

基于事件触发机制的虚拟编组列车协同控制^{*}

魏文景¹ 肖宝弟^{1,2} 岳丽丽¹ 李茂青¹ 林俊亭¹

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 730070, 兰州; 2. 北京康吉森交通技术有限公司, 101318, 北京)

摘要 [目的] 为了提高铁路线路的运输能力, 使列车在区间内形成稳定的虚拟编组列车, 减少整个编组过程中的通信压力, 有必要对基于事件触发机制的虚拟编组列车协同控制进行研究。[方法] 介绍了虚拟编组列车控制系统, 提出一种基于事件触发机制的虚拟编组列车协同控制方法。通过分析虚拟编组列车的基本概念, 建立区间内存在扰动的虚拟编组列车动力学模型, 并基于事件触发思想, 根据列车运行过程中的状态误差, 设置事件触发条件, 并设计了跟随列车的分布式控制器。基于 Lyapunov 稳定性理论对该控制系统进行稳定性分析, 并通过 MATLAB 仿真软件验证该算法应用于虚拟编组的有效性。[结果及结论] 所设计的事件触发函数能够使虚拟编组系统渐进稳定, 且该系统已避免了 Zeno 行为。跟随列车在控制器的作用下, 在 4 s 内就与领航列车的速度保持了一致, 在减少通信压力的同时, 整个虚拟编组列车队形内部也能保持稳定的追踪间距。

关键词 列车虚拟编组; 事件触发机制; 协同控制

中图分类号 U292.31

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.12.012

Collaborative Control of Virtual Formation Trains Based on Event Triggering Mechanism

WEI Wenjing¹, XIAO Baodi^{1,2}, YUE Lili¹, LI Maoqing¹, LIN Juntong¹

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, 730070, Lanzhou, China; 2. Beijing Consen Traffic Technology Co., Ltd., 101318, Beijing, China)

Abstract [Objective] In order to improve the transportation capacity of railway lines, make the trains form a stable virtual formation within the interval, and reduce the communication pressure during the entire marshaling process, it is necessary to study the collaborative control of virtual formation trains based on the event triggering mechanism. [Method] The control system of virtual formation trains is introduced, and a method based on the above-mentioned collaborative control is proposed. By analyzing the basic concept of virtual formation trains, a dynamic model of virtual formation trains with dis-

turbance in sections is established, and event triggering conditions are set according to the state error during the train operation using the idea of event triggering, and the distributed controller of the following train is designed. The stability analysis of the control system is carried out based on Lyapunov stability theory, and the effectiveness of the algorithm applied to virtual formation is verified by MATLAB simulation software. [Result & Conclusion] The designed event triggering function can make the virtual formation system asymptotically stable, and the system has avoided Zeno behavior. Under the action of the controller, the following train can keep the same speed as the lead train within 4 s, while reducing the communication pressure, the entire virtual formation train can also maintain a stable tracking distance.

Key words virtual train formation; event triggering mechanism; collaborative control

0 引言

为了提升铁路线路的运输能力, 国内外学者针对铁路运输提出了虚拟编组技术。该技术指在车-车无线通信条件下, 对前后相邻运行的两列及两列以上列车进行虚拟编组, 取代物理上的机械连接, 以较小的追踪运行间隔来追踪运行, 且能够在需要时自动解编或重新编组, 以提高线路的运输效率。

文献[1]开发了一种 DFSimu 仿真工具, 针对东京至大阪的新干线高铁线路, 采用虚拟编组的控车模式, 将每小时、每个行车方向的客运量从 1.5 万人次增加至 2.3 万人次。文献[2]基于分布式模型预测控制, 提出一种虚拟编组列车控制系统, 并以越南胡志明市地铁 1 号线为例进行模拟仿真, 验证了所提虚拟编组列车控制系统的有效性。文献[3]对比了相对移动闭塞、绝对移动闭塞及虚拟重联条件下的城市轨道交通车站通过性能, 研究结果表明, 虚拟重联模式可以显著提升线路的整体通过能力。

^{*} 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(2021G045)

文献[4]建立了新冠疫情期间的虚拟编组列车模型、病毒感染概率模型和社会力模型,分析虚拟编组系统下的新冠感染风险,研究结果表明,虚拟编组模式不但可以提高运输效率,还能降低旅客的感染风险。

此外,事件触发机制已在多智能体编队领域中取得了显著成效。鉴于此,基于事件触发控制理论,本文提出一种在非线性和扰动约束条件下的虚拟编组列车分布式控制器,能够使虚拟编组列车在预设的期望速度和编组队形下稳定运行。同时,基于 Lyapunov 稳定性理论,通过 MATLAB 软件进行仿真试验,验证所提算法的稳定性和有效性。本文研究可为虚拟编组列车在区间内形成编组的方式提供一种新的思路。

1 虚拟编组列车控制系统

传统的闭塞方式可分为固定闭塞、准移动闭塞和移动闭塞。采用移动闭塞模式能最大化地缩短列车追踪间隔,且列车不受闭塞分区的限制,通过连续监测前行列车的实时位置及速度,控制列车间的追踪间隔。移动闭塞又可划分为绝对移动闭塞和相对移动闭塞。绝对移动闭塞仅考虑前车的当前位置,并假定前车是静止的;相对移动闭塞既考虑了前车的当前位置,也考虑了前车的当前速度。因此,与绝对移动闭塞相比,相对移动闭塞可以进一步缩短区间内列车间的追踪间隔。

虚拟编组技术打破了传统的闭塞方式,即各列车都可以作为独立的个体来实现自身的定位、测速及完整性检查,进而能够计算自身的列车速度曲线,在保证行车安全的同时,不打破列车编组队形,实现协同控制。区间内,虚拟编组形成前、后的编队示意图如图 1 所示。

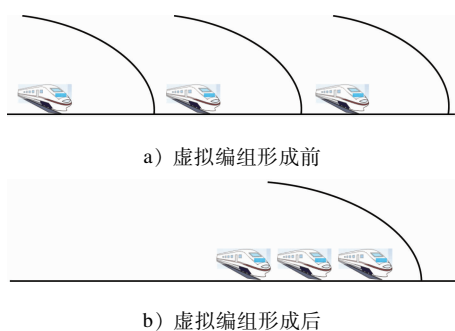


图 1 区间内虚拟编组形成前、后的编队示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the train formations before and after virtual formation within the interval

2 图论及问题描述

2.1 相关图论

加权拓扑图 $G = (\gamma, E)$, 一般用于表示多智能体系统内的每个智能体及智能体之间的通信关系。拓扑图 G 中: $\gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n\}$ 为每个节点的集合, 代表了每个智能体的位置信息; E 为拓扑图中边的集合, 代表了每个智能体之间的信息传递; 多智能体系统邻接矩阵 A 表示了各智能体间的连接关系。定义节点 γ_i 的入度为 D_i , $D = \text{diag}(D_1, D_2, \dots, D_n)$ 为多智能体系统入度矩阵。在图论中, 经常使用多智能体系统拉普拉斯矩阵 L 表征智能体间的信息交换, 则有:

$$L = D - A \quad (1)$$

定义矩阵 $B = \text{diag}(b_1, b_2, \dots, b_n)$, 表征领航者与跟随者之间的通信权值, 当且仅当第 i 个跟随者能接收到领航者所传递的信息时, $b_i > 0$ 。在多智能体系统内至少要保证有 1 个跟随者收到领航者信息, 则 $b_1 + b_2 + \dots + b_n > 0^{[5]}$ 。

2.2 问题描述

现假设虚拟编组队内有 1 列领航列车和 n 列跟随列车, 领航列车通过车-车无线通信将线路信息及自身的速度、位置等状态信息发送给每一列跟随列车, 跟随列车凭此自主计算列车速度曲线。同时, 跟随列车将自身的状态信息发送给领航列车及相对于自身的前行列车, 以便于列车组更新状态信息及进行完整性检查。在整个虚拟编队中, 将每一列列车视为一个智能体, 整个虚拟编队就成为了一个多智能体系统。

为了不受跟随列车的影响, 领航列车的动力学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}_H = v_H \\ \dot{v}_H = f(x_H) \end{cases} \quad (2)$$

式中:

x_H ——领航列车的位置状态;

v_H ——领航列车的速度状态;

$f(x_H)$ ——领航列车动力学行为的非线性项。

跟随列车遵循以下二阶动力学模型:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \\ \dot{v}_i = u_i + f(x_i) \end{cases} \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

式中:

x_i ——第 i 列跟随列车的位置状态;

v_i ——第 i 列跟随列车的速度状态;

u_i ——第 i 列跟随列车的控制输入;

$f(x_i)$ ——第 i 列跟随列车动力学行为的非线性项。

对于本文所提出的虚拟编组多智能体系统,当且仅当所有智能体列车的位置状态和速度状态满足以下条件时,系统达到稳定,则有:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_H(t)\| = id_{\min} \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_j(t)\| = |i - j|d_{\min} = d_{ij} \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \|v_i(t) - v_H(t)\| = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:

d_{\min} ——两列车之间的最短追踪距离;

d_{ij} ——第 i 列跟随列车与第 j 列跟随列车之间的期望距离;

t ——列车运行时间。

假设非线性项满足利普希茨条件,则有:

$$\begin{aligned} |f(x_i) - f(x_j)| &\leq \rho(|x_i - x_j|) \\ \forall i, j &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (5)$$

式中:

ρ ——非负常数。

3 控制器设计

3.1 控制算法设计

对于跟随者状态,即式(3),考虑事件触发机制下的跟随列车控制算法 $u_i(t)$ 可以表示为:

$$\begin{aligned} u_i(t) = & -\alpha \left\{ \sum_{j=1}^n a_{ij} [x_i(t_k) - x_j(t_k) - d_{ij}] - [x_i(t_k) - \right. \\ & \left. x_H(t_k) - d_{i,H}] \right\} - \beta \left\{ \sum_{j=1}^n a_{ij} [v_i(t_k) - v_j(t_k)] + \right. \\ & \left. [v_i(t_k) - v_H(t_k)] \right\} \\ & \alpha > 0, \beta > 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中:

t_k ——事件触发时间, $k = 1, 2, \dots, \infty$;

a_{ij} ——邻接矩阵元素,表示第 i 列车和第 j 列车之间的连接权重;

$d_{i,H}$ ——第 i 列车和领航列车之间的期望距离;

α, β ——控制增益参数。

定义跟随列车 i 的位置误差为 $\hat{x}_i(t) = x_i(t) - x_H(t) - d_{i,H}$, 以及速度误差为 $\hat{v}_i(t) = v_i(t) - v_H(t)$, 则有:

$$\begin{cases} \hat{x}_i(t) = \hat{v}_i(t) \\ \hat{v}_i(t) = -\alpha \sum_{j=1}^n a_{ij} [\hat{x}_i(t_k) - \hat{x}_j(t_k)] - \\ \beta \sum_{j=1}^n a_{ij} [\hat{v}_i(t_k) - \hat{v}_j(t_k)] - \\ \alpha \hat{x}_i(t_k) - \beta \hat{v}_i(t_k) + [f(x_i) - f(x_H)] \\ \forall t \in [t_k, t_{k+1}) \end{cases} \quad (7)$$

为了便于研究,本文利用文献[6]中的处理方法,将跟随列车的动力学模型整合为矩阵模式,则有:

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) & 0 & 0 \\ 0 & \hat{x}_2(t) & 0 \\ 0 & 0 & \hat{x}_3(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{v}}(t) = \begin{bmatrix} \hat{v}_1(t) & 0 & 0 \\ 0 & \hat{v}_2(t) & 0 \\ 0 & 0 & \hat{v}_3(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f(x_1) & 0 & 0 \\ 0 & f(x_2) & 0 \\ 0 & 0 & f(x_3) \end{bmatrix} \quad (10)$$

定义误差矩阵 $\mathbf{e}(t) = [\mathbf{e}_1(t) \quad \mathbf{e}_2(t)]^T$, 其中, $\mathbf{e}_1(t) = \hat{\mathbf{x}}(t_k) - \hat{\mathbf{x}}(t)$, $\mathbf{e}_2(t) = \hat{\mathbf{v}}(t_k) - \hat{\mathbf{v}}(t)$, $\forall t \in [t_k, t_{k+1})$, 则式(7)可改写为:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}(t) = \hat{\mathbf{v}}(t) \\ \hat{\mathbf{v}}(t) = -\alpha(\mathbf{A} + \mathbf{B})[\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{e}_1(t)] - \\ \beta(\mathbf{A} + \mathbf{B})[\hat{\mathbf{v}}(t) + \mathbf{e}_2(t)] + [\mathbf{F} - \mathbf{I}_n f(x_H)] \\ \forall t \in [t_k, t_{k+1}) \end{cases} \quad (11)$$

式中:

\mathbf{I}_n —— n 阶单位矩阵。

假设所有跟随列车的状态误差矩阵为 $\mathbf{y}(t) = [\hat{\mathbf{x}}(t) \quad \hat{\mathbf{v}}(t)]^T$, 此时可定义触发函数为:

$$g_i(t) = \|\mathbf{e}(t)\| -$$

$$\varepsilon \frac{\|\mathbf{y}(t)\|(\omega - 1 - \rho)}{2 \max\{\|\alpha(\mathbf{A} + \mathbf{B})\|, \|\beta(\mathbf{A} + \mathbf{B})\|\}} = 0 \quad (12)$$

式中:

ε ——常数,且 $0 < \varepsilon < 1$;

ω ——常数,其数值大小为 $\max\{\omega_{\min}[\alpha(\mathbf{A} + \mathbf{B})], \omega_{\min}[\beta(\mathbf{A} + \mathbf{B})]\}$, 且 $\omega - 1 - \rho > 0$ 。

3.2 稳定性证明

前文针对虚拟编组列车的跟随列车定义了控

制式及触发函数,下面本文将采用 Lyapunov 函数对虚拟编组列车的稳定性进行证明。

考虑一个在控制式(6)作用下的虚拟编组列车,当其满足式(13)且执行式(14)时,则定义该队列实现了一致性,则有:

$$\omega[\alpha A^T + \beta A + (\alpha + \beta)B] > 1 \quad (13)$$

$$\|e(t)\| \leq \varepsilon \frac{\|y(t)\|(\omega - 1 - \rho)}{2\max\{\|\alpha(A+B)\|, \|\beta(A+B)\|\}} \quad (14)$$

证明:设 $\lambda = \alpha A^T + \beta A + (\alpha + \beta)B$, 设计 Lyapunov 函数 V 来证明其稳定性,则有:

$$V = \frac{1}{2}y^T(t)\theta y(t) \quad (15)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \lambda & I_n \\ I_n & I_n \end{bmatrix} \quad (16)$$

根据参考文献[7]中的引理及式(13)可知, $\omega_{\min}(\lambda - I_n) \geq \omega_{\min}(\lambda) - 1 > 0$, 由此可知, Lyapunov 函数正定。此时,对式(15)求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= y^T(t)\theta\dot{y}(t) = [\hat{x}(t) \quad \hat{v}(t)] \begin{bmatrix} \lambda & I_n \\ I_n & I_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}(t) \\ \dot{\hat{v}}(t) \end{bmatrix} = \\ &[\hat{x}(t) + \hat{v}(t)] [-\alpha(A+B)e_1(t) - \\ &\beta(A+B)e_2(t)] - \hat{x}(t)[\alpha(A+B)]\hat{x}(t) + \\ &\hat{v}^T(t)[I_n - \beta(A+B)]\hat{v}(t) + [\hat{x}(t) + \\ &\hat{v}(t)][F - I_n f(x_H)] \end{aligned} \quad (17)$$

由于 $\|\hat{x}(t)\|^2 + \|\hat{v}(t)\|^2 = \|y(t)\|^2$, 则有:

$$\dot{V} \leq 2\|y(t)\|\|e(t)\|\max\{\|\alpha(A+B)\|, \|\beta(A+B)\|\} - (\omega - 1 - \rho)\|y(t)\|^2 \quad (18)$$

令误差的范数 $\|e(t)\|$ 满足式(15), 则可以保证 Lyapunov 稳定, 即 $\dot{V} < 0$, 此时进一步可得:

$$\dot{V} \leq (\varepsilon - 1)\|y(t)\|^2(\omega - 1 - \rho) \quad (19)$$

根据所设计的 Lyapunov 函数, 即式(15), 可得

$$\tau = \frac{\varepsilon(\omega - 1 - \rho)}{[2\max\{\|\alpha(A+B)\|, \|\beta(A+B)\|\} + \varepsilon(\omega - 1 - \rho)]\sqrt{n} + \sqrt{2}\mu + \rho} \quad (25)$$

式中:

τ ——两次事件触发的时间间隔。

$$\delta(\tau, 0) = \varepsilon \frac{\|y(t)\|(\omega - 1 - \rho)}{2\max\{\|\alpha(A+B)\|, \|\beta(A+B)\|\}} \quad (26)$$

此时联立式(24)和式(26), 可得:

$$\tau = \frac{\varepsilon(\omega - 1 - \rho)}{[2\max\{\|\alpha(A+B)\|, \|\beta(A+B)\|\} + \varepsilon(\omega - 1 - \rho)]\chi} \quad (27)$$

由式(27)可知, τ 是严格大于 0 的, 表明了该系

对于任意 $0 < \varepsilon < 1$, 有 $\dot{V} \leq 0$ 。

因此, 所设计的事件触发函数能够使虚拟编组系统渐进稳定, 此时跟随列车能够与领航列车保持一致, 从而形成稳定的编队。

3.3 Zeno 行为证明

Zeno(芝诺)行为是指在事件触发机制下, 系统两次事件触发的时间间隔无限接近于 0, 则导致系统出现在短时间内无限次触发输入更新的现象^[8]。本节将针对该系统是否会产生 Zeno 行为进行证明, 证明两次触发间隔大于 0, 即保证单位时间内有限次数的触发。

令 $z_i(t) = \frac{\|e(t)\|}{\|y(t)\|}$, 对其求导可得:

$$\dot{z}_i(t) = \left(1 + \frac{\|e(t)\|}{\|y(t)\|}\right) \frac{\|\dot{y}(t)\|}{\|y(t)\|} \quad (20)$$

从上文的推导可知:

$$\dot{z}_i(t) \leq \sqrt{2}\mu \left(1 + \frac{\|e(t)\|}{\|y(t)\|}\right)^2 + (\sqrt{n} + \rho) \cdot$$

$$\left(1 + \frac{\|e(t)\|}{\|y(t)\|}\right) \quad (21)$$

$$\mu = \max\{\|\alpha(A+B)\|, \|\beta(A+B)\|\} \quad (22)$$

又因为 $1 + \dot{z}_i(t) \geq 1$, 因此:

$$\dot{z}_i(t) \leq (\sqrt{n} + \sqrt{2}\mu + \rho) \left(1 + \frac{\|e(t)\|}{\|y(t)\|}\right)^2 \quad (23)$$

令 $\zeta = \dot{z}_i(t)$, $\chi = \sqrt{n} + \sqrt{2}\mu + \rho$, 则有 $\dot{\zeta} \leq (1 + \zeta)^2\chi$ 。由此可得, ζ 有界, 且满足 $\zeta \leq \delta(t, \delta_0)$, 其中, $\delta(t, t_0)$ 为微分方程 $\dot{\delta} = (1 + \delta)^2\chi$ 的解, δ_0 为微分方程解 δ 的初值, t_0 为初始时间, 并且满足 $\delta(0, \delta_0) = \delta_0$ 。

因此, 求得微分方程的解为:

$$\delta(\tau, 0) = \frac{\chi^\tau}{1 - \chi^\tau} \quad (24)$$

τ 有严格正下限, 其下限满足:

4 仿真验证

考虑由 1 列领航列车、3 列跟随列车组成的虚拟编组列车,领航列车及跟随列车的动力学模型见式(2)和式(3)。根据文献[9]的研究结果可知,当列车运行速度为 270 km/h,前、后车速度误差不超过 2 km/h,通信延时为 0.1 s 时,虚拟编组列车内部的最小追踪距离 d_{\min} 为 294.3 m,本文取 $d_{\min} = 300.0$ m。增益参数 $\alpha = 3, \beta = 6$ 。假设领航列车在线路内 1 200 m 处以 270 km/h 运行,跟随列车分别位于线路内 880 m、600 m、290 m 处,此时的虚拟编组列车拓扑图如图 2 所示。其中:H 表示领航列车;1、2、3 分别代表 3 列跟随列车。

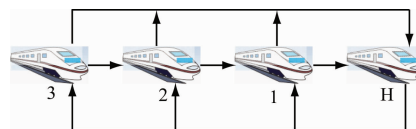
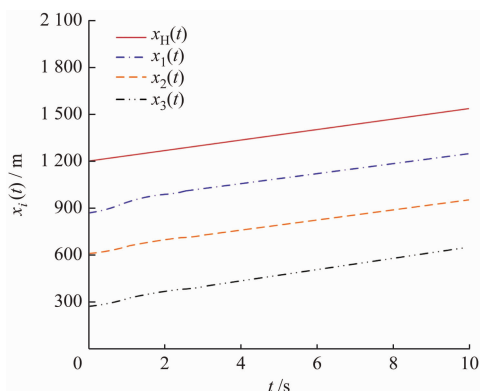


图 2 虚拟编组列车拓扑图

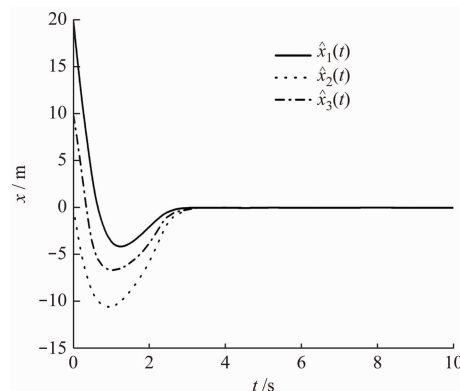
Fig. 2 Virtual formation trains topology diagram

虚拟编组列车中,领航列车与跟随列车的位置变化及追踪间距误差如图 3 所示。

由图 3 可知:虽然前期存在扰动,但各列车之间的追踪距离误差显著减小,并最终稳定在一个非常小的范围内,且各跟随列车也能在有限的时间内与领航列车速度保持一致,按照最小追踪间隔 $d_{\min} = 300.0$ m 呈队列稳定运行。



a) 位置变化



b) 追踪间距误差

图 3 领航列车与跟随列车的位置变化及追踪间距误差

Fig. 3 Position changes and tracking spacing errors between the lead train and the following trains

领航列车与跟随列车的速度变化如图 4 所示。其中: v_H 为领航列车的速度, v_1 、 v_2 、 v_3 为 3 列跟随列车的速度; v 为列车运行速度。在控制算法下,跟随列车可以调整自身的状态,并最终与领航列车的运行速度达到一致。跟随列车的控制输入随运行时

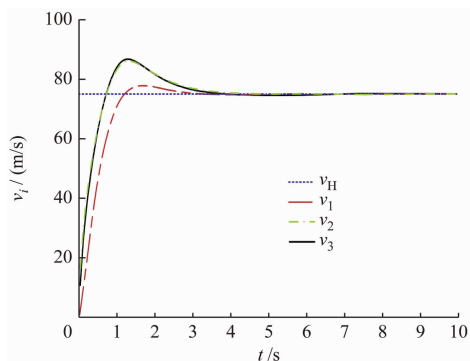


图 4 领航列车与跟随列车的速度变化

Fig. 4 Speed changes of the lead train and the following trains

间的变化关系如图 5 所示。其中: u_1 、 u_2 、 u_3 为 3 列跟随列车的控制输入; u 为列车加速度。在队列形成初期,每列跟随列车均根据分布式控制器调整其状态,并与领航列车保持一致。随着队列逐渐成形,该虚拟编组列车系统达到稳定。

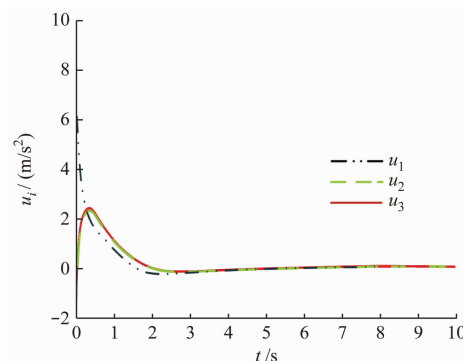
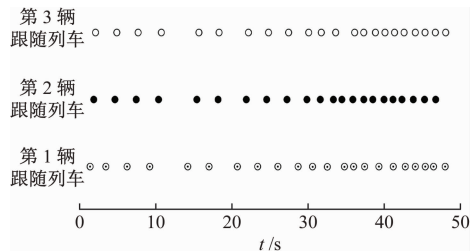


图 5 跟随列车的控制输入随运行时间的变化关系

Fig. 5 Changes in control input of following trains with running time

在事件触发控制协议下,每列跟随列车在不同运行时间下触发的控制输入更新次数示意图,如图6所示。该虚拟编组列车系统控制有效地排除了Zeno行为,相比于时间触发机制,有效降低了各列车间的通信压力。



注:图中每个点表示每列跟随列车更新1次。

图6 每列跟随列车在不同运行时间下触发的控制输入更新次数示意图

Fig.6 Diagram of number of control input updates triggered by each following train at different running times

5 结语

本文针对虚拟编组列车控制系统,考虑存在扰动的情况下,提出一种基于事件触发的分布式控制器,跟随列车可在事件触发时刻与领航列车进行信息交互,有效地减少了通信压力,节约了资源。应用Lyapunov稳定性理论对虚拟编组列车进行了稳定性证明,同时排除了Zeno行为。仿真结果表明,所提算法可以使跟随列车有效控制自身状态,并与领航列车的速度保持一致,且每列列车之间的间距保持稳定,进而形成稳定的虚拟编组队形。

参考文献

- [1] SCHUMANN T. Increase of capacity on the shinkansen high-speed line using virtual coupling[J]. International Journal of Transport Development and Integration, 2017, 1(4): 666.
- [2] FELEZ J, KIM Y, BORRELLI F. A model predictive control approach for virtual coupling in railways[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(7): 2728.

- [3] 荀径,陈明亮,宁滨,等. 虚拟重联条件下地铁列车追踪运行性能衡量[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(1): 96.
XUN Jing, CHEN Mingliang, NING Bin, et al. Train tracking performance measurement under virtual coupling in subway[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(1): 96.
- [4] 曹源,温佳坤,马连川. 重大疫情下的列车动态编组与调度[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(3): 120.
CAO Yuan, WEN Jiakun, MA Lianchuan. Dynamic marshalling and scheduling of trains in major epidemics[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(3): 120.
- [5] 张志雄,杨凯军. 具有避碰和保持连通的多智能体鲁棒编队控制[J]. 电光与控制, 2022, 29(8): 28.
ZHANG Zhixiong, YANG Kaijun. Robust formation control of multi-agent systems with collision avoidance and connection preservation[J]. Electronics Optics & Control, 2022, 29(8): 28.
- [6] 申通,唐晔,李立. 基于事件触发机制的自主车辆队列协同控制[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(3): 792.
SHEN Tong, TANG Ye, LI Li. Consensus for autonomous vehicle platoon system via event-triggered control[J]. Application Research of Computers, 2021, 38(3): 792.
- [7] BOYD S, EL GHAOU L, FERON E, et al. Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1994.
- [8] 施维嘉. 基于事件触发的多智能体编队控制应用研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
SHI Weijia. Application research of multi-agent formation control based on event triggering[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2022.
- [9] 李建雄. 面向动态编组和紧密追踪的虚拟编组列控方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
LI Jianxiong. Research on virtual marshalling train control method for dynamic marshalling and close tracking[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

· 收稿日期:2023-05-24 修回日期:2023-07-05 出版日期:2024-12-10
Received:2023-05-24 Revised:2023-07-05 Published:2024-12-10
· 通信作者:魏文景,硕士研究生,1163223601@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第74页)

HUANG Yonghua, LIN Zhenheng, CHEN Xuejun. A surface crack detection method for friction block of brake pad based on SVM[J]. Journal of Yanbian University (Natural Science Edition), 2019, 45(2): 175.

· 收稿日期:2023-11-27 修回日期:2024-03-28 出版日期:2024-12-10

Received:2023-11-27 Revised:2024-03-28 Published:2024-12-10

· 第一作者:管春玲,副教授,gclbgs@163.com
通信作者:宋跃超,高级工程师,songyuechao22@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license