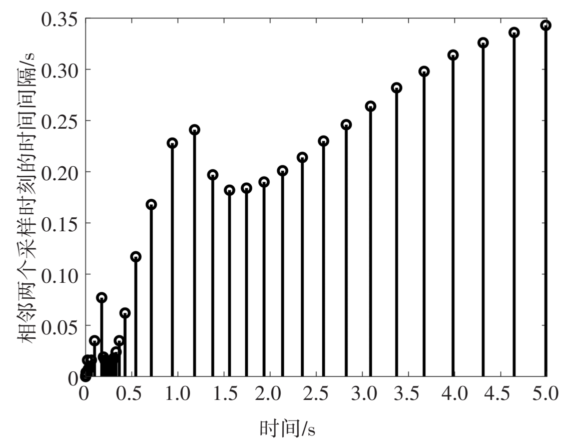

图6 SS-ETC机制下的触发间隔

Fig.6 Trigger interval under SS-ETC mechanism

从图6和图7中可以看出，随着路径跟踪系统状态趋于稳定，触发阈值变大，传输间隔也逐步增大，减少了数据发送量，能够有效节约通信资源．我们仿照文献[19]中设计的静态事件触发控制器进行仿真实验．结果显示，在不同事件触发阈值δ下，静态事件触发策略在扰动存在时所能达到的最小平均数据传输时间为0.15 s，而本文提出的SS-ETC控制策略可达到0.10 s，控制性能也更加稳定，进一步验证了该策略的优越性．具体情况详见表2.

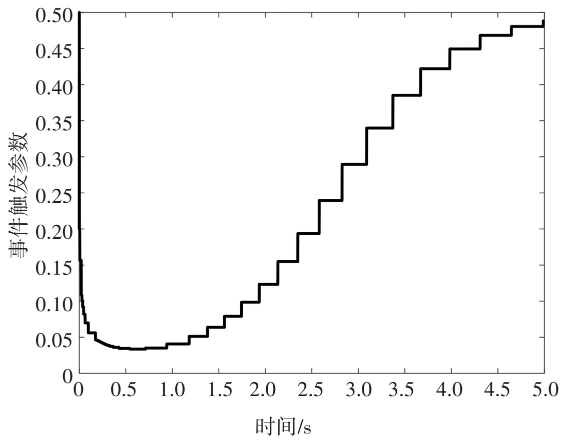

图7　SS-ETC的触发阈值变化

Fig.7　The trigger-threshold changes of SS-ETC

表2　不同控制策略下的平均传输时间T和控制器增益K

Tab.2　Average transmission period T and obtained controller gain K with different control scheme

控制策略	阈值δ	T/S	K	控制性能
C. Peng[19]	0.32	0.15	$\begin{bmatrix} -0.00 & -0.05 & -0.54 & -0.64 \\ -0.64 & 1.43 & 20.44 & -0.67 \end{bmatrix}$	较差
SS-ETC	[0,0.32]	0.10	$\begin{bmatrix} -0.00 & -0.05 & -0.54 & -0.02 \\ -0.64 & 1.43 & 20.44 & -0.67 \end{bmatrix}$	好

4　结　论

本文在自主车辆的路径跟踪控制建模基础上提出了一种H_∞事件触发网络控制方法．通过在采样器端增加事件触发机制，设计了一种新颖的事件触发策略，能够根据被控对象的实时状态调整事件触发阈值．通过构造Lyapunov函数的方法，分析了控制系统的渐近稳定，实现了H_∞性能指标γ的稳定性．利用线性矩阵不等式技术，通过设计的事件触发参数，反馈控制器和H_∞参数γ的协同设计方法，使系统能够在不同环境下实现控制的稳定性．最后通过车辆控制模型进行仿真，验证本文所提出理论方法的有效性．本文提出的SS-ETC方法能够在保证系统稳定性的同时自适应地调整事件触发通信阈值，在节约通信资源的同时可有效实现通信与控制的动态协同设计．在实际中应主要考虑将事件触发控制的系统性能指标与实际工况相结合，增强基于状态感知下的事件触发控制方法对具体工况响应的快速性与适应性．关于控制策略下信号传输的网络安全问题，需要我们在今后的工作中来完成．

参考文献

[1]　BEMANI A，BJÖRSELL N．Cyber-physical control of indoor multi-vehicle testbed for cooperative driving[C]//2020 IEEE Conference on Industrial Cyber physical Systems. Tampere，Finland：IEEE，2020：371-377．

[2]　PINTO J，CALADO P，BRAGA J，*et al*．Implementation of a control architecture for networked vehicle systems[J]．IFAC Proceedings Volumes，2012，45(5)：100-105．

[3]　何莉萍，李庆锋，丁舟波，等．基于模糊神经网络控制的汽车辅助再生制动系统研究[J]．湖南大学学报(自然科学版)，2014，41(10)：35-41．
HE L P，LI Q F，DING Z B，*et al*．Research on the vehicle assist regenerative braking system based on the fuzzy neural network[J]．Journal of Hunan University (Natural Sciences)，2014，41(10)：35-41．(In Chinese)

[4]　袁小芳，陈秋伊，黄国明，等．基于FNN的电动汽车自适应横向稳定性控制[J]．湖南大学学报(自然科学版)，2019，46(8)：98-104．
YUAN X F，CHEN Q Y，HUANG G M，*et al*．Adaptive lateral stability control of electric vehicle based on FNN[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences)，2019，46(8)：98-104．(In Chinese)

[5]　HESPANHA J P，NAGHSHTABRIZI P，XU Y G. A survey of recent results in networked control systems[J]. Proceedings of the IEEE，2007，95(1)：138-162．

[6]　YOSHIZAWA K，HASHIMOTO H，WADA M，*et al*. Path tracking control of mobile robots using a quadratic curve[C]//Proceedings of Conference on Intelligent Vehicles. 1996：58-63．

[7]　HU C，CHEN Y M，WANG J M. Fuzzy observer-based transitional path-tracking control for autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems，2021，22(5)：3078-3088．

[8]　梁政焘，赵克刚，裴锋，等．基于MPC的智能车轨迹跟踪算法[J]．机械与电子，2019，37(1)：66-70．

LIANG Z T, ZHAO K G, PEI F, *et al*. The trajectory tracking algorithm of intelligent vehicle based on MPC [J]. Machinery & Electronics, 2019, 37(1):66-70. (In Chinese)

[9] PANG H, YAO R, WANG P, *et al*. Adaptive backstepping robust tracking control for stabilizing lateral dynamics of electric vehicles with uncertain parameters and external disturbances[J]. Control Engineering Practice, 2021, 110:104781.

[10] BROWN M, FUNKE J, ERLIEN S, *et al*. Safe driving envelopes for path tracking in autonomous vehicles[J]. Control Engineering Practice, 2017, 61:307-316.

[11] SUN Z, ZOU J Y, HE D F, *et al*. Path-tracking control for autonomous vehicles using double-hidden-layer output feedback neural network fast nonsingular terminal sliding mode[J]. Neural Computing and Applications, 2022, 34(7):5135-5150.

[12] CHEN C F, JIA Y M, SHU M L, *et al*. Hierarchical adaptive path-tracking control for autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(5): 2900-2912.

[13] LIU J H, HUANG Z H, XU X, *et al*. Multi-kernel online reinforcement learning for path tracking control of intelligent vehicles [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(11):6962-6975.

[14] LI Q, SHEN B, WANG Z D, *et al*. Synchronization control for A class of discrete time-delay complex dynamical networks: a dynamic event-triggered approach[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(5):1979-1986.

[15] ZHANG H, WANG Z P, YAN H C, *et al*. Adaptive event-triggered transmission scheme and H_∞ filtering co-design over a filtering network with switching topology[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(12):4296-4307.

[16] PENG C, LI J C, FEI M R. Resilient event-triggering H_∞ load frequency control for multi-area power systems with energy-limited DoS attacks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32 (5):4110-4118.

[17] TIAN E G, PENG C. Memory-based event-triggering H_∞ load frequency control for power systems under deception attacks [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 50(11):4610-4618.

[18] PENG C, TIAN Y C, YUE D. Output feedback control of discrete-time systems in networked environments[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2011, 41(1):185-190.

[19] PENG C, YANG T C. Event-triggered communication and H_∞ control co-design for networked control systems [J]. Automatica, 2013, 49(5):1326-1332.

[20] WANG R R, JING H, HU C, *et al*. Robust H_∞ path following control for autonomous ground vehicles with delay and data dropout [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(7):2042-2050.