



多级故障下网联车队协同变道性能监督容错控制

付主木 琚函铮 夏元清 陶发展 张玮 陈启宏

Performance-monitored Fault-tolerant Control for Cooperative Lane-changing of Connected Vehicular Platoons Under Multi-level Failures

FU Zhu-Mu, JU Han-Zheng, XIA Yuan-Qing, TAO Fa-Zhan, ZHANG Wei, CHEN Qi-Hong

在线阅读 View online:

<http://www.aas.net.cn/article/current/9db88fdab3765976d4e170f8ae556ef223d564edb5f14139797ae4a5d9e70ed7>

您可能感兴趣的其他文章

基于零和微分博弈的航天器编队通信链路故障容错控制

Fault-tolerant Control for Spacecraft Formation With Communication Faults Based on Zero-sum Differential Game

自动化学报. 2025, 51(1): 174–185 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c240115>

双端切换拓扑下基于二值通信的多智能体系统容错控制

Fault-tolerant Control for Multi-agent Systems Based on Binary-valued Communication Under Dual-terminal Switching Topologies

自动化学报. 2025, 51(6): 1347–1358 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c240722>

故障诊断与容错控制的一个新框架

A New Framework for Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control

自动化学报. 2021, 47(5): 1035–1042 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c190004>

考虑执行器非线性的固定时间全局预设性能车辆队列控制

Fixed-time Global Prescribed Performance Control for Vehicular Platoons With Actuator Nonlinearities

自动化学报. 2024, 50(2): 320–333 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c230189>

面向自动驾驶测试的危险变道场景泛化生成

Generalization Generation of Hazardous Lane-changing Scenarios for Automated Vehicle Testing

自动化学报. 2023, 49(10): 2211–2223 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c220772>

基于层级结构的空地协同预设时间最优容错控制

Hierarchical-based Prescribed-time Optimal Fault-tolerant Control for Air-ground Cooperative System

自动化学报. 2024, 50(8): 1589–1600 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c230699>

多级故障下网联车队协同变道性能监督容错控制

付主木^{1,2} 琚函铮¹ 夏元清² 陶发展¹ 张玮¹ 陈启宏³

摘要 针对由涵盖执行器部分至完全失效的多级故障所导致的网联车队决策-执行层协调失配问题, 提出一种融合跟踪精度与收敛速度监督的协同变道容错控制方法. 首先, 针对变道决策规划参数不当引发的快速性与平稳性冲突问题, 设计一种基于可变安全时窗的目标轨迹规划机制, 规避相邻车道动态障碍车碰撞风险, 实现变道过程快速响应与乘客舒适性的动态权衡. 其次, 针对多级故障、饱和输入与欺骗攻击耦合造成的执行层轨迹跟踪失控问题, 构建一种集成分布式扰动近似技术的性能监督容错跟踪控制策略, 确保队列跟踪精度与收敛速度在预设时间内恢复到指定范围, 消除对故障因子非零的强假设条件. 接着, 针对多级故障过渡阶段安全时窗非光滑突变引发的决策-执行层协调失配问题, 提出一种基于性能过渡映射的自适应协同变道控制方法, 确保决策层与执行层动态双向交互调节, 保障车队一致跟踪目标轨迹并安全完成变道. 最后, 通过仿真实验验证了所提方法的有效性.

关键词 网联车队; 变道; 容错控制; 性能监督

引用格式 付主木, 琚函铮, 夏元清, 陶发展, 张玮, 陈启宏. 多级故障下网联车队协同变道性能监督容错控制. 自动化学报, xxxx, xx(x): x-xx

DOI 10.16383/j.aas.c260085 **CSTR** 32138.14.j.aas.c260085

Performance-monitored Fault-tolerant Control for Cooperative Lane-changing of Connected Vehicular Platoons Under Multi-level Failures

FU Zhu-Mu^{1,2} JU Han-Zheng¹ XIA Yuan-Qing² TAO Fa-Zhan¹ ZHANG Wei¹ CHEN Qi-Hong³

Abstract To address the problem of coordination mismatch between the decision-making and execution levels of connected vehicular platoons caused by multi-level failures ranging from partial to full actuator faults, a cooperative lane-changing fault-tolerant control method integrating supervision of tracking accuracy and convergence speed is proposed. Firstly, to address the conflict problem between rapidity and smoothness caused by improper lane-changing decision-making planning parameters, a target trajectory planning mechanism based on a variable safe time window is designed to mitigate collision risks posed by dynamic obstacle vehicles in adjacent lanes, thereby achieving dynamic trade-off between rapid response and passenger comfort during lane-changing process. Secondly, to address the loss problem of trajectory tracking control at the execution level due to the coupling of multi-level failures, saturation input, and deception attacks, a performance-monitored fault-tolerant tracking control strategy integrating distributed disturbance approximation technology is constructed to ensure that platoon tracking accuracy and convergence speed are restored into the specified range within the prescribed time while eliminating the strong assumption of non-zero fault factor. Then, to address the coordination mismatch problem between the decision-making and execution levels caused by the non-smooth change of safe time window during the transition phase of multi-level failures, an adaptive cooperative lane-changing control method based on a performance transition mapping is proposed to ensure dynamic bidirectional interaction and adjustment between the two levels, while guaranteeing that the vehicular platoon consistently tracks the target trajectory to complete lane-changing safely. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by simulation experiment.

Keywords connected vehicular platoons; lane-changing; fault-tolerant control; performance-monitored

Citation Fu Zhu-Mu, Ju Han-Zheng, Xia Yuan-Qing, Tao Fa-Zhan, Zhang Wei, Chen Qi-Hong. Performance-monitored fault-tolerant control for cooperative lane-changing of connected vehicular platoons under multi-level failures. *Acta Automatica Sinica*, xxxx, xx(x): x-xx

收稿日期 2026-01-30 录用日期 2026-04-12

Manuscript received January 30, 2026; accepted April 12, 2026

国家自然科学基金 (62371182, 62301212, U25A20460), 河南省高校科技创新人才计划 (23HASTIT021), 河南省人才项目 (26400510006) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (62371182, 62301212, U25A20460), Program for Science and Technology Innovation Talents in the University of Henan Province (23HASTIT021), and Henan Provincial Talent Program (264000510006)

本文责任编辑 杨涛

Recommended by Associate Editor YANG Tao

1. 河南科技大学信息工程学院 (人工智能学院) 洛阳 471023 2. 中原工学院自动化与电气工程学院 郑州 450007 3. 武汉理工大学自动化学院 武汉 430070

1. School of Information Engineering (School of Artificial Intelligence), Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023 2. School of Automation and Electrical Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007 3. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070

网联车队系统作为智能交通系统的关键组成部分,在缩短车距、提升交通容量、降低能耗等方面具有显著优势,吸引了诸多学者的关注^[1-3]。现有车队控制研究主要聚焦于单车道内的稳态跟驰场景,旨在设计有效的控制方法使跟随车以给定的间距策略跟踪领航车,并保证队列稳定性^[4]。然而,在实际交通中,为提升通行效率或应对突发状况,车队在行驶过程中变道行为普遍存在。在此过程中,车辆的轨迹规划与跟踪控制高度耦合、相互制约,若二者交互不当将诱发队列性能恶化甚至导致碰撞风险。因此,研究网联车队在动态交通场景下的协同变道控制问题具有重要意义^[5]。

队列变道过程的轨迹规划与跟踪控制通常采用分层结构实现,决策层根据交通环境及车队状态生成安全平稳的目标变道轨迹^[6],执行层则通过油门、制动及转向控制实现车队对目标轨迹的精准跟踪^[7]。在轨迹规划层面,为确保队列变道轨迹的最优性,文献[8]构建一种基于加权成本函数的协同变道运动规划算法,生成最小化变道时间与控制能耗的目标轨迹。在此基础上,文献[9]将该技术扩展到多车道队列形成场景,实现多车协同变道轨迹的协调规划。针对决策规划中动态环境交互与复杂行为预测的核心挑战,文献[10]开发一种融合交互预测信息的安全规划方法,保证车辆在安全高效状态下完成驾驶任务。文献[11]设计一种基于合作变道博弈模型的动态轨迹规划算法,降低变道过程队列偏航幅度并提升轨迹规划效率。在跟踪控制层面,针对存在未知时变故障方向的二维网联车队,文献[12]提出一种基于 Nussbaum 型函数的容错控制算法,确保队列在复杂工况下稳定变道。针对变道过程遭受拒绝服务攻击与重放攻击耦合影响的网联车队,文献[13-14]开发一种事件触发分布式韧性控制方案,改善队列性能恢复能力并节省通信带宽。为进一步提高变道效率,文献[15]设计一种预设时间性能函数,将预设时间变道问题转化为跟踪误差约束问题,实现队列在指定时间内的高精度变道。然而,上述研究大多假设当前车道与目标车道无障碍且空间充足,场景较为理想。针对相邻车道存在障碍车辆的情形,文献[16]开发一种基于分层结构的数据驱动协同变道控制策略,在无需精确车辆模型的条件下规避变道过程中的车队内外碰撞风险。

上述研究主要集中于网联车队在执行器理想工作环境下的协同变道控制。然而,由于机械磨损、电气老化及环境侵蚀,队列车辆在变道过程中极易遭受执行器故障,若处理不当将导致队列决策-执行

层协调失配进而引发协同失稳。根据故障程度,执行器故障可分为部分失效的“适度故障”与完全失效的“极端故障”两类^[17]。针对存在未知适度故障的网联车队,文献[18]提出一种自适应容错协同控制策略,以规避队列行驶过程中的潜在安全风险。在此基础上,文献[19]将该方法扩展到拒绝服务攻击下的网联车队,融合故障估计与攻击补偿技术以增强队列的容错能力。上述研究主要聚焦于网联车队的稳态性能,而对瞬态性能保障探讨不足。为了在处理适度故障的同时兼顾队列的瞬态与稳态性能,文献[20-22]将指定性能控制方法与容错控制技术相结合,将期望的性能特性表征为跟踪误差约束。然而,当执行器发生极端故障时,上述容错控制策略将难以适用。为此,部分学者引入冗余执行器作为备份机制以应对极端故障,并取得一些初步成果^[23-25]。为了增强网联车队的制动冗余能力,文献[23]开发一种液压与再生执行器并联工作的容错控制策略,但在极端恶劣环境下所有执行器可能同时发生极端故障。为解决这一问题,文献[25]提出一种集成故障监督模块与执行器切换规则的硬件冗余控制方案,在监督条件触发时切换至备份执行器,从而维持队列持续稳定行驶。尽管现有容错控制策略在适度故障与极端故障环境下已取得一定成效,但研究范畴仍主要局限于网联车队在单车道内的纵向行驶控制。目前,针对网联车队在“适度与极端故障并存”的多级故障模式下横纵向变道控制研究尚显不足,尚未对多级故障过渡阶段导致的决策-执行层协调失配问题提出有效解决方法,这构成本文主要研究动机。

基于上述分析与总结,本文针对存在多级故障的网联车队系统展开研究,提出一种融合跟踪精度与收敛速度监督的协同变道容错控制策略。与现有工作相比,本文的主要贡献如下:

1) 针对多级故障下队列决策-执行层协调失配问题,提出基于可变安全时窗的协同变道控制算法,规避当前车道与目标车道中动态障碍车辆碰撞风险,以实现变道完成时间与跟踪精度的量化预设。与已有变道控制策略^[12]相比,本文在确保避撞安全的同时兼顾乘客舒适性,增强了算法在真实场景下的工程适用性。

2) 针对局部车辆多级故障引发的队列性能全局恶化问题,构建基于性能监督的统一容错跟踪控制方法,以保证队列在适度故障下于指定的动态性能包络内实现轨迹跟踪,并在极端故障下于预设时间内实现性能恢复。与已有硬件冗余控制^[25]相比,

本文在不改变控制结构的条件下进一步降低了执行器切换频率, 规避了队列协同振荡风险.

3) 针对多级故障过渡阶段变道安全时窗非光滑突变问题, 设计具有动态异构性的性能过渡函数, 以实现性能包络的连续切换与安全平稳变道. 与已有性能恢复容错控制^[26]相比, 本文从极端故障下的单车道跟驰场景扩展到多级故障下的多车道变道场景, 化解了性能恶化对协同变道安全的威胁.

1 系统模型与问题描述

1.1 车辆动力学模型

如图 1 所示, 本文考虑基于双向通信拓扑且由 1 辆领航车 (标记为车辆 0) 和 n 辆跟驰车组成的网联车队系统, 车间通信遭受欺骗攻击的影响. 本文研究的交通控制场景为: 通过执行图 2(b) 所示的变道操作, 使网联车队由图 2(a) 所示的当前位置移动到图 2(c) 所示的目标位置, 且避免与当前车道障碍车 L_o 和 F_o 以及目标车道障碍车 L_d 和 F_d 碰撞.

变道车辆 i ($i = 0, 1, \dots, n$) 的动力学模型描述为如下三阶非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{p}}_i(t) = \mathbf{v}_i(t) \\ \dot{\mathbf{v}}_i(t) = \mathbf{a}_i(t) \\ \dot{\mathbf{a}}_i(t) = \bar{\mathbf{u}}_i(t) + \mathbf{f}_i(\mathbf{p}_i, \mathbf{v}_i, \mathbf{a}_i) + \boldsymbol{\varrho}_i(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{p}_i(t) = [p_{x_i}(t), p_{y_i}(t)]^T$ 表示位移, $p_{x_i}(t)$ 和 $p_{y_i}(t)$ 分别表示左车头角的纵向位移和横向位移; $\mathbf{v}_i(t) = [v_{x_i}(t), v_{y_i}(t)]^T$ 表示速度, $v_{x_i}(t)$ 和 $v_{y_i}(t)$ 分别表示纵向速度和横向速度; $\mathbf{a}_i(t) = [a_{x_i}(t), a_{y_i}(t)]^T$ 表示加速度, $a_{x_i}(t)$ 和 $a_{y_i}(t)$ 分别表示纵向加速度和横向加速度; $\bar{\mathbf{u}}_i(t) = [\bar{u}_{x_i}(t), \bar{u}_{y_i}(t)]^T$ 表示控制输入, $\bar{u}_{x_i}(t)$ 和 $\bar{u}_{y_i}(t)$ 分别表示纵向控制输入和横向控制输入; $\boldsymbol{\varrho}_i(t) = [\varrho_{x_i}(t), \varrho_{y_i}(t)]^T$ 表示外部干扰; $\mathbf{f}_i(\mathbf{p}_i, \mathbf{v}_i, \mathbf{a}_i) = [f_{x_i}(\mathbf{x}_i(t)), f_{y_i}(\mathbf{y}_i(t))]^T$ 表示在建立非线性车辆模型过程中产生的不确定非线性函数, 其包含发动机动力学、空气阻力动力学与滚动阻力动力学^[7], $\mathbf{x}_i(t) = [p_{x_i}(t), v_{x_i}(t), a_{x_i}(t)]^T$, $\mathbf{y}_i(t) = [p_{y_i}(t), v_{y_i}(t), a_{y_i}(t)]^T$.

假设 1. 外部干扰 $\varrho_{x_i}(t)$ 和 $\varrho_{y_i}(t)$ 及其导数是有界的, 满足 $|\varrho_{x_i}(t)| \leq \bar{\varrho}_{x_i}$, $|\dot{\varrho}_{x_i}(t)| \leq \varrho_{x_{iM}}$, $|\varrho_{y_i}(t)| \leq \bar{\varrho}_{y_i}$, $|\dot{\varrho}_{y_i}(t)| \leq \varrho_{y_{iM}}$, 其中, $\bar{\varrho}_{x_i}$ 、 $\varrho_{x_{iM}}$ 、 $\bar{\varrho}_{y_i}$ 和 $\varrho_{y_{iM}}$ 是未知正常数.

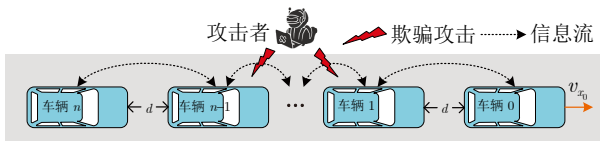


图 1 网联车队系统

Fig.1 Connected vehicular platoon system

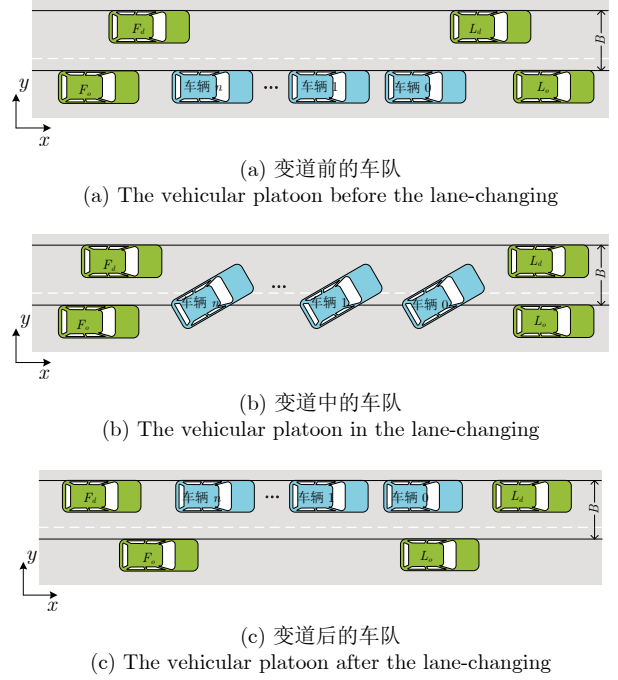


图 2 队列变道场景

Fig.2 Platoon lane-changing scenes

其中, $\bar{\varrho}_{x_i}$ 、 $\varrho_{x_{iM}}$ 、 $\bar{\varrho}_{y_i}$ 和 $\varrho_{y_{iM}}$ 是未知正常数.

1.2 执行器故障模型

在网联车队变道过程中, 车辆纵向执行器可能突发偏置、部分失效、死锁乃至完全失效等多种故障, 其具体定义如下:

执行器偏置故障模型^[17]:

$$\bar{u}_{x_i}(t) = u_{x_i}(t) + r_i(t) \quad (2)$$

其中, $u_{x_i}(t)$ 表示纵向控制信号 (执行器输入); $r_i(t)$ 表示可能快速时变或间歇突发的偏置故障.

执行器部分/完全失效故障模型^[17]:

$$\bar{u}_{x_i}(t) = \rho_i(t)u_{x_i}(t) \quad (3)$$

其中, $\rho_i(t)$ 表示故障因子, 用以反映执行器的有效程度, 且 $\rho_i(t) \in [0, 1]$. 如果存在一个正常数 $\underline{\rho}_i$ 使得 $0 < \underline{\rho}_i < \rho_i(t) \leq 1$, 则执行器遭受部分失效故障; 如果故障因子 $\rho_i(t) = 0$, 则执行器遭受完全失效故障.

执行器死锁故障模型^[17]:

$$\bar{u}_{x_i}(t) = u_{ci} \quad (4)$$

其中, u_{ci} 表示执行器卡死的位置.

执行器故障模型 (2) ~ (4) 可以统一重写为:

$$\bar{u}_{x_i}(t) = \rho_i(t_{li}, t)u_{x_i}(t) + r_i(t_{bi}, t) \quad (5)$$

其中, t_{li} 表示执行器失效故障发生的时刻; t_{bi} 表示

执行器偏置或死锁故障发生的时刻; 故障因子 $\rho_i(t_{li}, t)$ 与执行器偏置 $r_i(t_{bi}, t)$ 是有界的, 满足 $0 \leq \rho_i(t_{li}, t) \leq 1$, $|r_i(t_{bi}, t)| \leq \bar{r}_i$, $\bar{r}_i$ 是未知的正常数.

当故障因子 $\rho_i(\cdot) \in (0, 1]$ 时, 模型 (5) 包含偏置故障与部分失效故障. 由于纵向控制输入 $\bar{u}_{x_i}(t)$ 仍受到所设计的纵向控制信号 $u_{x_i}(t)$ 的影响, 因此这种故障称为“适度故障”. 当故障因子 $\rho_i(\cdot) = 0$ 时, 模型 (5) 包含死锁故障与完全失效故障. 此时纵向控制输入 $\bar{u}_{x_i}(t)$ 不再受到纵向控制信号 $u_{x_i}(t)$ 的影响, 因此这种故障称为“极端故障”. 可见, 模型 (5) 能统一描述多种类型的执行器故障.

由于执行器物理结构的限制, 油门/制动以及转向系统输出不能任意大, 因此考虑饱和和非线性的影响, 其表达式如下所示:

$$\text{sat}(u_{z_i}) = \begin{cases} u_{z_i, \max}, & u_{z_i} \geq u_{z_i, \max} \\ u_{z_i}, & u_{z_i, \min} < u_{z_i} < u_{z_i, \max} \\ u_{z_i, \min}, & u_{z_i} \leq u_{z_i, \min} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $u_{z_i, \max}$ 和 $u_{z_i, \min}$ 分别表示控制信号 u_{z_i} 的上界和下界, z 表示 x 或 y .

此外, 网联车队在变道过程中极易遭受欺骗攻击, 使得某些车辆的加速度信息 $\mathbf{a}_i(t)$ 被恶意篡改, 从而干扰或破坏网联车队的变道控制行为. 欺骗攻击下变道车辆 i 的加速度数据模型描述如下:

$$\dot{\mathbf{a}}_i^A(t) = \begin{cases} \dot{\mathbf{a}}_i(t) + \mathbf{h}_i(t), & t \in [t_j^-, t_j^+) \\ \dot{\mathbf{a}}_i(t), & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{h}_i(t) = [h_{x_i}(x_i(t)), h_{y_i}(y_i(t))]^T$, $h_{x_i}(x_i(t))$ 和 $h_{y_i}(y_i(t))$ 表示篡改状态信息所引入的偏置量; $\mathbf{a}_i^A(t)$ 表示遭受攻击后车辆的加速度; t_j^- 和 t_j^+ 分别表示欺骗攻击的起始与结束时刻, $j = 1, \dots, M$ 表示第 j 次欺骗攻击.

1.3 控制目标与预备知识

本文的控制目标是针对受到多级故障、欺骗攻击及饱和和非线性的网联车队系统, 设计统一的协同变道容错控制方法, 在避免车辆碰撞与保证乘客舒适性的前提下, 确保网联车队于给定时间内安全完成变道.

与文献 [7] 类似, 将变道车辆 i 的纵向位移跟踪误差 e_{px_i} 与横向位移跟踪误差 e_{py_i} 依次定义为:

$$e_{px_i} = \begin{cases} p_{x_i}^o - p_{x_i}, & i = 0 \\ p_{x_{(i-1)}} - l_i - d - p_{x_i}, & i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (8)$$

$$e_{py_i} = \begin{cases} p_{y_i}^o - p_{y_i}, & i = 0 \\ p_{y_{(i-1)}} - p_{y_i}, & i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (9)$$

其中, $p_{x_i}^o$ 与 $p_{y_i}^o$ 分别表示期望纵向位移与期望横向位移; l_i 表示车辆 i 的长度; d 表示相邻变道车辆之间的期望距离.

为实现上述控制目标, 需要下列预备知识.

定义 1 (队列稳定性)^[15]. 如果给定任意的正常数 ς , 存在一个正常数 κ , 使得所有跟踪误差 e_{pz_i} (z 表示 x 或 y) 满足 $\sup_i \max\{|e_{pz_i}(0)|, |\dot{e}_{pz_i}(0)|\} < \varsigma \Rightarrow \sup_i \sup_{t \geq 0} \max\{|e_{pz_i}(t)|, |\dot{e}_{pz_i}(t)|\} < \kappa$, 即网联车队的跟踪误差一致有界, 则网联车队系统满足队列稳定性.

引理 1^[27]. 对于定义在紧集 Ω_x 上的连续函数 $F(\chi)$, 存在模糊逻辑系统 (fuzzy logic system, FLS) $\mathbf{W}^T \boldsymbol{\varphi}(\chi)$ 满足:

$$F(\chi) = \mathbf{W}^T \boldsymbol{\varphi}(\chi) + \delta(\chi) \quad (10)$$

其中, $\chi \in \Omega_x$; $\mathbf{W} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N]^T$ 表示理想权向量, $N > 0$ 表示模糊规则的数量; $\delta(\chi)$ 表示逼近误差且满足 $\|\delta(\chi)\| \leq \varepsilon$, $\varepsilon > 0$. $\boldsymbol{\varphi}(\chi)$ 和 $\xi_j(\chi)$ 分别表示模糊基函数和隶属度函数, 其表达式如下:

$$\boldsymbol{\varphi}(\chi) = \frac{[\xi_1(\chi), \xi_2(\chi), \dots, \xi_N(\chi)]^T}{\sum_{j=1}^N \xi_j(\chi)} \quad (11)$$

$$\xi_j(\chi) = \exp\left(\frac{-(\chi - \boldsymbol{\iota}_j)^T(\chi - \boldsymbol{\iota}_j)}{\nu_j^2}\right) \quad (12)$$

其中, $\boldsymbol{\iota}_j = [\iota_{j1}, \dots, \iota_{jn}]^T$ 表示中心向量; ν_j 表示宽度.

2 协同变道控制结构

在本节中, 提出一种包含决策层与执行层的协同变道控制结构. 首先基于变道交通场景建立避让与舒适性约束条件, 接着计算变道完成时间取值范围. 基于给定的变道完成时间 t_l 制定目标变道轨迹, 并设计控制方案以确保网联车队跟踪目标轨迹完成变道操作, 具体结构如图 3 所示.

2.1 避撞与舒适性约束

为确保网联车队在 $[0, t_l]$ 内安全变道, 分析下列约束条件以避免车队间碰撞. 具体而言, 领航车 0 需要同时避免与障碍车 L_d 和 L_o 碰撞, 队列末尾的跟随车 n 需要同时避免与障碍车 F_d 和 F_o 碰撞, t_l 是整个网联车队完成变道的时间上界.

2.1.1 领航车 0 与障碍车 L_d 避撞条件

如图 4 所示, 为避免领航车 0 与障碍车 L_d 碰撞, 需考虑变道过程中领航车 0 的宽度在 x 轴方向

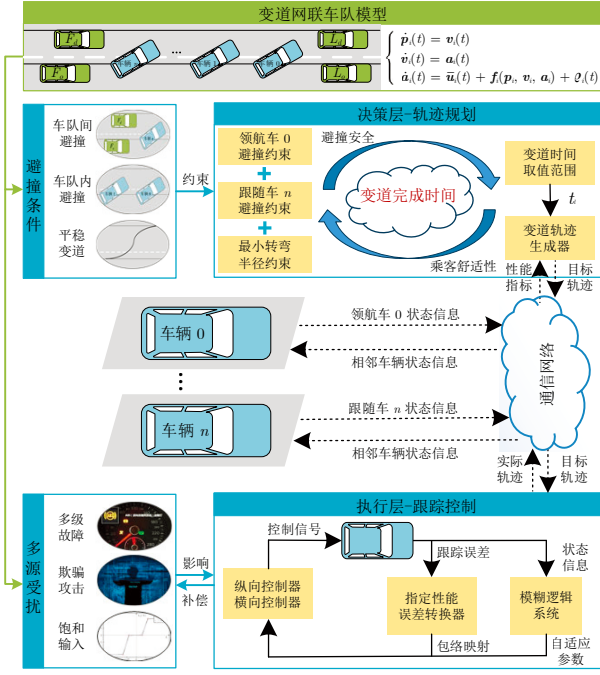


图3 协同变道控制方法框图

Fig.3 The block diagram of cooperative lane-changing control method

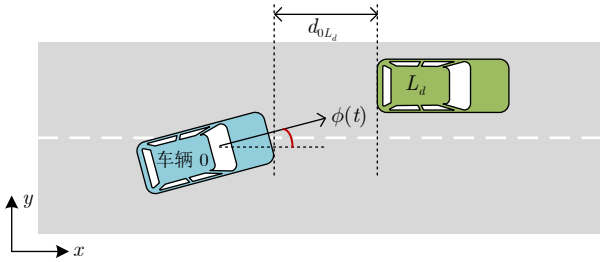


图4 领航车0与障碍车L_d

Fig.4 Leader vehicle 0 and obstacle vehicle L_d

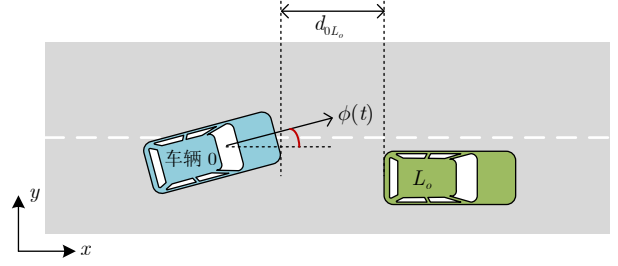
的投影与障碍车 L_d 长度的影响, 以确保无论领航车 0 处于何种变道角度, 其车头均不会撞上障碍车 L_d 的车尾. 当 $t \in [0, t_l]$ 时, 应满足下列约束条件:

$$p_{x_{L_d}}(t) - l_{L_d} - \varpi_0 \sin(\phi(t)) - p_{x_0}(t) \geq d_{0L_d} \quad (13)$$

其中, $p_{x_{L_d}}(t)$ 表示障碍车 L_d 左车头角的纵向位移; l_{L_d} 表示障碍车 L_d 的长度; ϖ_0 表示领航车 0 的宽度; d_{0L_d} 表示领航车 0 与障碍车 L_d 之间的期望距离; $\phi(t)$ 表示车队行驶方向与 x 轴之间的角度.

2.1.2 领航车 0 与障碍车 L_o 避撞条件

如图 5 所示, 为避免领航车 0 与障碍车 L_o 碰撞, 需考虑变道过程中领航车 0 的宽度在 x 轴方向的投影与障碍车 L_o 长度的影响, 以保证无论领航车 0 处于何种变道角度, 其与障碍车 L_o 的纵向距离始终安全. 当 $t \in [0, t_l]$ 时, 应满足下列约束条件:

图5 领航车 0 与障碍车 L_o Fig.5 Leader vehicle 0 and obstacle vehicle L_o

$$p_{x_{L_o}}(t) - l_{L_o} - \varpi_0 \sin(\phi(t)) - p_{x_0}(t) \geq d_{0L_o} \quad (14)$$

其中, $p_{x_{L_o}}(t)$ 表示障碍车 L_o 左车头角的纵向位移; l_{L_o} 表示障碍车 L_o 的长度; d_{0L_o} 表示领航车 0 与障碍车 L_o 之间的期望距离.

2.1.3 跟随车 n 与障碍车 F_d 避撞条件

如图 6 所示, 为避免跟随车 n 与障碍车 F_d 碰撞, 需考虑变道过程中跟随车 n 的长度在 x 轴方向投影的影响, 以确保跟随车 n 的车尾不会与障碍车 F_d 的车头发生碰撞. 当 $t \in [0, t_l]$ 时, 应满足下列约束条件:

$$p_{x_n}(t) - l_n \cos(\phi(t)) - p_{x_{F_d}}(t) \geq d_{nF_d} \quad (15)$$

其中, $p_{x_{F_d}}(t)$ 表示障碍车 F_d 左车头角的纵向位移; l_n 表示跟随车 n 的长度; d_{nF_d} 表示跟随车 n 与障碍车 F_d 之间的期望距离.

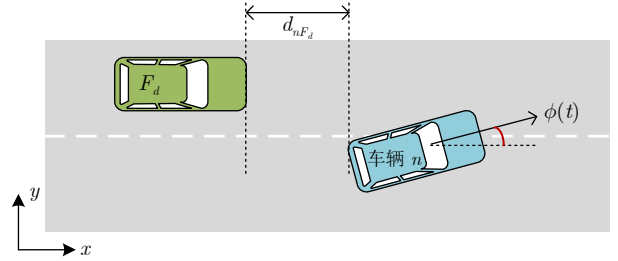
2.1.4 跟随车 n 与障碍车 F_o 避撞条件

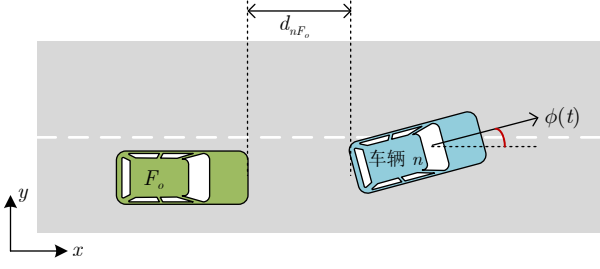
如图 7 所示, 为避免跟随车 n 与障碍车 F_o 碰撞, 需考虑变道过程中跟随车 n 的长度在 x 轴方向投影的影响, 以保证跟随车 n 与后方的障碍车 F_o 之间有安全的纵向缓冲距离. 当 $t \in [0, t_l]$ 时, 应满足下列约束条件:

$$p_{x_n}(t) - l_n \cos(\phi(t)) - p_{x_{F_o}}(t) \geq d_{nF_o} \quad (16)$$

其中, $p_{x_{F_o}}(t)$ 表示障碍车 F_o 左车头角的纵向位移; d_{nF_o} 表示跟随车 n 与障碍车 F_o 之间的期望距离.

为保证网联车队在 $[0, t_l]$ 内实现安全变道, 应

图6 跟随车 n 与障碍车 F_d Fig.6 Following vehicle n and obstacle vehicle F_d

图 7 跟随车 n 与障碍车 F_o Fig. 7 Following vehicle n and obstacle vehicle F_o

同时满足约束条件 (13) ~ (16).

2.2 变道完成时间

变道完成时间 t_l 的取值应保证在整个变道过程中不发生碰撞. 为了在变道后仍能避免队列间碰撞, 当 $t \geq t_l$ 时, 领航车纵向速度 v_{x_0} 应与当前车道的障碍车纵向速度 $v_{x_{L_d}}$ 一致. 因此, 在 $t \in [0, t_l]$ 时目标纵向加速度 $a_{x_0}^o(t)$ 满足下列方程:

$$\int_0^{t_l} a_{x_0}^o(t) dt + v_{x_0}(0) = v_{x_{L_d}}(0) + \int_0^{t_l} a_{x_{L_d}}(t) dt \quad (17)$$

且当 $t > t_l$ 时, $a_{x_0}^o(t) = a_{x_{L_d}}(t)$ 成立.

接着, 通过积分形式分别将上述位移避撞安全约束 (13) ~ (16) 转化为对变道完成时间的约束, 从而求解出 t_l 的取值范围. 由领航车 0 与障碍车 L_d 之间的避撞约束条件 (13) 可知, 通过利用位移-速度-加速度运动学关系, 变道完成时间 t_l 应满足下列不等式:

$$\begin{aligned} \int_0^{t_l} \int_0^\lambda a_{x_0}^o(t) dt d\lambda + v_{x_0}(0)t_l \leq \\ \int_0^{t_l} \int_0^\lambda a_{x_{L_d}}(t) dt d\lambda + v_{x_{L_d}}(0)t_l + \\ p_{x_{L_d}}(0) - l_{L_d} - p_{x_0}(0) - d_{0L_d} \end{aligned} \quad (18)$$

其中, λ 表示积分变量.

同理, 由领航车 0 与障碍车 L_o 之间的避撞约束条件 (14) 可知, 通过利用位移-速度-加速度运动学关系, 变道完成时间 t_l 应满足下列不等式:

$$\begin{aligned} \int_0^{t_l} \int_0^\lambda a_{x_0}^o(t) dt d\lambda + v_{x_0}(0)t_l \leq \\ \int_0^{t_l} \int_0^\lambda a_{x_{L_o}}(t) dt d\lambda + v_{x_{L_o}}(0)t_l + \\ p_{x_{L_o}}(0) - l_{L_o} - p_{x_0}(0) - d_{0L_o} \end{aligned} \quad (19)$$

为便于联立求解, 记变道网联车队整体长度为 $L = l_0 + l_1 + \dots + l_n + (n-1)d$. 基于跟随车 n 与障碍车 F_d 之间的避撞约束条件 (15), 将跟随车 n 位移

改写为基于领航车 0 位移的等效表达式, 即 $p_{x_n}(t) = p_{x_0}(t) - (L - l_n)$, 则 $p_{x_n}(t_l) - p_{x_n}(0) = (p_{x_0}(t_l) - (L - l_n)) - (p_{x_0}(0) - (L - l_n)) = p_{x_0}(t_l) - p_{x_0}(0)$. 通过利用位移-速度-加速度运动学关系可知, 变道完成时间 t_l 应满足下列不等式:

$$\begin{aligned} \int_0^{t_l} \int_0^\lambda a_{x_0}^o(t) dt d\lambda + v_{x_0}(0)t_l \geq \\ \int_0^{t_l} \int_0^\lambda a_{x_{F_d}}(t) dt d\lambda + v_{x_{F_d}}(0)t_l - \\ p_{x_0}(0) + l_n + p_{x_{F_d}}(0) + d_{nF_d} \end{aligned} \quad (20)$$

同理, 基于跟随车 n 与障碍车 F_o 之间的避撞约束条件 (16), 将跟随车 n 位移改写为基于领航车 0 位移的等效表达式, 并利用位移-速度-加速度运动学关系可知, 变道完成时间 t_l 应满足下列不等式:

$$\begin{aligned} \int_0^{t_l} \int_0^\lambda a_{x_0}^o(t) dt d\lambda + v_{x_0}(0)t_l \geq \\ \int_0^{t_l} \int_0^\lambda a_{x_{F_o}}(t) dt d\lambda + v_{x_{F_o}}(0)t_l - \\ p_{x_0}(0) + l_n + p_{x_{F_o}}(0) + d_{nF_o} \end{aligned} \quad (21)$$

由于平稳的变道过程对于保证乘客的舒适性至关重要, 因而变道过程的转弯半径 R 应该满足相应的物理约束. 如图 8 所示, 变道的纵向位移 A 可由勾股定理表示如下:

$$A = \sqrt{4BR - B^2} \quad (22)$$

其中, B 表示网联车队的总横向位移.

由目标纵向加速度 $a_{x_0}^o(t)$ 可知, 变道完成时间 t_l 与标准最小转弯半径 $R_{\min}$ 应满足下列约束条件:

$$\int_0^{t_l} \int_0^\lambda a_{x_0}^o(\tau) d\tau d\lambda + v_{x_0}(0)t_l \geq \sqrt{4BR_{\min} - B^2} \quad (23)$$

即变道过程产生的实际纵向位移必须不小于以最小转弯半径 $R_{\min}$ 完成变道所需的几何位移. 基于式 (17) 联立求解式 (18) ~ (23), 可计算出变道完成时间 t_l 的取值范围 $[t_{\min}, t_{\max}]$, 其中 $t_{\min}$ 和 $t_{\max}$ 分别

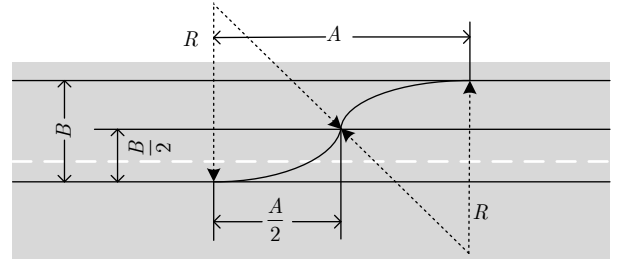


图 8 变道过程的转弯半径

Fig. 8 Turning radius during the lane-changing

表示取值范围的下界和上界, 在该范围内可以安全完成变道操作, 同时保证网联车队的稳定性.

注 1. 由避撞条件 (18) ~ (21) 与舒适性条件 (23) 可知, 变道完成时间 t_l 的取值范围仅由障碍车的纵向加速度决定. 如果前车 L_d 持续加速且后车 F_d 同步减速, 则表明纵向间隙正在扩大, 这种情况下变道更安全; 反之, 如果前车 L_d 减速而后车 F_d 加速, 则表明纵向间隙正在缩小, 必须延缓变道以确保安全.

2.3 目标变道轨迹

变道轨迹需满足变道起止点横向加速度为零, 且横向加速度连续. 为此, 基于给定的变道完成时间 t_l , 采用正弦函数将领航车 0 的目标横向加速度建模为:

$$a_{y0}^o(t) = \begin{cases} \frac{2\pi B}{t_l^2} \sin\left(\frac{2\pi t}{t_l}\right), & t \in [0, t_l] \\ 0, & t \in [t_l, +\infty) \end{cases} \quad (24)$$

可见, 正弦函数的导数连续, 符合舒适性要求, 且 $a_{y0}^o(0) = a_{y0}^o(t_l) = 0$.

此外, 变道轨迹需确保变道起止点横向速度为零, 且横向位移精确收敛至 B . 为此, 领航车 0 的目标横向位移可建模为:

$$p_{y0}^o(t) = \begin{cases} -\frac{B}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{t_l}\right) + \frac{Bt}{t_l}, & t \in [0, t_l] \\ B, & t \in [t_l, +\infty) \end{cases} \quad (25)$$

可见, 正弦函数能够确保变道过程更加平滑, 且 $\dot{p}_{y0}^o(0) = \dot{p}_{y0}^o(t_l) = 0$, $p_{y0}^o(t_l) = B$.

根据式 (17) 与位移-速度-加速度运动学关系, 目标纵向位移可建模为:

$$p_{x0}^o(t) = \int_0^t \int_0^\lambda a_{x0}^o(\tau) d\tau d\lambda + v_{x0}(0)t \quad (26)$$

基于构造的目标横向位移 $p_{y0}^o(t)$ 与目标纵向位移 $p_{x0}^o(t)$, 可确定目标变道轨迹.

注 2. 本文采用正弦函数作为目标横向加速度模型 (24), 旨在平衡舒适性与计算效率. 一方面, 横向加速度 $\dot{a}_{y0}^o(t) = 4\pi^2 B \cos(2\pi t/t_l)/t_l^3$ 连续变化, 避免了突变冲击, 且幅值随 t_l 增大而减小, 通过合理选择 t_l 可将加速度限制在舒适范围内; 另一方面, 正弦函数表达式简洁, 无需如五次多项式般求解线性方程组, 计算负担小, 便于实时控制.

3 全周期性能监督容错控制策略

在本节中, 提出一种基于性能监督的容错控制

策略, 以分析整个队列变道过程中执行器故障不同阶段的跟踪误差响应.

3.1 指定性能函数

为了在网联车队变道过程中满足期望的性能指标, 设计如下更实用的指定性能函数:

$$\beta_{zi}(t) = \begin{cases} \eta_{zi} \sin^4\left(\frac{\pi(t_l - t)}{2t_l}\right) + \omega_{zi}, & 0 \leq t \leq t_l \\ \omega_{zi}, & t > t_l \end{cases} \quad (27)$$

其中, η_{zi} 和 ω_{zi} 为正常数, η_{zi} 的取值应确保 $\beta_{zi}(0) > |e_{pz_i}(0)|$ 成立, ω_{zi} 依据期望的稳态精度进行取值, t_l 在上一节求出的 $[t_{\min}, t_{\max}]$ 范围内依据期望的变道完成时间进行取值.

因此, 只要跟踪误差 $e_{pz_i}(t)$ 满足下列条件:

$$|e_{pz_i}(t)| < \beta_{zi}(t) \quad (28)$$

则跟踪误差 $e_{pz_i}(t)$ 在给定时间 t_l 内收敛到指定范围 $(-\omega_{zi}, \omega_{zi})$ 内.

注 3. 在文献 [15] 中, 变道完成时间 t_l 是预先任意给定的, 且与车辆的位置、速度和加速度等状态信息无关. 然而, 如果时间 t_l 选取不当, 强行在预设的 t_l 前完成变道可能会导致控制输入超出可接受的限度, 从而影响乘客舒适性并破坏队列稳定性. 为解决这一问题, 本文同时考虑了避撞条件与舒适性条件, 由式 (18) ~ (23) 求解出变道完成时间 t_l 的取值范围, 再据此构造指定性能函数 $\beta_{zi}(t)$. 与文献 [15] 相比, 本文构造的指定性能函数更具实用性.

3.2 容错控制策略

如图 9 所示, 本文采用执行器冗余结构来处理极端故障, 每辆车的纵向通道均配备两个执行器, 其中只有一个执行器连接到控制器. 极端故障监督机制由一组前馈监测函数组成, 可以提前检测到极端故障发生. 一旦执行器极端故障令队列性能恶化到超出容忍阈值, 会立即触发监督机制, 经过一段延迟替换时间后, 当前的故障执行器被替换为备份的健康执行器, 并重新设计控制信号以在预设时间内恢复队列性能.

在整个队列变道行驶过程中, 执行器故障不同阶段的纵向跟踪误差响应如图 10 所示. 假设网联车队的整个变道周期 $[0, t_l]$ 可分为健康或适度故障阶段 $[0, t_{efi})$ 、极端故障发生阶段 $[t_{efi}, t_{ri})$ 和后极端故障阶段 $[t_{ri}, t_l]$, t_{efi} 、 t_{di} 和 t_{ri} 分别表示车辆 i 中极端故障发生、极端故障检测和执行器替换的时刻.

1) 在健康或适度故障阶段 $[0, t_{efi})$, 纵向控制输入 $\bar{u}_{xi}(t)$ 仍受到控制信号 $u_{xi}(t)$ 的影响, 因此可

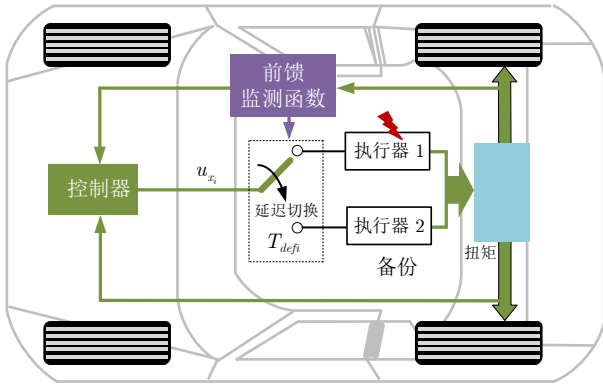


图 9 具有双冗余执行器的容错车辆结构

Fig.9 Architecture of fault-tolerant vehicle with dual-redundant actuators

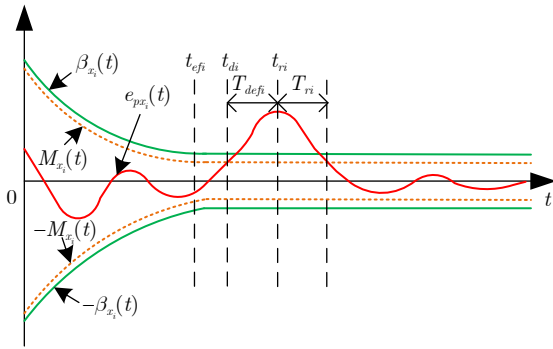


图 10 整个队列变道过程的纵向跟踪误差

Fig.10 The longitudinal tracking error during the entire platoon lane-changing process

以通过设计有效的容错控制信号来满足期望的队列性能要求 (28)。

2) 在极端故障发生阶段 \$[t_{efi}, t_{ri}]\$，车辆 \$i\$ 完全失去执行器输出 (即 \$\bar{u}_{xi}(t) = 0\$) 或执行器处于死锁状态 (即 \$\bar{u}_{xi}(t) = u_{ci}\$)，导致任何控制指令都无法抵消性能衰退。因此，这一阶段的主要任务是检测极端故障，并用备份的健康执行器替换故障执行器，同时避免车辆碰撞。为此，设计如下极端故障监督机制：

$$t_{di} = \inf \{t : |e_{pxi}(t)| \geq M_{xi}(t), i = 1, \dots, n\} \quad (29)$$

其中，\$M_{xi}(t) = \gamma\beta_{xi}(t)\$ 表示前馈监测函数，且 \$0 < \gamma < 1\$。由于执行器无法立即替换或激活，因此存在一段延迟替换时间 \$T_{defi}\$，使得备份健康执行器在 \$t_{ri}\$ 时刻完全激活。

3) 在后极端故障阶段 \$[t_{ri}, t_l]\$，备份的健康执行器已连接到控制器。此时的主要任务是在预设时间 \$T_{ri}\$ 内将恶化的跟踪误差 \$e_{pxi}(t)\$ 恢复到先前的约束范围内。

假设 2. 在网联车队变道行驶过程中，领航车 0 不会出现极端故障，且跟随车 \$i\$ 的状态在延迟替换

时间 \$T_{defi}\$ 内保持有界。一旦备用执行器连接到控制器，其在后续队列行驶过程中不会再发生故障。

3.3 饱和非线性近似

为解决由执行器饱和拐点导致的非光滑问题，本文构造如下分段光滑函数以近似式 (6) 中的饱和输入：

$$\vartheta_i(u_{zi}) = \begin{cases} u_{zi, \max} \tanh\left(\frac{u_{zi}}{u_{zi, \max}}\right), & u_{zi} \geq 0 \\ u_{zi, \min} \tanh\left(\frac{u_{zi}}{u_{zi, \min}}\right), & u_{zi} < 0 \end{cases} \quad (30)$$

根据近似性质，式 (6) 中的 \$\text{sat}(u_{zi})\$ 可以改写为：

$$\text{sat}(u_{zi}) = \vartheta_i(u_{zi}) + \gamma_{zi}(u_{zi}) \quad (31)$$

其中，\$\gamma_{zi}(u_{zi}) = \text{sat}(u_{zi}) - \vartheta_i(u_{zi})\$ 是一个有界函数且满足：

$$|\gamma_{zi}(u_{zi})| \leq \max \{u_{zi, \max}(1 - \tanh(1)), u_{zi, \min}(\tanh(1) - 1)\} = \bar{\gamma}_{zi} \quad (32)$$

其中，\$\bar{\gamma}_{zi}\$ 是正常数。

利用中值定理，可得如下等式成立：

$$\vartheta_i(u_{zi}) = \vartheta_i(u_{zi}^0) + \vartheta_{u_{zi}\zeta}(u_{zi} - u_{zi}^0) \quad (33)$$

其中，\$\vartheta_{u_{zi}\zeta} = \frac{\partial \vartheta_i(u_{zi})}{\partial u_{zi}}|_{u_{zi}=u_{zi}\zeta}\$，\$u_{zi}\zeta = \zeta u_{zi} + (1 - \zeta)u_{zi}^0\$，\$\zeta \in (0, 1)\$；\$u_{zi}^0\$ 为常数。通过选择 \$u_{zi}^0 = 0\$，则式 (33) 可以简化为：

$$\vartheta_i(u_{zi}) = \vartheta_{u_{zi}\zeta} u_{zi} \quad (34)$$

假设 3. 对于式 (33) 中的函数 \$\vartheta_{u_{zi}\zeta}\$，存在未知的正常数 \$\vartheta_{u_{zi}\zeta}\$ 使得下列不等式成立：

$$0 < \vartheta_{u_{zi}\zeta} \leq \vartheta_{u_{zi}\zeta} \leq 1 \quad (35)$$

注 4. 不等式 (35) 在文献 [20] 中引入。由于实际中施加在车辆上的控制信号 \$u_{zi}\$ 不可能是无穷大的，因而该假设在工程视角下是合理的。

4 适度故障下指定性能变道容错控制

在本节中，基于制定的目标变道轨迹，提出一种指定性能变道容错控制方法，以保证在适度故障 \$0 < \rho_i < \rho_i(t) \leq 1\$ (\$\rho_i\$ 表示未知常数) 的情况下，网联车队的变道跟踪误差 \$e_{pxi}(t)\$ 满足期望的性能要求 (28)。

4.1 基于转换的包络映射

为便于变道车辆 \$i\$ (\$i = 0, 1, \dots, n\$) 的控制器设计，定义如下转换变量：

$$\Phi_{pz_i}(t) = \frac{e_{pz_i}(t)}{\beta_{z_i}(t)} \quad (36)$$

可见, 只要转换变量满足下列不等式, 就可以实现期望的性能需求:

$$|\Phi_{pz_i}(t)| < 1 \quad (37)$$

由于初始条件满足 $\beta_{z_i}(0) > |e_{pz_i}(0)|$, 可见 $|\Phi_{pz_i}(0)| < 1$ 成立. 为实现指定的队列性能, 设计具有如下特征的包络映射 $\Psi(\Phi_{pz_i}) : (-1, 1) \rightarrow \mathbf{R}$.

1) 包络映射 $\Psi(\Phi_{pz_i})$ 连续可微且转换变量 $\Phi_{pz_i} \in (-1, 1)$;

2) 包络映射 $\Psi(\Phi_{pz_i})$ 相对于转换变量 Φ_{pz_i} 单调递增;

3) 当且仅当转换变量 $\Phi_{pz_i} = 0$ 时, 包络映射 $\Psi(\Phi_{pz_i}) = 0$;

4) 当转换变量 $\Phi_{pz_i} \rightarrow 1$ 或 $\Phi_{pz_i} \rightarrow -1$ 时, 包络映射 $\Psi(\Phi_{pz_i}) \rightarrow \pm\infty$.

值得指出的是, 满足上述特征的映射均可作为包络映射, 表 1 列出了一些包络映射的例子.

表 1 包络映射的一些示例

Table 1 Some examples of envelope mapping

类型	$\Psi(\Phi_{pz_i})$	$\frac{\partial \Psi(\Phi_{pz_i})}{\partial \Phi_{pz_i}}$	$\frac{\partial^2 \Psi(\Phi_{pz_i})}{\partial \Phi_{pz_i}^2}$
1	$\ln \left(\frac{1 + \Phi_{pz_i}}{1 - \Phi_{pz_i}} \right)$	$\frac{2}{1 - \Phi_{pz_i}^2}$	$\frac{4\Phi_{pz_i}}{(1 - \Phi_{pz_i}^2)^2}$
2	$\tan \left(\frac{\pi}{2} \Phi_{pz_i} \right)$	$\frac{\pi \sec^2 \left(\frac{\pi}{2} \Phi_{pz_i} \right)}{2}$	$\frac{\pi^2 \sin \left(\frac{\pi}{2} \Phi_{pz_i} \right)}{2 \cos^3 \left(\frac{\pi}{2} \Phi_{pz_i} \right)}$
3	$\frac{2\Phi_{pz_i}}{(1 + \Phi_{pz_i})(1 - \Phi_{pz_i})}$	$\frac{2 + 2\Phi_{pz_i}^2}{(1 - \Phi_{pz_i}^2)^2}$	$\frac{12\Phi_{pz_i} + 4\Phi_{pz_i}^3}{(1 - \Phi_{pz_i}^2)^3}$

4.2 干扰观测器

本文构造干扰观测器, 实时估计并补偿各车所受纵向、横向外部干扰 ϱ_{x_i} 和 ϱ_{y_i} , 以维持期望的队列性能. 为提高网联车队在虚假数据注入下的鲁棒性, 将 FLS 对欺骗攻击的逼近结果引入干扰观测器的设计中.

构造如下干扰观测器以估计外部干扰 ϱ_{z_i} :

$$\hat{\varrho}_{z_i} = \hat{\xi}_{z_i} + \psi_{z_i} a_{z_i} \quad (38)$$

其中, $\hat{\varrho}_{z_i}$ 表示 ϱ_{z_i} 的估计值; ψ_{z_i} 表示正常数; $\hat{\xi}_{z_i}$ 表示 ξ_{z_i} 的估计值, $\xi_{z_i} = \varrho_{z_i} - \psi_{z_i} a_{z_i}$ 表示辅助变量.

利用式 (1)、(7) 和引理 1, 对 ξ_{z_i} 进行求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_{z_i} = & \dot{\varrho}_{z_i} - \psi_{z_i} (\dot{u}_{z_i} + \mathbf{W}_{z_i}^T \varphi_{z_i}(z_i) + \delta_{z_i}(z_i) + \\ & \delta_{hz_i}(z_i) + \mathbf{W}_{hz_i}^T \varphi_{hz_i}(z_i) + \xi_{z_i} + \psi_{z_i} a_{z_i}) \end{aligned} \quad (39)$$

其中, $\mathbf{W}_{z_i}^T \varphi_{z_i}(z_i)$ 和 $\mathbf{W}_{hz_i}^T \varphi_{hz_i}(z_i)$ 表示 FLS, 分别用于逼近车辆系统的模型不确定性与攻击偏置量, $\mathbf{W}_{z_i}$ 和 $\mathbf{W}_{hz_i}$ 表示权向量, $\varphi_{z_i}(z_i)$ 和 $\varphi_{hz_i}(z_i)$ 表示模糊基函数; $\delta_{z_i}(z_i)$ 和 $\delta_{hz_i}(z_i)$ 表示逼近误差.

为了获得干扰估计值, 定义如下辅助变量 ξ_{z_i} 的估计值:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\xi}}_{z_i} = & -\psi_{z_i} \left(\hat{\mathbf{W}}_{z_i}^T \varphi_{z_i}(z_i) + \hat{\xi}_{z_i} + \psi_{z_i} a_{z_i} + \right. \\ & \left. \bar{u}_{z_i} + \hat{\mathbf{W}}_{hz_i}^T \varphi_{hz_i}(z_i) \right) \end{aligned} \quad (40)$$

其中, $\hat{\mathbf{W}}_{z_i}$ 和 $\hat{\mathbf{W}}_{hz_i}$ 分别表示权向量 $\mathbf{W}_{z_i}$ 和 $\mathbf{W}_{hz_i}$ 的估计值.

定义干扰观测误差为 $\tilde{\varrho}_{z_i} = \varrho_{z_i} - \hat{\varrho}_{z_i}$, 辅助变量估计误差为 $\tilde{\xi}_{z_i} = \xi_{z_i} - \hat{\xi}_{z_i}$. 基于式 (38) 与 $\xi_{z_i} = \varrho_{z_i} - \psi_{z_i} a_{z_i}$, 可推导出 $\tilde{\varrho}_{z_i} = \xi_{z_i} - \hat{\xi}_{z_i} = \tilde{\xi}_{z_i}$. 因此, 干扰观测误差的导数 $\dot{\tilde{\varrho}}_{z_i}$ 可表示为:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\varrho}}_{z_i} = & \dot{\tilde{\xi}}_{z_i} = \dot{\varrho}_{z_i} - \psi_{z_i} \tilde{\mathbf{W}}_{z_i}^T \varphi_{z_i}(z_i) - \psi_{z_i} \delta_{z_i}(z_i) - \\ & \psi_{z_i} \tilde{\varrho}_{z_i} - \psi_{z_i} \tilde{\mathbf{W}}_{hz_i}^T \varphi_{hz_i}(z_i) - \psi_{z_i} \delta_{hz_i}(z_i) \end{aligned} \quad (41)$$

其中, $\tilde{\mathbf{W}}_{z_i} = \mathbf{W}_{z_i} - \hat{\mathbf{W}}_{z_i}$ 和 $\tilde{\mathbf{W}}_{hz_i} = \mathbf{W}_{hz_i} - \hat{\mathbf{W}}_{hz_i}$ 分别表示权向量 $\mathbf{W}_{z_i}$ 和 $\mathbf{W}_{hz_i}$ 的估计误差.

4.3 队列控制器设计

基于反步法, 设计适度故障阶段的纵向与横向变道控制器. 为便于分析, 分别定义 $\lambda_{px_i} = \Psi(\Phi_{px_i})$ 与 $\lambda_{py_i} = \Psi(\Phi_{py_i})$ ($i = 0, 1, \dots, n$).

第 1 步. 对于 $i = 0, 1, \dots, n$, 考虑如下候选 Lyapunov 函数:

$$V_{p_i} = \frac{1}{2} \lambda_{px_i}^2 + \frac{1}{2} \lambda_{py_i}^2 \quad (42)$$

利用式 (1)、(8)、(9)、(36) 和 (42), 对 V_{p_i} 进行求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{p_i} = & \lambda_{px_i} S_{px_i} \left(\dot{p}_{x_i}^o - v_{x_i}^* - e_{vx_i} - \Phi_{px_i} \dot{\beta}_{x_i} \right) + \\ & \lambda_{py_i} S_{py_i} \left(\dot{p}_{y_i}^o - v_{y_i}^* - e_{vy_i} - \Phi_{py_i} \dot{\beta}_{y_i} \right) \end{aligned} \quad (43)$$

其中, $v_{x_i}^*$ 和 $v_{y_i}^*$ 表示虚拟控制器; $e_{vx_i} = v_{x_i} - v_{x_i}^*$ 和 $e_{vy_i} = v_{y_i} - v_{y_i}^*$ 表示虚拟误差; $S_{px_i} = \frac{\partial \Psi(\Phi_{px_i})}{\partial \Phi_{px_i}} / \beta_{x_i}$; $S_{py_i} = \frac{\partial \Psi(\Phi_{py_i})}{\partial \Phi_{py_i}} / \beta_{y_i}$. 当 $i = 1, \dots, n$ 时 $p_{x_i}^o = p_{x_{(i-1)}}^o$ 且 $p_{y_i}^o = p_{y_{(i-1)}}^o$.

使用 Young 不等式, 可得:

$$-\lambda_{px_i} S_{px_i} e_{vx_i} \leq \frac{1}{2} \lambda_{px_i}^2 S_{px_i}^2 + \frac{1}{2} e_{vx_i}^2 \quad (44)$$

$$-\lambda_{py_i} S_{py_i} e_{vy_i} \leq \frac{1}{2} \lambda_{py_i}^2 S_{py_i}^2 + \frac{1}{2} e_{vy_i}^2 \quad (45)$$

纵向虚拟控制器 $v_{x_i}^*$ 和横向虚拟控制器 $v_{y_i}^*$ 分别设计为:

$$v_{x_i}^* = \frac{K_{px_i} \lambda_{px_i}}{S_{px_i}} + \frac{S_{px_i} \lambda_{px_i}}{2} - \Phi_{px_i} \dot{\beta}_{x_i} + \dot{p}_{x_i}^o \quad (46)$$

$$v_{y_i}^* = \frac{K_{py_i} \lambda_{py_i}}{S_{py_i}} + \frac{S_{py_i} \lambda_{py_i}}{2} - \Phi_{py_i} \dot{\beta}_{y_i} + \dot{p}_{y_i}^o \quad (47)$$

其中, $K_{px_i} > 0$ 和 $K_{py_i} > 0$ 表示设计参数.

把式 (44) ~ (47) 代入式 (43), 可得:

$$\dot{V}_{p_i} \leq -K_{px_i} \lambda_{px_i}^2 - K_{py_i} \lambda_{py_i}^2 + \frac{1}{2} e_{vx_i}^2 + \frac{1}{2} e_{vy_i}^2 \quad (48)$$

第 2 步. 对于 $i = 0, 1, \dots, n$, 考虑如下 Lyapunov 函数:

$$V_{v_i} = \frac{1}{2} e_{vx_i}^2 + \frac{1}{2} e_{vy_i}^2 \quad (49)$$

利用式 (1), 对 V_{v_i} 进行求导可得:

$$\dot{V}_{v_i} = e_{vx_i} (a_{x_i}^* + e_{ax_i} - \dot{v}_{x_i}^*) + e_{vy_i} (a_{y_i}^* + e_{ay_i} - \dot{v}_{y_i}^*) \quad (50)$$

其中, $a_{x_i}^*$ 和 $a_{y_i}^*$ 表示虚拟控制器; $e_{ax_i} = a_{x_i} - a_{x_i}^*$ 和 $e_{ay_i} = a_{y_i} - a_{y_i}^*$ 表示虚拟误差.

使用 Young 不等式, 可得:

$$e_{vx_i} e_{ax_i} \leq \frac{1}{2} e_{vx_i}^2 + \frac{1}{2} e_{ax_i}^2 \quad (51)$$

$$e_{vy_i} e_{ay_i} \leq \frac{1}{2} e_{vy_i}^2 + \frac{1}{2} e_{ay_i}^2 \quad (52)$$

纵向虚拟控制器 $a_{x_i}^*$ 和横向虚拟控制器 $a_{y_i}^*$ 分别设计为:

$$a_{x_i}^* = -K_{vx_i} e_{vx_i} - e_{vx_i} + \dot{v}_{x_i}^* \quad (53)$$

$$a_{y_i}^* = -K_{vy_i} e_{vy_i} - e_{vy_i} + \dot{v}_{y_i}^* \quad (54)$$

其中, $K_{vx_i} > 0$ 和 $K_{vy_i} > 0$ 表示设计参数.

把式 (51) ~ (54) 代入式 (50), 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{v_i} \leq & -K_{vx_i} e_{vx_i}^2 - K_{vy_i} e_{vy_i}^2 - \frac{1}{2} e_{vx_i}^2 - \frac{1}{2} e_{vy_i}^2 + \\ & \frac{1}{2} e_{ax_i}^2 + \frac{1}{2} e_{ay_i}^2 \end{aligned} \quad (55)$$

第 3 步. 对于 $i = 0, 1, \dots, n$, 选择如下 Lyapunov 函数:

$$\begin{aligned} V_{a_i} = & \frac{1}{2} e_{ax_i}^2 + \frac{1}{2} e_{ay_i}^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_{x_i}^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_{y_i}^2 + \frac{\rho_i \vartheta_{x_i}}{2} \tilde{\theta}_{x_i}^2 + \\ & \frac{\vartheta_{y_i}}{2} \tilde{\theta}_{y_i}^2 + \frac{\rho_i \vartheta_{x_i}}{2} \tilde{\theta}_{hx_i}^2 + \frac{\vartheta_{y_i}}{2} \tilde{\theta}_{hy_i}^2 \end{aligned} \quad (56)$$

其中, $\tilde{\theta}_{x_i} = \theta_{x_i} - \hat{\theta}_{x_i}$; $\tilde{\theta}_{y_i} = \theta_{y_i} - \hat{\theta}_{y_i}$; $\tilde{\theta}_{hx_i} = \theta_{hx_i} - \hat{\theta}_{hx_i}$; $\tilde{\theta}_{hy_i} = \theta_{hy_i} - \hat{\theta}_{hy_i}$. 这里 $\hat{\theta}_{x_i}$ 、 $\hat{\theta}_{y_i}$ 、 $\hat{\theta}_{hx_i}$ 和 $\hat{\theta}_{hy_i}$

分别表示未知参数 θ_{x_i} 、 θ_{y_i} 、 θ_{hx_i} 和 θ_{hy_i} 的估计值, $\theta_{x_i} = \|\mathbf{W}_{x_i}\|^2$, $\theta_{y_i} = \|\mathbf{W}_{y_i}\|^2$, $\theta_{hx_i} = \|\mathbf{W}_{hx_i}\|^2$, $\theta_{hy_i} = \|\mathbf{W}_{hy_i}\|^2$.

利用式 (1), 对 V_{a_i} 进行求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{a_i} = & e_{ax_i} (\rho_i \vartheta_{u_{x_i} \zeta} u_{x_i} + \rho_i \gamma_{x_i} + r_i + f_{x_i}(\mathbf{x}_i) + \\ & h_{x_i}(\mathbf{x}_i) - \dot{a}_{x_i}^* + \hat{\varrho}_{x_i} + \tilde{\varrho}_{x_i}) + e_{ay_i} (\vartheta_{u_{y_i} \zeta} u_{y_i} + \\ & f_{y_i}(\mathbf{y}_i) + \gamma_{y_i} + h_{y_i}(\mathbf{y}_i) - \dot{a}_{y_i}^* + \hat{\varrho}_{y_i} + \tilde{\varrho}_{y_i}) + \\ & \tilde{\varrho}_{x_i} \dot{\varrho}_{x_i} - \underline{\rho}_i \vartheta_{x_i} \tilde{\theta}_{hx_i} \dot{\hat{\theta}}_{hx_i} - \vartheta_{y_i} \tilde{\theta}_{y_i} \dot{\hat{\theta}}_{y_i} - \\ & \vartheta_{y_i} \tilde{\theta}_{hy_i} \dot{\hat{\theta}}_{hy_i} + \tilde{\varrho}_{y_i} \dot{\varrho}_{y_i} - \underline{\rho}_i \vartheta_{x_i} \tilde{\theta}_{x_i} \dot{\hat{\theta}}_{x_i} \end{aligned} \quad (57)$$

令 $Q_{x_i}(\mathbf{x}_i) = f_{x_i}(\mathbf{x}_i) - \dot{a}_{x_i}^* + 1.5e_{ax_i}$, $Q_{y_i}(\mathbf{y}_i) = f_{y_i}(\mathbf{y}_i) - \dot{a}_{y_i}^* + e_{ay_i}$. 由于 $Q_{x_i}(\mathbf{x}_i)$ 和 $Q_{y_i}(\mathbf{y}_i)$ 是不确定非线性函数, 根据引理 1 可知, 对于任意给定的 ε_{x_i} 和 ε_{y_i} , 存在模糊逻辑系统 $\mathbf{W}_{x_i}^T \boldsymbol{\varphi}_{x_i}(\mathbf{x}_i)$ 和 $\mathbf{W}_{y_i}^T \boldsymbol{\varphi}_{y_i}(\mathbf{y}_i)$ 满足:

$$Q_{x_i}(\mathbf{x}_i) = \mathbf{W}_{x_i}^T \boldsymbol{\varphi}_{x_i}(\mathbf{x}_i) + \delta_{x_i}(\mathbf{x}_i) \quad (58)$$

$$Q_{y_i}(\mathbf{y}_i) = \mathbf{W}_{y_i}^T \boldsymbol{\varphi}_{y_i}(\mathbf{y}_i) + \delta_{y_i}(\mathbf{y}_i) \quad (59)$$

其中, $\|\delta_{x_i}(\mathbf{x}_i)\| \leq \varepsilon_{x_i}$, $\|\delta_{y_i}(\mathbf{y}_i)\| \leq \varepsilon_{y_i}$, ε_{x_i} 和 ε_{y_i} 是正常数.

同理, 对于欺骗攻击引入的偏置量 $h_{x_i}(\mathbf{x}_i)$ 和 $h_{y_i}(\mathbf{y}_i)$, 存在模糊逻辑系统 $\mathbf{W}_{hx_i}^T \boldsymbol{\varphi}_{hx_i}(\mathbf{x}_i)$ 和 $\mathbf{W}_{hy_i}^T \boldsymbol{\varphi}_{hy_i}(\mathbf{y}_i)$ 满足:

$$h_{x_i}(\mathbf{x}_i) = \mathbf{W}_{hx_i}^T \boldsymbol{\varphi}_{hx_i}(\mathbf{x}_i) + \delta_{hx_i}(\mathbf{x}_i) \quad (60)$$

$$h_{y_i}(\mathbf{y}_i) = \mathbf{W}_{hy_i}^T \boldsymbol{\varphi}_{hy_i}(\mathbf{y}_i) + \delta_{hy_i}(\mathbf{y}_i) \quad (61)$$

其中, $\|\delta_{hx_i}(\mathbf{x}_i)\| \leq \varepsilon_{hx_i}$, $\|\delta_{hy_i}(\mathbf{y}_i)\| \leq \varepsilon_{hy_i}$, ε_{hx_i} 和 ε_{hy_i} 是正常数.

基于式 (41) 和 Young 不等式, 可得:

$$e_{ax_i} r_i \leq \frac{1}{2} e_{ax_i}^2 + \frac{1}{2} \bar{r}_i^2 \quad (62)$$

$$e_{ax_i} \tilde{\varrho}_{x_i} \leq \frac{1}{2} e_{ax_i}^2 + \frac{1}{2} \tilde{\varrho}_{x_i}^2 \quad (63)$$

$$e_{ay_i} \tilde{\varrho}_{y_i} \leq \frac{1}{2} e_{ay_i}^2 + \frac{1}{2} \tilde{\varrho}_{y_i}^2 \quad (64)$$

$$\tilde{\varrho}_{x_i} \dot{\varrho}_{x_i} \leq \frac{1}{2} \tilde{\varrho}_{x_i}^2 + \frac{1}{2} \varrho_{x_{iM}}^2 \quad (65)$$

$$\tilde{\varrho}_{y_i} \dot{\varrho}_{y_i} \leq \frac{1}{2} \tilde{\varrho}_{y_i}^2 + \frac{1}{2} \varrho_{y_{iM}}^2 \quad (66)$$

$$e_{ax_i} \hat{\varrho}_{x_i} \leq \underline{\rho}_i \vartheta_{x_i} e_{ax_i}^2 \hat{\varrho}_{x_i}^2 + \frac{1}{4 \underline{\rho}_i \vartheta_{x_i}} \quad (67)$$

$$e_{ay_i} \hat{\varrho}_{y_i} \leq \underline{\rho}_i \vartheta_{y_i} e_{ay_i}^2 \hat{\varrho}_{y_i}^2 + \frac{1}{4 \underline{\rho}_i \vartheta_{y_i}} \quad (68)$$

$$e_{ax_i} (\mathbf{W}_{x_i}^T \boldsymbol{\varphi}_{x_i}(\mathbf{x}_i) + \delta_{x_i}(\mathbf{x}_i) + \rho_i \gamma_{x_i}) \leq$$

$$\frac{\rho_i \vartheta_{x_i} \theta_{x_i} e_{ax_i}^2 \boldsymbol{\varphi}_{x_i}^T(\mathbf{x}_i) \boldsymbol{\varphi}_{x_i}(\mathbf{x}_i) + \rho_i \vartheta_{x_i} e_{ax_i}^2 + \frac{\varepsilon_{x_i}^2}{2\rho_i \vartheta_{x_i}} + \frac{\bar{\gamma}_{x_i}^2}{2\rho_i \vartheta_{x_i}} + \frac{1}{4\rho_i \vartheta_{x_i}} \quad (69)$$

$$e_{ay_i} (\mathbf{W}_{y_i}^T \boldsymbol{\varphi}_{y_i}(\mathbf{y}_i) + \delta_{y_i}(\mathbf{y}_i) + \gamma_{y_i}) \leq$$

$$\frac{\vartheta_{y_i} \theta_{y_i} e_{ay_i}^2 \boldsymbol{\varphi}_{y_i}^T(\mathbf{y}_i) \boldsymbol{\varphi}_{y_i}(\mathbf{y}_i) + \vartheta_{y_i} e_{ay_i}^2 + \frac{\varepsilon_{y_i}^2}{2\vartheta_{y_i}} + \frac{\bar{\gamma}_{y_i}^2}{2\vartheta_{y_i}} + \frac{1}{4\vartheta_{y_i}} \quad (70)$$

$$e_{ax_i} (\mathbf{W}_{hx_i}^T \boldsymbol{\varphi}_{hx_i}(\mathbf{x}_i) + \delta_{hx_i}(\mathbf{x}_i)) \leq$$

$$\frac{\rho_i \vartheta_{x_i} \theta_{hx_i} e_{ax_i}^2 \boldsymbol{\varphi}_{hx_i}^T(\mathbf{x}_i) \boldsymbol{\varphi}_{hx_i}(\mathbf{x}_i) + \frac{\rho_i \vartheta_{x_i}}{2} e_{ax_i}^2 + \frac{\varepsilon_{hx_i}^2}{2\rho_i \vartheta_{x_i}} + \frac{1}{4\rho_i \vartheta_{x_i}} \quad (71)$$

$$e_{ay_i} (\mathbf{W}_{hy_i}^T \boldsymbol{\varphi}_{hy_i}(\mathbf{y}_i) + \delta_{hy_i}(\mathbf{y}_i)) \leq$$

$$\frac{\vartheta_{y_i} \theta_{hy_i} e_{ay_i}^2 \boldsymbol{\varphi}_{hy_i}^T(\mathbf{y}_i) \boldsymbol{\varphi}_{hy_i}(\mathbf{y}_i) + \frac{\vartheta_{y_i}}{2} e_{ay_i}^2 + \frac{\varepsilon_{hy_i}^2}{2\vartheta_{y_i}} + \frac{1}{4\vartheta_{y_i}} \quad (72)$$

$$-\tilde{\varrho}_{x_i} \psi_{x_i} (\tilde{\mathbf{W}}_{x_i}^T \boldsymbol{\varphi}_{x_i} + \tilde{\mathbf{W}}_{hx_i}^T \boldsymbol{\varphi}_{hx_i} + \delta_{x_i} + \delta_{hx_i}) \leq$$

$$2\tilde{\varrho}_{x_i}^2 + \frac{\psi_{x_i}^2}{2} (\tilde{\theta}_{x_i}^2 + \varepsilon_{x_i}^2 + \tilde{\theta}_{hx_i}^2 + \varepsilon_{hx_i}^2) \quad (73)$$

$$-\tilde{\varrho}_{y_i} \psi_{y_i} (\tilde{\mathbf{W}}_{y_i}^T \boldsymbol{\varphi}_{y_i} + \tilde{\mathbf{W}}_{hy_i}^T \boldsymbol{\varphi}_{hy_i} + \delta_{y_i} + \delta_{hy_i}) \leq$$

$$2\tilde{\varrho}_{y_i}^2 + \frac{\psi_{y_i}^2}{2} (\tilde{\theta}_{y_i}^2 + \varepsilon_{y_i}^2 + \tilde{\theta}_{hy_i}^2 + \varepsilon_{hy_i}^2) \quad (74)$$

纵向实际控制器 u_{x_i} 和横向实际控制器 u_{y_i} 分别设计为:

$$u_{x_i} = -K_{ax_i} e_{ax_i} - \frac{3}{2} e_{ax_i} - \hat{\theta}_{x_i} e_{ax_i} \boldsymbol{\varphi}_{x_i}^T(\mathbf{x}_i) \boldsymbol{\varphi}_{x_i}(\mathbf{x}_i) -$$

$$\hat{\theta}_{hx_i} e_{ax_i} \boldsymbol{\varphi}_{hx_i}^T(\mathbf{x}_i) \boldsymbol{\varphi}_{hx_i}(\mathbf{x}_i) - \hat{\varrho}_{x_i}^2 e_{ax_i} \quad (75)$$

$$u_{y_i} = -K_{ay_i} e_{ay_i} - \frac{3}{2} e_{ay_i} - \hat{\theta}_{y_i} e_{ay_i} \boldsymbol{\varphi}_{y_i}^T(\mathbf{y}_i) \boldsymbol{\varphi}_{y_i}(\mathbf{y}_i) -$$

$$\hat{\theta}_{hy_i} e_{ay_i} \boldsymbol{\varphi}_{hy_i}^T(\mathbf{y}_i) \boldsymbol{\varphi}_{hy_i}(\mathbf{y}_i) - \hat{\varrho}_{y_i}^2 e_{ay_i} \quad (76)$$

其中, $K_{ax_i} > 0$ 和 $K_{ay_i} > 0$ 表示设计参数.

纵向自适应律和横向自适应律分别设计为:

$$\dot{\hat{\theta}}_{x_i} = e_{ax_i}^2 \boldsymbol{\varphi}_{x_i}^T(\mathbf{x}_i) \boldsymbol{\varphi}_{x_i}(\mathbf{x}_i) - \sigma_{x_i} \hat{\theta}_{x_i} \quad (77)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_{hx_i} = e_{ax_i}^2 \boldsymbol{\varphi}_{hx_i}^T(\mathbf{x}_i) \boldsymbol{\varphi}_{hx_i}(\mathbf{x}_i) - \sigma_{hx_i} \hat{\theta}_{hx_i} \quad (78)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_{y_i} = e_{ay_i}^2 \boldsymbol{\varphi}_{y_i}^T(\mathbf{y}_i) \boldsymbol{\varphi}_{y_i}(\mathbf{y}_i) - \sigma_{y_i} \hat{\theta}_{y_i} \quad (79)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_{hy_i} = e_{ay_i}^2 \boldsymbol{\varphi}_{hy_i}^T(\mathbf{y}_i) \boldsymbol{\varphi}_{hy_i}(\mathbf{y}_i) - \sigma_{hy_i} \hat{\theta}_{hy_i} \quad (80)$$

其中, $\sigma_{x_i} > 0$, $\sigma_{hx_i} > 0$, $\sigma_{y_i} > 0$ 和 $\sigma_{hy_i} > 0$ 表示设计参数.

把式 (58) ~ (80) 代入式 (57), 可得:

$$\dot{V}_{a_i} \leq -K_{ax_i} \rho_i \vartheta_{x_i} e_{ax_i}^2 + \rho_i \vartheta_{x_i} \sigma_{x_i} \hat{\theta}_{x_i} \tilde{\theta}_{x_i} - \frac{1}{2} e_{ax_i}^2 +$$

$$\vartheta_{y_i} \sigma_{y_i} \hat{\theta}_{y_i} \tilde{\theta}_{y_i} + \rho_i \vartheta_{x_i} \sigma_{hx_i} \hat{\theta}_{hx_i} \tilde{\theta}_{hx_i} - \frac{1}{2} e_{ay_i}^2 +$$

$$\vartheta_{y_i} \sigma_{hy_i} \hat{\theta}_{hy_i} \tilde{\theta}_{hy_i} + (3 - \psi_{x_i}) \tilde{\varrho}_{x_i}^2 + \Delta +$$

$$(3 - \psi_{y_i}) \tilde{\varrho}_{y_i}^2 + \frac{\psi_{x_i}^2}{2} (\tilde{\theta}_{x_i}^2 + \tilde{\theta}_{hx_i}^2) -$$

$$K_{ay_i} \vartheta_{y_i} e_{ay_i}^2 + \frac{\psi_{y_i}^2}{2} (\tilde{\theta}_{y_i}^2 + \tilde{\theta}_{hy_i}^2) \quad (81)$$

其中,

$$\Delta = \frac{\psi_{x_i}^2 (\varepsilon_{x_i}^2 + \varepsilon_{hx_i}^2)}{2} + \frac{\psi_{y_i}^2 (\varepsilon_{y_i}^2 + \varepsilon_{hy_i}^2)}{2} + \frac{\bar{r}_i^2}{2} +$$

$$\frac{\varrho_{x_iM}^2}{2} + \frac{\varrho_{y_iM}^2}{2} + \frac{\varepsilon_{x_i}^2 + \varepsilon_{hx_i}^2}{2\rho_i \vartheta_{x_i}} + \frac{\bar{\gamma}_{x_i}^2}{2\rho_i \vartheta_{x_i}} +$$

$$\frac{3}{4\rho_i \vartheta_{x_i}} + \frac{\varepsilon_{y_i}^2 + \varepsilon_{hy_i}^2}{2\vartheta_{y_i}} + \frac{\bar{\gamma}_{y_i}^2}{2\vartheta_{y_i}} + \frac{3}{4\vartheta_{y_i}}$$

基于 Young 不等式, 可得:

$$\rho_i \vartheta_{x_i} \sigma_{x_i} \hat{\theta}_{x_i} \tilde{\theta}_{x_i} \leq \frac{1}{2} \rho_i \vartheta_{x_i} \sigma_{x_i} (\theta_{x_i}^2 - \tilde{\theta}_{x_i}^2) \quad (82)$$

$$\rho_i \vartheta_{x_i} \sigma_{hx_i} \hat{\theta}_{hx_i} \tilde{\theta}_{hx_i} \leq \frac{1}{2} \rho_i \vartheta_{x_i} \sigma_{hx_i} (\theta_{hx_i}^2 - \tilde{\theta}_{hx_i}^2) \quad (83)$$

$$\vartheta_{y_i} \sigma_{y_i} \hat{\theta}_{y_i} \tilde{\theta}_{y_i} \leq \frac{1}{2} \vartheta_{y_i} \sigma_{y_i} (\theta_{y_i}^2 - \tilde{\theta}_{y_i}^2) \quad (84)$$

$$\vartheta_{y_i} \sigma_{hy_i} \hat{\theta}_{hy_i} \tilde{\theta}_{hy_i} \leq \frac{1}{2} \vartheta_{y_i} \sigma_{hy_i} (\theta_{hy_i}^2 - \tilde{\theta}_{hy_i}^2) \quad (85)$$

把式 (82) ~ (85) 代入式 (81), 可得:

$$\dot{V}_{a_i} \leq -K_{ax_i} \rho_i \vartheta_{x_i} e_{ax_i}^2 - K_{ay_i} \vartheta_{y_i} e_{ay_i}^2 - \frac{1}{2} e_{ax_i}^2 +$$

$$(3 - \psi_{x_i}) \tilde{\varrho}_{x_i}^2 + (3 - \psi_{y_i}) \tilde{\varrho}_{y_i}^2 - \left(\frac{1}{2} \rho_i \vartheta_{x_i} \sigma_{x_i} - \right.$$

$$\left. \frac{\psi_{x_i}^2}{2} \right) \tilde{\theta}_{x_i}^2 + \Delta_p - \left(\frac{1}{2} \rho_i \vartheta_{x_i} \sigma_{hx_i} - \frac{\psi_{x_i}^2}{2} \right) \tilde{\theta}_{hx_i}^2 -$$

$$\left(\frac{1}{2} \vartheta_{y_i} \sigma_{y_i} - \frac{\psi_{y_i}^2}{2} \right) \tilde{\theta}_{y_i}^2 - \frac{1}{2} e_{ay_i}^2 - \left(\frac{1}{2} \vartheta_{y_i} \sigma_{hy_i} - \right.$$

$$\left. \frac{\psi_{y_i}^2}{2} \right) \tilde{\theta}_{hy_i}^2 \quad (86)$$

其中, $\Delta_p = \Delta + \rho_i \vartheta_{x_i} \sigma_{x_i} \theta_{x_i}^2 / 2 + \rho_i \vartheta_{x_i} \sigma_{hx_i} \theta_{hx_i}^2 / 2 +$

$$\underline{\vartheta}_{y_i} \sigma_{y_i} \theta_{y_i}^2 / 2 + \underline{\vartheta}_{y_i} \sigma_{hy_i} \theta_{hy_i}^2 / 2.$$

4.4 稳定性分析

基于上述队列控制器设计, 给出如下概括适度故障阶段网联车队变道控制结果的定理.

定理 1. 在假设 1 ~ 假设 3 下, 考虑受饱和和非线性、欺骗攻击与适度故障 ($0 < \underline{\rho}_i < \rho_i(t) \leq 1$) 影响的网联车队 (1), 如果选用纵向虚拟控制器 (46) 和 (53)、横向虚拟控制器 (47) 和 (54)、纵向实际控制器 (75)、横向实际控制器 (76) 以及自适应律 (77) ~ (80), 则网联车队 (1) 能够在给定时间 t_l 内跟踪目标轨迹安全变道, 并获得指定的队列跟踪性能.

证明. 构造如下整体 Lyapunov 函数:

$$V = \sum_{i=0}^n (V_{p_i} + V_{v_i} + V_{a_i}) \quad (87)$$

基于式 (48)、(55) 和 (86), 对 V 进行求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \sum_{i=0}^n \left(-K_{px_i} \lambda_{px_i}^2 - K_{py_i} \lambda_{py_i}^2 - K_{vx_i} e_{vx_i}^2 + \Delta_p - \right. \\ & K_{vy_i} e_{vy_i}^2 - K_{ax_i} \underline{\rho}_i \underline{\vartheta}_{x_i} e_{ax_i}^2 - K_{ay_i} \underline{\vartheta}_{y_i} e_{ay_i}^2 - \\ & (\psi_{x_i} - 3) \tilde{\varrho}_{x_i}^2 - (\psi_{y_i} - 3) \tilde{\varrho}_{y_i}^2 - \left(\frac{1}{2} \underline{\rho}_i \underline{\vartheta}_{x_i} \sigma_{x_i} - \right. \\ & \left. \frac{\psi_{x_i}^2}{2} \right) \tilde{\theta}_{x_i}^2 - \left(\frac{1}{2} \underline{\rho}_i \underline{\vartheta}_{x_i} \sigma_{hx_i} - \frac{\psi_{x_i}^2}{2} \right) \tilde{\theta}_{hx_i}^2 - \\ & \left. \left(\frac{1}{2} \underline{\vartheta}_{y_i} \sigma_{y_i} - \frac{\psi_{y_i}^2}{2} \right) \tilde{\theta}_{y_i}^2 - \left(\frac{1}{2} \underline{\vartheta}_{y_i} \sigma_{hy_i} - \frac{\psi_{y_i}^2}{2} \right) \tilde{\theta}_{hy_i}^2 \right) \leq \\ & -\bar{a}V + \bar{\Delta}_p \end{aligned} \quad (88)$$

其中, $\bar{a} = \min\{2K_{px_i}, 2K_{py_i}, 2K_{vx_i}, 2K_{vy_i}, 2K_{ax_i} \times \underline{\rho}_i \underline{\vartheta}_{x_i}, 2K_{ay_i} \underline{\vartheta}_{y_i}, \sigma_{x_i} - \psi_{x_i}^2 / (\underline{\rho}_i \underline{\vartheta}_{x_i}), \sigma_{hx_i} - \psi_{x_i}^2 / (\underline{\rho}_i \underline{\vartheta}_{x_i}), \sigma_{y_i} - \psi_{y_i}^2 / \underline{\vartheta}_{y_i}, \sigma_{hy_i} - \psi_{y_i}^2 / \underline{\vartheta}_{y_i}, 2(\psi_{x_i} - 3), 2(\psi_{y_i} - 3)\}$; $\bar{\Delta}_p = \sum_{i=0}^n \Delta_p$.

对式 (88) 进行积分, 可得:

$$V(t) \leq V(0) + \frac{\bar{\Delta}_p}{\bar{a}} \quad (89)$$

基于式 (89) 和 $V(t)$ 的定义可知, $\lambda_{px_i}, \lambda_{py_i}, \tilde{\varrho}_{x_i}, \tilde{\varrho}_{y_i}, \tilde{\theta}_{x_i}, \tilde{\theta}_{y_i}, \tilde{\theta}_{hx_i}, \tilde{\theta}_{hy_i}$ 在 $t \in [0, t_{efi})$ 时均有界, 因此可以推断出估计值 $\hat{\varrho}_{x_i}, \hat{\varrho}_{y_i}, \hat{\theta}_{x_i}, \hat{\theta}_{y_i}, \hat{\theta}_{hx_i}, \hat{\theta}_{hy_i}$ 在 $t \in [0, t_{efi})$ 时也是有界的. 接着通过反证法来证明 $|\Phi_{px_i}(t)| < 1$ 和 $|\Phi_{py_i}(t)| < 1$ 在 $t \in [0, t_{efi})$ 时成立. 假设 $t_{mi} \in [0, t_{efi})$ 且 $\Phi_{pz_i}(t_{mi}) = A_{z_i}$, 其中 $A_{z_i} \geq 1$ 或 $A_{z_i} \leq -1$. 由于 $|\Phi_{pz_i}(0)| < 1$ 成立且 $\Phi_{pz_i}(t)$ 是连续的, 基于中值定理可知, 存在时刻 $t_{mi}^0 \in [0, t_{mi}]$ 使得 $\Phi_{pz_i}(t_{mi}^0) = 1$ 或 $\Phi_{pz_i}(t_{mi}^0) = -1$.

根据包络映射的性质, 可以推断出 $\Psi(\Phi_{pz_i}(t_{mi}^0)) = \pm\infty$, 这与 $\lambda_{pz_i} = \Psi(\Phi_{pz_i})$ 在 $t \in [0, t_{efi})$ 时的有界性相矛盾. 因此, 该假设是不正确的, 故 $|\Phi_{pz_i}(t)| < 1$ 在 $t \in [0, t_{efi})$ 时成立, 可以实现期望的队列性能需求. $\square$

5 极端故障下预设时间性能恢复控制

在后极端故障阶段 $[t_{ri}, t_l]$, 故障执行器已经被替换为备份的健康执行器, 因此本节的控制目标是在预设时间 T_{ri} 内将恶化的跟踪误差 $e_{px_i}(t)$ 恢复到先前的约束边界内, 且不改变第 4 节所设计的控制结构.

5.1 性能过渡函数

极端故障发生后, 先前计算出的变道完成时间取值范围发生变化, 可能使原性能函数发生突变, 进而引发控制不连续性. 为解决这一问题, 在极端故障检测时刻 t_{di} 到执行器替换时刻 t_{ri} 之间 (即 $t \in [t_{di}, t_{ri}]$), 设计如下连续可微的性能过渡函数:

$$\beta_{z_i}^t(t) = \lambda_i(t) \beta_{z_i}^{\text{old}}(t) + (1 - \lambda_i(t)) \beta_{z_i}^{\text{new}}(t) \quad (90)$$

其中, $\beta_{z_i}^{\text{old}}(t)$ 表示旧的变道完成时间 t_l^{old} 所对应的指定性能函数, 且 $t_l^{\text{old}} \in [t_{\min}, t_{\max}]$; $\beta_{z_i}^{\text{new}}(t)$ 表示重新计算后新的变道完成时间 t_l^{new} 所对应的指定性能函数, 且 $t_l^{\text{new}} \in [t_{\min}, t_{\max}] \cap [t_{di} + T_{defi} + T_{ri}, t_{\max} + T_{defi} + T_{ri}]$; $\lambda_i(t)$ 表示过渡因子, 其表达式如下:

$$\lambda_i(t) = \exp(-k_i(t - t_{di})) \quad (91)$$

其中, $k_i > 0$ 用于调节过渡速率. 可见, 过渡因子 $\lambda_i(t)$ 具有如下特征:

- 1) 在极端故障检测时刻 t_{di} , 过渡因子满足 $\lambda_i(t_{di}) = 1$, 故此时 $\beta_{z_i}^t(t_{di}) = \beta_{z_i}^{\text{old}}(t_{di})$;
- 2) 在执行器替换时刻 t_{ri} , 通过调节 k_i 可使得过渡因子满足 $\lambda_i(t_{ri}) \approx 0$, 故此时 $\beta_{z_i}^t(t_{ri}) = \beta_{z_i}^{\text{new}}(t_{ri})$;
- 3) 在 $t \in [t_{di}, t_{ri}]$ 内, 过渡因子 $\lambda_i(t)$ 单调递减且连续可微.

综上所述, 如果 $t_l^{\text{old}} = t_l^{\text{new}}$, 则整个队列变道过程的性能函数 $\beta_{z_i}(t)$ 保持一致, 不会发生瞬间跳变现象; 如果 $t_l^{\text{old}} \neq t_l^{\text{new}}$, 则整个变道过程的性能函数 $\beta_{z_i}(t)$ 表示为:

$$\beta_{z_i}(t) = \begin{cases} \beta_{z_i}^{\text{old}}(t), & t \in [0, t_{di}) \\ \beta_{z_i}^t(t), & t \in [t_{di}, t_{ri}] \\ \beta_{z_i}^{\text{new}}(t), & t \in (t_{ri}, +\infty) \end{cases} \quad (92)$$

为了直观地展示性能过渡函数 $\beta_{z_i}^t(t)$ 的特征, 图 11 描述了 $t_l^{\text{old}} \neq t_l^{\text{new}}$ 的情况下整个性能函数 $\beta_{z_i}(t)$ 的一个可能的演变轨迹. 可见, 性能过渡函数

$\beta_{z_i}^t(t)$ 可以确保原函数 $\beta_{z_i}^{\text{old}}(t)$ 与新函数 $\beta_{z_i}^{\text{new}}(t)$ 平滑过渡, 从而解决性能函数突变引发的控制不连续问题. 这样, 当极端故障迫使决策层改变变道完成时间时, 执行层控制器可以平稳适应新的约束边界, 保持控制信号的连续性, 确保车队稳定跟踪决策层规划的目标变道轨迹, 实现决策层与执行层的动态协调. 因此, 性能过渡函数 $\beta_{z_i}^t(t)$ 是应对多级故障过渡阶段安全时窗非光滑突变、保障决策-执行层双向交互调节的关键设计. 此外, 由于极端故障仅发生在纵向控制通道, 因而基于旧的变道完成时间 t_l^{old} 所设计的目标横向位移 $p_{y_0}^o(t)$ 无需发生变化.

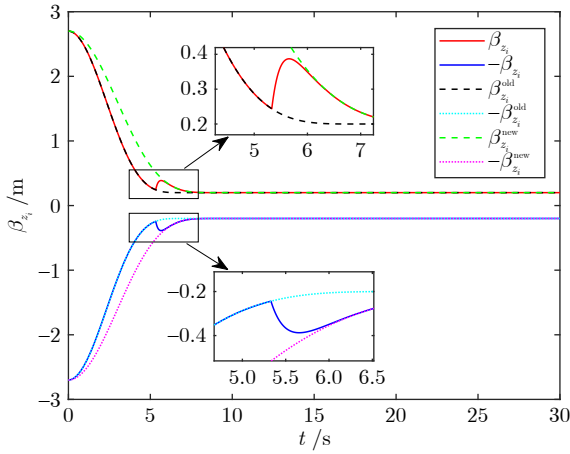


图 11 性能过渡函数的示意图

Fig.11 Diagram of performance transition function

5.2 虚拟恢复函数

由于执行器替换后的初始跟踪误差 $e_{px_i}(t_{ri})$ 超出了性能约束边界, 导致指定性能控制器 (75) 和 (76) 失效. 为了恢复期望的队列性能, 在后极端故障阶段 $[t_{ri}, t_l]$ 构造如下虚拟恢复函数:

$$\bar{\beta}_{x_i}(t) = \begin{cases} (|e_{px_i}(t_{ri})| - \beta_{x_i}(t_{ri}) + \phi_i) \left(\frac{t_{ri} + T_{ri} - t}{T_{ri}} \right)^2 + \beta_{x_i}(t), & t_{ri} \leq t < t_{ri} + T_{ri} \\ \beta_{x_i}(t), & t_{ri} + T_{ri} \leq t \leq t_l \end{cases} \quad (93)$$

其中, ϕ_i 是正常数. 可见, 虚拟恢复函数 $\bar{\beta}_{x_i}(t)$ 具有如下特征:

1) 在执行器替换时刻 t_{ri} , 虚拟恢复函数满足 $\bar{\beta}_{x_i}(t_{ri}) = |e_{px_i}(t_{ri})| + \phi_i > |e_{px_i}(t_{ri})|$. 因此, 当 $t = t_{ri}$ 时, 跟踪误差满足 $|e_{px_i}(t_{ri})| < \bar{\beta}_{x_i}(t_{ri})$;

2) 当 $t \in [t_{ri}, t_l]$ 时, 虚拟恢复函数 $\bar{\beta}_{x_i}(t)$ 是连续可微的. 经过预设的恢复时间 T_{ri} 后, 误差约束边

界恢复为 $\pm\beta_{x_i}(t)$.

图 12 显示了纵向跟踪误差 $e_{px_i}(t)$ 、性能约束边界 $\pm\beta_{x_i}(t)$ 和虚拟恢复边界 $\pm\bar{\beta}_{x_i}(t)$ 的演变轨迹. 可见, 只要跟踪误差满足:

$$|e_{px_i}(t)| < \bar{\beta}_{x_i}(t), \quad \forall t \in [t_{ri}, t_l] \quad (94)$$

则跟踪误差 $e_{px_i}(t)$ 可以在预设时间 T_{ri} 内恢复到先前的指定范围 $|e_{px_i}(t)| < \beta_{x_i}(t)$ 内.

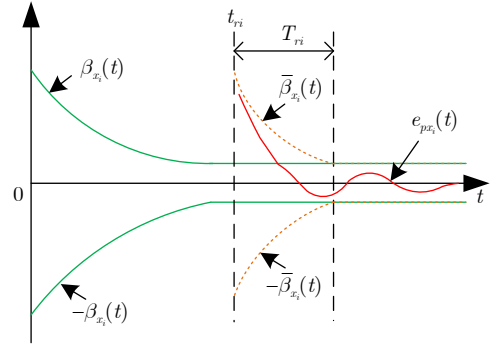


图 12 虚拟恢复函数的示意图

Fig.12 Diagram of virtual recovery function

5.3 控制器设计与稳定性分析

如果初始跟踪误差在性能约束边界内 (即 $|e_{px_i}(0)| < \beta_{x_i}(0)$), 则定理 1 中的指定性能控制器可以使得 $|e_{px_i}(t)| < \beta_{x_i}(t)$ 成立. 由上述分析可知, 执行器替换后的初始跟踪误差 $e_{px_i}(t_{ri})$ 在虚拟恢复边界内 (即 $|e_{px_i}(0)| < \bar{\beta}_{x_i}(0)$). 因此, 只要将 $\beta_{x_i}(t)$ 替换为 $\bar{\beta}_{x_i}(t)$, 就可以在不改变定理 1 中控制结构的前提下满足虚拟恢复约束条件 (94). 在此基础上, 纵向虚拟控制器和纵向实际控制器分别重新设计为:

$$\bar{v}_{x_i}^* = \frac{K_{px_i} \bar{\lambda}_{px_i}}{\bar{S}_{px_i}} + \frac{\bar{S}_{px_i} \bar{\lambda}_{px_i}}{2} - \bar{\Phi}_{px_i} \dot{\bar{\beta}}_{x_i} + \dot{p}_{x_i}^o \quad (95)$$

$$\bar{a}_{x_i}^* = -K_{vx_i} \bar{e}_{vx_i} - \bar{e}_{vx_i} + \bar{v}_{x_i}^* \quad (96)$$

$$u_{x_i} = -K_{ax_i} \bar{e}_{ax_i} - \frac{3}{2} \bar{e}_{ax_i} - \hat{\theta}_{x_i} \bar{e}_{ax_i} \varphi_{x_i}^T(x_i) \varphi_{x_i}(x_i) - \hat{\theta}_{hx_i} \bar{e}_{ax_i} \varphi_{hx_i}^T(x_i) \varphi_{hx_i}(x_i) - \hat{e}_{x_i}^2 \bar{e}_{ax_i} \quad (97)$$

其中, $\bar{\Phi}_{px_i} = e_{px_i} / \bar{\beta}_{x_i}$; $\bar{\lambda}_{px_i} = \Psi(\bar{\Phi}_{px_i})$; $\bar{e}_{vx_i} = v_{x_i} - \bar{v}_{x_i}^*$; $\bar{e}_{ax_i} = a_{x_i} - \bar{a}_{x_i}^*$; $\bar{S}_{px_i} = \frac{\partial \Psi(\bar{\Phi}_{px_i})}{\partial \bar{\Phi}_{px_i}} / \bar{\beta}_{x_i}$.

纵向自适应律分别重新设计为:

$$\dot{\hat{\theta}}_{x_i} = \bar{e}_{ax_i}^2 \varphi_{x_i}^T(x_i) \varphi_{x_i}(x_i) - \sigma_{x_i} \hat{\theta}_{x_i} \quad (98)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_{hx_i} = \bar{e}_{ax_i}^2 \varphi_{hx_i}^T(x_i) \varphi_{hx_i}(x_i) - \sigma_{hx_i} \hat{\theta}_{hx_i} \quad (99)$$

注 5. 预设恢复时间 T_{ri} 的取值直接影响后极端故障阶段所需的控制量. 由虚拟恢复函数 $\bar{\beta}_{x_i}(t)$ 的构造可知, T_{ri} 取值越小, $\bar{\beta}_{x_i}(t)$ 下降速率越大, 进而要求实际控制器 u_{x_i} 输出更大的控制信号, 以将恶化的跟踪误差拉回 $\pm\beta_{x_i}(t)$ 边界内. 在实际应用中, 可实现的恢复时间受执行器饱和幅值 $u_{x_i, \max}$ 和 $u_{x_i, \min}$ 所限制. 若给定 T_{ri} 所需的控制量超出上述饱和和限幅, 实际性能恢复时间将长于预设值. 此外, T_{ri} 的上限受到新的变道完成时间 t_l^{new} 取值范围的约束, 过长的 T_{ri} 可能导致 t_l^{new} 超出 $[t_{\min}, t_{\max}] \cap [t_{di} + T_{defi} + T_{ri}, t_{\max} + T_{defi} + T_{ri}]$ 的允许范围, 使变道完成时间无法满足避撞约束, 进而引发碰撞风险. 因此, 设计人员应遵循“恢复时间越短, 所需控制量越大”的原则, 根据实际的执行器饱和和限幅与 t_l^{new} 取值范围合理选择 T_{ri} .

定理 2. 考虑满足假设 1 ~ 假设 3 的网联车队 (1). 假设在 $t = t_{di}$ 时监督机制 (29) 检测到极端故障, 然后在 $t = t_{ri}$ 时用备份执行器替换故障执行器. 如果选用纵向虚拟控制器 (95) 和 (96)、横向虚拟控制器 (47) 和 (54)、纵向实际控制器 (97)、横向实际控制器 (76) 以及自适应律 (79)、(80)、(98)、(99), 则恶化的跟踪误差 $e_{px_i}(t)$ 在预设时间 T_{ri} 内恢复到先前的性能约束边界 $\pm\beta_{x_i}(t)$ 内, 且网联车队 (1) 在给定时间 t_l 内完成变道操作.

证明. 该部分证明过程与定理 1 类似, 故此处不再赘述. $\square$

5.4 全周期统一控制器设计

当 $t \in [t_{di}, t_{ri}]$ 时, 纵向控制输入 $\bar{u}_{x_i}(t)$ 不受控制信号 $u_{x_i}(t)$ 的影响, 因此控制信号可以简化设计为 $u_{x_i}(t) = 0$. 结合式 (75) 与 (97), 构造如下用于网联车队整个变道周期的统一容错控制器:

$$u_{x_i}(t) = \begin{cases} u_{x_i}(\beta_{x_i}, t), & t \in [0, t_{di}) \\ 0, & t \in [t_{di}, t_{ri}) \\ u_{x_i}(\bar{\beta}_{x_i}, t), & t \in [t_{ri}, t_l] \\ u_{x_i}(\beta_{x_i}, t), & t \in (t_l, +\infty) \end{cases} \quad (100)$$

其中, 时刻 t_{di} 由极端故障监督机制 (29) 获得. 这样, 所设计的分段容错控制器 (100) 能够适用于整个车队变道过程, 包括健康或适度故障阶段、极端故障发生阶段和后极端故障阶段. 尽管网联车队在变道过程中切换了执行器, 但控制结构始终保持不变, 且能够同时实现指定性能和性能恢复的控制目标.

6 仿真验证

本节通过 Matlab 仿真实验验证本文所提变道

容错控制方法的有效性. 考虑由 1 辆领航车与 3 辆跟随车组成的网联车队系统, 每辆变道车辆 i ($i = 0, 1, 2, 3$) 的非线性函数建模为^[7]:

$$f_{x_i} = -\frac{1}{m_i \mu_i} (0.5 \rho_{ai} \Xi_i C_{ai} (v_{x_i}^2 - q_i v_{x_i} a_{x_i}) + m_i a_{x_i} + \mu_i m_i g) \quad (101)$$

$$f_{y_i} = -\frac{1}{m_i \mu_i} (0.5 \rho_{ai} \Xi_i C_{ai} (v_{y_i}^2 - q_i v_{y_i} a_{y_i}) + m_i a_{y_i}) \quad (102)$$

其中, $m_i = 1110 \text{ kg}$ 表示车辆质量; $q_i = 0.25 \text{ s}$ 表示发动机时间常数; $\rho_{ai} = 20.28 \text{ kg/m}^3$ 表示空气密度; $\Xi_i = 1.6 \text{ m}^2$ 表示车辆横截面积; $\mu_i = 1$ 表示滚动摩擦系数; $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 表示重力加速度; $C_{ai} = 5$ 表示空气阻力系数. 此外, 对于车辆 $j = 0, 1, 2, 3$, L_d, L_o, F_d, F_o , 相关参数设定为 $l_j = 4 \text{ m}$, $\varpi_j = 1.8 \text{ m}$, $B = 5 \text{ m}$, $d = 2 \text{ m}$, $d_{0L_d} = d_{0L_o} = d_{nF_d} = d_{nF_o} = 0.5 \text{ m}$, $R_{\min} = 60 \text{ m}$.

障碍车 L_d, L_o, F_d, F_o 的纵向加速度分别设定为:

$$a_{x_{L_d}} = \begin{cases} 0.80 \text{ m/s}^2, & t \in [0, t_l) \\ 0 \text{ m/s}^2, & t \in [t_l, +\infty) \end{cases} \quad (103)$$

$$a_{x_{F_d}} = \begin{cases} 0.50 \text{ m/s}^2, & t \in [0, t_l) \\ 0 \text{ m/s}^2, & t \in [t_l, +\infty) \end{cases} \quad (104)$$

$$a_{x_{L_o}} = \begin{cases} 0.75 \text{ m/s}^2, & t \in [0, t_l) \\ 0 \text{ m/s}^2, & t \in [t_l, +\infty) \end{cases} \quad (105)$$

$$a_{x_{F_o}} = \begin{cases} 0.70 \text{ m/s}^2, & t \in [0, t_l) \\ 0 \text{ m/s}^2, & t \in [t_l, +\infty) \end{cases} \quad (106)$$

为便于表述, 将变道车辆 i ($i = 0, 1, 2, 3$) 的相关变量记为 $\mathbf{G}_i = [p_{x_i}, p_{y_i}, v_{x_i}, v_{y_i}, a_{x_i}, a_{y_i}, \hat{\theta}_{x_i}, \hat{\theta}_{h_{x_i}}, \hat{\theta}_{y_i}, \hat{\theta}_{h_{y_i}}]$, 并将障碍车辆 j ($j = L_d, L_o, F_d, F_o$) 的相关变量记为 $\mathbf{G}_j = [p_{x_j}, p_{y_j}, v_{x_j}, v_{y_j}, a_{x_j}, a_{y_j}]$. 变道车辆与障碍车辆的相关变量初值分别选取为:

$$\mathbf{G}_i(0) = [-6 \times 0, 0, 8, 0, 0.60, 0, 0, 0, 0, 0] \quad (107)$$

$$\mathbf{G}_{L_d}(0) = [3, 5, 8, 0, 0.80, 0] \quad (108)$$

$$\mathbf{G}_{L_o}(0) = [7, 0, 8, 0, 0.75, 0] \quad (109)$$

$$\mathbf{G}_{F_d}(0) = [-20, 5, 7, 0, 0.50, 0] \quad (110)$$

$$\mathbf{G}_{F_o}(0) = [-23, 0, 6, 0, 0.70, 0] \quad (111)$$

基于式 (103) ~ (111), 通过求解不等式 (18) ~ (23) 可计算出变道完成时间 t_l 的取值范围为 $[3.121\ 9, 11.720\ 2]$ s. 在本文仿真中, 变道完成时间设定为 $t_l = 7.00$ s. 接着, 指定性能函数的参数选取为 $\eta_{x_i} = 2.5$, $\eta_{y_i} = 2.5$, $\omega_{x_i} = 0.2$, $\omega_{y_i} = 0.2$, 性能过渡函数的参数选取为 $k_i = 20$, 虚拟恢复函数的参数选取为 $\phi_i = 8$, 且前馈监测函数的参数选取为 $\gamma = 0.842\ 8$. 此外, 本文将包络映射设计为 $\Psi(\Phi_{p_{z_i}}) = 2\Phi_{p_{z_i}} / ((1 + \Phi_{p_{z_i}})(1 - \Phi_{p_{z_i}}))$, 纵向控制输入的饱和边界设定为 $u_{x_i, \max} = 330\ \text{N}\cdot\text{m}$ 和 $u_{x_i, \min} = -330\ \text{N}\cdot\text{m}$, 横向控制输入的饱和边界设定为 $u_{y_i, \max} = 20\ \text{N}\cdot\text{m}$ 和 $u_{y_i, \min} = -20\ \text{N}\cdot\text{m}$. 当 $t \in [3, 5)$ 时, 领航车 0 遭受欺骗攻击, 且纵向攻击为 $h_{x_0}(\mathbf{x}_0) = 0.02\sqrt{p_{x_0}^2 + v_{x_0}^2 + a_{x_0}^2} \times \sin t$, 横向攻击为 $h_{y_0}(\mathbf{y}_0) = 0.02\sqrt{p_{y_0}^2 + v_{y_0}^2 + a_{y_0}^2} \times \sin t$. 当 $t \in [14, 16)$ 时, 跟随车 1 遭受欺骗攻击, 且纵向攻击为 $h_{x_1}(\mathbf{x}_1) = 0.01\sqrt{p_{x_1}^2 + v_{x_1}^2 + a_{x_1}^2} \sin t$, 横向攻击为 $h_{y_1}(\mathbf{y}_1) = 0.04\sqrt{p_{y_1}^2 + v_{y_1}^2 + a_{y_1}^2} \sin t$. 当 $t \in [19, 21)$ 时, 跟随车 2 遭受欺骗攻击, 且纵向攻击为 $h_{x_2}(\mathbf{x}_2) = 0.01\sqrt{p_{x_2}^2 + v_{x_2}^2 + a_{x_2}^2} \sin t$, 横向攻击为 $h_{y_2}(\mathbf{y}_2) = 0.03\sqrt{p_{y_2}^2 + v_{y_2}^2 + a_{y_2}^2} \sin t$. 当 $t \in [26, 28)$ 时, 跟随车 3 遭受欺骗攻击, 且纵向攻击为 $h_{x_3}(\mathbf{x}_3) = 0.01\sqrt{p_{x_3}^2 + v_{x_3}^2 + a_{x_3}^2} \sin t$, 横向攻击为 $h_{y_3}(\mathbf{y}_3) = 0.02\sqrt{p_{y_3}^2 + v_{y_3}^2 + a_{y_3}^2} \sin t$. 队列控制器的相关参数选择如下: $K_{p_{x_0}} = K_{p_{x_1}} = 30$, $K_{p_{x_2}} = 3$, $K_{p_{x_3}} = 50$, $K_{p_{y_0}} = K_{p_{y_1}} = 30$, $K_{p_{y_2}} = K_{p_{y_3}} = 60$, $K_{v_{x_0}} = K_{v_{x_1}} = K_{v_{x_3}} = 30$, $K_{v_{x_2}} = 3$, $K_{v_{y_0}} = K_{v_{y_1}} = K_{v_{y_2}} = K_{v_{y_3}} = 30$, $K_{a_{x_0}} = K_{a_{x_1}} = K_{a_{x_2}} = K_{a_{x_3}} = 150$, $K_{a_{y_0}} = K_{a_{y_1}} = K_{a_{y_2}} = K_{a_{y_3}} = 150$, $\sigma_{x_0} = \sigma_{x_1} = \sigma_{x_2} = \sigma_{x_3} = 33$, $\sigma_{h_{x_0}} = \sigma_{h_{x_1}} = \sigma_{h_{x_2}} = \sigma_{h_{x_3}} = 33$, $\sigma_{y_0} = \sigma_{y_1} = \sigma_{y_2} = \sigma_{y_3} = 33$, $\sigma_{h_{y_0}} = \sigma_{h_{y_1}} = \sigma_{h_{y_2}} = \sigma_{h_{y_3}} = 33$, $\psi_{x_0} = \psi_{x_1} = \psi_{x_2} = \psi_{x_3} = 3.5$, $\psi_{y_0} = \psi_{y_1} = \psi_{y_2} = \psi_{y_3} = 3.5$. 外部干扰表示为 $\varrho_{x_i}(t) = 0.1 \tanh(t)$ 和 $\varrho_{y_i}(t) = 0.1 \tanh(t)$.

6.1 本文所提方法的仿真结果

为充分验证本文所提方法的有效性, 考虑队列所有车辆在仿真全程均受持续存在的适度故障影响, 且在特定时刻某辆跟随车会进一步发生极端故障. 根据队列中不同车辆突发极端故障的情况, 分别考虑情况 1 与情况 2 进行两组实验.

情况 1. 跟随车 2 极端故障, 其余车辆适度故障

在此情况下, 假设每辆车在开始变道时均出现适度故障, 并且跟随车 2 在时刻 t_{ef2} 发生极端故障. 领航车 0、跟随车 1 与跟随车 3 的故障因子为:

$$\rho_j(t) = 0.75 + 0.25\sin(0.1t), \quad j = 0, 1, 3 \quad (112)$$

跟随车 2 的纵向通道中, 执行器 1 的故障因子为:

$$\rho_2(t) = \begin{cases} 0.75 + 0.25\sin(0.1t), & 0 \leq t < t_{ef2} \\ 0, & t \geq t_{ef2} \end{cases} \quad (113)$$

且备份执行器 2 的故障因子始终为:

$$\rho_2(t) = 1 \quad (114)$$

此外, 每辆车的偏置故障为 $r_i(t) = 0.01 \sin t$. 在跟随车 2 中, 极端故障发生时间设定为 $t_{ef2} = 4.00$ s, 执行器延迟替换时间设定为 $T_{def2} = 0.10$ s, 预设恢复时间设定为 $T_{r2} = 2.00$ s.

仿真结果如图 13 ~ 图 16 所示. 图 13 显示了网联车队的变道轨迹. 可见, 跟随车可以跟踪领航车轨迹安全变道, 且变道过程没有发生任何碰撞. 图 14(a) 和图 14(b) 分别显示了网联车队的纵向跟踪误差与横向跟踪误差. 可见, 在 $t \in [0, 4)$ 内所有纵向跟踪误差均能保证在性能边界内. 跟随车 2 在 $t_{ef2} = 4.00$ s 时发生极端故障, 在 $t_{d2} = 4.34$ s 时检测到极端故障, 并在 $t_{r2} = t_{d2} + T_{def2} = 4.44$ s 时将备份的健康执行器连接到控制器. 在执行器替换之后, 纵向跟踪误差 $e_{px2}(t)$ 在 $T_{r2} = 2.00$ s 内恢复到指定性能. 极端故障发生后, 变道完成时间取值范围变为 $[6.440\ 0, 11.720\ 2]$ s, 由于先前设定的 $t_l = 7.00$ s 位于该取值范围内, 因而无需改变变道完成时间. 图 15(a) 和图 15(b) 分别显示了网联车队的纵向位移与横向位移. 可见, 队列能够跟踪目标轨迹完成变道操作. 图 16(a) 和图 16(b) 分别显示了网联车队的纵向控制输入与横向控制输入. 可见, 当欺骗攻击发生时, 相应的被攻击车辆及其连接的下游车辆控制输入会快速波动以抵消攻击的影响.

情况 2. 跟随车 3 极端故障, 其余车辆适度故障

为进一步验证所提方法在不同车辆极端故障及变道完成时间突变情况下的有效性, 假设跟随车 3 在时刻 t_{ef3} 发生极端故障. 领航车 0、跟随车 1 与跟随车 2 的故障因子为:

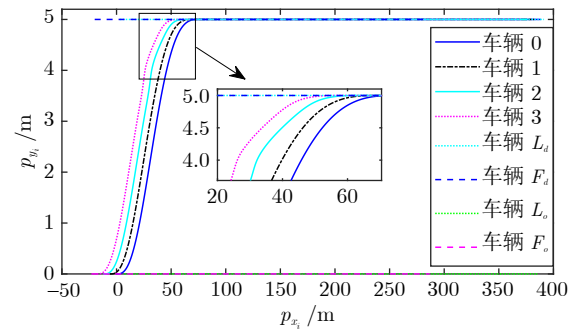
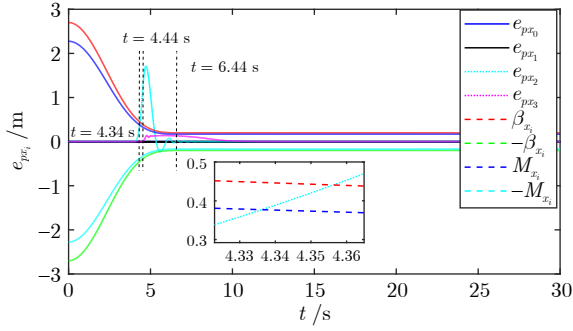
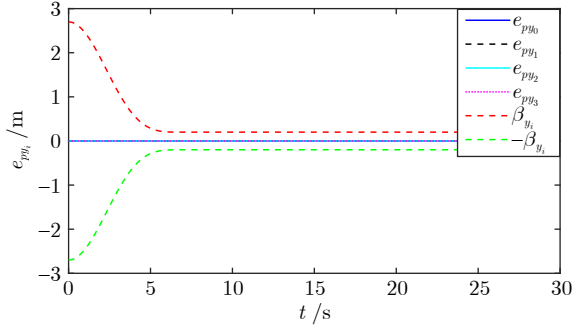


图 13 情况 1 中队列的变道轨迹

Fig. 13 Lane-changing trajectories of platoon in Case 1



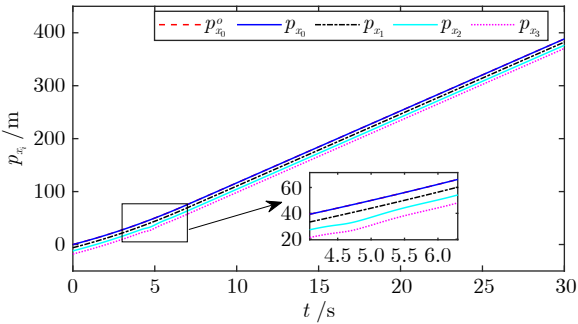
(a) 纵向跟踪误差
(a) The longitudinal tracking errors



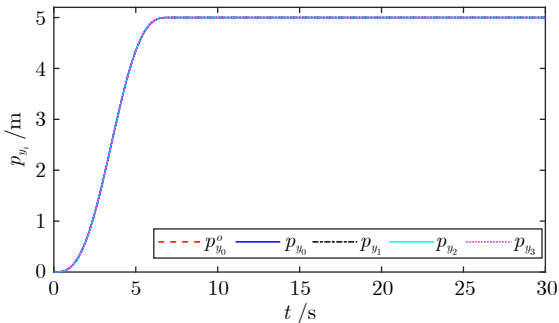
(b) 横向跟踪误差
(b) The lateral tracking errors

图 14 情况 1 中队列的跟踪误差

Fig. 14 The tracking errors of platoon in Case 1



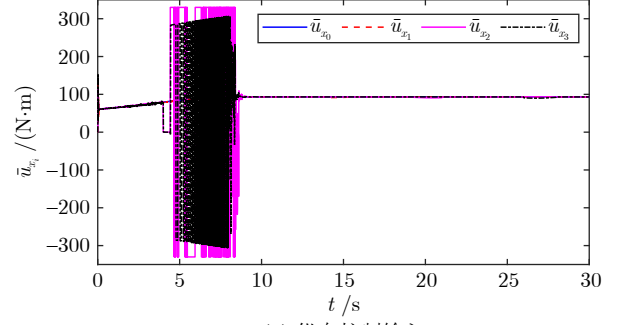
(a) 纵向位移
(a) The longitudinal displacements



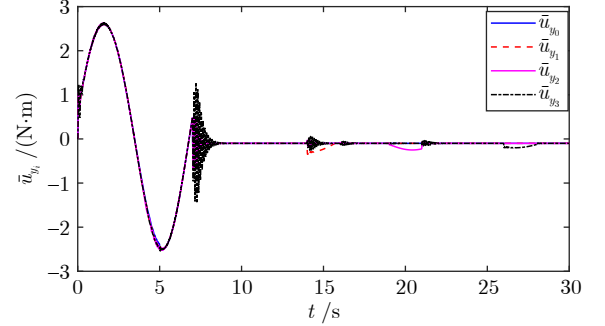
(b) 横向位移
(b) The lateral displacements

图 15 情况 1 中队列的位移

Fig. 15 The displacements of platoon in Case 1



(a) 纵向控制输入
(a) The longitudinal control inputs



(b) 横向控制输入
(b) The lateral control inputs

图 16 情况 1 中队列的控制输入

Fig. 16 The control inputs of platoon in Case 1

$$\rho_j(t) = 0.75 + 0.25\sin(0.1t), \quad j = 0, 1, 2 \quad (115)$$

跟随车 3 的纵向通道中, 执行器 1 的故障因子为:

$$\rho_3(t) = \begin{cases} 0.75 + 0.25\sin(0.1t), & 0 \leq t < t_{ef3} \\ 0, & t \geq t_{ef3} \end{cases} \quad (116)$$

且备份执行器 2 的故障因子始终为:

$$\rho_3(t) = 1 \quad (117)$$

此外, 每辆车的偏置故障为 $r_i(t) = 0.01\sin(t)$. 在跟随车 3 中, 极端故障发生时间设定为 $t_{ef3} = 6.00\text{s}$, 执行器延迟替换时间设定为 $T_{def3} = 0.10\text{s}$, 预设恢复时间设定为 $T_{r3} = 2.00\text{s}$.

仿真结果如图 17 ~ 图 20 所示. 由图 17 可知, 网联车队能够安全完成变道操作, 并避免与当前车道和目标车道的障碍车碰撞. 由图 18 可知, 跟随车 3 在 $t_{ef3} = 6.00\text{s}$ 时发生极端故障, 在 $t_{d3} = 6.24\text{s}$ 时检测到极端故障, 并在 $t_{r3} = t_{d3} + T_{def3} = 6.34\text{s}$ 时将备份的健康执行器连接到控制器. 在执行器替换之后, 纵向跟踪误差 $e_{px3}(t)$ 在 $T_{r3} = 2.00\text{s}$ 内恢复到指定性能. 极端故障发生后, 变道完成时间取值范围变为 $[8.340\ 0, 11.720\ 2]\text{s}$, 由于先前设定的 $t_l = 7.00\text{s}$ 不属于该取值范围内, 因而需要重新设定变道完成时间. 为此, 本文在该范围内取 $t_l = 9.00\text{s}$, 并通过

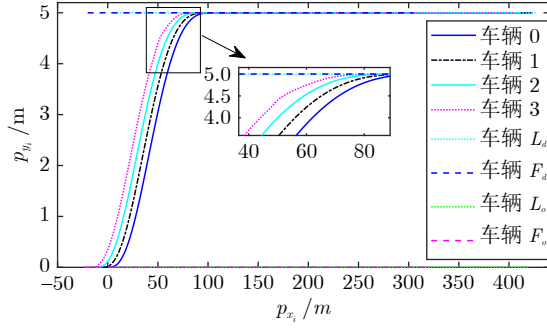
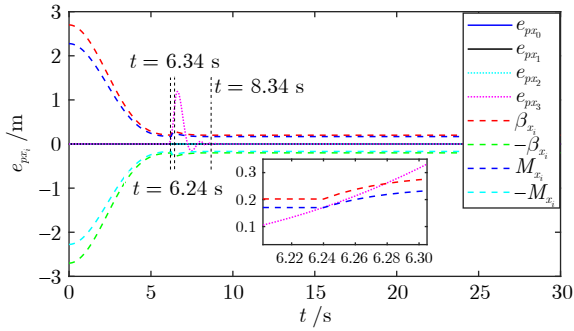


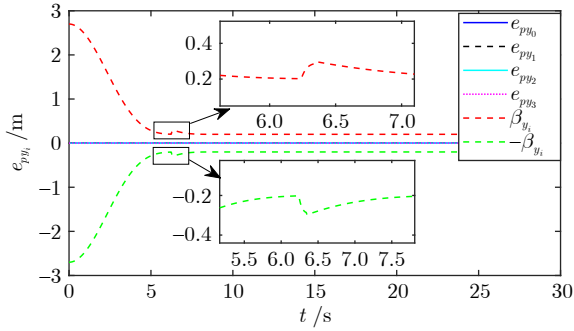
图 17 情况 2 中队列的变道轨迹

Fig.17 Lane-changing trajectories of platoon in Case 2



(a) 纵向跟踪误差

(a) The longitudinal tracking errors



(b) 横向跟踪误差

(b) The lateral tracking errors

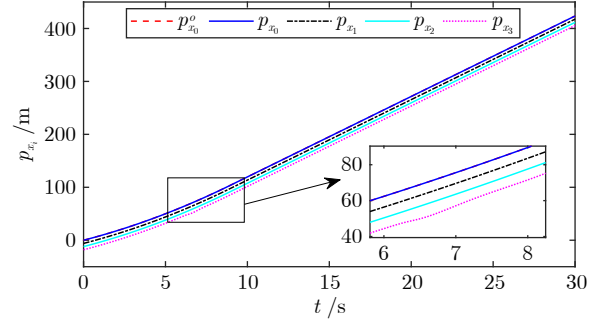
图 18 情况 2 中队列的跟踪误差

Fig.18 The tracking errors of platoon in Case 2

性能过渡函数实现约束边界平滑过渡. 由图 19 可知, 网联车队能够精确跟踪目标轨迹. 由图 20 可知, 纵向控制输入与横向控制输入均有界, 且在执行器延迟替换时间 T_{def3} 内, 跟随车 3 的纵向控制输入为 0. 此外, 为了在预设时间 T_{r3} 内实现性能恢复, 跟随车 3 需要较大的控制力矩来快速抑制大幅跟踪误差, 因此 $\bar{u}_{x3}(t)$ 在后极端故障阶段有较大幅度的振荡现象.

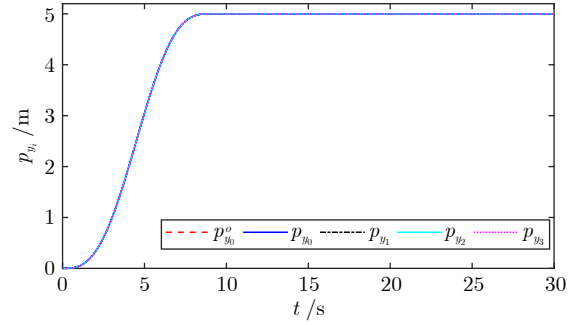
6.2 仿真对比

为进一步证明本文所提方法的优势, 与文献 [12] 提出的一种广泛应用的网联车队变道容错控制



(a) 纵向位移

(a) The longitudinal displacements

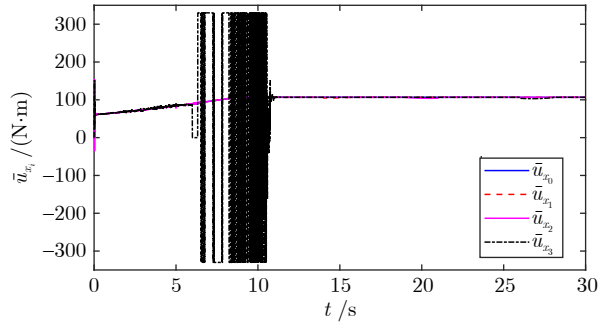


(b) 横向位移

(b) The lateral displacements

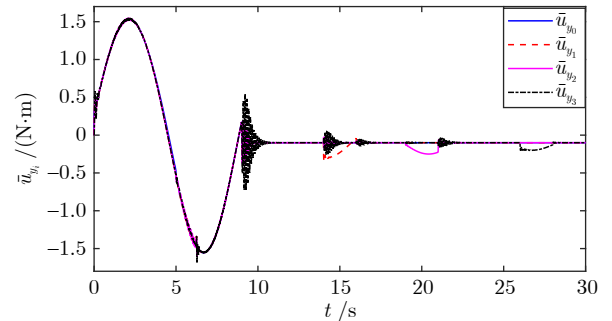
图 19 情况 2 中队列的位移

Fig.19 The displacements of platoon in Case 2



(a) 纵向控制输入

(a) The longitudinal control inputs



(b) 横向控制输入

(b) The lateral control inputs

图 20 情况 2 中队列的控制输入

Fig.20 The control inputs of platoon in Case 2

方法进行对比. 为了保证对比过程的合理性, 设定队列初始条件以及极端故障发生的情形与情况 1 保持一致. 文献 [12] 采用的指定性能函数为 $\beta_{zi}(t) = (\beta_{i0} - \beta_{i\infty})\exp(-\tilde{p}_i t) + \beta_{i\infty}$, 其中 $\beta_{i0} = 2.7$, $\beta_{i\infty} = 0.2$, $\tilde{p}_i = 0.3$.

文献 [12] 所提方法的仿真结果如图 21 所示. 由于文献 [12] 没有考虑备份执行器切换技术, 因而极端故障引发的性能违反将导致奇异问题. 由图 21(a) 可知, 跟随车 2 发生极端故障后, 恶化的纵向跟踪误差 $e_{px_2}(t)$ 无法恢复到先前的性能边界内, 因而车辆间的通信连接不再维持. 由图 21(b) 可知, 极端故障的发生导致跟随车 2 与跟随车 3 无法跟踪领航车完成变道. 与文献 [12] 的容错工作相比, 本文所提方法能够解决极端故障引发的性能违反问题, 并且可以在预设时间内实现性能恢复.

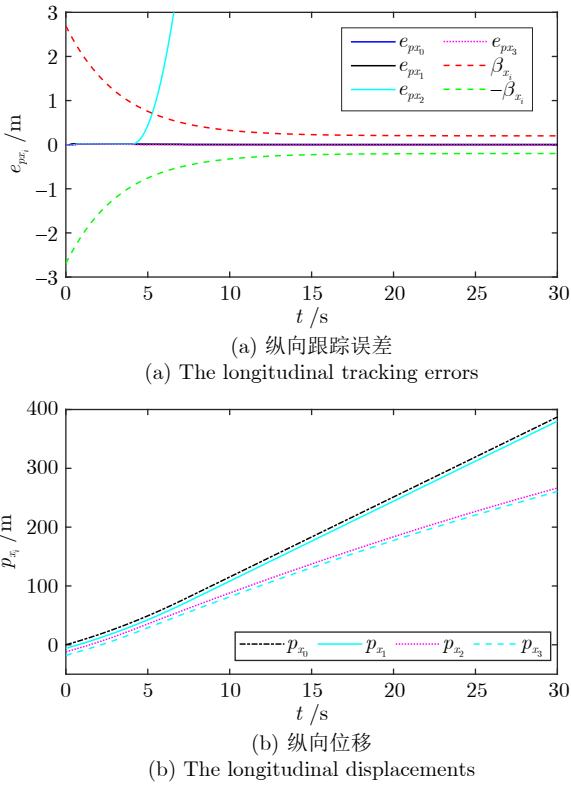


图 21 文献 [12] 所提方法仿真结果
Fig. 21 Simulation results under the method in reference [12]

7 结束语

本文针对多级故障下的网联车队变道控制问题, 提出了一种基于性能监督的协同变道容错控制方法. 设计了领航车的避撞变道轨迹以兼顾避撞安全性与乘客舒适性, 构建了纵向与横向跟踪控制策

略以确保领航车准确跟踪变道轨迹, 同时跟随车能够在给定的变道完成时间内以指定精度跟踪前车行驶. 在不改变控制器结构的条件下, 所提策略能够在适度故障阶段满足期望的队列性能要求, 并在极端故障阶段实现预设时间内的性能恢复. 然而, 该方法依赖于备用执行器激活后不会发生极端故障的假设, 未来将进一步研究冗余执行器结构下的网联车队变道容错控制问题.

参考文献

- Wen G H, Wan Y, Zhou J L, Zheng D Z, Chen C L P. Distributed robust event-triggered platooning control of connected vehicles with uncertain dynamics: A neuro-adaptive approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2025, **21**(3): 2570–2579
- Wang Zheng-Wu, Wen Qiang, Wu Ju-Qiang. DMPC controller design for trajectory synchronization of multi-platoon vehicles under unidirectional communication. *Acta Automatica Sinica*, 2025, **51**(9): 2085–2105
(王正武, 文强, 吴锯强. 单向通信下多队列车轨迹同步的 DMPC 控制器设计. *自动化学报*, 2025, **51**(9): 2085–2105)
- Song Xiu-Lan, Li Yang-Yang, He De-Feng. Secure H_∞ platooning control for connected vehicles subject to external disturbance and random DoS attacks. *Acta Automatica Sinica*, 2024, **50**(2): 348–355
(宋秀兰, 李洋洋, 何德峰. 外部干扰和随机 DoS 攻击下的网联车安全 H_∞ 队列控制. *自动化学报*, 2024, **50**(2): 348–355)
- Gao Zhen-Yu, Sun Zhen-Chao, Guo Ge. Fixed-time global prescribed performance control for vehicular platoons with actuator nonlinearities. *Acta Automatica Sinica*, 2024, **50**(2): 320–333
(高振宇, 孙振超, 郭戈. 考虑执行器非线性固定时间全局预设性能车辆队列控制. *自动化学报*, 2024, **50**(2): 320–333)
- Deng C, Xu L, Yang T, Yue D, Chai T Y. Distributed cooperative optimization for nonlinear heterogeneous MASs under intermittent communication. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2024, **69**(4): 2737–2744
- Yang Kai, Tang Xiao-Lin, Zhong Gui-Chuan, Wang Ming, Li Guo-Fa, Hu Xiao-Song. Research on safe decision-making for autonomous driving at unsignalized intersections. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, **60**(10): 147–159
(杨凯, 唐小林, 钟桂川, 王明, 李国法, 胡晓松. 面向无信号灯十字路口场景的自动驾驶安全决策方法研究. *机械工程学报*, 2024, **60**(10): 147–159)
- Che W W, Zhang L L, Deng C, Wu Z G. Hierarchical lane-changing control for vehicle platoons in prescribed performance. *Automatica*, 2025, **171**: Article No. 111972
- Duan X T, Sun C, Tian D X, Zhou J S, Cao D P. Cooperative lane-change motion planning for connected and automated vehicle platoons in multi-lane scenarios. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, **24**(7): 7073–7091
- Yang S W, Xu Y W, Wang P, Li D W. An efficient rolling-horizon approach for cooperative multi-lane platoon formation with undefined configurations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, **25**(12): 21608–21621
- Tang Xiao-Lin, Zhang Kun-Yi, Chen Zhi-Ge, Yang Jian-Ying, Yang Wei. Research on autonomous driving safety planning method integrating interactive prediction information. *Journal of Mechanical Engineering*, 2026, **62**(4): 249–262
(唐小林, 张焜埸, 陈止戈, 杨剑英, 杨为. 融合交互预测信息的自动驾驶安全规划方法研究. *机械工程学报*, 2026, **62**(4): 249–262)

- 11 Jin S, Luo L, Zhu Q H, Liu A L. Vehicle platoon formation control method under mixed traffic scenarios with complex road conditions of variable curvature. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025, **26**(10): 16947–16962
- 12 Xu W D, Guo X G, Wang J L, Che W W, Wu Z G. Nonlinear disturbance observer-based fault-tolerant sliding-mode control for 2-D plane vehicular platoon with UTVFD and ANAS. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2024, **54**(4): 2050–2061
- 13 Chen S G, Chen Y, Pan C W, Ali I, Pan J T, He W. Distributed adaptive platoon secure control on unmanned vehicles system for lane change under compound attacks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, **24**(11): 12637–12647
- 14 Chen X Y, Hu S W, Yang T, Xie X P, Qiu J L. Event-triggered bipartite consensus of multiagent systems with input saturation and DoS attacks over weighted directed networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2024, **54**(7): 4054–4065
- 15 Zhang L L, Che W W, Xu S X, Deng C. Prescribed performance tracking control for 2-D plane vehicle platoons with actuator faults and saturations. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, **72**(11): 14040–14050
- 16 Zhang L L, Che W W, Deng C, Wu Z G. Data-driven prescribed performance lane-changing control for vehicle platoons. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025, **26**(10): 16710–16723
- 17 Cao Y, Wang X J, Ma Y J, Cao J F, Song Y D. Performance-based fault-tolerant control uniformly accommodating multiple levels of actuation failures. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2024, **69**(11): 8018–8025
- 18 Wang L, Bian Y G, Cao D P, Qin H M, Hu M J. Hierarchical safe control of heterogeneous connected vehicle systems using adaptive fault-tolerant control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, **73**(10): 14313–14325
- 19 Liu C, Xia Z W, Patton R J. Distributed fault-tolerant consensus control of vehicle platoon systems with DoS attacks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, **73**(10): 14438–14449
- 20 Gao Z Y, Zhang Y, Guo G. Finite-time fault-tolerant prescribed performance control of connected vehicles with actuator saturation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, **72**(2): 1438–1448
- 21 Yang Y D, Shen Q K. Predetermined performance fault-tolerant control for vehicle platoon against measurement drifts and multiple input constraints. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2025, **72**(3): 3008–3016
- 22 Liu J L, Dong J X. Hierarchical prescribed-time platoon control for heterogeneous vehicles with actuator faults and system uncertainties. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2025, **26**(5): 6965–6976
- 23 Han J H, Zhang J Z, He C K, Lv C, Li C, Hou X H, et al. Adaptive distributed finite-time fault-tolerant controller for cooperative braking of the vehicle platoon. *IET Intelligent Transport Systems*, 2021, **15**(12): 1562–1581
- 24 Sun W W, Ding L S, Lv X Y, Wu Y. State-triggered fault-tolerant control strategy for performance recovery in nonlinear interconnected systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2026, **56**(2): 1423–1435
- 25 Ji W, Lv D Y, Luo S H, Sun Y G. Multiple models-based fault tolerant control of levitation module of maglev vehicles against partial actuator failures. *IEEE Transactions on Vehicular Tech-*

nology, 2025, **74**(2): 2231–2240

- 26 Han J H, Zhang J Z, He C K, Lv C, Li C, Ji Y, et al. Prescribed-time performance recovery fault tolerant control of platoon with nominal constraints guarantee. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, **24**(3): 3501–3513
- 27 Gao H, Wang J L, Liu X L, Xia Y Q. Fuzzy fixed-time event-triggered consensus control for uncertain nonlinear multi-agent systems with memory-based learning. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2024, **32**(6): 3682–3692



付主木 中原工学院自动化与电气工程学院教授. 主要研究方向为混合动力汽车系统建模与模式切换控制, 多智能体协同优化控制和自适应模糊控制. E-mail: fuzhumu@haust.edu.cn
(**FU Zhu-Mu** Professor at the School of Automation and Electrical Engineering, Zhongyuan University of Technology. His research interests include system modeling and mode-switching control for hybrid electric vehicles, cooperative optimal control of multi-agent systems, and adaptive fuzzy control.)



据函铮 河南科技大学信息工程学院 (人工智能学院) 博士研究生. 主要研究方向为网联车队协同控制, 多智能体系统一致性控制和随机非线性系统控制.

E-mail: jhz1521168686@163.com

(**JU Han-Zheng** Ph.D. candidate at the School of Information Engineering (School of Artificial Intelligence), Henan University of Science and Technology. His research interests include cooperative control of connected vehicular platoons, consensus control of multi-agent systems, and stochastic nonlinear system control.)



夏元清 中原工学院自动化与电气工程学院教授. 主要研究方向为云控制, 云数据中心优化调度管理, 智能交通, 模型预测控制, 自抗扰控制, 飞行器控制和空天地一体化网络协同控制.

E-mail: xia_yuanqing@bit.edu.cn

(**XIA Yuan-Qing** Professor at the School of Automation and Electrical Engineering, Zhongyuan University of Technology. His research interests include cloud control, cloud data center optimization scheduling and management, intelligent transportation, model predictive control, active disturbance rejection control, flight control, and networked cooperative control for integration of space, air and earth.)



陶发展 河南科技大学信息工程学院 (人工智能学院) 教授. 主要研究方向为复杂动态系统鲁棒控制, 智能网联汽车协同优化和深度学习人工智能. 本文通信作者.

E-mail: taofazhan@haust.edu.cn

(**TAO Fa-Zhan** Professor at the School of Information Engineering (School of Artificial Intelligence), Henan University of Science and Technology. His research interests include robust control of complex dynamic systems, collaborative optimization of intelligent connected vehicles, and deep learning artificial intelligence. Corresponding author of this paper.)



张 玮 河南科技大学信息工程学院 (人工智能学院) 博士研究生. 主要研究方向为行车风险建模和自动驾驶轨迹规划.

E-mail: zhangwehkj@163.com

(**ZHANG Wei** Ph.D. candidate at the School of Information Engineer-

ing (School of Artificial Intelligence), Henan University of Science and Technology. His research interests include driving risk modeling and trajectory planning for autonomous driving.)



陈启宏 武汉理工大学自动化学院教授. 主要研究方向为新能源电力变换与控制, 燃料电池检测与控制, 预测控制.

E-mail: chenqh@whut.edu.cn

(**CHEN Qi-Hong** Professor at the School of Automation, Wuhan University of Technology. His research interests include new energy power conversion and control, fuel cell detection and control, and predictive control.)