

控制与决策

Control and Decision

多列车系统数据驱动无模型自适应PID控制

田帅涛, 侯忠生

引用本文:

田帅涛, 侯忠生. 多列车系统数据驱动无模型自适应PID控制[J]. 控制与决策, 2025, 40(5): 1447-1456.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0836>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于参数自适应蚁群算法的高速列车行车调度优化](#)

Optimization of high-speed train operation scheduling based on parameter adaptive improved ant colony algorithm
控制与决策. 2021, 36(7): 1581-1591 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0992>

[基于PID参数整定的线性自抗扰控制参数整定](#)

[Tuning of linear active disturbance rejection controllers based on PID tuning rules](#)
控制与决策. 2021, 36(7): 1592-1600 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1408>

[磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制](#)

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor
控制与决策. 2021, 36(6): 1449-1456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064>

[一种改进的紧格式无模型自适应控制方法](#)

An improved compact form model free adaptive control method
控制与决策. 2021, 36(2): 436-442 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0635>

[基于反馈无源化的切换非线性系统 \$H_\infty\$ 跟踪控制](#)

Passification-based H_∞ tracking control for a class of switched nonlinear systems
控制与决策. 2021, 36(11): 2729-2734 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0798>

多列车系统数据驱动无模型自适应 PID 控制

田帅涛, 侯忠生[†]

(青岛大学 自动化学院, 山东 青岛 266071)

摘要: 针对一类多列车系统, 提出一种具有牵引力/制动力约束以及追尾防护功能的分布式无模型自适应 PID (MFAPID) 控制方案. 首先, 通过动态线性化方法将列车的动力学模型转化为等价的动态线性化数据模型; 其次, 通过引入饱和函数以及避碰反馈机制, 利用 I/O 数据设计一种带有牵引力/制动力约束和追尾防护功能的分布式 MFAPID 控制算法, 并通过压缩映射的方法对该算法进行严格的收敛性分析证明; 最后, 通过数值仿真对比实验验证 MFAPID 控制算法的有效性和稳定性.

关键词: 多列车系统; PID 控制; 输入饱和; 无模型自适应控制; 数据驱动控制; 追尾防护

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0836

引用格式: 田帅涛, 侯忠生. 多列车系统数据驱动无模型自适应 PID 控制 [J]. 控制与决策, 2025, 40(5): 1447-1456.

Data-driven model-free adaptive PID control for multi-train systems

TIAN Shuai-tao, HOU Zhong-sheng[†]

(School of Automation, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: A distributed model-free adaptive PID(MFAPID) control scheme with traction/braking force constraints and rear-end protection is proposed for a class of multi-train systems. Firstly, the dynamic linearization method is used to transform the train dynamics model into an equivalent dynamic linearization data model. Secondly, by introducing saturation function and collision avoidance feedback mechanism, a distributed MFAPID control algorithm with traction/braking force constraint and rear-end protection function is designed by using I/O data, and the convergence of the algorithm is proved by compression mapping method. Finally, the effectiveness and stability of MFAPID control algorithm are verified by numerical simulation and comparison experiments.

Keywords: multi-train system; PID control; input saturation; model-free adaptive control; data-driven control; collision protection

0 引言

随着计算机技术的发展, 列车通过列车自动驾驶系统来控制列车的精确调速和安全运行^[1], 通过无线网络与相邻列车交换信息, 保证了多列车的协同控制, 提高了列车间的运行效率. 目前, 已有多种控制方法来提高多列车的运行性能, 如强化学习协同控制^[2]、鲁棒控制^[3]、自适应控制^[4]等方法.

上述控制算法大多都是基于模型已知的多列车运行控制算法, 其控制策略设计与稳定性分析需要模型信息. 事实上, 由于列车在运行过程中受质量、空气阻力等干扰因素影响, 导致多列车系统具有强非线性和强时变性, 其动力学模型往往难以精确建立. 因此, 设计一种仅利用多列车运行数据的控制方法是一件具有理论和实际应用价值的工作.

无模型自适应控制 (MFAC) 是一种有效处理非线性系统控制问题的数据驱动控制 (DDC) 方法^[5], 优势在于消除了设计控制方案时对系统模型和结构信息的依赖, 使其能够仅利用输入/输出 (I/O) 数据来实现控制目标. 目前, MFAC 控制理论体系已经建立^[6-8], 并在此基础上发展出若干控制理论研究新分支, 比如无模型自适应迭代学习控制^[9]、预测型 MFAC^[10]等, 且有些方法已在列车等领域应用^[11-12].

经典 PID 控制也是一种 DDC 方法, 因易调节、稳定性强等特点在列车领域广泛应用, 如文献 [13] 设计了一种模糊 PID 软切换控制算法, 提高了列车的运行精度. 但上述 PID 参数整定方法依赖于系统模型知识, 并且面对强非线性系统的结构、环境等动力学因素时变、高阶系统模型难以精确建立时,

收稿日期: 2024-07-13; 录用日期: 2024-10-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62373206); 青岛大学学科集群攻关系统项目 (XT2024101).

[†]通信作者. E-mail: zshou@qdu.edu.cn.

PID 的参数整定十分困难,同时控制性能往往也难以时刻得到保障.根据 MFAC 的最新研究指出,针对离散时间非线性系统,PID 控制可看作全格式动态线性化数据模型 MFAC (FFDL-MFAC) 方案输出伪阶数 $L_y = 2$, 输入伪阶数 $L_u = 1$ 情况的一种特例^[7-8].无模型自适应 PID(MFAPID) 控制作为 FFDL-MFAC 方案的一种特例,仅利用 I/O 数据实现控制目标,并且相较于紧格式动态线性化数据模型 MFAC,在控制器设计时考虑了伪阶数 $L_y = 2$ 的输出变化量,增加了设计的灵活性.同时相较于 FFDL-MFAC, MFAPID 控制方案降低了控制器结构的复杂性,回避了伪阶数的选取问题.

安全运行是多列车系统迫切需要解决的问题,因此必须保证列车在安全距离范围内运行,以避免碰撞.文献 [14] 针对多列车系统在通讯丢包情况下提出了一种带有避碰机制的控制方案.文献 [4] 则针对多列车系统在执行器故障和饱和情况下提出了一种带有避碰机制的无模型自适应迭代控制方案.通过上述分析,本文仅利用系统 I/O 数据,设计一种具有牵引力/制动力约束和追尾防护功能的分布式无模型自适应 PID 控制方案,保证了列车始终在安全距离范围内运行.本文贡献如下:

1) 相较于文献 [11] 和文献 [15] 的控制方案仅用到输入变化量,本文设计的控制方案使用了伪阶数 $L_y = 2$ 的输出变化量,增加了设计灵活度的同时也回避了伪阶数的选取问题.

2) 相较于文献 [16] 的 PID 稳定性分析,本文的稳定性分析用更加具体的权重因子 λ_i 和调节因子 ρ_i 替代了文献 [16] 中 PID 参数积分部分的范围.同时,利用期望车距和列车间的距离,设计了避碰机制,保证了列车的安全运行.

3) 相较于传统 PID 参数固定以及手动调参,本文设计的 MFAPID 算法仅利用系统 I/O 数据对 PID 参数进行调节,并根据系统的变化自适应实时更新.

1 问题描述

1.1 预备知识

如图 1 所示,将每辆列车视为一个智能体,考虑一个有向图 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{A})$ 来模拟 $N + 1$ 辆列车之间的通信.其中: $\mathcal{V} = \{0, 1, \dots, N\}$ 表示由虚拟领导者列车 0 和跟随者列车组成的节点集合, $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ 表示节点之间边构成的集合, $\mathcal{A} = [a_{i,j}] \in R^{N \times N}$ 表示有向图 \mathcal{G} 对应的邻接矩阵, $\mathcal{N}_i = \{j \in \mathcal{V} | (j, i) \in \mathcal{E}\}$ 表示多智能体列车 i 的邻居.如果来自列车 i 的信息可以传递给列车 j , 则 $(j, i) \in \mathcal{E}$, 且 $a_{i,j} = 1$; 否

则 $(j, i) \notin \mathcal{E}$, 且 $a_{i,j} = 0$. 有向图 \mathcal{G} 拉普拉斯矩阵定义为 $\mathcal{L} = \mathcal{D} - \mathcal{A}$, 其中 $\mathcal{D} = \text{diag}\{\sigma_1^{\text{in}}, \sigma_2^{\text{in}}, \dots, \sigma_N^{\text{in}}\}$, $\sigma_i^{\text{in}} = \sum_{j=1}^N a_{i,j}$ 定义为列车 i 的入度. $D = \text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ 描述了虚拟领导列车 0 与每个跟随列车 i 之间的关系.如果列车 i 可访问领导者列车 0, 则 $d_i = 1$, 否则 $d_i = 0$.

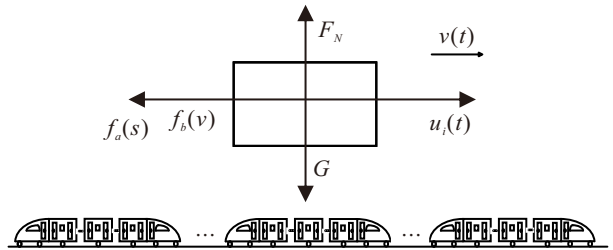


图1 多智能体列车质点模型

1.2 系统描述

考虑多列车系统,列车 i 的模型^[14] 可以描述为

$$\begin{cases} \frac{ds_i(t)}{dt} = v_i(t), \\ \frac{dv_i(t)}{dt} = u_i(t) - F_i(t), \end{cases} \quad (1)$$

其中: t 是运行时刻; $s_i(t)$ (m) 和 $v_i(t)$ (m/s) 分别是列车 i 在 t 时刻的位置及速度; $u_i(t)$ 是单位质量上的牵引力/制动力; $F_i(t)$ (N) 是总阻力, 并满足

$$F_i(t) = f_{ai}(t) + f_{bi}(t), \quad (2)$$

$$f_{ai}(v_i(t)) = c_{1i}(t) + c_{2i}(t)v_i(t) + c_{3i}(t)v_i^2(t), \quad (3)$$

$$f_{bi}(s_i(t)) = r_{ri}(s_i(t)) + r_{ci}(s_i(t)) + r_{ti}(s_i(t)). \quad (4)$$

$f_{ai}(t)$ 表示与列车 i 运行速度 v_i 相关的基本阻力, 包括机械阻力与空气阻力; $f_{bi}(t)$ 表示与列车 i 位置相关的附加阻力; $c_{1i}(t)$ 、 $c_{2i}(t)$ 、 $c_{3i}(t)$ 表示未知的时变阻力系数; $r_{ri}(s_i(t))$ 、 $r_{ci}(s_i(t))$ 和 $r_{ti}(s_i(t))$ 分别表示与坡道、弯道和隧道相关的阻力.

由于基本阻力 $f_{ai}(t)$ 和附加阻力 $f_{bi}(t)$ 是时变参数, 并且列车受客流及天气等时变因素影响, 致使多列车系统非线性强, 模型难以精确建立. 对多智能体列车系统 (1), 通过欧拉差分法^[17] 将其离散化为

$$v_i(t + 1) = v_i(t) + t_s(u_i(t) - F_i(t)), \quad (5)$$

其中 t_s 是列车的采样时间.

实际中, 列车运行过程在 $t + 1$ 时刻的速度, 不仅与 t 时刻的速度有关, 还与 $t - 1$ 时刻的速度有关. 另外, 由于 $F_i(t)$ 是与 $v_i(t)$ 相关的总阻力, 实际中往往难以精确获取, 故将式 (5) 改写为一般离散时间非线性系统^[11], 即

$$v_i(t+1) = f(v_i(t), v_i(t-1), u_i(t)). \quad (6)$$

其中: $f(\cdot)$ 是未知的非线性函数, $v_i(t)$ 和 $u_i(t)$ 分别是列车 i 第 t 时刻的输出速度和牵引力/制动力.

注 1 为简化符号以及避免过多符号引起混淆的问题, 式 (5) 和 (6) 仍然用 t 表述离散的运行时刻.

1.3 多列车系统动态线性化

为便于分析, 对多列车系统 (6) 作以下假设.

假设 1 非线性函数 $f(\cdot)$ 关于控制输入 $u_i(t)$ 的偏导数是连续的.

假设 2 系统 (6) 满足广义 Lipschitz 条件, 即对于所有 t 以及 $|\Delta u_i(t)| \neq 0$ 时, 有

$$|\Delta v_i(t+1)| \leq p \|\mathbf{H}_i(t) - \mathbf{H}_i(t-1)\|.$$

其中: $\Delta v_i(t+1) = v_i(t+1) - v_i(t)$, $\mathbf{H}_i(t) = [v_i(t), v_i(t-1), u_i(t)]^T$, $p > 0$ 是一个常数.

注 2 上述假设对多列车系统而言是合理的. 假设 1 是一般非线性系统均适用的典型条件. 假设 2 是多列车系统固有的力学特性, 牵引力/制动力的有限变化不会引起速度的无限变化. 此外, 从能量的角度看, 该假设是对实际系统的物理约束^[18-19].

引理 1^[6] 对于满足假设 1 和假设 2 的非线性系统 (6), 对所有 t 时刻有 $\|\Delta \mathbf{H}_i(t) \neq 0\|$ 时, 一定存在一个被称为伪梯度 (PG) 的有界时变参数向量 $\Phi_i \in R^3$, 使得系统 (6) 可等价转化为如下数据模型:

$$\Delta v_i(t+1) = \Phi_i^T(t) \Delta \mathbf{H}_i(t). \quad (7)$$

其中: $\Delta \mathbf{H}_i(t) = \mathbf{H}_i(t) - \mathbf{H}_i(t-1)$, 伪梯度向量 $\Phi_i(t) = [\phi_{i1}(t), \phi_{i2}(t), \phi_{i3}(t)]^T$ 在任意时刻 t 都是有界的, 即存在正数 $b_1, b_2, \underline{b}_3, \bar{b}_3$, 满足 $|\phi_{i1}| \leq b_1, |\phi_{i2}| \leq b_2, \underline{b}_3 \leq |\phi_{i3}| \leq \bar{b}_3, \|\Phi_i(t)\| \leq b = \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + \bar{b}_3^2}$.

证明过程参考文献 [6] 中定理 3.4, 取输出伪阶数 $L_y = 2$, 输入伪阶数 $L_u = 1$ 的情况.

注 3 列车在实际运行过程中可能受噪声及天气等扰动因素影响, 故当存在扰动变量 $\omega(t)$ 满足 $|\omega(t)| < b_\omega$ 时, 输出 $v_i(t)$ 实际为 $v_{im}(t) = v_i(t) + \omega(t)$, 其中 b_ω 是有界正数. 如果存在扰动, 方法可做适当的修改, 无本质困难.

在实际多列车系统中, 为保证列车安全运行, 牵引力/制动力 $u_i(t)$ 不能超过列车 i 提供的最大力, 这意味着需要满足以下饱和函数^[15]:

$$\bar{u}_i(t) = \text{sat}[u_i(t)] = \begin{cases} u_{\min}(t), & u_i < u_{\min}; \\ u_i(t), & u_{\min} \leq u_i \leq u_{\max}; \\ u_{\max}(t), & u_i > u_{\max}, \end{cases} \quad (8)$$

其中 $u_{\max}(t)$ 和 $u_{\min}(t)$ 分别是牵引力/制动力 $u_i(t)$ 允许的最大值和最小值.

1.4 控制目标

该策略的控制目标是在牵引力/制动力约束下设计一种带有避碰机制的分布式 MFAPID 控制算法, 实现列车在安全距离范围内运行, 并保证列车速度跟踪期望速度. 即对于 $\forall t \in \{1, 2, \dots, T\}$, 列车的速度跟踪误差 $e_i(t) = v_d(t) - v_i(t)$ 是有界收敛的, 并有 $\lim_{t \rightarrow \infty} |e_i(t)| = \varpi$, 其中 $\varpi = \frac{bk_i L}{1 - (d_1 + d_2)}$.

2 MFAPID 控制器系统设计

为实现列车的安全运行, 跟随列车必须能够接收到前车的信息^[15], 并且设定满足初始化条件为 $v_i(0) = 0, s_{i-1}(0) - s_i(0) = d_0, i = 1, 2, \dots, N$, 其中 $v_i(0)$ 和 $s_i(0)$ 分别表示列车初始时刻的速度和位置.

针对实际列车问题, 相邻列车输出误差 $\xi_i(t)$ 具体可描述为

$$\xi_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij}(v_j(t) - v_i(t)) + d_i(v_d(t) - v_i(t)), \quad (9)$$

其中 $v_d(t)$ 是列车运行的期望函数曲线, 并设定有 $v_d(t+1) = v_d = \text{const}$.

考虑如下关于控制输入准则函数:

$$J(u_i(t)) = \left| \sum_{j \in N_i} a_{ij}(v_j(t) - v_i(t+1)) + d_i(v_d(t+1) - v_i(t+1)) \right|^2 + \lambda_i |\Delta u_i(t)|^2, \quad (10)$$

其中 $\lambda_i > 0$ 是权重因子.

注 4 式 (10) 中的第 1 项 $\sum_{j \in N_i} a_{ij}(v_j(t) - v_i(t+1))$ 描述了列车 i 与相邻列车间的局部误差, $v_d(t+1) - v_i(t+1)$ 描述了列车 i 与期望运行轨迹间的误差; 第 2 项用来限制控制输入的变化.

将数据模型 (7) 代入式 (10) 中, 并对输入 $u_i(t)$ 求极值, 可得如下控制算法:

$$u_i(t) = u_i(t-1) + \frac{\left(\sum_{j \in N_i} a_{ij} + d_i \right) \phi_{i3}(t) \xi_i(t)}{\lambda_i + \left| \left(\sum_{j \in N_i} a_{ij} + d_i \right) \phi_{i3}(t) \right|^2} - \frac{\left(\sum_{j \in N_i} a_{ij} + d_i \right)^2 \phi_{i3}(t) [\phi_{i1}(t) \Delta v_i(t) + \phi_{i2}(t) \Delta v_i(t-1)]}{\lambda_i + \left| \left(\sum_{j \in N_i} a_{ij} + d_i \right) \phi_{i3}(t) \right|^2}. \quad (11)$$

考虑 PG 向量的估计准则函数如下:

$$J(\hat{\Phi}_i(t)) = |\Delta v_i(t) - \hat{\Phi}_i^T(t)\Delta H_i(t-1)|^2 + \mu_i \|\hat{\Phi}_i(t) - \hat{\Phi}_i(t-1)\|^2. \quad (12)$$

其中: $\Delta H_i(t) = [\Delta v_i(t), \Delta v_i(t-1), \Delta \bar{u}_i(t)]^T$, $\mu_i > 0$ 是权重因子, $\hat{\Phi}_i(t)$ 是 $\Phi_i(t)$ 的估计值.

根据最优条件, 利用矩阵求逆原理, 对 PG 求极值, 可得如下估计算法:

$$\Delta \hat{\Phi}_i(t) = \frac{\eta_i \Delta H(t-1)(v_i(t) - v_i(t-1))}{\mu_i + \|\Delta H(t-1)\|^2} - \frac{\eta_i \Delta H_i(t-1)\hat{\Phi}_i(t-1)\Delta H_i(t-1)}{\mu_i + \|\Delta H(t-1)\|^2}. \quad (13)$$

其中: $\Delta \hat{\Phi}_i(t) = \hat{\Phi}_i(t) - \hat{\Phi}_i(t-1)$, $\hat{\Phi}_i(t) = [\hat{\phi}_{i1}(t), \hat{\phi}_{i2}(t), \hat{\phi}_{i3}(t)]^T$, 步长因子 $\eta_i \in (0, 2]$ 是为了使算法更具有灵活性, $\mu_i > 0$ 是权重因子.

控制器 (11) 中只考虑了速度跟踪, 为提高列车的安全性, 有必要增加牵引力/制动力饱和以及追尾防护机制. 根据 $v_d = \text{const}$, 可得 $\Delta v_i(t) = -\Delta e_i(t)$. 因此, 结合式 (8)、(11) 以及 (13), 针对列车 i 设计的带有牵引力/制动力约束和追尾防护功能的分布式 MFAPID 控制算法如下:

$$\Delta \hat{\Phi}_i(t) = \frac{\eta_i \Delta H(t-1)(v_i(t) - v_i(t-1))}{\mu_i + \|\Delta H(t-1)\|^2} - \frac{\eta_i \Delta H_i(t-1)\hat{\Phi}_i(t-1)\Delta H_i(t-1)}{\mu_i + \|\Delta H(t-1)\|^2}, \quad (14)$$

$$\hat{\Phi}_i(t) = \hat{\Phi}_i(1), \|\hat{\Phi}_i(t)\| \leq \varepsilon \text{ or } \|\Delta H_i(t-1)\| \leq \varepsilon \text{ or } \text{sign}(\hat{\Phi}_i(t)) \neq \text{sign}(\hat{\Phi}_i(1)); \quad (15)$$

$$u_i(t) = \bar{u}_i(t-1) + \hat{K}_{P,i}(t)\Delta e_i(t) + \hat{K}_{I,i}(t)\xi_i(t) + \hat{K}_{D,i}(t)[\Delta e_i(t) - \Delta e_i(t-1)] - k_i(d_0 - \bar{s}_i(t)), \quad (16)$$

$$\bar{u}_i(t) = \text{sat}[u_i(t)]. \quad (17)$$

其中

$$\hat{K}_{P,i}(t) = \frac{\rho_i \left(\sum_{j \in N_i} a_{ij} + d_i \right)^2 \hat{\phi}_{i3}(t) [\hat{\phi}_{i1}(t) + \hat{\phi}_{i2}(t)]}{\lambda_i + \left| \left(\sum_{j \in N_i} a_{ij} + d_i \right) \hat{\phi}_{i3}(t) \right|^2},$$

$$\hat{K}_{I,i}(t) = \frac{\rho_i \left(\sum_{j \in N_i} a_{ij} + d_i \right) \hat{\phi}_{i3}(t)}{\lambda_i + \left| \left(\sum_{j \in N_i} a_{ij} + d_i \right) \hat{\phi}_{i3}(t) \right|^2},$$

$$\hat{K}_{D,i}(t) = \frac{-\rho_i \left(\sum_{j \in N_i} a_{ij} + d_i \right)^2 \hat{\phi}_{i3}(t) \hat{\phi}_{i2}(t)}{\lambda_i + \left| \left(\sum_{j \in N_i} a_{ij} + d_i \right) \hat{\phi}_{i3}(t) \right|^2},$$

$k_i > 0$ 是避免碰撞的增益调节因子; d_0 表示相邻列车期望的距离; $\bar{s}_i(t) = s_{i-1}(t) - s_i(t)$ 表示列车 i 与前向列车间的距离, 并满足 $d_{\min} \leq \bar{s}_i(t) \leq d_{\max}$, d_{\min} 表示相邻列车间最小安全距离, d_{\max} 表示相邻列车间最大安全距离; $s_i(t)$ 表示列车 i 在 t 时刻的位置; $\varepsilon > 0$ 是一个任意小的数; 调节因子 $\rho_i \in (0, 1]$; $\hat{\Phi}_i(1)$ 是 $\hat{\Phi}_i(t)$ 的初始估计值.

注 5 重置算法机制 (15) 的引入提高了式 (14) 中 PG 向量参数的跟踪能力. 式 (16) 中 $-k_i(d_0 - \bar{s}_i(t))$ 是为列车安全增加的避碰反馈机制. 当 $d_0 = \bar{s}_i(t)$ 时, 列车间距理想, 此时避碰反馈机制不作用. 当 $d_0 > \bar{s}_i(t)$ 时, 列车间距小于理想安全距离, 避碰机制作用, 制动力增加, 输入减小, 车距增加; 当 $d_0 < \bar{s}_i(t)$ 时, 列车间距大于理想安全距离, 避碰机制作用, 牵引力增加, 输入增大, 车距减少. 从式 (14) ~ (17) 可知, 相较于文献 [20] 设计的无模型自适应 PID 控制算法, 本节设计的 MFAPID 控制算法具有牵引力/制动力约束和追尾防护的功能. 相较于传统 PID, 调节因子 ρ_i 的加入使 PID 三个参数调节更加灵活.

3 收敛性分析

为了方便分析, 给出以下引理和假设.

引理 2^[21] 设 $A_1 \in R^{N \times N}$ 对于任意给定的 $\delta > 0$ 一定存在一个诱导的矩阵范数 $\|\cdot\|_v$, 使得

$$\|A_1\|_v \leq s(A_1) + \delta. \quad (18)$$

引理 3^[15] 列车 i 在牵引力/制动力约束下的输入 u_i 满足

$$\Delta \bar{u}_i(t) = g(t)\Delta u_i(t), \quad (19)$$

其中 $0 \leq g(t) \leq 1$.

假设 3^[22] 假设对于 $\forall t \in \{1, \dots, T\}$, $\phi_{i3}(t)$ 的符号已知且保持不变. 为不失一般性, 本文只考虑了 $\phi_{i3}(t) > \omega > 0$ 的情况, 其中 ω 是任意小的正常数.

注 6 假设 3 类似于基于模型控制理论^[23] 中关于控制方向已知的假设, 其物理意义可概括为非线性系统的准线性特性, 即增加控制输入不应导致系统输出的减少. 这一假设也适用于其他的系统, 如温控系统、压力控制系统等.

定理 1 对于满足假设 1 ~ 假设 3 的非线性系统 (6), 针对多列车控制系统采用 MFAPID 控制方

案(14)~(17)时, PID参数 Ω_{PID} 满足

$$\Omega_{PID} = \begin{cases} \tau \frac{|g(t)\hat{K}_{D,i}| + \sqrt{\theta}}{2} < g(t)b_3\hat{K}_{I,i}, \theta > 0; \\ \tau\sqrt{\kappa} < g(t)b_3\hat{K}_{I,i}, \theta < 0. \end{cases}$$

其中: $\tau = \max\{1, |\phi_{i2}|\}$, $\kappa = g(t)(\hat{K}_{P,i} + \hat{K}_{D,i})$, $\theta = g^2(t)\hat{K}_{D,i}^2 - 4g(t)(\hat{K}_{P,i} + \hat{K}_{D,i})$. 选取合适的 ρ_i 满足 $\rho_i < 1 / (\max_{j \in N_i} \sum a_{i,j} + d_i)$, 总存在正数 $\lambda_{\min} > 0$, 当 $\lambda_i > \lambda_{\min}$ 时, 对于 $\forall t \in \{1, \dots, T\}$ 存在伪梯度(PG)向量的估计值 $\hat{\Phi}_i(t)$ 有界, 跟踪误差 $e_i(t)$ 是有界收敛的, 并有 $\lim_{t \rightarrow \infty} |e_i(t)| = \varpi$, 其中 $\varpi = \frac{bk_iL}{1 - (d_1 + d_2)}$.

证明 证明由两部分组成. 第1部分证明PG向量的估计值 $\hat{\Phi}_i(t)$ 有界, 第2部分证明跟踪误差 $e_i(t)$ 的有界性, 其中 $\hat{\Phi}_i(t)$ 的有界性证明请参见文献[6].

证明跟踪误差 $e_i(t)$ 的有界性. 根据跟踪误差 $e_i(t)$ 的定义及 $v_d = \text{const}$ 可得

$$e_i(t+1) = v_d(t+1) - v_i(t+1) = e_i(t) - \Phi_i^T(t)\Delta H_i(t). \quad (20)$$

通过引理3可知, 当 $u_i(t) \in [u_{\min}, u_{\max}]$ 时, $\bar{u}_i(t) = u_i(t)$. 当 $u_i(t) > u_{\max}$ 或 $u_i(t) < u_{\min}$ 时, $\bar{u}_i(t) = g(t)u_i(t)$. 因此根据 $\Delta v_i(t) = -\Delta e_i(t)$ 以及式(16), 可将牵引力/制动力约束下的输入 $\bar{u}_i(t)$ 转换为

$$\begin{aligned} \Delta \bar{u}_i(t) &= g(t)\Delta u_i(t) = \\ &g(t)[(-\hat{K}_{P,i} - \hat{K}_{D,i})\Delta v_i(t) + \hat{K}_{I,i}\xi_i(t) + \\ &\hat{K}_{D,i}\Delta v_i(t-1) - k_i(d_0 - \bar{s}_i(t))]. \end{aligned} \quad (21)$$

通过式(9)及参考文献[9]可知, 相邻列车输出误差 $\xi_i(t)$ 可转换为 $\xi_i(t) = (L+D)e_i(t)$. 令 $S_i(t) = d_0 - \bar{s}_i(t)$, 并将式(21)代入到 $\Delta H_i(t)$ 中, 可得

$$\begin{aligned} \Delta H_i(t) &= \\ &g(t)[0 \ 0 \ \hat{K}_{I,i}(L+D)]^T e_i(t) + \\ &ABCD\Delta H_i(t-1) - g(t)[0 \ 0 \ k_i]^T S_i(t). \end{aligned} \quad (22)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -g(t)(\hat{K}_{P,i} + \hat{K}_{D,i}) & g(t)\hat{K}_{D,i} \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \phi_{i3}(t-1) & \phi_{i1}(t-1) & \phi_{i2}(t-1) \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

将式(22)代入(20), 对 $e_i(t+1)$ 分析可得

$$\begin{aligned} |e_i(t+1)| &\leq \\ &\|ABCD\| \|\Phi_i^T(t)\| \|\Delta H_i(t-1)\| + \\ &\phi_{i3}k_i|S_i(t)| + |1 - g(t)\hat{K}_{I,i}(L+D)\phi_{i3}(t)| |e_i(t)|. \end{aligned} \quad (23)$$

取 $\lambda_{\min} = \frac{(b + \bar{b}_3)^2}{4}$, 利用不等式 $\partial^2 + \beta^2 \geq 2\partial\beta$ 及条件 ρ_i 的取值可使得式(23)中部分不等式 $g(t)\hat{K}_{I,i}(L+D)\phi_{i3}(t)$ 有

$$\begin{aligned} 0 < g(t)\hat{K}_{I,i}(t)(L(t) + D(t))\phi_{i3}(t) &= \\ &g(t)\rho_i \left(\sum_{j \in N_i} a_{i,j} + d_i \right)^2 \hat{\phi}_{i3}(t)\phi_{i3}(t) \\ &\frac{\rho_i \left(\sum_{j \in N_i} a_{i,j} + d_i \right) \phi_{i3}(t)}{2\sqrt{\lambda_i}} \leq \\ &\frac{\phi_{i3}(t)}{2\sqrt{\lambda_i}} \leq \frac{\bar{b}_3}{2\sqrt{\lambda_i}} < 1. \end{aligned} \quad (24)$$

对式(24)分析得, 一定存在一个 $d_1 \in (0, 1)$ 使得

$$0 < d_1 = 1 - g(t)\hat{K}_{I,i}(L+D)\phi_{i3}(t) < 1. \quad (25)$$

为进一步计算相容矩阵范数 $\|ABCD\|_v$, 分别求解矩阵 A 、 B 、 C 、 D 的相容范数.

当判别式 $g^2(t)\hat{K}_{D,i}^2 - 4g(t)(\hat{K}_{P,i} + \hat{K}_{D,i}) = \theta > 0$ 时, 对矩阵 A 求取特征值, 有

$$|\lambda_A|_{\max} = \frac{|g(t)\hat{K}_{D,i}| + \sqrt{\theta}}{2}; \quad (26)$$

当判别式 $\theta < 0$ 时, 对矩阵 A 求取特征值, 有

$$|\lambda_A|_{\max} = \sqrt{g(t)(\hat{K}_{P,i} + \hat{K}_{D,i})}. \quad (27)$$

由引理2可知, 矩阵 A 的相容矩阵范数满足

$$\|A\|_v \leq \max \left\{ \frac{|g(t)\hat{K}_{D,i}| + \sqrt{\theta}}{2}, \sqrt{g(t)(\hat{K}_{P,i} + \hat{K}_{D,i})} \right\} + \delta. \quad (28)$$

令

$$\varsigma = \max \left\{ \frac{|g(t)\hat{K}_{D,i}| + \sqrt{\theta}}{2}, \sqrt{g(t)(\hat{K}_{P,i} + \hat{K}_{D,i})} \right\},$$

则式(28)可转化为

$$\|A\|_v \leq \varsigma + \delta. \quad (29)$$

同理, 分别对矩阵 B 、 C 、 D 求取特征值, 并求矩阵的相容范数, 有

$$\begin{cases} \|B\|_v \leq 1 + \delta, \\ \|C\|_v \leq \tau + \delta, \\ \|D\|_v \leq 1 + \delta. \end{cases} \quad (30)$$

其中 $\tau = \max\{1, |\phi_{i2}|\} > 0$.

根据式 (29) 和 (30), 针对相容矩阵范数 $\|ABCD\|_v$ 有

$$\begin{aligned} & \|ABCD\|_v \leq \\ & \|A\|_v \|B\|_v \|C\|_v \|D\|_v \leq \\ & (\varsigma + \delta)(\tau + \delta)(1 + \delta)^2 \leq \\ & \varsigma\tau + \varsigma\delta + \delta(\tau + \delta) + \\ & (2\delta + \delta^2)(\varsigma + \delta)(\tau + \delta) := d_2. \end{aligned} \quad (31)$$

根据定理 1 中 PID 参数 Ω_{PID} 的取值对式 (31) 进行分析, 有

$$\varsigma \max\{1, |\phi_{i2}|\} \leq \varsigma\tau < \hat{K}_{I,i} \bar{b}_3 \leq \hat{K}_{I,i} \bar{b}_3 < 1. \quad (32)$$

于是对于任意小的 δ 有

$$0 < d_2 < 1. \quad (33)$$

对式 (22) 两边取范数, 并利用式 (31) 有

$$\begin{aligned} \|\Delta H_i(t)\| & \leq d_2 \|\Delta H_i(t-1)\| + k_i |S_i(t)| + \\ & \hat{K}_{I,i}(L+D) |e_i(t)| \leq \dots \leq \\ & d_2^t \|\Delta H_i(0)\| + k_i \sum_{j=1}^t d_2^{t-j} |S_i(j)| + \\ & \hat{K}_{I,i}(L+D) \sum_{j=1}^t d_2^{t-j} |e_i(j)|. \end{aligned} \quad (34)$$

结合式 (22)、(23)、(25) 和 (34) 可得

$$\begin{aligned} & |e_i(t+1)| \leq \\ & d_1 |e_i(t)| + \phi_{i3} k_i |S_i(t)| + \\ & d_2 \|\Phi_i^T(t)\| \|\Delta H_i(t-1)\| \leq \\ & d_1^t |e_i(1)| + \phi_{i3} k_i \sum_{j=1}^t d_1^{t-j} |S_i(j)| + \\ & d_2 \sum_{j=0}^{t-1} d_1^{t-1-j} \|\Phi_i^T(j+1)\| \|\Delta H_i(j)\| \leq \\ & d_1^t |e_i(1)| + b k_i \sum_{j=1}^t d_1^{t-j} |S_i(j)| + \\ & d_2 b \sum_{j=0}^{t-1} d_1^{t-1-j} \left[d_2^j \|\Delta H_i(0)\| + \hat{K}_{I,i}(L+ \right. \\ & \left. D) \sum_{p=1}^j d_2^{j-p} |e_i(p)| + k_i \sum_{p=1}^j d_2^{j-p} |S_i(p)| \right] \leq \\ & d_1^t |e_i(1)| + b k_i \sum_{j=1}^t d_1^{t-j} |S_i(j)| + \\ & d_4 \sum_{j=0}^{t-1} d_1^{t-1-j} \sum_{p=1}^j d_2^{j-p} |S_i(p)| + \\ & d_2 b \sum_{j=0}^{t-1} d_1^{t-1-j} d_2^j \|\Delta H_i(0)\| + \\ & d_2 d_3 \sum_{j=0}^{t-1} d_1^{t-1-j} \sum_{p=1}^j d_2^{j-p} |e_i(p)| := h(t+1). \end{aligned} \quad (35)$$

其中: $d_3 = b\hat{K}_{I,i}(L+D)$, $d_4 = d_2 b k_i$.

通过式 (35) 中 $h(t+1)$ 可得

$$\begin{aligned} & h(t+2) = \\ & d_1 h(t+1) + b d_2^{t+1} \|\Delta H_i(0)\| + b k_i |S_i(t+1)| + \\ & d_4 \sum_{p=1}^t d_2^{t-p} |S_i(p)| + d_2 d_3 \sum_{p=1}^t d_2^{t-p} |e_i(p)| \leq \\ & d_1 h(t+1) + b d_2^{t+1} \|\Delta H_i(0)\| + \\ & d_4 \sum_{p=1}^t d_2^{t-p} |S_i(p)| + b k_i |S_i(t+1)| + \\ & d_3 (d_2^t |e_i(1)| + \dots + d_2^2 |e_i(t-1)| + d_2 |h(t)|) := \\ & d_1 h(t+1) + r(t). \end{aligned} \quad (36)$$

由于 $\lambda_{\min} = \frac{(b + \bar{b}_3)^2}{4}$, 取合适的 $\lambda_i > \lambda_{\min}$ 时可

满足

$$\begin{aligned} d_3 & = b\hat{K}_{I,i}(L+D) < \\ & 1 - \hat{K}_{I,i}(L+D)\bar{b}_3 < \\ & 1 - g(t)\hat{K}_{I,i}(L+D)\phi_{i3} = d_1. \end{aligned} \quad (37)$$

通过式 (37) 对 (36) 中表达式 $r(t)$ 分析得

$$\begin{aligned} & r(t) = \\ & b d_2^{t+1} \|\Delta H_i(0)\| + d_4 \sum_{p=1}^t d_2^{t-p} |S_i(p)| + b k_i |S_i(t+1)| + \\ & d_3 (d_2^t |e_i(1)| + \dots + d_2^2 |e_i(t-1)| + d_2 |h(t)|) = \\ & b d_2^{t+1} \|\Delta H_i(0)\| + d_4 \sum_{p=1}^t d_2^{t-p} |S_i(p)| + \\ & d_3 (d_2^t |e_i(1)| + \dots + d_2^2 |e_i(t-1)|) + \\ & d_2 d_3 \left(d_1^{t-1} |e_i(1)| + d_2 b \sum_{j=0}^{t-2} d_1^{t-2-j} d_2^j \|\Delta H_i(0)\| + \right. \\ & \left. d_2 d_3 \sum_{j=0}^{t-2} d_1^{t-2-j} \sum_{p=1}^j d_2^{j-p} |e_i(p)| + \right. \\ & \left. d_4 \sum_{j=0}^{t-2} d_1^{t-2-j} \sum_{p=1}^j d_2^{j-p} |S_i(p)| + \right. \\ & \left. b k_i \sum_{j=1}^{t-1} d_1^{t-1-j} |S_i(j)| \right) + b k_i |S_i(t+1)| \leq \\ & d_2 d_1^t |e_i(1)| + b d_2^{t+1} \|\Delta H_i(0)\| + \\ & d_2^2 b \sum_{j=0}^{t-2} d_1^{t-1-j} d_2^j \|\Delta H_i(0)\| + \\ & d_2^2 d_3 \sum_{j=0}^{t-2} d_1^{t-1-j} \sum_{p=1}^j d_2^{j-p} |e_i(p)| + \\ & d_2^2 d_3 (d_2^{t-2} |e_i(1)| + \dots + |e_i(t-1)|) + \\ & d_2 d_4 \sum_{j=0}^{t-2} d_1^{t-1-j} \sum_{p=1}^j d_2^{j-p} |S_i(p)| + \\ & d_2 d_4 (d_2^{t-2} |S_i(1)| + \dots + |S_i(t-1)|) + \end{aligned}$$

$$d_2 b k_i \sum_{j=1}^{t-1} d_1^{t-j} |S_i(t)| + d_4 |S_i(t)| + b k_i |S_i(t+1)| := d_2 h(t+1) + b k_i |S_i(t+1)|. \quad (38)$$

参考文献 [15] 的附录 A 可知, 列车在实际运行过程中, 列车间的距离 $\bar{s}_i(t)$ 是有界的, 故存在一个正数 L , 满足避碰机制 $S_i(t) = d_0 - \bar{s}_i(t)$, 有 $|S_i(t)| < L$. 将式 (38) 代入 (36) 可得

$$h(t+2) \leq (d_1 + d_2)h(t+1) + b k_i L. \quad (39)$$

通过 PID 参数 Ω_{PID} 的取值可推断出

$$0 < 1 - g(t) \hat{K}_{I,i}(L + D) \phi_{i3}(t) + \varsigma \tau < 1 - g(t) \hat{K}_{I,i} b_3 + \varsigma \tau < 1. \quad (40)$$

由 d_2 中 δ 的任意小性, 结合式 (40) 有

$$0 < d_1 + d_2 < 1. \quad (41)$$

结合式 (39) 和 (41) 有

$$h(t+2) \leq (d_1 + d_2)h(t+1) + b k_i L \leq \dots \leq (d_1 + d_2)^t h(2) + \frac{1 - (d_1 + d_2)^t}{1 - (d_1 + d_2)} b k_i L. \quad (42)$$

将式 (42) 代入 (35) 可得

$$|e_i(t+1)| \leq h(t+1) \leq \dots \leq (d_1 + d_2)^{t-1} h(2) + \frac{1 - (d_1 + d_2)^{t-1}}{1 - (d_1 + d_2)} b k_i L. \quad (43)$$

故有 $\lim_{t \rightarrow \infty} |e_i(t)| = \frac{b k_i L}{1 - (d_1 + d_2)} = \varpi$. \square

注 7 定理 1 中误差的上界 ϖ 是与避碰机制上界 L 有关的函数. 当列车间距大于或小于理想安全距离时, 避碰机制作用, 此时跟踪误差是有界收敛的, 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} |e_i(t)| = \varpi$; 当列车间距等于理想安全距离时, 避碰机制不作用, 此时 $L = 0$, 则有 $\lim_{t \rightarrow \infty} |e_i(t)| = 0$, 跟踪误差收敛.

4 仿真研究

4.1 仿真环境设置

为验证算法的有效性, 本文对 CRH2-A 型多列车系统进行了数值仿真. 系统模型仅用于生成 I/O 数据, 与控制器方案设计无关. 设采样时间为 $t_s = 1$ s, 期望的操作时间间隔为 $[0, 2000]$ s, 列车期望运行速度轨迹 v_d 如图 2 所示^[24]. 列车的通信关系可表示如下:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}.$$

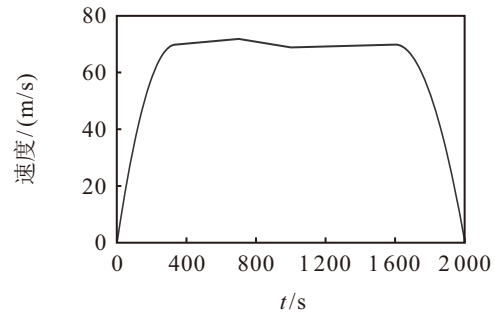


图2 列车期望速度轨迹

单位质量上的附加阻力 $f_{bi}(t)$ 如图 3 所示^[24]. 设定 3 辆列车的初始位置分别为 1 010 m、510 m 和 10 m, 列车之间最小安全距离为 $d_{\text{min}} = 300$ m, 最大安全距离为 $d_{\text{max}} = 800$ m, 期望安全距离 $d_0 = 500$ m.

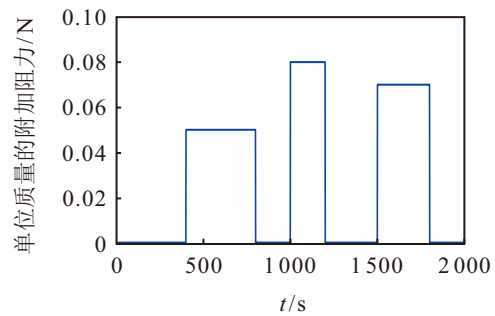


图3 单位质量的附加阻力

列车的基本阻力 $f_{ai}(t)$ ^[25] 如下所示:

$$\begin{aligned} c_{11}(t) &= 0.0054 + 0.0014 \times \sin(0.0038t), \\ c_{21}(t) &= 0.0012 + 1.3 \times 10^{-4} \times \sin(0.0038t), \\ c_{31}(t) &= 2.4 \times 10^{-5} + 0.5 \times 10^{-4} \times \sin(0.0038t), \\ c_{12}(t) &= 0.0064 + 0.0014 \times \sin(0.0038t), \\ c_{22}(t) &= 0.0011 + 1.4 \times 10^{-4} \times \sin(0.0038t), \\ c_{32}(t) &= 1.4 \times 10^{-5} + 0.5 \times 10^{-4} \times \sin(0.0038t), \\ c_{13}(t) &= 0.0069 + 0.0011 \times \sin(0.0038t), \\ c_{23}(t) &= 0.0007 + 1.3 \times 10^{-4} \times \sin(0.0038t), \\ c_{33}(t) &= 2.5 \times 10^{-5} + 1 \times 10^{-5} \times \sin(0.0038t). \end{aligned}$$

4.2 仿真结果

为验证所提 MFAPID 控制算法的有效性, 利用 Matlab 进行仿真, 并与传统 PID 控制算法^[26]、CFDL-MFAC 算法^[27] 以及 PFDL-MFAC 算法^[6] 进行仿真对比. 列车速度跟踪均方误差可定义为

$$\text{MSE}_i = \frac{1}{2000} \sum_{t=1}^{2000} (v_d(t) - v_i(t))^2.$$

设定列车初始时刻的输入为 $u_i(1) = u_i(2) = 0.1$, 初始速度为 $v_i(1) = v_i(2) = 0$, $\mu_i = 1$, $k_i = 0.0001$, $\eta_i = 0.4$, 其中 $i = 1, 2, 3$. $\rho_1 = 0.45$, $\rho_2 = 0.48$, $\rho_3 = 0.2$, $u_{\text{min}} = -0.5$, $u_{\text{max}} = 0.5$, $\varepsilon = 10^{-5}$. 各列车 PG 向量的初值为 $\Phi_1(1) = \Phi_1(2) = [0.45, 0.9, 0.5]^T$, $\Phi_2(1) = \Phi_2(2) = [0.15, 0.6, 0.2]^T$, $\Phi_3(1)$

$$= \Phi_3(2) = [0.2, 0.5, 0.25]^T.$$

图4是MFAPID控制算法速度跟踪轨迹的仿真结果. 仿真显示MFAPID控制算法跟踪效果明显, 面对期望函数变动时, MFAPID控制算法具有较小的超调和波动, 并较快跟踪期望函数. 表1是不同控制方案下列车的性能对比, 从列车速度跟踪均方误差和列车速度跟踪最大误差角度分析, 相较于CFDL-MFAC算法, PFDL-MFAC算法以及传统PID算法, 本文设计的MFAPID控制算法有更小的误差, 更好的控制效果.

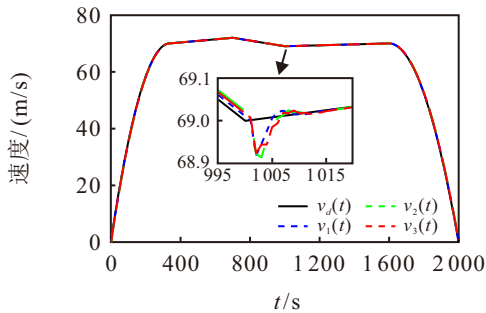
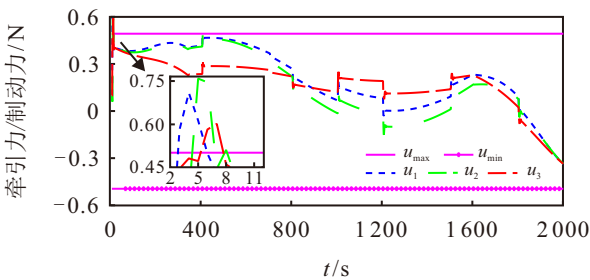


图4 MFAPID控制算法速度跟踪轨迹

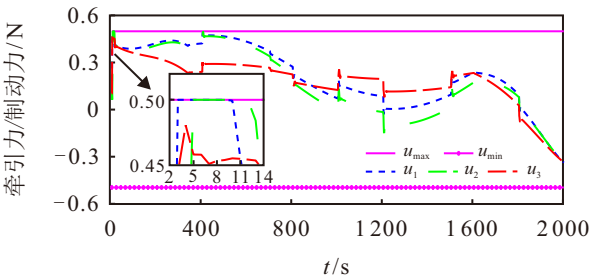
表1 不同控制方案下列车的性能对比

列车	MSE / e_{max}			
	CFDL-MFAC $L_u=1, L_y=0$	PFDL-MFAC $L_u=2, L_y=0$	PID $L_u=1, L_y=2$	MFAPID $L_u=1, L_y=2$
1	0.0964 / 1.9495	0.0370 / 1.6341	0.0398 / 1.8165	0.0206 / 1.1317
2	0.4983 / 3.2531	0.2731 / 2.9405	0.1256 / 2.8618	0.0836 / 1.5852
3	0.5264 / 3.6645	0.2894 / 3.2606	0.0699 / 1.9053	0.0527 / 1.1371

图5是无约束和带约束情况下MFAPID控制算法的输入. 从图5可以看出, 在无控制输入限定时, 系统所需的牵引力/制动力在开始时过大, 难以符合实际需求, 而在加入牵引力/制动力约束后有效防止



(a) 无控制输入约束情况下

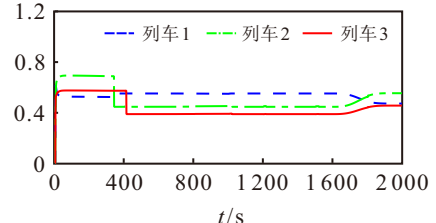


(b) 带控制输入约束情况下

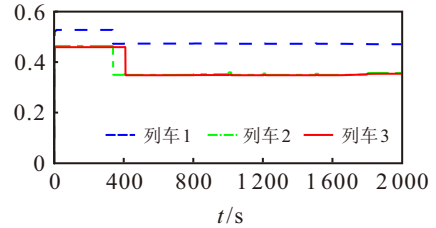
图5 MFAPID控制算法输入

了输入过大, 满足了实际的需求.

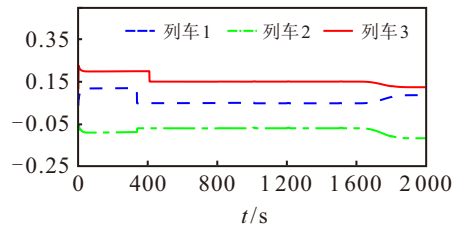
图6是MFAPID控制算法中PID的三参数变化情况. 图7是列车运行间距离, 仿真显示列车在避碰机制作用下始终在安全距离范围内运行, 没有发生碰撞行为.



(a) K_p



(b) K_i



(c) K_d

图6 PID参数

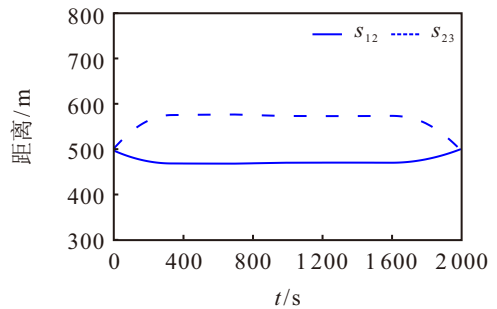


图7 列车运行间距离

为模拟更加真实的环境, 在系统中添加了扰动来进一步验证算法的有效性. 取扰动 $\omega(t) = 0.05 \sin\left(\frac{2\pi t}{500}\right) + 0.05 \text{randn}(1)$. 图8表明, 尽管受

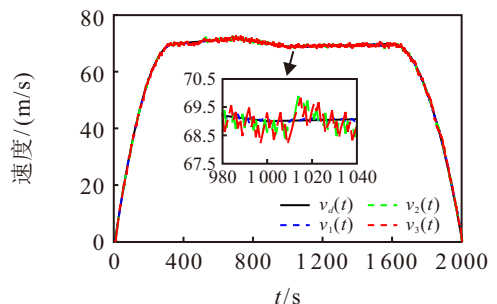


图8 扰动情况下MFAPID控制算法速度跟踪轨迹

扰动因素影响,列车跟踪效果相对减弱,但列车仍能有效跟踪期望函数目标.因此,MFAPID控制算法具有较强的鲁棒性.

5 结论

本文针对多列车系统,设计了一种具有牵引力/制动力约束和追尾防护功能的分布式MFAPID控制算法.与现有多列车控制算法相比,MFAPID控制算法只利用了列车运行时产生的I/O数据来实现,不依赖任何模型信息,而且控制器参数有自适应更新功能.控制方案的稳定性和收敛性已经得到了严谨证明,仿真结果也进一步表明了MFAPID控制算法的有效性.

参考文献 (References)

- [1] Dong H R, Ning B, Cai B G, et al. Automatic train control system development and simulation for high-speed railways[J]. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 2010, 10(2): 6-18.
- [2] Wang H W, Zhao Q Q, Lin S Y, et al. A reinforcement learning empowered cooperative control approach for ItoT-based virtually coupled train sets[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(7): 4935-4945.
- [3] 李中奇,王睿.重载列车多智能体模型的鲁棒一致性控制方法[J]. *控制与决策*, 2023, 38(5): 1448-1456. (Li Z Q, Wang R. Robust consistency control method for multi-agent model of heavy haul train[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(5): 1448-1456.)
- [4] Wang Q, Jin S T, Hou Z S. Cooperative MFAILC for multiple subway trains with actuator faults and actuator saturation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(8): 8164-8174.
- [5] Hou Z S, Jin S T. Data-driven model-free adaptive control for a class of MIMO nonlinear discrete-time systems[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2011, 22(12): 2173-2188.
- [6] Hou Z S, Jin S T. Model free adaptive control[M]. Boca Raton: CRC press, 2013.
- [7] Hou Z S, Xiong S S. On model-free adaptive control and its stability analysis[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 64(11): 4555-4569.
- [8] Xiong S S, Hou Z S. Model-free adaptive control for unknown MIMO nonaffine nonlinear discrete-time systems with experimental validation[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2022, 33(4): 1727-1739.
- [9] Bu X H, Yu Q X, Hou Z S, et al. Model free adaptive iterative learning consensus tracking control for a class of nonlinear multiagent systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 49(4): 677-686.
- [10] Zheng J M, Hou Z S. Data-driven spatial adaptive terminal iterative learning predictive control for automatic stop control of subway train with actuator saturation[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(10): 11453-11465.
- [11] 王海,刘根锋,侯忠生.高速列车数据驱动无模型自适应容错控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(5): 1127-1136. (Wang H, Liu G F, Hou Z S. Data-driven model-free adaptive fault tolerant control for high-speed trains[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(5): 1127-1136.)
- [12] 王洪力,侯忠生.流量处理能力均衡的无模型自适应迭代学习交通信号控制[J]. *控制与决策*, 2024, 39(9): 3033-3042. (Wang H L, Hou Z S. Model free adaptive iterative learning traffic signal control for balancing the intersection traffic flow[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(9): 3033-3042.)
- [13] 董海荣,高冰,宁滨,等.基于模糊PID软切换控制的列车自动驾驶系统调速制动[J]. *控制与决策*, 2010, 25(5): 794-796. (Dong H R, Gao B, Ning B, et al. Fuzzy-PID soft switching speed control of automatic train operation system[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(5): 794-796.)
- [14] Wang Q, Jin S T, Hou Z S. Compensation-based cooperative MFAILC for multiple subway trains under asynchronous data dropouts[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(12): 23750-23760.
- [15] Wang H J, Hou Z S. Model-free adaptive fault-tolerant control for subway trains with speed and traction/braking force constraints[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2020, 14(12): 1557-1566.
- [16] Xiong S S, Hou Z S. Stabilizing regions of PID controller for a class of unknown nonlinear non-affine discrete-time systems[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2022, 32(18): 9421-9437.
- [17] Zheng J M, Hou Z S. ESO-based model-free adaptive iterative learning energy-efficient control for subway train with disturbances and over-speed protection[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(8): 8136-8148.
- [18] Ai Q S, Ke D, Zuo J, et al. High-order model-free adaptive iterative learning control of pneumatic artificial muscle with enhanced convergence[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(11): 9548-9559.
- [19] Ren J C, Liu D, Wan Y. Model-free adaptive iterative learning control method for the czochralski silicon monocrystalline batch process[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2021, 34(3): 398-407.
- [20] Xiong S S, Hou Z S, Fan L L. Design of distributed model free adaptive PID controllers for heterogenous nonlinear multi-agent systems[C]. 2021 IEEE 10th Data Driven Control and Learning Systems Conference. Suzhou, 2021: 1558-1563.
- [21] Ortega J M, Rheinboldt W C. Iterative solution of

- nonlinear equations in several variables[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2000.
- [22] Hou Z S, Jin S T. A novel data-driven control approach for a class of discrete-time nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 19(6): 1549-1558.
- [23] Goodwin G C, Sin K S. Adaptive filtering prediction and control[M]. New York: Dover Publications, 2014.
- [24] Zheng J M, Hou Z S. Model free adaptive iterative learning control based fault-tolerant control for subway train with speed sensor fault and over-speed protection[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, 21(1): 168-180.
- [25] Wang Q, Jin S T, Hou Z S. Data-driven event-triggered cooperative control for multiple subway trains with switching topologies[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(9): 14702-14711.
- [26] Wang Z H, Zhang J. Incremental PID controller-based learning rate scheduler for stochastic gradient descent[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2024, 35(5): 7060-7071.
- [27] Bu X H, Hou Z S, Zhang H W. Data-driven multiagent systems consensus tracking using model free adaptive control[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2018, 29(5): 1514-1524.

作者简介

田帅涛 (1999-), 男, 硕士生, 主要研究方向为多列车系统无模型自适应 PID 控制, E-mail: tst66688@163.com;

侯忠生 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为数据驱动控制、无模型自适应控制、智能交通系统, E-mail: zshou@qdu.edu.cn.