

存在时滞与饱和的高速列车新型动态面漏斗控制策略

谢玟洪^{1,2}, 谭畅^{1,2}, 付方奕¹, 张艺耀¹

(1. 华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学江西省先进控制与优化重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 针对高速列车运行中存在的输入时滞与执行器饱和问题, 提出了一种新型动态面漏斗控制策略, 保证了控制系统的稳定性, 消除了时滞的影响, 并在没有饱和发生时列车拥有理想的跟踪性能。首先, 通过受力分析建立了存在输入时滞与饱和的高速列车纵向动力学模型。其次基于新型动态面控制框架, 通过设计动态补偿与约束机制, 解决了时滞与饱和的双重约束问题, 使跟踪误差始终被限制在动态漏斗边界内, 并在没有饱和发生时实现渐近跟踪。最后以 CRH380A 型高速列车为被控对象进行仿真验证, 仿真结果表明设计的控制器有效抑制了列车输入时滞效应, 且在列车出现输入饱和时保持稳定, 没有饱和发生时列车快速恢复理想的跟踪性能。所设计的方法能有效实现对输入时滞效应补偿和对输入饱和约束, 有效提高高速列车的安全性和可靠性。

关键词: 高速列车; 新型动态面; 动态漏斗; 输入饱和; 输入时滞

中图分类号: U260

文献标志码: A

A New Dynamic Surface Funnel Control Scheme for High-speed Trains with Time Delays and Saturation

Xie Wenhong^{1,2}, Tan Chang^{1,2}, Fu Fangyi¹, Zhang Yiyao¹

(1. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Key Laboratory of Advanced Control and Optimization of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To address the issues of input delay and actuator saturation in the operation of high-speed trains, a new dynamic surface funnel control scheme was proposed, which ensures the stability of the control system, eliminates the influence of delays, and enables the train to have ideal tracking performance without saturation. Firstly, a longitudinal dynamics model of the high-speed trains with input delay and saturation was established through force analysis. Then, based on the new dynamic surface control framework, a novel dynamic compensation and constraint mechanism was proposed to address the dual constraints of time delays and saturation, which ensures the tracking error was strictly confined within a dynamic funnel boundary and achieves asymptotic tracking without saturation. Finally, the CRH380A high-speed train was employed as the controlled object for simulation verification. The results show that the designed controller effectively suppresses the input delay effect of the train and remains stable when the input saturation occurs, and the train quickly recovers the ideal tracking performance without saturation. The proposed method can effectively compensate for the input delay effect and constrain the input saturation, effectively improving the operational safety and reliability of high-speed trains.

Key words: High-speed, New dynamic surface, Dynamic funnel, Input saturation, Input delay

高速列车控制系统是保障行车安全、实现列车系统智能运维的核心, 其性能直接影响运输能力和乘客体验^[1]。然而, 高速列车在实际运行过程中面临模型参数不确定性、外部干扰和执行机构约束等诸多挑战^[2-3]。其中, 控制系统中的时滞与执行器饱和效应尤为突出, 它们会显著降低系统的响应速度与控制精度, 甚至威胁行车安全^[4-5]。因此, 研究时滞与饱和约束下的列车控制方法, 对实现高速列车的精准、可靠控制具有重要意义。

针对列车输入时滞与饱和问题, 许多学者进行了相关研究, 余琼霞等^[6]提出了时滞执行器故障下的高速列车无模型自适应预测协同控制方法能同时处理时滞与执行器故障, 但没有考虑输入饱和限制问题。刘

洋等^[7]结合时滞补偿设计了基于多幂次趋近律的滑模控制器提升了系统鲁棒性,但未考虑输入时滞与饱和可能共存的问题。谭畅等^[8]针对具有不确定性参数和已知输入时滞的高速列车制动系统,设计的模型参考自适应制动控制策略实现了良好的控制效果,但其方法没有考虑系统中的时变时滞影响。TONG Y H 等^[9]考虑列车时变时滞和扰动特性进行模型建立,设计了有限时间状态估计器和有限时间控制器并实现了良好的控制效果。蔡亮成等^[10]利用线性化技术处理输入时滞对列车防滑控制的不良影响,但没有进一步考虑执行器的响应时滞和饱和特性。夏晓南^[11]和王清华^[12]等针对输入时变时滞的不确定非线性系统,设计了动态面控制方案拥有良好的瞬态和稳态控制性能,但没有考虑执行器的饱和约束问题。

动态面控制作为递归设计框架,通过结构化的分解和滤波技术,不仅能在参数不确定和外部扰动下保证系统的跟踪精度与稳定性,还在便于结合其他控制方法方面具有独特优势^[13-15]。高速列车控制系统面临输入时滞、参数不确定以及执行器饱和等多重制约。其中,输入饱和与时滞问题的交互耦合是恶化系统动态响应、威胁闭环稳定性的关键诱因。苏义鑫等^[16]在递归滑模动态面控制中引入饱和处理模块,解决了动力定位船舶的输入饱和问题。周章勇等^[17]将自适应神经网络方法与动态面控制结合,保证了战斗机在饱和情形下依然能精确跟踪控制。SHAO X F 等^[18]提出了一种非奇异延迟漏斗技术用于实现延迟漏斗约束控制。LIU C 等^[19]针对具有输入死区与饱和的问题,基于反步法构建了自适应模糊漏斗控制器,将饱和时的误差视为扰动用平滑函数逼近,但控制器的计算量较大。BERGER T^[20]在控制器中引入饱和检测项,通过动态调节漏斗边界在输入饱和时放宽性能要求,从而满足输入约束,但没有考虑可能存在的输入时滞问题。CHEN Q^[21]和 LIU X^[22]都将神经网络与漏斗控制引入到动态面框架,所设计的方法表现出了良好的跟踪控制性能,跟踪误差保持在预定义的漏斗内。ZHANG J X^[23]和于小川^[24]都将自适应预设性能控制与动态面结合,保证了系统跟踪误差在指定时间收敛在预设指标内。

针对高速列车运行中同时存在的输入时滞与输入饱和难题,本文提出了一种高速列车新型动态面漏斗控制策略。其创新点主要体现在以下三个方面:1) 该策略构建了统一的新型动态面控制结构,通过在动态面控制递归的最后一步中嵌入时滞补偿机制,实现了对输入时滞的系统性补偿,并运用新型动态面提升了系统瞬态性能。2) 设计了动态漏斗边界与非线性增益协同调节机制,使控制器能够依据饱和程度自适应协调跟踪性能与输入约束,在约束饱和输入时确保所有闭环信号有界,从而保证列车运行过程的稳定性。3) 该策略实现了瞬态平稳性与稳态精度的统一,在饱和发生时维持系统稳定,在没有饱和时保证对目标速度曲线的渐近跟踪控制,从而显著提升了高速列车在输入时滞与输入饱和共存下的安全性、可靠性与平稳性。

1 问题的提出

1.1 高速列车动力学模型

本文不考虑车厢间的相互作用力,将运行过程中的高速列车视为一个刚性质点并应用牛顿动力学第二定律对其进行受力分析。高速列车运行过程中所受的力主要包含基本阻力、列车牵引力/制动力,二者的合力决定了列车的运动状态。然后通过分析列车所受的力与列车运行速度、位移和时间之间的关系,得到高速列车运行过程动力学模型

$$\begin{cases} m\dot{v}(t) = F(t) - f(t) \\ \dot{s}(t) = v(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中: m 为列车总质量, $v(t)$ 和 $s(t)$ 分别是列车运行速度和运行位移, $F(t)$ 为列车受到的牵引力/制动力, $f(t)$ 是列车运行过程中受到的基本阻力,其与列车运行速度 $v(t)$ 呈二次函数的关系

$$f(t) = c_1 + c_2 v(t) + c_3 v^2(t) \quad (2)$$

其中： c_1 、 c_2 和 c_3 为基本阻力的系数，且大于0。其将随运行环境的改变而发生变化，从而使列车动力学模型存在不确定性，不可避免地影响列车控制效果和跟踪精度。

此外，控制输入在信号转换与执行环节存在大量时滞，例如列车缸压力从指令发出到完全建立需50-100 ms，而输入时滞的存在必将影响系统的控制性能。另一方面，执行机构由于物理限制，输出力有限。因此，本文在高速列车纵向动力学模型(1)的基础上进一步考虑输入时滞与饱和的影响，建立存在输入时滞与饱和的高速列车纵向动力学模型。

1.2 考虑输入时滞与饱和的列车模型

控制系统中的输入时滞 $\tau(t)$ 源于车地通信延迟波动及牵引/制动响应特性变化，且其时变范围与规律可通过数据与机理分析加以估计^[25]。为了使符号和传统控制系统一致，本文使用 $u(t)$ 来代表控制输入信号 $F(t)$ ，且为了表述时变时滞输入信号，本文进一步将 $u(t)$ 修正为 $u(t - \tau(t))$ ， $0 < \tau(t) < t$ 。

因此，高速列车动力学模型进一步改写为

$$\begin{cases} m\dot{v}(t) = u(t - \tau(t)) - (c_1 + c_2 v(t) + c_3 v^2(t)) \\ \dot{s}(t) = v(t) \end{cases} \quad (3)$$

此外，鉴于列车运行时执行器的物理限制，本文在高速列车控制系统动力学模型(3)中加入饱和函数，使得列车的控制输入被限制在执行器的输入饱和界限内，饱和非线性函数的表达式如下

$$\text{sat}(u(t - \tau)) = \begin{cases} N, & u(t - \tau) \geq N \\ u(t - \tau), & |u(t - \tau)| < N \\ -N, & u(t - \tau) \leq -N \end{cases} \quad (4)$$

其中， $u(t - \tau)$ 为所设计的实际控制输入， N 为控制输入的最大值。

因此，令 $x_1 = s(t)$ ， $x_2 = v(t)$ ，式(3)高速列车动力学模型可以改为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{m} \text{sat}(u(t - \tau(t))) - \frac{1}{m} (a_1 + a_2 x_2 + a_3 x_2^2) \end{cases} \quad (5)$$

根据所建立的列车动力学模型(5)可知，影响控制性能的核心问题主要体现在两方面：一是控制回路中存在的输入时滞，会显著降低系统的响应速度与跟踪精度；二是执行机构的输入饱和现象，即当理想控制指令超出实际执行能力时，系统进入非线性受限状态。二者均会造成速度跟踪效果严重恶化与闭环稳定性显著下降，进而威胁列车运行安全。

1.3 控制问题

鉴于动态面控制的框架清晰，便于结合其它控制方法，本文针对上述建立的存在输入时滞与饱和的高速列车非线性模型(5)，设计能够同时克服时滞与饱和约束的高速列车新型动态面漏斗控制策略，消除输入时滞对系统控制的影响，增强对高速列车饱和时的稳定控制，实现在没有饱和发生时对高速列车的速度/位移的渐近跟踪。

因此，本文的控制目标为：针对存在输入时滞与饱和的列车动力学模型(5)，在一个统一的动态面控制框架下，结合时滞补偿机制消除输入时滞的影响进而设计高速列车控制律 $u(t)$ ，使得其经过饱和函数 $\text{sat}(u)$ 作用后的实际控制输入 $\text{sat}(u(t))$ 能够保证所有闭环信号有界，并在没有饱和发生时，使列车位移和速度 $x(t)$ 渐近地跟踪给定的信号曲线 $x_d(t)$ 。

2 高速列车新型动态面漏斗控制器设计

为了实现 1.3 节中提出的控制目标, 本文提出的高速列车新型动态面漏斗控制器的设计过程如下。

2.1 新型动态面漏斗控制器设计

控制器设计核心流程可概括为四个环节: 动态漏斗约束设计、非线性滤波器设计、时滞补偿处理和自适应控制器综合设计。

2.1.1 动态漏斗约束设计

首先定义系统位移和速度跟踪误差为

$$e_1 = x_1 - x_d \quad (6)$$

其中: x_1 为列车实时位移, x_d 为列车理想位移曲线。

列车的位移跟踪误差受速度跟踪误差的影响, 而列车速度的变化由动力系统决定, 为保证在系统输入饱和时增大的跟踪误差被限制在漏斗边界内, 设计动态漏斗函数

$$\dot{\varphi}_1 = P_1 \varphi_2 - a_1 \varphi_1 + \beta_1 - P_1 \frac{\beta_2}{a_2} \quad (7)$$

$$\dot{\varphi}_2 = -a_2 \varphi_2 + \beta_2 + \varphi_2 \frac{\kappa(u(t-\tau))}{\|e_2\|} \quad (8)$$

其中 φ_1 和 φ_2 分别为位移跟踪误差 e_1 和速度跟踪误差 e_2 的漏斗边界函数, 动态漏斗的设计参数为 $P_1 > 1$ 、 $a_1 > a_2 > 0$ 、 $\beta > 0$, 漏斗函数的初始值即 $\varphi_i(0) > \beta_i / a_i$ 。通过该耦合方程使得 e_1 和 e_2 相联系。

式(8)中的 $\kappa(u(t-\tau))$ 决定了饱和是否有效, 即

$$\kappa(u(t-\tau)) = \|u - \text{sat}(u(t-\tau))\| \quad (9)$$

当系统输入饱和发生时, 则 $\kappa(u(t-\tau)) \neq 0$ 表示式(9)有效, 式(8)中的正值 $\frac{\kappa(u(t-\tau))}{\|e_2\|}$ 使漏斗 φ_2 的边界加宽, 从而使得与 φ_2 耦合的漏斗 φ_1 的边界被迫加宽, 进而保证位移与速度跟踪误差都被限制在漏斗的边界内, 从而提升控制器在输入饱和情况下的稳定性。

为了设计虚拟控制律, 针对位移跟踪误差设计第一个李雅普诺夫函数为

$$V_1 = \frac{1}{2} \ln \frac{\varphi_1^2}{\varphi_1^2 - e_1^2} \quad (10)$$

对式(10)求导得

$$\dot{V}_1 = \frac{e_1(e_2 + \alpha_1 - \dot{x}_d)}{\varphi_1^2 - e_1^2} - \frac{e_1^2 \dot{\varphi}_1}{\varphi_1(\varphi_1^2 - e_1^2)} \quad (11)$$

为使 $\dot{V}_1 \leq 0$, 设计虚拟控制律为

$$\bar{\alpha}_1 = -k_1 e_1 + \dot{x}_d \quad (12)$$

其控制增益 k_1 设计为时变的, 即 $k_1 = (1 - \frac{\|e_1\|^2}{\varphi_1^2})^{-1}$ 。该动态增益与位移跟踪误差 e_1 和动态漏斗 φ_1 联系起来, 将动态面的核心反馈机制从“线性”升级为“非线性”, 使控制器具备了根据系统实时位移跟踪误差进行自我优化的能力。当输入饱和发生时, e_1 与 φ_1 的比值变小, 使得 k_1 增益减小, 避免控制器的饱和情况进一步恶化。

2.1.2 非线性滤波器设计

为提升系统的瞬态性能, 使 $\bar{\alpha}_1$ 通过非线性滤波器得到虚拟控制律实际控制律 α_1 。滤波器设计如下:

$$\begin{cases} \iota \dot{\alpha}_1 = -z - \frac{\iota \hat{M}^2 z}{\sqrt{\hat{M}^2 z^2 + \sigma^2(t)}} \\ \alpha_1(0) = \bar{\alpha}_1(0) \end{cases} \quad (13)$$

其中： $z = \alpha_1 - \bar{\alpha}_1$ 为新型动态面边界层误差， \hat{M} 为滤波器参数 M 的估计值， ι 是滤波器的时间常数， $\sigma(t)$ 是一个正的已知连续的有界函数，满足

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \sigma(t) dt \leq \sigma_1 < +\infty \\ |\dot{\sigma}(t)| \leq \sigma_2 < +\infty \end{cases} \quad (14)$$

其中 σ_1 ， σ_2 是正的常数。

为证明理想虚拟控制律式(12)的导数有界，根据文献[12]中的已有证明公式，定义紧集 Ω_1 和 Ω_2

$$\begin{cases} \Omega_1 = \{[x_d \quad \dot{x}_d \quad \ddot{x}_d]^T : x_d^2 + \dot{x}_d^2 + \ddot{x}_d^2 \leq B_0\} \\ \Omega_2 = \{V(t) \leq V_0\} \end{cases} \quad (15)$$

其中 B_0 为已知正的常数，所以在 $\Omega_1 \times \Omega_2$ 中存在一个正的 M 满足 $|B(\cdot)| \leq M$ 。

因此，对新型动态面边界层误差 z 求导可得

$$\dot{z} = -\frac{z}{\iota} - \frac{\hat{M}^2 z}{\sqrt{\hat{M}^2 z^2 + \sigma^2(t)}} + B_1(\cdot) \quad (16)$$

其中 $B_1(\cdot)$ 由虚拟控制律式(12)求导组成的已知连续函数。用 \hat{M} 估计未知的 M ，且 $\tilde{M} = M - \hat{M}$ 。

引理 1^[26]：对于任何 $a > 0$ 和 $b \in \mathbb{R}$ 有不等式

$$0 \leq |b| - b^2 / \sqrt{b^2 + a^2} < a \quad (17)$$

根据上述公式可知

$$M|z| = \hat{M}|z| + \tilde{M}|z| \leq \frac{\hat{M}^2 z^2}{\sqrt{\hat{M}^2 z^2 + \sigma^2(t)}} + \sigma(t) + \tilde{M}|z| \quad (18)$$

为在线估计虚拟控制律导数上界 M ，取自适应律 \hat{M} 如下

$$\dot{\hat{M}} = \gamma_M |z| \quad (19)$$

其中 γ_M 为正的设计参数。该式使得新型动态面能快速稳定地抑制边界层误差 z ，从而确保系统跟踪误差渐近收敛至零，提升了控制瞬态性能。

2.1.3 输入时滞补偿处理

为消除列车动力学模型(5)中输入时滞的影响，将列车速度跟踪误差定义为

$$e_2 = x_2 - \alpha_1 - h \quad (20)$$

其中 x_2 为列车的实时速度，即在新型动态面控制的最后一步递归中引入时滞补偿项 h ，旨在主动抵消时滞环节 $u(t-\tau)$ 对系统的负面影响，故设计时滞补偿动态变量为

$$\dot{h} = (-\lambda h + u(t-\tau(t)) - u(t)) / m \quad (21)$$

其中 λ 为正的设计参数， $h(0) = 0$ 。如果系统无时滞，即 $\tau(t) = 0$ ，则补偿动态变量 $h = 0$

结合式(5)，对式(20)即速度跟踪误差 e_2 求导得

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 + (\lambda h - u(t-\tau(t)) + u(t)) / m = \frac{(u(t) + \lambda h - f(x_2))}{m} + \frac{z}{\iota} + \frac{\hat{M}^2 z}{\sqrt{\hat{M}^2 z^2 + \sigma^2(t)}} \quad (22)$$

通过这一前馈补偿, 列车系统控制输入 $u(t-\tau)$ 的时滞影响由补偿变量 λh 吸引和处理, 原含时滞的列车系统在闭环控制中被等效为无时滞系统, 从而简化了控制器设计与稳定性分析。在此基础上, 为保证系统稳定, 最终设计的实际控制律 $u(t)$ 为

$$u(t) = m(-k_2 e_2 - \frac{z}{t} - \frac{\hat{M}^2 z}{\sqrt{\hat{M}^2 z^2 + \sigma^2(t)}}) - \lambda h + f(x_2) \quad (23)$$

其控制增益 k_2 设计为 $k_2 = (1 - \frac{\|e_2\|^2}{\varphi_2^2})^{-1}$, 该增益与速度跟踪误差 e_2 和动态漏斗边界 φ_2 的比值相关。在非饱和情况下, 它能够维持高增益确保精确跟踪; 一旦检测到输入饱和, 控制增益会通过上述比值自主降低, 从而动态放宽对瞬态跟踪性能的要求, 进而在满足输入约束的前提下维持系统稳定运行。

2.1.4 RBF 神经网络设计

高速列车在运行过程中所受的运行阻力是连续的, 根据文献[25]中的引理, 本文采用 RBF 神经网络估计式(23)中的 $f(x_2)$, 即

$$f(x_2) = W^T \Phi(x_2) + \varepsilon(x_2) \quad (24)$$

其中: W 是神经网络的权值, $\Phi(x_2)$ 是高斯径向基函数向量, $\varepsilon(x_2)$ 为神经网络的逼近误差。

高斯径向基函数为

$$\phi_i(x_2) = \exp\left[\frac{-(x_i - u_i)^T (x_i - u_i)}{2\eta^2}\right] \quad (25)$$

其中: $u_i = [u_{i1} \cdots u_{iq}]^T$ 为高斯径向基函数的中心点坐标矢量, η 为高斯径向基函数的宽度, $W = [w_1 \cdots w_l]^T$ 是神经网络的权值。

因此, 实际控制律式(23)改写成

$$u(t) = m(-k_2 e_2 - \frac{z}{t} - \frac{\hat{M}^2 z}{\sqrt{\hat{M}^2 z^2 + \sigma^2(t)}}) - \lambda h + W^T \Phi + \varepsilon \quad (26)$$

而神经网络权值与神经网络误差的自适应律设计为

$$\dot{\hat{W}} = \gamma_w e_2 \Phi \quad (27)$$

$$\dot{\hat{\varepsilon}} = \gamma_\varepsilon e_2 \quad (28)$$

其中: $\gamma_w, \gamma_\varepsilon$ 是正的设计参数, $\hat{W}, \hat{\varepsilon}$ 为 W, ε 的估计值, 且 $\tilde{W} = W - \hat{W}, \tilde{\varepsilon} = \varepsilon - \hat{\varepsilon}$ 。

2.2 稳定性分析

本文设计的高速列车新型动态面漏斗控制策略有以下期望性能:

定理 1: 针对存在时滞与饱和的高速列车动力学模型(5), 设计新型动态面漏斗控制策略包括: 设计动态漏斗函数(7)~(8), 非线性滤波器(13)~(14), 采用实际控制律(26)、控制器自适应增益和自适应律(27)~(28)使得被控对象所有闭环信号有界, 在没有饱和发生时最终的跟踪误差能渐近收敛到零, 即有 $\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - x_d(t)) = 0$ 。

证明: 设计 Lyapunov 函数 V 如下

$$V = \frac{1}{2} \ln \frac{\varphi_1^2}{\varphi_1^2 - e_1^2} + \frac{1}{2} \ln \frac{\varphi_2^2}{\varphi_2^2 - e_2^2} + \frac{1}{2} z^2 + \frac{1}{2\gamma_w} \tilde{W}^T \tilde{W} + \frac{1}{2\gamma_\varepsilon} \tilde{\varepsilon}^2 + \frac{1}{2\gamma_M} \tilde{M}^2 \quad (29)$$

其中 $\gamma_w, \gamma_\varepsilon$ 为正的设计参数。

根据杨氏不等式, 对 V 求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \frac{-k_1 e_1^2}{\varphi_1^2 - e_1^2} - \frac{k_2 e_2^2}{\varphi_2^2 - e_2^2} + \frac{\eta_1}{2} \left(\frac{e_1}{\varphi_1^2 - e_1^2} \right)^2 + \frac{1}{2\eta_1} e_2^2 + \frac{\eta_2}{2} \left(\frac{e_1}{\varphi_1^2 - e_1^2} \right)^2 + \frac{1}{2\eta_2} z^2 - \frac{\dot{\varphi}_1 e_1^2}{\varphi_1(\varphi_1^2 - e_1^2)} + \\ & \frac{a_2 e_2^2}{\varphi_2^2 - e_2^2} - \frac{1}{\gamma_M} \tilde{M}(\dot{M} - \gamma_M |z|) - \frac{\beta_2 e_2^2}{\varphi_2(\varphi_2^2 - e_2^2)} - \frac{|e_2| \kappa(u)}{\varphi_2^2 - e_2^2} - \frac{z^2}{t} + \sigma(t) \end{aligned} \quad (30)$$

根据设计的自适应律(19), 从式(30)可得

$$\dot{V} \leq \frac{-k_1 e_1^2}{\varphi_1^2 - e_1^2} - \frac{k_2 e_2^2}{\varphi_2^2 - e_2^2} + \frac{\eta_1}{2} \left(\frac{e_1}{\varphi_1^2 - e_1^2} \right)^2 + \frac{\eta_2}{2} \left(\frac{e_1}{\varphi_1^2 - e_1^2} \right)^2 + \frac{1}{2\eta_2} z^2 + \frac{a_2 e_2^2}{\varphi_2^2 - e_2^2} - \frac{|e_2| \kappa(u)}{\varphi_2^2 - e_2^2} - \frac{z^2}{t} + \sigma(t) \quad (31)$$

由于动态漏斗函数有界, 存在增益 k 和 η 保证:

$$k_1 > \frac{\eta_1 + \eta_2}{2}, k_2 > a_2, \frac{1}{t} > \frac{1}{2\eta_2} \quad (32)$$

则存在 $\lambda_i > 0$ 使得

$$\dot{V} \leq \frac{-\lambda_1 e_1^2}{\varphi_1^2 - e_1^2} - \frac{\lambda_2 e_2^2}{\varphi_2^2 - e_2^2} - \lambda_3 z^2 + \sigma(t) \quad (33)$$

对式(33)时间内积分得

$$V(t) \leq -\int_0^t \left[\frac{\lambda_1 e_1^2}{\varphi_1^2 - e_1^2} + \frac{\lambda_2 e_2^2}{\varphi_2^2 - e_2^2} + \lambda_3 z^2 \right] d\omega + V(0) + \int_0^t \sigma(\omega) d\omega \leq V(0) + \sigma_1 \quad (34)$$

则

$$\int_0^t \left[\frac{\lambda_1 e_1^2}{\varphi_1^2 - e_1^2} + \frac{\lambda_2 e_2^2}{\varphi_2^2 - e_2^2} \right] d\omega \leq V(0) + \sigma_1 \quad (35)$$

根据 Barbalat 引理, $\frac{e^2}{\varphi^2 - e^2} : [0, +\infty) \rightarrow \mathbb{R}$ 一致连续且满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \frac{e(\omega)^2}{\varphi(\omega)^2 - e(\omega)^2} d\omega < +\infty$ 则有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{e^2}{\varphi^2 - e^2} = 0 \quad (36)$$

即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - x_d(t)) = 0 \quad (37)$$

定理 1 得证。

2.3 饱和解除后的跟踪收敛时间讨论

根据式(8)可知, 从系统饱和解除时刻 t_0 起, 漏斗函数 φ_2 的表达式恢复成指数衰减形式。经过饱和时期的跟踪误差累积, 在 t_0 时刻的速度跟踪误差为 $e_2(t_0)$ 。当 t 时刻时的跟踪误差恢复到理想范围内 $\varphi_2(t)$ 时, 其误差收敛时间的计算公式如下:

$$t_{rec} = \frac{1}{-a_2} \ln \left(\frac{\varphi_2(t) - \beta_2 / a_2}{e_2(t_0) - \beta_2 / a_2} \right) \quad (38)$$

由于速度跟踪误差被限制在漏斗边界内, 因此, 系统实际的跟踪误差收敛时间远小于式(38)计算出的时间, 收敛时间更短, 系统可更快地达到理想速度。

3 仿真实验

为验证设计的控制方法的效果, 本文选用 CRH380A 型动车组作为被控对象进行仿真验证。

3.1 仿真条件及仿真情况

CRH380A 型动车组参数表如表 1 所示。本文选取由济南到徐州的 CRH380A 型动车组真实位移 x_{d1} 与

速度 x_{d2} 曲线作为参考曲线，进行仿真得到没有饱和发生时的如下仿真结果。

表 1 CRH380A 型动车组仿真参数
Tab.1 Simulation parameters of CRH380A

参数	数值
基本编组	8 辆编组(6M2T)
编组质量/t	442
运行阻力/(N/t)	$5.6 + 0.036v + 0.00121v^2$
车轮直径/mm	860
坡度	12‰
曲度	0.35

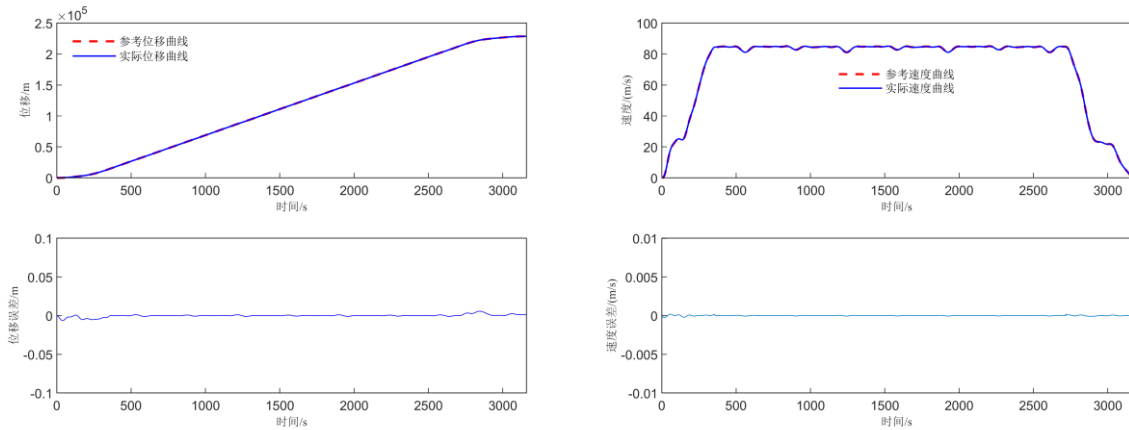


图 1 位移与速度跟踪和误差曲线

Fig.1 Displacement and velocity tracking and error curves

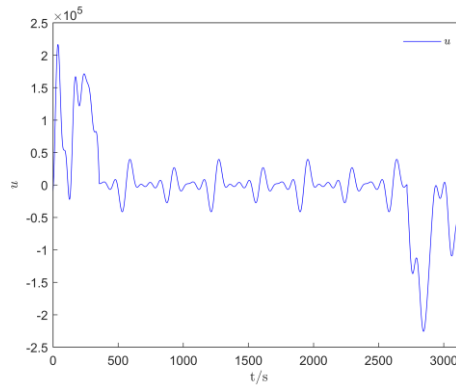


图 2 没有饱和发生的控制输入信号曲线（牵引力/制动力物理映射）

Fig.2 Control input signal curve without saturation occurring (traction/braking force physical mapping)

从仿真结果图 1 可知，在没有饱和发生时的列车位移跟踪误差稳定在厘米级别内，速度跟踪误差稳定在毫米级别内；从图 2 可知，控制输入信号始终光滑连续，进一步表明了控制系统的良好运行状态。综合上述仿真结果可知，本文设计的控制策略有效抑制了输入时滞的负面影响，系统跟踪误差能够快速收敛到理想范围内，且动态平稳，验证了该方法的时滞补偿有效性。

3.2 未考虑输入饱和的仿真结果

为充分验证本文控制策略的鲁棒性，保证仿真对比的有效性，未考虑输入饱和的控制策略中采用预设漏斗，且没有相应的输入饱和约束机制。仿真中的输入时滞设置为 $\tau(t) = 0.2|\sin t|$ s，0.2 s 的幅值对应高速铁路控制中一个具有显著影响的时滞量级，其周期性变化可模拟实际控制系统中因通信与信号处理环节引

起的时变时滞, 该时变时滞条件比常值时滞更复杂, 能够更全面地检验所设计时滞补偿机制的动态适应能力, 从而证明本文方法在应对时变时滞的有效性 with 优越性。输入时滞补偿动态变量设计为 $\dot{h} = (-5h + u(t - 0.2|\sin t|) - u(t)) / m$, 非线性滤波器设计参数为 $t = 0.005$, $\sigma(t) = 0.001e^{-0.001t} + 0.0001$, 漏斗参数设计为 $a_1 = 0.0035$, $a_2 = 0.0034$, $\beta_1 = 0.0006$, $\beta_2 = 0.0000003$, $P_1 = 1.05$, 自适应律参数设计为 $\gamma_w = 1$, $\gamma_\varepsilon = 15$, $\gamma_M = 0.5$ 。

根据上述控制器参数进行仿真实验: 当列车执行器出现输入饱和, 可提供最大的力为 200 000 N 时, 与没有饱和发生时的输入值相比, 饱和比达到了 11.4%, 如果对输入饱和信号不加处理, 得到如下的列车跟踪误差仿真结果。

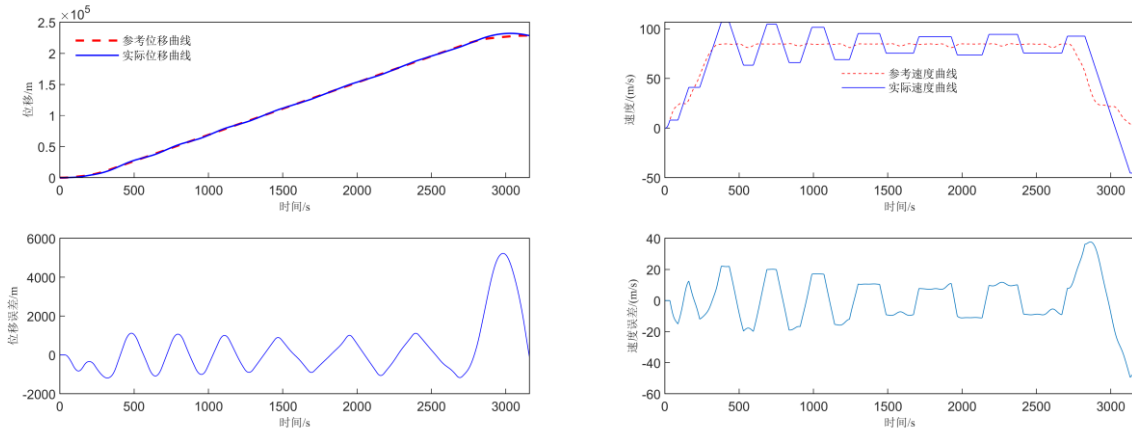


图3 未考虑输入饱和的位移与速度跟踪和误差曲线

Fig.3 Displacement and velocity tracking and error curves without considering input saturation

从图3可知, 在列车牵引阶段发生了轻度输入饱和后, 列车位移跟踪误差越来越大, 在匀速工况阶段, 位移跟踪误差达千米量级; 进入制动阶段后, 位移误差进一步增大至约五千米, 表明列车已完全偏离期望位置。在牵引阶段出现的轻度输入饱和导致列车速度跟踪显著劣化: 在匀速工况阶段速度跟踪误差持续波动在 20 m/s 左右, 制动阶段误差峰值接近 40 m/s, 且当期望速度降至零时, 列车仍未停止。上述仿真结果表明, 若列车运行控制策略设计中没有考虑输入饱和问题, 当系统出现输入饱和时, 执行器输出能力无法达到控制指令要求, 从而系统跟踪误差变大, 进而突破预设漏斗收敛边界, 严重破坏闭环系统的跟踪能力与稳定性, 控制器内部状态持续累加偏差, 速度/位移曲线产生剧烈波动与发散。本文所设计的控制策略, 其核心目标之一正是为了解决这一问题。为验证本文策略的有效性, 其在同等工况下的仿真结果将在下文进行展示与分析。

3.3 考虑输入饱和的仿真结果

根据 3.2 节的仿真结果可知, 若不处理输入饱和, 系统的跟踪性能将严重恶化, 直接危及列车运行安全。为验证本文所设计的控制策略在应对时滞与饱和问题时的有效性, 以下将展示采用该控制器在同一工况下的仿真结果。

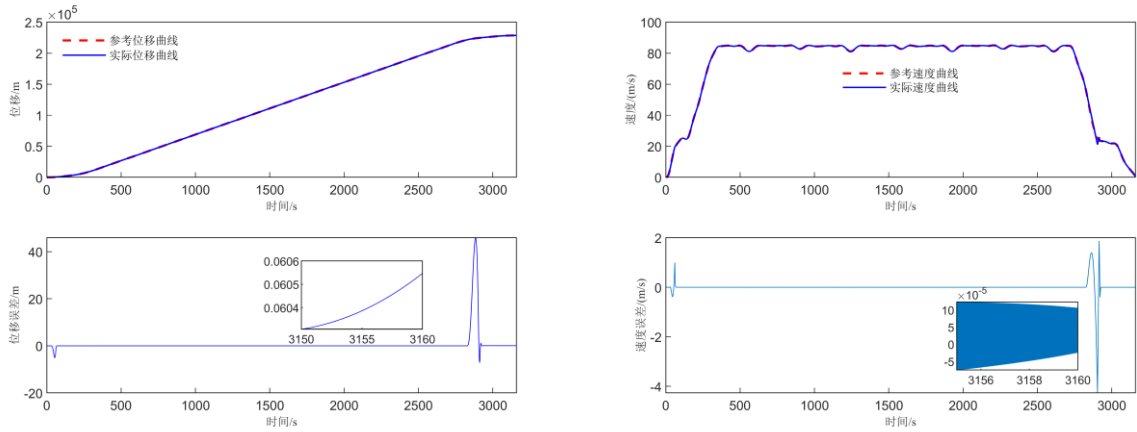


图 4 位移与速度跟踪和误差曲线

Fig.4 Displacement and velocity tracking and error curves

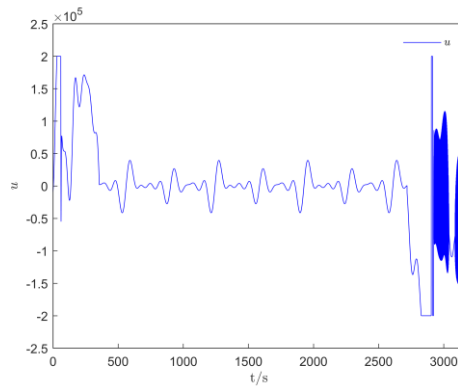


图 5 发生饱和时的控制输入信号曲线（牵引力/制动力物理映射）

Fig.5 Control input signal curve at saturation (traction/braking force physical mapping)

在高速列车系统输入时滞与饱和并存的情况下，从图 4 的位移与速度跟踪和误差曲线可知，即使在系统牵引阶段出现短暂的轻度饱和、制动阶段遭遇长达 77 s 的深度饱和，系统仍保持稳定。饱和期间位移跟踪误差虽有所增大，制动阶段的误差峰值超过了 40 m，但一旦没有饱和发生，位移跟踪误差迅速收敛至厘米级，表明控制器在饱和约束下仍具备快速恢复与高精度跟踪能力。在牵引阶段的速度跟踪误差收敛迅速；列车制动阶段虽因输入饱和程度加深导致误差波动增大，峰值约 4 m/s，但在没有输入饱和后的 22 s 内速度跟踪误差收敛至厘米级，再次验证了本文设计的控制器在时变饱和条件下的强鲁棒性。从图 5 的列车输入信号曲线可知，在列车执行器最多提供 200 000 N 的约束条件下，控制器始终将输入信号严格限制在执行器饱和幅值内。进一步证明了本文设计的控制器不仅主动避免了过饱和，更在饱和期间维持了系统稳定，没有饱和发生时迅速恢复跟踪性能。

综上，仿真结果一致表明：本文所设计的高速列车新型动态面漏斗控制策略通过时滞补偿与饱和抑制的协同设计，实现了复杂约束下的高性能控制：在输入饱和发生时，系统仍能维持闭环稳定；在没有饱和发生时，跟踪误差可快速收敛至厘米级精度。

4 结论

本文对存在输入时滞与饱和的高速列车运行控制进行了研究，所设计的策略能够同时克服输入时滞与执行器饱和的双重约束，显著提升了高速列车系统的跟踪精度、鲁棒性与运行安全性，得出以下结论：

- 1) 针对时变输入时滞问题，在新型动态面的最后一步递归中引入时滞补偿动态变量，有效抵消了输入时滞对系统动态性能的影响，简化了控制器结构并提高了设计可操作性。
- 2) 在系统输入饱和时，该控制器能主动约束控制输入信号幅值避免过饱和，具有良好的参数鲁棒性；

在没有饱和发生时,系统仍可实现对给定速度曲线的渐近跟踪,从而保障高速列车的安全可靠运行。

3) 该控制策略提升了高速列车在输入时滞与饱和共存下的瞬态性能与平稳性,实现了高精度、强鲁棒性的跟踪控制。后续研究可进一步探讨所提控制策略在多质点纵向动力学模型中的控制精度与效果及如何在有限时间内提升跟踪误差的收敛速度。

参考文献:

- [1] 余祖俊,唐涛,李开成,等.智慧高速铁路运行控制系统发展趋势综述[J].铁道学报,2024,46(01):1-12.
YU Z J, TANG T, LI K C, et al. Overview of development trends of intelligent high-speed rail train control systems[J]. Journal of The China Railway Society, 2024, 46(01): 1-12.
- [2] ZHANG J P, YANG H, ZHANG K P, et al. Tracking control for high-speed train with coupler constraints[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(10): 14654-14668.
- [3] 李中奇,曾祥泉,余剑烽.重载列车运行过程的建模与RBFNN滑模控制[J].华东交通大学学报,2024,41(05):94-104.
LI Z Q, ZENG X Q, YU J F. Modeling and RBFNN sliding mode control for the operation process of heavy haul trains[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(05): 94-104.
- [4] 谭畅,李毅清,杨辉.存在扰动和时滞的高速列车自适应制动控制[J].华东交通大学学报,2021,38(04):64-71+126.
TAN C, LI Y Q, YANG H. Adaptive braking control for high-speed trains with disturbances and time delays[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(04): 64-71+126.
- [5] 王中森,李茂青,岳丽丽,等.计及动力部分损失的动车组精准停车自适应模糊控制[J].铁道科学与工程学报,2024,21(08):3050-3060.
WANG Z S, LI M Q, YUE L L, et al. Adaptive fuzzy control of electric multiple unit for accurate stopping by considering power loss partly [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(08): 3050-3060.
- [6] 余琼霞,吴帅帅,孙俊杰,等.时滞执行器故障下高速列车无模型自适应预测协同控制[J].铁道科学与工程学报,2025,22(10):4354-4365.
YU Q X, WU S S, SUN J J, et al. Model free adaptive predictive cooperative control of high-speed trains with time delay and actuator fault[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(10): 4354-4365.
- [7] 刘洋,窦顺坤,张丽艳.基于时延补偿的高速列车无线网络多幂次滑模控制策略[J].中国铁道科学,2023,44(06):162-171.
LIU Y, DOU S K, ZHANG Y L. Multi-Power sliding mode control strategy of high-speed train wireless network based on time delay compensation[J]. China Railway Science, 2023, 44 (06): 162-171.
- [8] 谭畅,李毅清.具有输入时滞特性的列车自适应制动控制[J].铁道科学与工程学报,2022,19(04):1071-1080.
TAN C, LI Y Q. Adaptive braking control for high-speed trains with input time delays[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(04): 1071-1080.
- [9] TONG Y H, REN Z Y, TONG D B, et al. Combined finite-time state feedback for high-speed train systems with time-varying delays and disturbances[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2024, 34(3): 2184-2205.
- [10] 蔡亮成,乐洋,黄德青.带输入时滞的高速列车防滑控制[J].控制理论与应用,2026,43(3):541-550.
CAI L C, YUE Y, HUANG D Q. Antiskid control of high-speed trains with input delay[J]. Control Theory & Applications, 2026, 43(3): 541-550.
- [11] 夏晓南,尹治林,李春,等.具有输入时滞和预设性能的非线性系统有限时间动态面控制[J].江苏大学学报(自然科学版),2024,45(03):316-322.
XIA X N, YIN Z L, LI C, et al. Finite-time dynamic surface control for nonlinear systems with input delay and prescribed performance[J]. Journal of JiangSu University (Natural Science Edition), 2024, 45(03): 316-322.
- [12] 王清华,刘焯,张桂林,等.输入时滞非线性系统的新型动态面 Funnel 控制[J].控制理论与应用,2022,39(08):1426-1432.
WANG Q H, LIU Y, ZHANG G L, et al. Novel dynamic surface Funnel control for nonlinear systems with input delay[J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(08): 1426-1432.
- [13] WANG Y D, ZONG G D. Dynamic event-triggered adaptive fixed-time practical tracking control for nonlinear systems through funnel function[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024, 22: 7008-7017.
- [14] 徐传芳,陈希有,丁丽娜,等.输入受约束的高速列车鲁棒自适应动态面控制[J].铁道学报,2020,42(06):56-63.
XU C F, CHEN X Y, DING L N, et al. Robust adaptive dynamic surface control for high-speed train with input constraints[J]. Journal of The China Railway Society, 2020, 42(06): 56-63.

- [15] 曹承钰, 李繁飙, 廖宇新, 等. 高超声速变外形飞行器建模与固定时间预设性能控制[J]. 自动化学报, 2024, 50(03): 486-504.
CAO C Y, LI F B, LIAO Y X, et al. Modeling and fixed-time prescribed performance control for hypersonic morphing vehicle[J]. Acta Automatica Sinica, 2024, 50(03): 486-504.
- [16] 苏义鑫, 公成龙, 张丹红. 考虑推进器饱和特性的动力定位船舶递归滑模动态面控制[J]. 振动与冲击, 2023, 42(08): 206-214.
SU Y X, GONG C L, ZHANG D H. Recursive sliding-mode dynamic surface control for dynamic positioning of ships considering the saturation characteristics of propellers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(08): 206-214.
- [17] 周章勇, 邵书义, 胡伟. 输入饱和情形下战斗机大机动动态面控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(02): 247-254.
ZHOU Z Y, SHAO S Y, HU W. High-g maneuver dynamic surface control of fighter plane under input saturation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(02): 247-254.
- [18] SHAO X F, LI K W, LI Y M. Event-based asymptotic tracking control for nonlinear system with funnel performance[J]. Nonlinear Dynamics, 2025, 113: 13523-13533.
- [19] LIU C G, WANG H Q, LIU X P, et al. Adaptive fuzzy funnel control for nonlinear systems with input deadzone and saturation[J]. International Journal of Systems Science, 2020, 51(9): 1542-1555.
- [20] BERGER T. Input-constrained funnel control of nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2024, 69(8): 5368-5382.
- [21] CHEN Q, TANG X Q, NAN Y R, et al. Finite-time neural funnel control for motor servo systems with unknown input constraint[J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2017, 30: 579-594.
- [22] LIU X, TONG D B, CHEN Q Y, et al. Observer-based adaptive funnel dynamic surface control for nonlinear systems with unknown control coefficients and hysteresis input[J]. Neural Process Letters, 2022, 54: 4681-4710.
- [23] ZHANG J X, FU Y, FU J. Funnel-based adaptive predefined-time leader-following output-feedback optimal control for second-order nonlinear multi-agent systems[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2024, 22: 2794-2805.
- [24] 于小川, 杨晓伟, 梁相龙, 等. 基于非线性滤波器和动态面的指定时间预设性能导弹冷发射响应控制[J]. 兵工学报, 2024, 45(11): 4155-4174.
YU X C, YANG X W, LIANG X L, et al. Appointed-time Prescribed Performance Control for Missile Cold Launch Response Based on Nonlinear Filters and Dynamic Surface[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(11): 4155-4174.
- [25] MA J L, XU S Y, ZHUANG G M, et al. Adaptive neural network tracking control for uncertain nonlinear systems with input delay and saturation[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2020, 30(7): 2593-2610.
- [26] LIU Y H. Adaptive dynamic surface asymptotic tracking for a class of uncertain nonlinear systems[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2018, 28(4): 1233-1245.



第一作者: 谢玟洪 (2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为轨道交通运行优化控制。



通信作者: 谭畅 (1982—), 女, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为轨道交通运行优化控制。