

## 线控转向系统主动信息安全控制

于树友<sup>1,2†</sup>, 刘 艺<sup>2</sup>, 王宇雷<sup>2</sup>, 陈 虹<sup>1,2,3</sup>

(1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林大学 通信工程学院, 长春 130012;  
3. 同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 200092)

**摘 要:** 线控车辆信息安全是指电信号传输的转向指令免受威胁、干扰和破坏, 近年来关于车辆信息安全的智能网联汽车受到黑客严重威胁, 信息安全对线控车辆系统的安全起着决定性作用. 鉴于此, 针对线控车辆的信息安全问题提出一种基于事件触发策略的四轮线控车辆系统的预测控制方案, 该方案利用事件触发控制对控制通道进行选择, 根据李雅普诺夫稳定理论给定幂指数稳定的充分条件, 进而设计事件触发条件, 并结合模型预测控制对未来动态信息进行预测, 能在潜在对手攻击的情况下, 保证车辆安全行驶. 仿真结果表明, 所提出方案具有良好的抗干扰能力和抗黑客攻击能力.

**关键词:** 信息安全; 线控转向; 事件触发; 黑客攻击; 李雅普诺夫稳定

中图分类号: TP273

文献标志码: A

## Active information security oriented steering control of steer-by-wire vehicles

YU Shu-you<sup>1,2†</sup>, LIU Yi<sup>2</sup>, WANG Yu-lei<sup>2</sup>, CHEN Hong<sup>1,2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China;  
2. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China; 3. New Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Information security of the steer-by-wire vehicle means protecting the steering instructions of electrical signal transmission from threats, interference and destruction. In recent years, intelligent connected vehicles related to information security have been seriously threatened by hackers. Thus, information security is one of vital issues for steer-by-wire vehicle systems. This paper presents a tube model predictive control scheme for a 4-wheel steer-by-wire vehicle, in which the event-triggered strategy is adopted in order to prevent potential opponents from attacking and ensure the information security. This scheme uses event trigger control to select control channels, and provides sufficient conditions for power exponential stability according to the Lyapunov stability theory, then designs event trigger conditions. In addition, the model predictive control is used to predict the future dynamic information in order to ensure the safe driving of the vehicle under the attack of potential opponents. Simulation results show that the proposed scheme is capable to deal with hacking attacks.

**Keywords:** information security; steer-by-wire; event-triggered; attacking by hacker; Lyapunov stability

### 0 引 言

汽车的存在使人类的出行变得更加便捷, 人们的生活质量也得以提高. 虽然汽车的使用给人类带来了诸多便利, 但重大交通事故时有发生, 随之而来的便是人员伤亡和财产损失<sup>[1-2]</sup>. 关乎车辆行驶安全的汽车操纵稳定性问题受到了广泛关注<sup>[3-5]</sup>. 四轮转向(four wheel steering, 4WS)汽车由于其具备后轮可以参与主动转向的优势, 使得其能够很好地完成轨迹保持和稳定性控制, 对提高汽车主动安全性有着重要

的作用.

为了进一步提高汽车的转向控制能力, 线控转向(steering by wire, SBW)技术应运而生<sup>[6-9]</sup>. 线控转向系统的转向操纵机构和转向执行机构并没有实际的物理连接, 转向的命令通过电信号进行传输, 一旦线控转向系统出现故障, 便会使汽车失去转向能力, 引发安全事故. 国际黑客大会上发表的白皮书明确指出线控车辆正在成为黑客们进行攻击的目标, 并详细介绍了攻击丰田普锐斯和福特翼虎关键系统的方

收稿日期: 2019-04-28; 修回日期: 2019-08-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573165, 61520106008, 61790564, 6171101085, 61603147, 61790561).

责任编辑: 李少远.

†通讯作者. E-mail: shuyou@jlu.edu.cn.

法. 黑客们能够让高速行驶的汽车突然刹车或突然加速, 也可以控制方向盘, 驾驶员无论如何操作都无法改变车辆的行驶状态, 智能网联汽车目前受到黑客严重的威胁<sup>[10-12]</sup>.

考虑到信号在线控转向系统中传输时可能受到干扰或屏蔽, 不能正常传输, 从而导致线控车辆的安全性问题, 本文提出基于事件触发的四轮转向线控车辆系统的预测控制策略, 以解决线控转向车辆受到外部信息攻击时所面临的安全问题. 采用带有事件触发的前馈加反馈控制策略, 以实现受攻击的情况下线控车辆对理想参考的状态跟踪. 所谓事件触发是指将设备和模型的状态大于或等于某个预先设定的阈值作为一个事件, 只有在事件发生时网络中传感器节点才会发送状态<sup>[13-15]</sup>. 传统的时间触发控制系统只是对测量信号进行定时采样, 并定期应用控制信号<sup>[16]</sup>, 当判断系统受到攻击时, 采用可行的控制信号作用到系统中, 解决线控车辆受到信息攻击时产生的安全问题. 本文介绍了线性二自由度车辆模型, 详细给出了前馈道路信息预瞄控制、反馈预测控制以及事件触发控制的设计方法与步骤, 最后通过仿真验证了所设计控制器的有效性.

### 1 二自由度车辆模型

四轮主动转向汽车的运动状态可由质心侧偏角和横摆角速度两个重要参数进行描述. 车辆操纵的稳定性可以通过对质心侧偏角和横摆角速度的分析表征出来. 实验表明, 在正常车速和较小的转向角度下, 二自由度车辆模型能够准确地反映车辆的实际转向过程<sup>[17]</sup>. 线性二自由度车辆模型可用于分析线控四轮转向车辆的操纵稳定性. 为了建立线性二自由度车辆模型, 需要忽略转向系统和悬架的影响; 选择前轮和后轮转角作为输入; 假设汽车只与地面平行恒速运动; 汽车横向加速度小于  $0.4g$ ; 轮胎轮廓线工作在一个线性范围内; 忽略空气阻力作用. 根据牛顿第二定律推导出二自由度车辆的动力学模型<sup>[18]</sup>为

$$\begin{cases} mv(\dot{\beta} + \gamma) = F_f + F_r, \\ I_z \dot{\gamma} = aF_f - bF_r. \end{cases} \quad (1)$$

在假设轮胎轮廓线工作在线性范围内条件下, 轮胎侧向力与轮胎侧偏角可以近似为线性关系, 即

$$F_f = k_f \beta_f, \quad F_r = k_r \beta_r. \quad (2)$$

由车辆几何特性可知

$$\begin{cases} \beta_f = \beta + a\gamma/v - \delta_f, \\ \beta_r = \beta - b\gamma/v - \delta_r. \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)和(3)代入(1), 可得<sup>[19-20]</sup>

$$\begin{cases} mv(\dot{\beta} + \gamma) = \\ -(k_f + k_r)\beta - \frac{ak_f - bk_r}{v}\gamma + k_f\delta_f + k_r\delta_r, \\ I_z \dot{\gamma} = \\ -(ak_f + bk_r)\beta - \frac{a^2k_f - b^2k_r}{v}\gamma + ak_f\delta_f - bk_r\delta_r. \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $m$ 、 $v$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  分别为整车质量、车辆纵向速度、汽车的质心侧偏角和汽车的横摆角速度;  $F_f$ 、 $F_r$ 、 $I_z$ 、 $a$ 、 $b$  分别为前轮的侧向力、后轮的侧向力、绕质心的横摆转动惯量、质心到前轴距离和质心到后轴距离;  $k_f$ 、 $k_r$  分别为前后轴侧偏刚度,  $\beta_f$ 、 $\beta_r$  分别为前后轮侧偏角,  $\delta_f$ 、 $\delta_r$  分别为前后轮转角输入.

实际情况下, 系统不可避免地会受到外部干扰或模型-设备不匹配的影响. 记  $w \in R^{2 \times 2}$  为车辆侧向风或者道路不平干扰, 假设

$$\|w\| \leq \varphi, \quad (5)$$

其中  $\varphi$  是一个给定的正的标量.

选取质心侧偏角以及横摆角速度作为状态变量, 即  $x = [\beta \quad \gamma]^T$ , 选取前后轮转角作为控制输入, 即  $u = [\delta_f \quad \delta_r]^T$ , 选取质心侧偏角以及横摆角速度作为系统输出, 即  $y = [\beta \quad \gamma]^T$ , 将式(4)写成标准状态空间形式, 有

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + B_w w, \\ y = Cx. \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(k_f + k_r) & bk_r - ak_f \\ mv & mv^2 - 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} bk_r - ak_f & a^2k_f + b^2k_r \\ I_z & I_z v \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_f}{mv} & \frac{k_r}{mv} \\ \frac{ak_f}{I_z} & -\frac{bk_r}{I_z} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_w = \begin{bmatrix} \frac{1}{mv} & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_z} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

本文控制目标是在存在外部干扰或模型不匹配情况下, 使线控车辆跟踪给定的轨迹, 当有限时间的黑客攻击发生时, 仍可以通过所设计的控制器使车辆跟踪给定的轨迹.

## 2 线控车辆的转向控制

### 2.1 控制问题描述

如图1所示,给出具有抗攻击能力的线控转向控制框图.

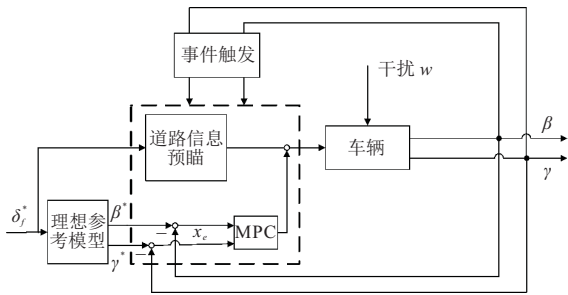


图1 具有抗攻击能力的线控转向控制框图

为了实现汽车运动轨迹保持和车身姿态控制,需要对汽车的侧向运动和横摆运动进行控制,提高汽车的操纵稳定性和主动安全性<sup>[21]</sup>.采用前后轮转角作为控制输入,使车辆能够实时跟踪所需的质心侧偏角和横摆角速度.控制器由前馈控制器和反馈控制器组成,前馈控制器采用道路预瞄控制,反馈控制器采用预测控制策略.控制输入  $u$  由前馈控制输入  $u_f$  和反馈控制输入  $u_e$  构成,有

$$u = u_f + u_e. \quad (10)$$

### 2.2 理想参考模型

根据汽车动力学理论,理想参考模型将汽车简化成为一个只做平面运动的刚性两轮自行车模型,它是能够体现车辆转向特性最简化模型,由理想参考模型体现出的理想横摆角速度主要反映车辆理想操纵特性,理想质心侧偏角主要反映车辆行驶稳定性,因此理想参考模型的转向特性可以代表车辆理想的转向特性.记汽车理想横摆角速度为  $\gamma^*$ ,则理想横摆角速度与理想前轮转角满足

$$\gamma^* = \frac{v}{L(1-kv^2)} \cdot \frac{1}{1+\tau_r s} \delta_f^*. \quad (11)$$

其中:  $k = \frac{m}{L^2} \left( \frac{a}{k_r} - \frac{b}{k_f} \right)$  为汽车稳定性因子;  $L$  为前后轴距,本文取 2.69 m;  $\delta_f^*$  为理想车辆模型的前轮转角;  $\tau_r$  为惯性环节时间常数,本文取 0.1. 记  $\beta^*$  为车辆理想质心侧偏角,有

$$\beta^* = \frac{k_\beta}{1+\tau_\beta s} \delta_f^*. \quad (12)$$

其中:  $k_\beta$  为比例增益,在理想情况下其值可以为 0,本文取  $k_\beta = 0$ ;  $\tau_\beta$  为理想侧偏角响应时间常数,本文取 0.1.

选取理想的质心侧偏角与理想的横摆角速度作为状态变量  $x_c = [\beta^* \quad \gamma^*]^T$ ,选取前轮转角作为输入  $u_c = \delta_f^*$ ,可以得到参考模型的状态空间表达式

$$\dot{x}_c = A_c x_c + B_c u_c. \quad (13)$$

其中

$$A_c = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_\beta} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\tau_\beta} \end{bmatrix}, B_c = \begin{bmatrix} \frac{k_\beta}{\tau_\beta} \\ \frac{k_h}{\tau_r} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$k_h = \frac{1}{1+kv^2} \cdot \frac{v}{L}. \quad (15)$$

### 2.3 前馈控制器设计

前馈控制即道路预瞄控制.所谓道路预瞄控制,就是传感器预先采集到道路的曲率信息,将采集到的信息传回车载计算机后,计算机根据车辆运动参数、道路曲率计算出所需要的前后轮转角,实现对目标路径的跟踪.

对二自由度车辆状态空间模型(6)进行拉普拉斯变换,得到与之对应的传递函数模型

$$G = C(sI - A)^{-1}B. \quad (16)$$

其中:  $I$  为二阶单位阵,  $s$  为复变量.道路预瞄控制器  $C_f(s)$  的设计思路是在理想条件下保证二自由度车辆模型的动态响应与车辆参考模型的理想动态响应一致,即满足如下关系式:

$$GC_f \cdot \delta_f^* = x_c = \begin{bmatrix} \beta^* \\ \gamma^* \end{bmatrix}. \quad (17)$$

前后轮主动转向前馈控制规律可以通过将式(11)、(12)和(16)代入(17),得到

$$C_f = \begin{bmatrix} \frac{I_z v s + a k_f L + v^2}{v k_f L} \cdot \frac{v}{L(1-kv^2)} \cdot \frac{1}{1+\tau_r s} \\ -\frac{I_z v s - b k_r L + a m v^2}{v k_f L} \cdot \frac{v}{L(1-kv^2)} \cdot \frac{1}{1+\tau_r s} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

进而得到前馈控制输入

$$u_f = C_f \cdot \delta_f^*. \quad (19)$$

道路预瞄控制在当前采样时刻  $k$  预测出未来  $L_c$  个时刻的道路曲率信息,有

$$\Delta_f^*(k|k) = [\delta_f^*(k|k); \delta_f^*(k+1|k); \delta_f^*(k+2|k); \dots; \delta_f^*(k+L_c-1|k); \delta_f^*(k+L_c|k)]. \quad (20)$$

将式(20)代入(19),可以预测出未来  $L_c$  个时刻的前后轮转角的输入序列为

$$U_f(k|k) = [u_f(k|k); u_f(k+1|k); u_f(k+2|k); \dots; u_f(k+L_c-1|k); u_f(k+L_c|k)]. \quad (21)$$

由计算能够得到多步控制率  $U_f$ , 每一步控制率  $u_f$  都是为了使车辆状态达到与其对应时刻的理想参

考状态的最优解,并且求解出的多步控制率能够为车辆受到攻击后事件触发控制做准备.

### 2.4 预测控制器设计

设计预测控制器的目的是在保证车辆质心侧偏角接近为0的同时使车辆的实际横摆角速度跟踪理想横摆角速度的变化,进而保证车辆行驶稳定.

定义误差系统状态变量

$$x_e = x - x_c = \begin{bmatrix} \beta - \beta^* \\ \gamma - \gamma^* \end{bmatrix}, \quad (22)$$

则误差系统动态为

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= \dot{x} - \dot{x}_c \\ &= (Ax + Bu + B_w w) - (A_c x_c + B_c u_c). \end{aligned} \quad (23)$$

由式(17)和(19)可知

$$G \cdot u_f = x_c. \quad (24)$$

将式(16)代入(24),并进行拉普拉斯逆变换可以得到

$$\dot{x}_c = Ax_c + Bu_f. \quad (25)$$

将式(25)和(13)代入(23),可以得到误差跟踪状态方程的简化形式

$$\dot{x}_e = Ax_e + Bu_e + B_w w. \quad (26)$$

定义误差系统(26)的名义系统

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_e = A\bar{x}_e + B\bar{u}_e, \\ \bar{y} = C\bar{x}_e. \end{cases} \quad (27)$$

设采样时间为 $\delta$ ,其值为0.1 s,离散化名义系统,得到名义系统离散时间模型

$$\begin{cases} \bar{x}_e(k+1|k) = A_d \bar{x}_e(k|k) + B_d \bar{u}_e(k|k), \\ \bar{y}(k|k) = C_d \bar{x}_e(k|k), \end{cases} \quad (28)$$

其中 $A_d, B_d, C_d$ 分别为离散化后的系统矩阵、输入控制矩阵、系统输出矩阵.如果系统的控制步长为 $L_c$ ,预测步长为 $L_p$ ,则本文 $L_c$ 与 $L_p$ 取值均为10.定义 $L_p$ 步预测输出向量和 $L_c$ 步输入向量,有

$$Y(k+1|k) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} \bar{y}(k+1|k) \\ \bar{y}(k+2|k) \\ \vdots \\ \bar{y}(k+L_p|k) \end{bmatrix}, \quad (29)$$

$$U_e(k|k) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} \bar{u}_e(k|k) \\ \bar{u}_e(k+1|k) \\ \vdots \\ \bar{u}_e(k+L_c-1|k) \end{bmatrix}. \quad (30)$$

将预测方程写为矩阵形式

$$Y(k+1|k) = S_x \bar{x}_e(k|k) + S_u U_e(k|k). \quad (31)$$

考虑到车辆对期望目标的跟踪能力,优化问题的目标函数定义<sup>[22-23]</sup>为

$$J = \|\Gamma_y Y(k+1|k)\|^2 + \|\Gamma_u U_e(k|k)\|^2. \quad (32)$$

其中 $\Gamma_y$ 和 $\Gamma_u$ 分别为输出和控制的加权矩阵,且有

$$S_x = \begin{bmatrix} C_d A_d \\ C_d A_d^2 \\ \vdots \\ C_d A_d^{L_p} \end{bmatrix}, \quad (33)$$

$$S_u = \begin{bmatrix} C_d B_d & 0 & \cdots & 0 \\ C_d A_d B_d & C_d B_d & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_d A_d^{L_p-1} B_d & C_d A_d^{L_p-2} B_d & \cdots & C_d A_d^{L_p-L_c} B_d \end{bmatrix}. \quad (34)$$

实际系统的前后轮转角需要满足约束条件

$$u_{\min} \leq \bar{u}_e(k+i|k) + u_f(k+i|k) \leq u_{\max}. \quad (35)$$

利用实际状态采样值与参考状态的差值作为预测系统未来动态的初值并求解带约束的优化问题,有

$$\min_{U_e(k|k)} \|\Gamma_y Y(k+1|k)\|^2 + \|\Gamma_u U_e(k|k)\|^2. \quad (36)$$

满足系统动力学方程

$$\begin{aligned} \bar{x}_e(k+i+1|k) &= A_d \bar{x}_e(k+i|k) + B_d \bar{u}_e(k+i|k), \\ \bar{x}_e(k|k) &= \bar{x}_e(k) = x(k) - x_c(k), \\ i &= 0, 1, \dots, L_p \end{aligned} \quad (37)$$

和时域约束

$$\begin{aligned} u_{\min} - u_f(k+i|k) &\leq \bar{u}_e(k+i|k) \leq \\ u_{\max} - u_f(k+i|k). \end{aligned} \quad (38)$$

将名义系统的控制量作为实际系统的控制量( $u_e = \bar{u}_e$ ),可得到未来 $L_c$ 步的控制序列

$$U_e(k|k) = [u_e(k|k); u_e(k+1|k); u_e(k+2|k); \cdots; u_e(k+L_c-1|k); u_e(k+L_c|k)]. \quad (39)$$

### 2.5 事件触发控制策略

事件触发控制的基本思想是设置事件触发条件,并依据触发条件对控制通道进行选择.

如果 $A$ 是Hurwitz矩阵,根据幂指数稳定原理,则下式成立:

$$\|e^{At}\|_2 \leq M e^{\alpha t}. \quad (40)$$

其中: $M \geq 1, \alpha < 0, t > 0$ <sup>[24]</sup>.幂指数稳定原理是李雅普诺夫稳定理论的特殊情况,根据李雅普诺夫稳定理论可以给出幂指数稳定的充分条件<sup>[24-26]</sup>:如果 $P > 0$ ,则如下李雅普诺夫不等式成立:

$$\begin{aligned} A^T P + P A &\leq 2\alpha P < 0, \\ \|P\| \cdot \|P^{-1}\| &\leq M^2, \end{aligned} \quad (41)$$

其中  $P$  为候选的李雅普诺夫矩阵. 通过式 (5)、(40) 和 (41) 可以设计事件触发条件的参数  $\varphi$ 、 $\alpha$ 、 $M$ <sup>[26]</sup>. 通过所设计的参数可以设定事件触发条件<sup>[27]</sup> 为  $\frac{\varphi M}{\alpha}(e^{\alpha\delta} - 1)$ .

$\alpha$  假设线控转向系统在  $k$  时刻 ( $k \geq 0$ ) 未受到攻击, 将  $k$  时刻状态采样值与参考状态的差值作为 MPC 控制器的初值求解优化问题 (36), 并结合道路信息预瞄控制得到控制序列

$$\begin{aligned} U(k|k) &= [u_f(k|k) + u_e(k|k); \\ &u_f(k+1|k) + u_e(k+1|k); \cdots; \\ &u_f(k+L_c-1|k) + u_e(k+L_c-1|k); \\ &u_f(k+L_c|k) + u_e(k+L_c|k)]. \end{aligned} \quad (42)$$

在  $k+1$  时刻对系统的实际状态进行采样得到  $x((k+1)\delta)$ . 将  $k$  时刻控制序列  $U(k|k)$  的第 1 个元素作用于系统 (16) 得到预测状态  $\bar{x}((k+1)\delta)$ . 如果

$$\|x((k+1)\delta) - \bar{x}((k+1)\delta)\| \leq \frac{\varphi M}{\alpha}(e^{\alpha\delta} - 1), \quad (43)$$

则认为  $k+1$  时刻系统正常工作<sup>[27]</sup>, 将  $k+1$  时刻新的状态采样值与参考状态的差值作为 MPC 控制器的初值求解优化问题, 并结合道路信息预瞄控制得到新的控制序列. 如果

$$\|x((k+1)\delta) - \bar{x}((k+1)\delta)\| > \frac{\varphi M}{\alpha}(e^{\alpha\delta} - 1), \quad (44)$$

则认为  $k+1$  时刻系统受到攻击, 事件触发控制启动<sup>[27]</sup>. 将  $k$  时刻由道路信息预瞄控制以及 MPC 控制得到的控制序列  $U(k|k)$  (式 (42)) 向后平移一步得到的控制序列仍然能够保证车辆跟踪期望轨迹, 故

$$\begin{aligned} \hat{U}(k+1|k) &= [u_f(k+1|k) + u_e(k+1|k); \\ &u_f(k+2|k) + u_e(k+2|k); \cdots; \\ &u_f(k+L_c|k) + u_e(k+L_c|k)]. \end{aligned} \quad (45)$$

仍然是可行的控制序列.

注意到, 系统被攻击时采取的控制序列  $\hat{U}(k+1|k)$  只是  $[\delta, L_p\delta]$  时域内的可行解, 而不是最优解. 系统允许攻击的时间受预测步长  $L_p$  制约, 允许最大攻击时间为  $(L_p - 1)\delta$  s. 如果超出允许的最大攻击时间, 则事件触发算法失效.

下面给出假设  $k$  时刻 ( $k \geq 0$ ) 系统未受攻击并给定控制序列  $U(k|k)$  情况下的算法过程.

**算法 1** 事件触发控制.

Step 1: 初始化参数  $\varphi$ 、 $\alpha$ 、 $M$ 、 $\delta$ 、 $n$  (计数器).

Step 2:  $k+1$  时刻, 对系统进行采样, 测量系统实

际状态  $x((k+1)\delta)$ ; 将  $k$  时刻控制序列  $U(k|k)$  第 1 个元素作用于系统 (16) 得到预测状态  $\bar{x}((k+1)\delta)$ .

1) 若满足

$$\|x((k+1)\delta) - \bar{x}((k+1)\delta)\| \leq \frac{\varphi M}{\alpha}(e^{\alpha\delta} - 1),$$

则判断系统未受攻击, 设置  $n = 0$ ; 将  $k+1$  时刻状态采样值与参考状态差值作为 MPC 控制器的初值求解优化问题; 结合道路信息预瞄控制得到控制序列  $U(k+1|k+1)$ .

2) 若满足

$$\|x((k+1)\delta) - \bar{x}((k+1)\delta)\| > \frac{\varphi M}{\alpha}(e^{\alpha\delta} - 1),$$

则判断系统受到攻击, 设置  $n = n + 1$ ; 将最后未受攻击时刻的控制序列向后平移  $n$  个时刻控制量, 得到受攻击时刻的控制序列  $U(k+1|k+1)$ .

Step 3: 若满足  $n \geq L_p - 1$ , 则判断算法失效; 若满足  $n < L_p - 1$ ,  $k = k + 1$ , 则返回 Step 1.

**注 1** 跟踪偏差只受扰动的幅值  $\varphi$  和预测时域  $L_p$  的影响, 算法的跟踪偏差为  $\frac{\varphi M}{\alpha}(e^{\alpha\tau} - 1)$ , 其中  $\tau$  为最后一次优化问题求解的时刻至当前时刻的时间间隔.

**注 2** 若受到攻击, 则  $U(k+1|k+1)$  的维数随着攻击时间的延长而减少.

### 3 仿真结果

为了验证基于事件触发前馈加反馈控制器的控制效果, 利用 Matlab/Simulink 进行相关的动态仿真实验, 所采用的车辆参数如表 1 所示. 首先针对汽车在正常运行时可能会受到的侧向风或者道路不平干扰的影响, 设计仿真实验. 车辆行驶 1 s 后, 在汽车控制输入端持续加入幅值为 0.1 的小扰动.

表 1 仿真车辆模型参数

符号	符号名称	数值	单位
$m$	整车质量	1 704.7	kg
$a$	汽车质心到前轴距离	1.035	m
$b$	汽车质心到后轴距离	1.655	m
$I_z$	横摆转动惯量	3 048.1	kg/m <sup>2</sup>
$v$	车辆速度	72	km/h
$k_f$	前轴侧偏刚度	79 030	N/rad
$k_r$	后轴侧偏刚度	79 030	N/rad
$\varphi$	事件触发条件参数	10	
$M$	事件触发条件参数	2.82	
$\alpha$	事件触发条件参数	-0.000 179 61	

图 2 为小扰动下控制器效果实验结果, 实线为实际横摆角速度, 虚线为理想横摆角速度. 由图 2 可见, 所设计的基于事件触发前馈加反馈控制器具有抵抗扰动的能力, 在扰动的影响下仍能保持车辆稳定性.

当  $\|x((k+1)\delta) - \bar{x}((k+1)\delta)\| > \frac{\varphi M}{\alpha}(e^{\alpha\delta} - 1)$

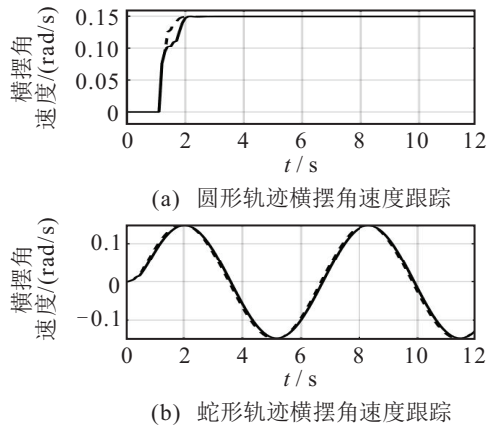


图2 小扰动下控制器效果实验结果

时,认定车辆受到黑客攻击.假设参考道路信息是半径为133.3m的圆形路径,在5s后加入持续时间为0.5s、幅值为1的脉冲信号,用来模拟黑客对车辆进行攻击,仿真时间为12s.

图3为转向信号受攻击有无事件触发控制对比实验结果,实线为实际横摆角速度(实际轨迹),虚线为理想横摆角速度(理想参考轨迹).由图3可见,在事件触发控制下的汽车不受黑客攻击的影响,能够跟踪上参考轨迹,因此由事件触发器控制的4WS车辆可以保证被攻击后的平稳转向和车辆行驶安全.

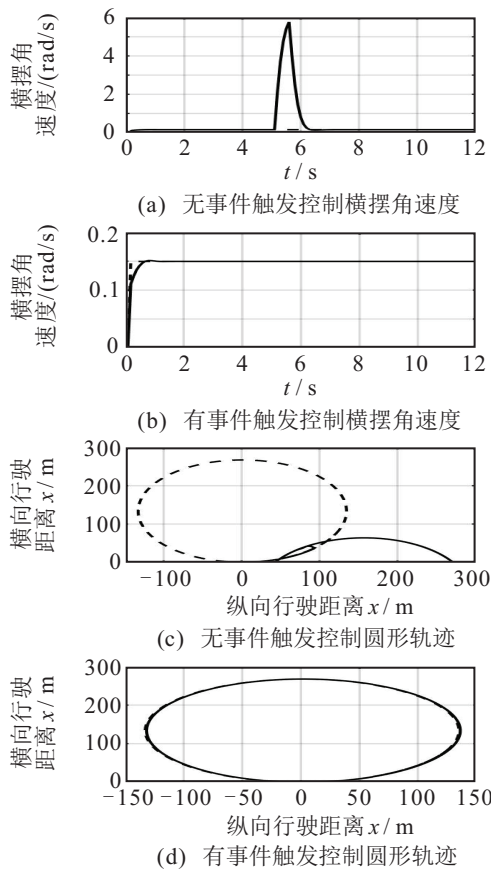


图3 转向信号受攻击有无事件触发控制对比实验结果

为了验证控制器在信号被屏蔽时的控制效果,进行了理想参考输入角频率为6.49rad/s、幅值为0.035

的蛇形工况仿真实验,在5s后转向信号被屏蔽,持续时间为0.9s,用来模拟黑客对车辆进行攻击.

图4为转向信号被屏蔽有无事件触发控制对比实验结果,实线为实际横摆角速度(实际轨迹),虚线为理想横摆角速度(理想参考轨迹).由图4可见,在事件触发控制下的汽车不受信号被屏蔽的影响,能够跟踪上参考轨迹,因此由事件触发器控制的4WS车辆可以保证被攻击后的平稳转向和车辆行驶安全.

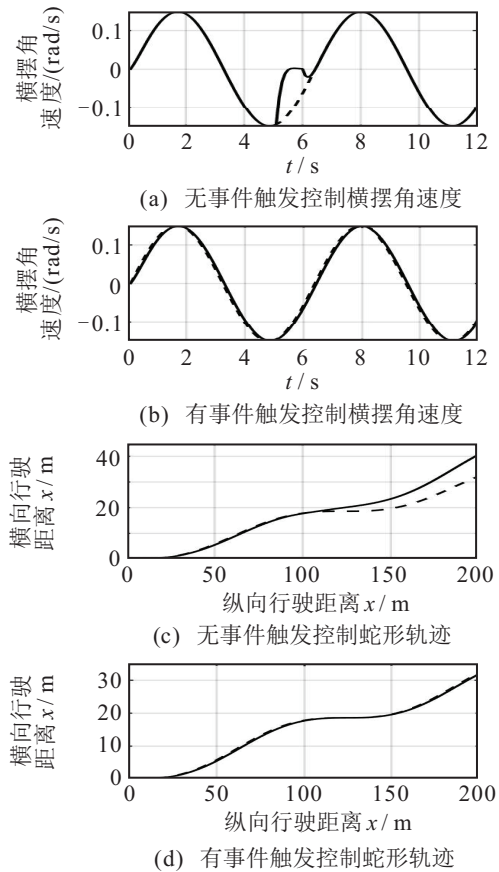


图4 转向信号被屏蔽有无事件触发控制对比实验结果

### 4 结论

本文设计了基于事件触发的前馈和反馈控制器解决线控转向车辆的信息安全问题.仿真结果验证了所设计控制器的有效性,即系统具有在黑客攻击的情况下安全行驶的能力,能够有效处理对线控转向系统的信号攻击或者屏蔽.

### 参考文献(References)

[1] Powers W F, Nicastrì P R. Automotive vehicle control challenges in the 21st century[J]. Control Engineering Practice, 2000, 8(6): 605-618.

[2] 刘毅坤. 汽车安全性研究[J]. 汽车实用技术, 2018, 270(15):168-169.  
(Liu Y K. Automobile safety research[J]. Practical Automobile Technology, 2018, 270(15): 168-169.)

[3] Shen H, Huang M, Tan Y. Active rear wheel steering control strategy research based on optimal control[J].

- Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2016, 13(3): 2043-2048.
- [4] Guo H, Hao N, Chen H. Lateral stability controller design for electrical vehicle based on active rear wheel steering[C]. World Congress on Intelligent Control and Automation. Guilin: Grand Link Hote, 2016: 1285-1290.
- [5] Zhao W, Qin X, Wang C. Yaw and lateral stability control of automotive four-wheel steer-by-wire system[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(6): 2628-2637.
- [6] Bao F B. The electric power steering systems and its key technology[J]. Auto Application, 2009, 6(3): 27-29.
- [7] Li B, Fan Y. Model following control of four-wheel active steering vehicle[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(10): 1531-1535.
- [8] Gadda C D, Laws S M, Gerdes J C. Generating diagnostic residuals for steer-by-wire vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(3): 529-540.
- [9] Rasid M, Nurul F A, Muhamad I M S. Preliminary thermal evaluation of actuator for steer-by-wire vehicle[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12): 11468-11474.
- [10] 张嫣. 黑客攻击汽车[J]. 经营者(汽车商业评论), 2013, 12(8): 44-45.  
(Zhang Y. Hackers attack cars[J]. Proprietor (Automotive Business Review), 2013, 12(8): 44-45.)
- [11] 桂丽. 移动互联网汽车信息安全风险研究[J]. 电信网络技术, 2017, 63(6): 19-24.  
(Gui L. Research on mobile Internet automobile information security risk[J]. Telecommunications Network Technology, 2017, 63(6): 19-24.)
- [12] 康双勇. 车联网与信息安全[J]. 保密科学技术, 2017, 8(8): 69.  
(Kang S Y. Internet of vehicles and information security[J]. Secret Science and Technology, 2017, 8(8): 69.)
- [13] Ferrara A, Oleari A N, Sacone S. An event-triggered model predictive control scheme for freeway systems[C]. Decision and Control (CDC), 2012 IEEE 51st Annual Conference on. Maui: IEEE, 2012: 6975-6982.
- [14] Liu C, Gao J, Li H. Robust self-triggered min-max model predictive control for linear discrete-time systems[C]. The 36th Chinese Control Conference (CCC). Shenyang: IEEE, 2017: 4512-4516.
- [15] Mi X, Li S. Event-triggered MPC design for distributed systems with network communications[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2018, 5(1): 240-250.
- [16] Wang Q, Zhou Y Y, Niu Y. Event-triggered predictive control with quantization[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2016, 42(2): 240-246.
- [17] Guo K H. Vehicle handling dynamics[M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1991: 102-106.
- [18] Guvenc B A, Bunte T, Odenthal D. Robust two degree-of-freedom vehicle steering controller design[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12(4): 627-636.
- [19] Yang Q L. Study on the 2-DOF steering model of four-wheel vehicle[J]. Machinery and Electronics, 2007, 25(8): 71-73.
- [20] Yong J, Gao F, Ding N. An integrated algorithm for vehicle stability improvement with the coordination of direct yaw moment and four-wheel steering control[J]. International Journal of Vehicle Design, 2017, 74(3): 231-256.
- [21] Yuan Y, Tan G. Research on handling stability of steering-by-wire system[C]. MATEC Web of Conferences. Kuala Lumpur: EDP Sciences, 2017: 139-198.
- [22] 陈虹. 模型预测控制[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 137-193.  
(Chen H. Model predictive control[M]. Beijing: Science Press, 2013: 137-193.)
- [23] Camacho E F, Bordons C. Model predictive control[M]. London: Springer, 2007: 205-230.
- [24] Eqtami A, Dimarogonas D V, Kyriakopoulos K J. Novel event-triggered strategies for Model Predictive Controllers[C]. The 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. Orlando: IEEE, 2011: 3392-3397.
- [25] Eqtami A, Dimarogonas D V, Kyriakopoulos K J. Event-triggered strategies for decentralized model predictive controllers[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2011, 44(1): 10068-10073.
- [26] Megretski V D B A. Unsolved problems in mathematical systems and control theory[M]. Princeton: Princeton University Press, 2009: 18-32.
- [27] Liu X, Liu M, Shi Y. Event triggered model predictive control: A less conservative result[J]. Journal of the Franklin Institute, 2018, 355(18): 9053-9071.

## 作者简介

于树友(1974—),男,教授,博士生导师,从事预测控制、鲁棒控制以及预测控制与鲁棒控制在机电系统中的应用等研究, E-mail: shuyou@jlu.edu.cn;

刘艺(1993—),男,硕士生,从事预测与决策算法的研究, E-mail: liuyi17@mails.jlu.edu.cn;

王宇雷(1985—),男,副教授,博士,从事预测与决策算法等研究, E-mail: wangyulei@jlu.edu.cn;

陈虹(1963—),女,教授,博士生导师,从事预测控制、鲁棒控制、非线性控制等研究, E-mail: chen@jlu.edu.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)