文章编号:1673-0291(2026)04-0023-10 DOI:10.11860/j.issn.1673-0291.20250134

基于改进滑模-自抗扰的高速列车速度跟踪控制

王新屏,张帅东,陈梦华
(大连交通大学 电气工程学院,辽宁 大连 116028)

摘 要:针对高速列车自动驾驶过程中,传统控制方法在目标运行速度跟踪环节存在的精度较低、误差波动较大、抗干扰性能薄弱等问题,提出一种基于改进滑模-自抗扰控制(Improved Sliding Mode Active Disturbance Rejection Control,ISM-ADRC)的新型速度控制算法.首先,建立高速列车单质点模型,并采用新型非线性函数来代替传统的fal函数设计扩张状态观测器,以减小其在原点附近不平滑引起的抖振;然后,引入饱和函数设计自适应变速趋近律,将其与非奇异快速终端滑模面相结合得到滑模控制律,以削弱因滑模控制固有的不连续开关特性引起的抖振,并通过Lyapunov稳定性理论证明控制系统的稳定性;最后,根据CR400BF型动车组参数,分别在无扰动和有扰动的情况下对控制系统进行仿真验证.仿真结果表明:无论是否有外部扰动存在,高速列车的速度跟踪误差均位于−0.1~0.2 km/h范围;与传统的比例-积分-微分(Proportional Integral Derivative,PID)控制、非奇异快速终端滑模控制(Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode Control,NFTSMC)以及滑模-线性自抗扰控制(Sliding Mode Linear Active Disturbance Rejection Control,SM-LADRC)相比,所提算法的抗干扰能力强、跟踪精度高,稳态时的速度跟踪误差相比其他3种方法分别降低了95%、89%和49%,验证了所提方法的有效性和可行性.

关键词:高速列车;单质点模型;滑模控制;自抗扰控制;速度跟踪控制
中图分类号:U284.48;TP273 **文献标志码**:A

Speed tracking control of high-speed trains based on improved sliding mode active disturbance rejection control

Wang Xinping, *Zhang Shuaidong*, *Chen Menghua*
(School of Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning 116028, China)

Abstract: To address the low tracking accuracy, large error fluctuations, and limited disturbance rejection capability of conventional control methods during target-speed tracking in the automatic operation of high-speed trains, a novel speed control algorithm based on Improved Sliding Mode Active Disturbance Rejection Control (ISM-ADRC) is proposed. First, a single-point-mass model of a high-speed train is established. A novel nonlinear function is then introduced to replace the conventional fal function in the design of the extended state observer, thereby mitigating the chattering caused by the nonsmooth behavior of the fal function near the origin. Second, a saturation function is incorporated into an

收稿日期:2025-09-08;**修回日期**:2026-05-26
基金项目:国家自然科学基金(62103074);辽宁省教育厅科学研究项目(LJ212410150055);辽宁省博士科研启动基金(2022-BS-257)
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (62103074); Scientific Research Project of Liaoning Provincial Department of Education (LJ212410150055); Liaoning Provincial Doctoral Research Startup Fund (2022-BS-257)
第一作者:王新屏(1978—),女,黑龙江巴彦人,副教授,博士.研究方向为列车运行控制.**email**:45737486@qq.com.
通信作者:陈梦华(1990—),女,河南商丘人,副教授,博士.**email**:chenmenghua@djtu.edu.cn.

引用格式:王新屏,张帅东,陈梦华.基于改进滑模-自抗扰的高速列车速度跟踪控制[J].北京交通大学学报,2026,50(4):23−32.
Wang Xinping, Zhang Shuaidong, Chen Menghua. Speed tracking control of high-speed trains based on improved sliding mode active disturbance rejection control[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(4): 23−32. (in Chinese)

adaptive variable-speed reaching law, which is combined with a nonsingular fast terminal sliding mode surface to derive the sliding mode control law. This approach suppresses the chattering caused by the inherent discontinuous switching characteristics of sliding mode control. The stability of the control system is subsequently demonstrated using Lyapunov stability theory. Finally, simulations are conducted under both disturbance-free and disturbed conditions using the parameters of a CR400BF electric multiple unit. The simulation results show that the speed-tracking error of high-speed train remains within the range of −0.1 to 0.2 km/h, regardless of the presence of external disturbances. Compared with the traditional Proportional Integral Derivative (PID) control, Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode Control (NFTSMC) and Sliding Mode Linear Active Disturbance Rejection Control (SM-LADRC), the proposed algorithm exhibits superior disturbance rejection capability and higher tracking accuracy. Its steady-state speed-tracking error is reduced by 95%, 89%, and 49%, respectively, relative to the three comparative methods, demonstrating the effectiveness and feasibility of the proposed approach.

Keywords: high-speed train; single-point-mass model; sliding mode control; active disturbance rejection control; speed tracking control

随着我国高速铁路的持续发展,高速铁路的运输效率在不断提高,运行目标也在向智能化方向发展.将列车自动驾驶(Automatic Train Operation, ATO)功能与高速列车的列控系统深度融合,是未来列车智能化发展的趋势.

ATO系统通过车载设备根据线路条件、牵引特性和目的地参数计算得出推荐速度曲线,并使列车的实际速度动态追踪该最优速度曲线.而在列车实际运行的过程中,由于外部环境存在未知扰动,列车速度跟踪精度会降低,进而影响列车运行状态,因此精准跟踪列车的目标速度曲线具有十分重要的意义.目前的ATO速度跟踪控制方法主要包括以比例-积分-微分(Proportional Integral Derivative, PID)控制为代表的传统控制方法,以及以自适应控制、滑模控制、自抗扰控制等为代表的先进控制方法.

在传统控制方法方面,文献[1]采用径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络PID控制器对生成的目标曲线进行跟踪,然而控制器输出曲线依然呈现出显著的波动现象.文献[2]通过设计二维复合云模型PID速度控制器,实现了对预设速度曲线的有效追踪,但速度跟踪误差在−3~6 km/h范围,其跟踪精度偏低.传统控制策略虽然基本能够实现跟踪控制,但跟踪精度和效果仍需进一步提升.

针对传统控制方法跟踪精度不高、效果不好等问题,学者利用各种先进控制策略来实现对列车目标速度曲线高精度、高品质的跟踪.文献[3]提出一种模型参考自适应控制策略,提升了速度跟踪控制的精度.文献[4]将补偿函数观测器与分数阶非奇异快速终端滑模控制器相结合,减小了速度跟踪误差.文献[5]设计一种基于自适应RBF神经网络的分数阶非奇异终端滑模控制器,在显著减小跟踪误差的同时提高了收敛速度.文献[6]建立一种基于神经网络最小参数学习算法的自适应模糊滑模控制方法,有效提升了列车的跟踪精度.文献[7]提出一种基于线性扩张状态观测器的自适应非奇异终端滑模迭代学习控制算法,大大提升了速度追踪精度.文献[8]采用一种自适应鲁棒终端滑模控制器,解决了在干扰情况下速度跟踪精度难以保障的问题.文献[9]引入多种群遗传算法对自抗扰控制器参数进行自适应调节,有效提升了磁浮列车的运行稳定性.文献[10]基于改进粒子群算法构建了自适应线性自抗扰控制器的参数优化策略,优化后的控制器在列车运行控制中表现出了良好的性能.文献[11]利用强化学习方法对包含结构简化的Levant跟踪微分器和改进扩张状态观测器的自抗扰控制器进行参数整定,使得速度跟踪误差明显减小.文献[12]使用一种基于自抗扰控制的分布式协同控制算法,使得每列列车都能够保持安全间距运行.文献[13]和[14]分别将滑模控制与线性自抗扰控制结合,其中前者采用改进指数趋近律的滑模控制,后者采用分数阶积分滑模控制,均有效提高了对列车运行轨迹的追踪精度.文献[15]提出一种基于同步控制的自适应快速终端滑模自抗扰控制策略,保障了重载列车的安全稳定运行.在列车运行控制系统之外的众多控制系统的应用实践中,滑模-自抗扰控制的有效性与卓越性已广受认可[16-20].

滑模控制虽然响应较快,但因状态轨迹在滑模面两侧来回穿越,不可避免地产生抖振.而自抗扰控制能够实时估计系统受到的总扰动并补偿,因此

其控制精度较高.鉴于上述分析,本文拟融合滑模控制和自抗扰控制两种控制算法,以期控制器能兼具两者的优势,并通过一系列优化措施,有效克服原算法的固有缺陷.首先,对扩张状态观测器中的非线性函数进行优化设计,以减轻控制器的抖振;然后,设计自适应变速趋近律,将其与非奇异快速终端滑模面相结合得到滑模控制律,以进一步削弱控制器的抖振现象;最后,将所提改进滑模-自抗扰控制(Improved Sliding Mode Active Disturbance Rejection Control,ISM-ADRC)应用于列车速度控制中,利用Lyapunov稳定性理论证明控制系统的稳定性,并通过仿真验证控制系统的有效性.

1　高速列车单质点模型

本文将列车视为一个整体进行分析,忽略了车厢间的作用力,建立列车单质点模型.在水平方向上,列车所受的控制力F_C表现为牵引电机通过电磁感应机制提供的正向牵引力以及制动系统通过空气制动和电制动产生的反向制动力,这两种力是列车运行的关键,通过调整二者的大小能有效控制列车运行速度.此外,列车在运行过程中还会受到运行阻力f_R的作用(包括基本阻力、坡道附加阻力、弯道附加阻力及隧道附加阻力等).列车在水平方向上的受力分析示意图如图1所示.

基于牛顿第二运动定律,建立列车单质点纵向动力学模型为

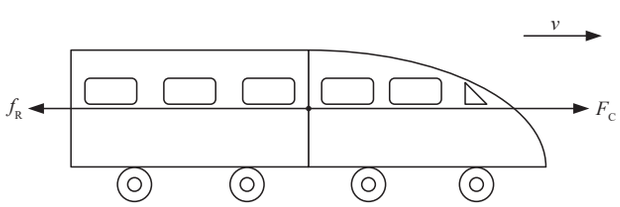


图1　列车水平方向受力

Fig.1　Horizontal forces acting on the train

$$F_C - f_R = m\dot{v} \tag{1}$$

式中:$\dot{v}$为列车实际运行过程中的加速度;m为列车的总质量.

仅考虑列车所受的基本阻力f_r,将式(1)重构为状态空间方程形式,其表达式为

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ m\dot{v} = F_C - f_r \\ f_r = a_r + b_r v + c_r v^2 \end{cases} \tag{2}$$

式中:x为列车实际运行位移;v(或$\dot{x}$)为列车实际运行速度;a_r、b_r、c_r为列车运行过程中的基本阻力系数.

为简化控制器构建过程,式(2)可通过一个二阶系统重新表述为

$$\begin{cases} \dot{x} = v \\ \dot{v} = f(v) + b_c u + \psi(t) \\ y = v \end{cases} \tag{3}$$

式中:u为该系统的控制输入量;b_c为控制输入系数;$f(\cdot)$为单位基本阻力函数;y为控制输出值;$\psi(t)$为t时刻系统所受的外部扰动,设M为$\psi(t)$的上界,满足$|\psi(t)| \leqslant M$;t为时间变量.

2　高速列车速度控制器设计

与传统的自抗扰控制器相比,滑模-自抗扰控制器采用滑模控制律取代原有的非线性状态误差反馈控制律.滑模-自抗扰控制器的结构如图2所示,其主要由跟踪微分器(Tracking Differentiator,TD)、滑模控制器(Sliding Mode Controller,SMC)以及扩张状态观测器(Extended State Observer,ESO)3个模块构成.此外,高速列车模型的状态空间简化形式如式(3)所示.图2中:v_d为列车的理想速度;v_1为TD对v_d的跟踪值;v_2为TD对v_d跟踪值的微分;z_1为ESO对v的观测值;z_2为ESO对$\dot{v}$的观测值;z_3为ESO对总扰动的观测值;u_0为滑模控制律;b_0为控制输入系数b_c的估计值.

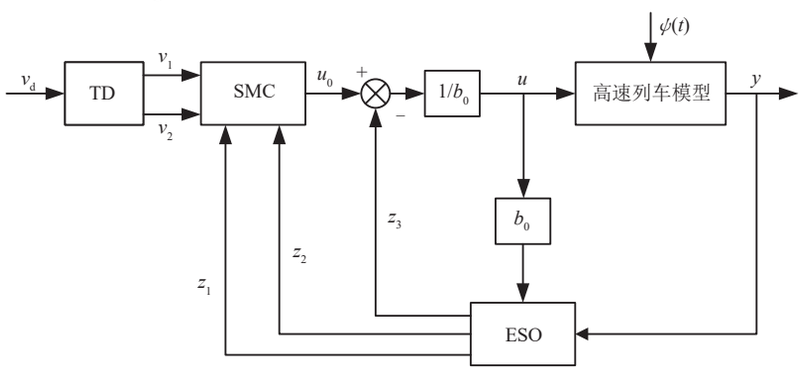


图2　滑模-自抗扰控制器结构

Fig.2　Structure of sliding mode active disturbance rejection controller

2.1 跟踪微分器设计

跟踪微分器旨在有效应对实际问题中因信号不连续或含有随机噪声而导致的追踪信号与微分信号难以合理提取的问题[21]，且兼具滤波性能，因此跟踪微分器能够提高控制品质.

传统的跟踪微分器为

$$\begin{cases}\dot{v}_1=v_2\\ \dot{v}_2=\mathrm{fhan}(v_1-v_\mathrm{d},v_2,r_0,h_0)\end{cases}\tag{4}$$

式中：$\dot{v}_1$和$\dot{v}_2$分别为v_1和v_2的导数；r_0为跟踪因子；h_0为滤波因子；fhan(·)为最速综合函数，其表达式为

$$\begin{cases}\mathrm{fhan}=-r_0\left[w/d_0-\mathrm{sgn}(w)\right]s_2-r_0\,\mathrm{sgn}(w)\\ d_0=r_0h_0^2\\ a_0=h_0v_2\\ y_0=v_1-v_\mathrm{d}+a_0\\ a_1=\sqrt{d_0\left(d_0+8\left|y_0\right|\right)}\\ a_2=a_0+\mathrm{sgn}(y_0)(a_1-d_0)/2\\ s_1=\left[\mathrm{sgn}(y_0+d_0)-\mathrm{sgn}(y_0-d_0)\right]/2\\ w=(a_0+y_0-a_2)s_1+a_2\\ s_2=\left[\mathrm{sgn}(w+d_0)-\mathrm{sgn}(w-d_0)\right]/2\end{cases}\tag{5}$$

式中：$d_0,a_0,y_0,a_1,a_2,s_1,w,s_2$均为fhan(·)函数的中间变量.

2.2 扩张状态观测器设计

扩张状态观测器旨在解决主动抗扰技术中的扰动观测这一关键问题.它通过引入状态观测器的设计思想，将影响被控对象输出的总扰动作为系统的一个新增状态变量，进而依托系统的输入与输出观测出涵盖系统既有状态变量及总扰动的全部状态，并能够对总扰动进行补偿[22].扩张状态观测器将总扰动d视作一个新增的未定义状态变量，并将其纳入原系统中，即在原有系统状态的基础上衍生出一个全新状态，从而使原系统演变为

$$\begin{cases}\dot{x}=v\\ \dot{v}=d+b_\mathrm{c}u\\ \dot{d}=\dot{g}(v,\psi(t),t)\\ y=v\end{cases}\tag{6}$$

式中：$d=g(v,\psi(t),t)=f(v)+\psi(t)$，其中$g(\cdot)$为总扰动函数.

通常情况下，fal(·)函数是用来设计扩张状态观测器的核心非线性函数.但该函数在原点附近区域缺乏平滑性，易引发自抗扰控制器产生高频抖振现象[23]，因此所构建的非线性函数须在原点处保持连续且具备可导性，并同时具有较强的平滑性.本文引入正弦、余弦、反正切3种三角函数来构建一种新型非线性函数，记为newfal(·)，该函数通过三角函数的光滑过渡特性可有效减轻抖振现象.fal(·)函数与newfal(·)函数的表达式分别为

$$\mathrm{fal}(\xi,\lambda,\delta)=\begin{cases}\dfrac{\xi}{\delta^{(1-\lambda)}} & |\xi|\leqslant\delta\\ |\xi|^{\lambda}\,\mathrm{sgn}(\xi) & |\xi|>\delta\end{cases}\tag{7}$$

$$\mathrm{newfal}(\xi,\lambda,\delta)=\begin{cases}n_1\sin\xi+n_2\cos\xi+n_3\arctan\xi & |\xi|\leqslant\delta\\ |\xi|^{\lambda}\,\mathrm{sgn}(\xi) & |\xi|>\delta\end{cases}\tag{8}$$

式中：ξ为误差变量；λ为幂指数，且$0<\lambda<1$；δ为线性区间长度，且$0<\delta<1$；n_1、n_2、n_3为拟合系数，其表达式为

$$\begin{cases}n_1=\dfrac{\delta^{\lambda}-\arctan\delta\cdot\lambda\cdot\delta^{\lambda-1}\cdot(1+\delta^2)}{\sin\delta-\cos\delta\cdot\arctan\delta\cdot(1+\delta^2)}\\ n_2=0\\ n_3=\dfrac{(1+\delta^2)(\lambda\cdot\delta^{\lambda-1}\cdot\sin\delta-\delta^{\lambda}\cdot\cos\delta)}{\sin\delta-\cos\delta\cdot\arctan\delta\cdot(1+\delta^2)}\end{cases}\tag{9}$$

为系统评估新型非线性函数newfal(·)的性能，根据经验设定参数$\lambda=0.25$、$\delta=0.01$，在同一坐标系下绘制传统fal(·)函数与新型newfal(·)函数的对比图像，如图3所示.由图3可知：在接近原点的区域，newfal(·)函数在平滑性与连续性方面相较于传统的fal(·)函数更优，其三角函数复合设计实现了原点处的平滑导数衔接，可有效削弱抖振现象.

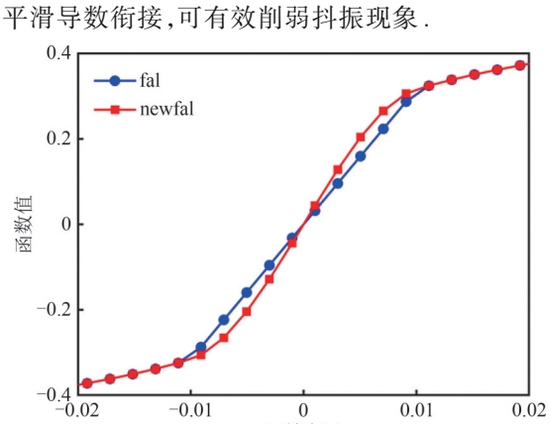


图3 fal函数与newfal函数对比

Fig.3 Comparison between fal function and newfal function

改进后的扩张状态观测器的表达式为

$$\begin{cases}e_1=z_1-y\\ \dot{z}_1=z_2-\beta_{01}e_1\\ \dot{z}_2=z_3-\beta_{02}\mathrm{newfal}\left(e_1,\dfrac{1}{2},\delta\right)+b_0u\\ \dot{z}_3=-\beta_{03}\mathrm{newfal}\left(e_1,\dfrac{1}{4},\delta\right)\end{cases}\tag{10}$$

式中:$\dot{z}_1$、$\dot{z}_2$、$\dot{z}_3$分别为z_1、z_2、z_3的导数;e_1为观测器对v的观测误差;β_{01}、β_{02}、β_{03}为观测器的增益参数.

2.3　滑模非线性误差反馈控制律设计

2.3.1　自适应变速趋近律

滑模控制与传统控制方法本质上的差异在于,它通过预设状态轨迹约束机制,使得系统在特定约束条件下执行高频小幅振荡运动,然而这种运动在某些情况下可能会引发抖振现象.滑模运动由趋近运动阶段与滑模运动阶段构成.系统从任意初始位置向切换面趋近,最终到达切换面的动态过程称为趋近运动阶段,即滑模面函数趋近于零的动态收敛过程.基于滑模变结构理论,滑模可达性条件仅保证状态空间中任意初始状态能在有限时间内收敛至切换面,但对趋近运动的轨迹未施加任何具体路径约束,因此借助趋近律的方法可以有效提升趋近过程的动态特性,并显著减轻抖振现象.

在基于趋近律的滑模控制中,指数趋近律的应用较为广泛,该趋近律包括等速项与指数项两部分,记为$\dot{s}_e$,其表达式为

$$\dot{s}_e=-\varepsilon\,\mathrm{sgn}(s)-ks \tag{11}$$

式中:ε为等速项系数,且$\varepsilon>0$;k为指数项系数,且$k>0$;s为滑模面函数.

当运动点到达滑模面时,t时刻的滑模面函数$s(t)$的值为零,对其从0到t进行积分,可得从运动点到达滑模面的时间T_a为

$$T_a=\frac{1}{k}\left\{\ln\left[s(0)+\frac{\varepsilon}{k}\right]-\ln\frac{\varepsilon}{k}\right\} \tag{12}$$

式中:k与T_a成反比例关系,若想使系统快速到达滑模面,需要增大k值,然而这会加剧控制器抖振;此时为了进一步减小到达时间,ε需同步增大,但会进一步加剧控制器抖振,这使得快速趋近的过程中难以保证同步削弱抖振现象[24].

此外,传统指数趋近律所采用的符号函数属于非线性函数,因其自身的固有特性,会导致其易在滑模面周边产生抖振现象,进而影响控制性能.因此为了弱化这种抖振现象,本文采用饱和函数取代符号函数,借助饱和函数独有的边界层特性,达成更为平滑的收敛效果,饱和函数sat(•)的表达式为

$$\mathrm{sat}(s)=\begin{cases}1 & s>\Delta\\ \dfrac{1}{\Delta}s & |s|\leqslant\Delta\\ -1 & s<-\Delta\end{cases} \tag{13}$$

式中:Δ为边界层厚度.

构建自适应变速趋近律$\dot{s}_a$为

$$\dot{s}_a=-\frac{\varepsilon|s|^c}{a|e|^{-|s|}+b}\mathrm{sat}(s)-k|s|^{(|\mathrm{sat}(s)|-1)}s \tag{14}$$

式中:a、b、c为待设计控制系数,且$-1<a<0$,$0<b<1$,$c>0$.

依据系统与滑模面(即边界层)的距离差异,分为3种情况进行讨论.

情况1:当$s\to+\infty$时,可知$\mathrm{sat}(s)=1$,此时式(14)变为$\dot{s}_a=-\dfrac{\varepsilon|s|^c}{b}-ks$.

情况2:当$s\to-\infty$时,可知$\mathrm{sat}(s)=-1$,此时式(14)变为$\dot{s}_a=\dfrac{\varepsilon|s|^c}{b}-ks$.

情况3:当$|s|\leqslant\Delta$且$|s|\to0$时,可知$\mathrm{sat}(s)=\dfrac{s}{\Delta}$,此时式(14)变为$\dot{s}_a=-\dfrac{\varepsilon|s|^c}{a+b}\dfrac{s}{\Delta}-k|s|^{\left(\frac{s}{\Delta}-1\right)}s$.

为更加直观地说明本文所设计自适应变速趋近律的优点,选取传统的指数趋近律作为对照基准,二者均以同一线性滑模面作为运动目标,在相同的初始状态下对比两种趋近律趋近过程,根据经验设置系统初始状态$\boldsymbol{\eta}_0=[1\ \ 1]$,等速项系数$\varepsilon=15$,指数项系数$k=10$,控制系数$a=-0.0001$、$b=0.001$、$c=0.5$,边界层厚度$\Delta=0.1$.对比结果如图4所示.由图4可知:自适应变速趋近律的趋近速度要明显快于传统指数趋近律,且减轻了滑模控制的抖振现象.

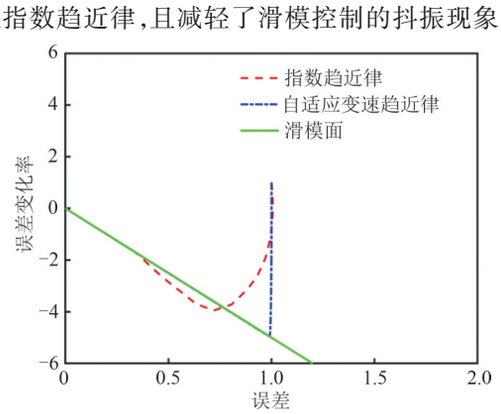


图4　滑模运动的相轨迹对比

Fig.4　Comparison of phase trajectories of sliding mode motion

综上所述,这种自适应变速趋近律通过动态调整边界层厚度,根据其所在位置实现了趋近模式切换:系统在远离滑模面时优先采用指数项主导的快速收敛方式,有效抑制等速项的干扰;而接近滑模面时自动切换为等速项主导的渐进收敛方式,利用其稳定收敛的特性来降低系统惯性.这种位置自适应机制在保证快速收敛的同时,通过变速调节有效削弱了传统滑模控制由于其固有的开关特性使得控制量在滑模面

附近产生高频切换导致的抖振现象.

2.3.2 滑模控制律设计

分别定义列车的位移跟踪误差和速度跟踪误差为

$$\begin{cases} e=\int_0^t z_1\mathrm{d}t-x_\mathrm{d} \\ \dot{e}=\int_0^t z_2\mathrm{d}t-v_\mathrm{d} \end{cases} \tag{15}$$

式中:x_d为列车的理想位移;v_d为列车的理想速度,满足$\dot{x}_\mathrm{d}=v_\mathrm{d}$;$e$为位移跟踪误差;$\dot{e}$为速度跟踪误差.

非奇异快速终端滑模面s_t表达式为

$$s_\mathrm{t}=e+\alpha|e|^p\operatorname{sgn}(e)+\beta|\dot{e}|^q\operatorname{sgn}(\dot{e}) \tag{16}$$

式中:α,β为正实数;p、q为指数项系数,q为两个奇整数之比,且$1<q<2$,同时要求$p>q$.由于位移跟踪误差e及速度跟踪误差$\dot{e}$中均不包含负指数项,因此该滑模面的设计有效规避了控制器的奇异性问题.

对滑模面求导可得

$$\dot{s}_\mathrm{t}=\dot{e}+\alpha p|e|^{p-1}\dot{e}+\beta q|\dot{e}|^{q-1}\ddot{e} \tag{17}$$

式中:$\dot{s}_\mathrm{t}$为s_t的导数;$\ddot{e}$为$\dot{e}$的导数.

令$\dot{s}_\mathrm{t}=0$,可得

$$\dot{s}_\mathrm{t}=\dot{e}+\alpha p|e|^{p-1}\dot{e}+\beta q|\dot{e}|^{q-1}\ddot{e}=0 \tag{18}$$

将式(15)代入式(18)中,可得

$$\dot{s}_\mathrm{t}=\dot{e}+\alpha p|e|^{p-1}\dot{e}+\beta q|\dot{e}|^{q-1}(z_2-\dot{v}_\mathrm{d})=0 \tag{19}$$

由于ESO已经将总扰动d实时估计并补偿,因此观测器对$\dot{v}$的观测值z_2可近似为系统输出的导数$\dot{y}$(即$\dot{v}$),将式(6)代入式(19)中,可得

$$\dot{s}_\mathrm{t}=\dot{e}+\alpha p|e|^{p-1}\dot{e}+\beta q|\dot{e}|^{q-1}(d+b_\mathrm{c}u-\dot{v}_\mathrm{d})=0 \tag{20}$$

等效控制律u_eq为

$$u_\mathrm{eq}=-\frac{1}{b_\mathrm{c}}\left[\frac{1}{\beta q}|\dot{e}|^{2-q}\left(1+\alpha p|e|^{p-1}\right)+d-\dot{v}_\mathrm{d}\right] \tag{21}$$

将非奇异快速终端滑模面s_t作为滑模面函数s代入自适应变速趋近律中,可得

$$\dot{s}_\mathrm{a}=-\frac{\varepsilon|s_\mathrm{t}|^c}{a|e|^{-|s_\mathrm{t}|}+b}\operatorname{sat}(s_\mathrm{t})-k|s_\mathrm{t}|^{(|\operatorname{sat}(s_\mathrm{t})|-1)}s \tag{22}$$

切换控制律u_sw为

$$u_\mathrm{sw}=-\frac{1}{b_\mathrm{c}}\left(\frac{\varepsilon|s_\mathrm{t}|^c}{a|e|^{-|s_\mathrm{t}|}+b}\operatorname{sat}(s_\mathrm{t})+k|s_\mathrm{t}|^{(|\operatorname{sat}(s_\mathrm{t})|-1)}s_\mathrm{t}\right) \tag{23}$$

滑模控制律u_0为

$$u_0=u_\mathrm{eq}+u_\mathrm{sw}=-\frac{1}{b_\mathrm{c}}\left[\frac{1}{\beta q}|\dot{e}|^{2-q}\left(1+\alpha p|e|^{p-1}\right)+\frac{\varepsilon|s_\mathrm{t}|^c}{a|e|^{-|s_\mathrm{t}|}+b}\operatorname{sat}(s_\mathrm{t})+k|s_\mathrm{t}|^{(|\operatorname{sat}(s_\mathrm{t})|-1)}s_\mathrm{t}+d-\dot{v}_\mathrm{d}\right] \tag{24}$$

则控制输入量u为

$$u=\frac{u_0-z_3}{b_0} \tag{25}$$

2.4 稳定性分析

2.4.1 观测器稳定性分析

构建ESO观测误差系统为

$$\begin{cases} e_1=z_1-y \\ \dot{e}_1=e_2-\beta_{01}e_1 \\ \dot{e}_2=e_3-\beta_{02}\operatorname{newfal}\left(e_1,\frac{1}{2},\delta\right) \\ \dot{e}_3=g(v,\psi(t),t)-\beta_{03}\operatorname{newfal}\left(e_1,\frac{1}{4},\delta\right) \end{cases} \tag{26}$$

式中:e_2为观测器对$\dot{v}$的观测误差;e_3为观测器对d的观测误差;$\dot{e}_1$、$\dot{e}_2$、$\dot{e}_3$分别为e_1、e_2、e_3的导数.

令$\boldsymbol{e}_0=\begin{bmatrix}e_1 & e_2 & e_3\end{bmatrix}^\mathrm{T}$,将式(26)在零平衡点处的状态转换为矩阵形式,其表达式为

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{e}}_0=-\boldsymbol{A}\boldsymbol{e}_0 \\ \boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} \beta_{01} & -1 & 0 \\ \beta_{02}\dfrac{\operatorname{newfal}\left(e_1,\frac{1}{2},\delta\right)}{e_1} & 0 & -1 \\ \beta_{03}\dfrac{\operatorname{newfal}\left(e_1,\frac{1}{4},\delta\right)}{e_1} & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{27}$$

令$C=\dfrac{\operatorname{newfal}(e_1,\lambda,\delta)}{e_1}$,易得$C>0$.定义$B=\beta_{01}\beta_{02}-\beta_{03}$,当$B>0$时,可得主对角线各元素均为正数的矩阵$\boldsymbol{D}$,使得$\boldsymbol{DA}$为正定对称矩阵.矩阵$\boldsymbol{D}$为

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix} 1 & \dfrac{\beta_{02}}{B}+\sigma_1 & -\delta_0 \\ -\dfrac{\beta_{02}}{B}-\sigma_1 & \delta_0 & \dfrac{1}{BC}+\sigma_2 \\ \delta_0 & -\dfrac{1}{BC}-\sigma_2 & \delta_0 \end{bmatrix} \tag{28}$$

式中:δ_0为无穷小的正数;σ_1、σ_2为与δ_0相关且趋近于零的数.

定义观测误差方程的Lyapunov函数$V_1(t)$为

$$V_1(t)=\int_0^t\left(-\dot{\boldsymbol{e}}_0^\mathrm{T}\boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{e}}_0\right)\mathrm{d}t+\mathrm{C}_0 \tag{29}$$

式中:C_0为常数.

将式(27)代入式(29),展开可得

$$V_1(t)=\int_0^t-(\boldsymbol{A}\boldsymbol{e}_0)^\mathrm{T}\boldsymbol{D}\boldsymbol{A}\boldsymbol{e}_0\mathrm{d}t+\mathrm{C}_0=\int_0^t\left[-\left(\beta_{01}e_1-e_2\right)^2-\delta_0\left(\beta_{02}C-e_3\right)^2-\delta_0\left(\beta_{03}C\right)^2\right]\mathrm{d}t+\mathrm{C}_0 \tag{30}$$

由于$\delta_0\to0$,因此式(30)可简化为

$$V_1(t)\approx C_0-\int_0^t\left(\beta_{01}e_1-e_2\right)^2\mathrm{d}t \tag{31}$$

对式(30)中的 $V_1(t)$ 求导可得

$$\dot{V}_1(t)=-\left(\beta_{01}e_1-e_2\right)^2-\delta_0\left(\beta_{02}C-e_3\right)^2-\delta_0\left(\beta_{03}C\right)^2 \tag{32}$$

在平衡点处,由于 $\int_0^t\left(\beta_{01}e_1-e_2\right)^2\mathrm{d}t$ 有界,因此当参数 C_0 选取适当值时,可使 $V_1(t)\geqslant 0$. 因为 $V_1(t)\geqslant 0$, $\dot{V}_1(t)\leqslant 0$,且仅当 $\boldsymbol{e}_0=0$ 时, $\dot{V}_1(t)=0$,根据上述推导过程可知,当 $B>0$ 时,即观测器增益均为正数且满足 $\beta_{01}\beta_{02}-\beta_{03}>0$ 时,观测器在平衡点处渐近稳定.

2.4.2　控制器稳定性分析

定义控制器的Lyapunov函数 V_2 为

$$V_2=\frac{1}{2}s_t^{\,2} \tag{33}$$

对 V_2 求导可得

$$\dot{V}_2=s_t\dot{s}_t \tag{34}$$

将式(20)代入式(34)中,可得

$$\dot{V}_2=s_t\left[\dot{e}+\alpha p|e|^{p-1}\dot{e}+\beta q|\dot{e}|^{q-1}\left(d+b_c u-\dot{v}_d\right)\right] \tag{35}$$

此时令滑模控制律 u_0 等效为控制输入量 u,将式(24)代入式(35),可得

$$\dot{V}_2=s_t\left[\beta q|\dot{e}|^{q-1}\left(-\frac{\varepsilon|s_t|^c}{a|e|^{-|s_t|}+b}\mathrm{sat}(s_t)-k|s_t|^{\left(|\mathrm{sat}(s_t)|-1\right)}s_t\right)\right] \tag{36}$$

整理式(36)可得

$$\dot{V}_2=\beta q|\dot{e}|^{q-1}\left(-\frac{\varepsilon|s_t|^{c+1}}{a|e|^{-|s_t|}+b}\left|\mathrm{sat}(s_t)\right|-k|s_t|^{\left(|\mathrm{sat}(s_t)|-1\right)}s_t^2\right) \tag{37}$$

在系数满足 $\beta>0$, $1<q<2$, $\varepsilon>0$, $k>0$, $-1<a<0$, $0<b<1$, $|a|<b$, $c>0$ 的情况下,使 $\dot{V}_2\leqslant 0$. 由于 $V_2\geqslant 0$, $\dot{V}_2\leqslant 0$,且当 $\dot{V}_2\equiv 0$ 时, $s_t\equiv 0$,根据LaSalle不变集原理,系统渐近稳定,当 $t\to\infty$ 时, $s_t\to 0$.

3　系统仿真与结果分析

本文以CR400BF型动车组作为研究对象进行分析,其基本运行参数为:列车重量465 t;最高运行速度350 km/h;牵引功率10 140 kW;单位基本阻力 $0.41+0.001\,3v+0.000\,111\,v^2$(N/kN);动力配置4动4拖.假设列车行驶在平直的无隧道线路,即所受的附加阻力为零.

基于上述条件,利用MATLAB/Simulink软件验证所设计的控制器在列车运行过程中针对不同工况运行状态的跟踪效果.参考列车的实际运行状态,设定一条包含列车牵引、巡航及制动3种不同工况下转换的理想目标速度曲线 $v_d(t)$,其函数表达式为

$$v_d(t)=\begin{cases}\min\left[v_{in}\left(1-\exp\left(-t/120\right)\right),\ 350\right] & 0\leqslant t<T/2\\ \max\left[v_{in}\left(1-\exp\left(-\left(T/2+240-t\right)/80\right)\right),\ 200\right] & T/2\leqslant t<T\\ \min\left[v_{in}\left(1-\exp\left(-\left(t-T+T_{in}\right)/160\right)\right),\ 350\right] & T\leqslant t<3T/2\\ \max\left[v_{in}\left(1-\exp\left(-\left(3T/2+480-t\right)/160\right)\right),\ 0\right] & 3T/2\leqslant t<2T\end{cases} \tag{38}$$

式中: v_{in} 为速度常数,其值为368.34 km/h; T 为时间常数,其值为1 200 s; T_{in} 为一个与 v_{in} 有关的时间常数,其计算方式为 $T_{in}=-160\ln\left(1-200/v_{in}\right)$.

将仿真时间设定为2 500 s,采样时间设置为0.001 s,根据经验选取的改进滑模-自抗扰控制器的控制参数的值如表1所示.

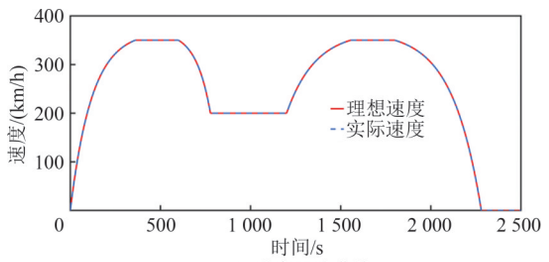
表1　控制器参数

Tab.1　Parameters of controller

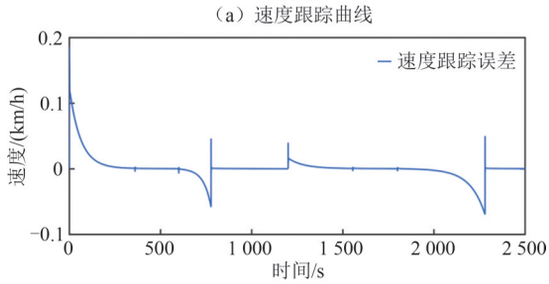
参数	数值	参数	数值
α	1	h	0.001
β	5	r_0	40
p	2	h_0	0.001
q	5/3	b_0	0.002 15
ε	5	β_{01}	1 200
k	10	β_{02}	1 700
a	−0.000 1	β_{03}	4 500
b	0.001	δ	0.005
c	1.5	—	—

首先,采用本文所设计的改进滑模-自抗扰控制器实现对列车速度曲线的动态跟踪,并由此生成列车速度跟踪误差曲线,仿真结果如图5所示.由图5可知:实际速度曲线始终与目标速度曲线保持紧密贴合,并且速度跟踪误差始终稳定在−0.1～0.2 km/h的范围内,这充分说明了该控制器在动态跟踪精度与稳态控制性能方面具有显著优势.

其次,状态扩张观测器观测到的速度、加速度和总扰动 d 如图6所示.由图6可知:在绝大部分时刻,观测器观测到的值与实际值几乎相同,表明该观测



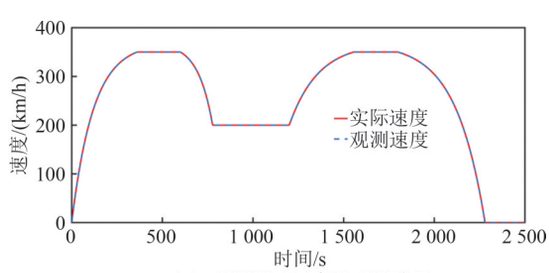
（a）速度跟踪曲线



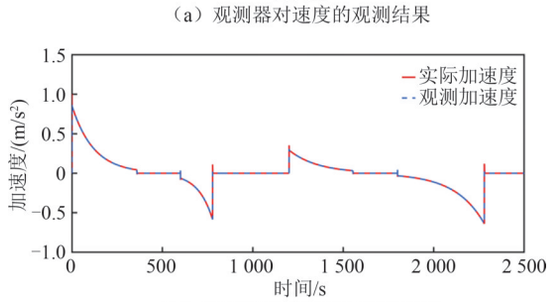
（b）速度跟踪误差曲线

图 5　列车速度跟踪及误差仿真结果

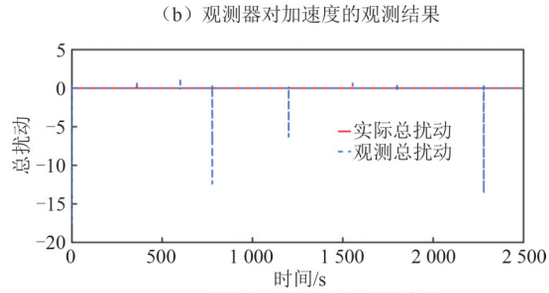
Fig.5　Simulation results of train speed tracking and tracking error



（a）观测器对速度的观测结果



（b）观测器对加速度的观测结果



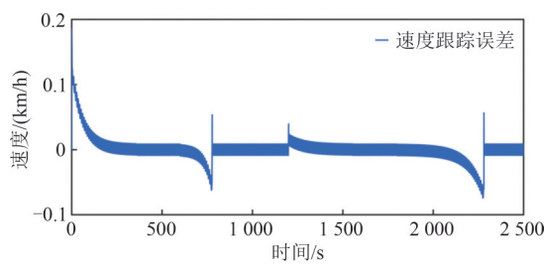
（c）观测器对总扰动的观测结果

图 6　观测器对状态变量的观测结果

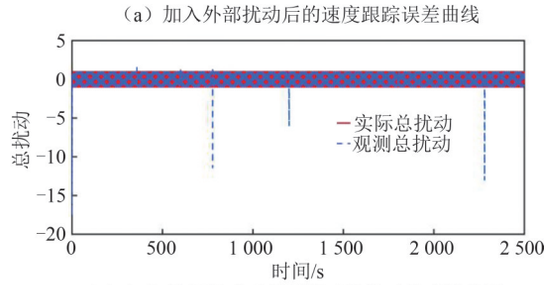
Fig.6　Observer estimates of the state variables

器具有良好的观测性能，整个控制器能够达到较为理想的效果.

参考列车实际运行经验，设定外部扰动 $\varphi(t)=\sin(0.77t)$，此时的速度跟踪误差曲线和状态扩张观测器对总扰动的观测结果如图 7 所示.由图 7 可知：当引入外部扰动后，速度跟踪误差曲线与未受到外部扰动时相比，变化幅度微乎其微，速度跟踪误差依旧维持在 −0.1～0.2 km/h 的范围内，这充分彰显了控制器具备出色的抗干扰性能；而加入外部扰动后，观测器对总扰动的观测结果依然在绝大多数时段内与真实值高度接近，这表明该观测器可实现对外部扰动的高精度辨识与补偿.



（a）加入外部扰动后的速度跟踪误差曲线

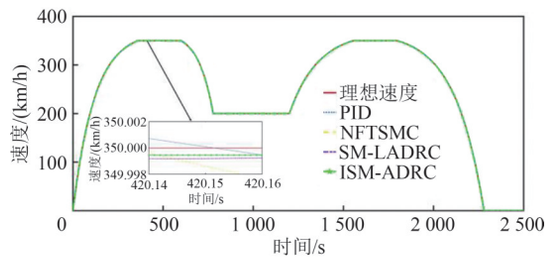


（b）加入外部扰动后观测器对总扰动的观测结果

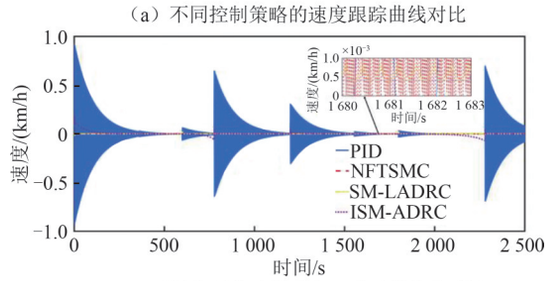
图 7　加入外部扰动后的仿真结果

Fig.7　Simulation results after adding external disturbance

最后，为了更有效地凸显本文所提出的控制策略的优越性，特选取 PID 控制、非奇异快速终端滑模控制（Non-Singular Fast Terminal Sliding Mode Control，NFTSMC）及滑模-线性自抗扰控制（Sliding Mode Linear Active Disturbance Rejection Control，SM-LADRC）作为参照，在统一的测试工况下评估分析各类控制器对速度曲线的动态追踪性能，4 种控制方式的速度跟踪及误差曲线的对比仿真实验结果如图 8 所示.由图 8 可知：在 1 680～1 683 s 时，列车的速度跟踪误差达到稳态，PID 的最大速度跟踪误差的绝对值为 0.008 25 km/h；NFTSMC 的最大速度跟踪误差的绝对值为 0.003 83 km/h；SM-LADRC 的最大速度跟踪误差的绝对值为 0.000 82 km/h；而 ISM-ADRC 的最大速度跟踪误差的绝对值为 0.000 42 km/h，相较于其他 3 种方法分别降低了 95%、89%、49%；尽管所有控制器均可以大致跟踪理想速度曲线，但其他 3 种控制器均产生了一定的振荡现象，这也反映出 ISM-ADRC 具有较好的控制效果.结果表明，本文提出的控制策略在跟踪精度上具有显著优势，使得列车运行控制的动态追踪精度更高.



（a）不同控制策略的速度跟踪曲线对比



（b）不同控制策略的速度跟踪误差曲线对比

图 8　4种控制策略的仿真结果对比

Fig.8　Comparison of simulation results for four control strategies

4　结论

1）针对自抗扰控制器响应速度较慢和滑模控制器追踪精度较低、易引发抖振的弊端，设计了一种改进滑模-自抗扰速度控制器．该控制器融合了滑模控制和自抗扰控制的优势，实现了跟踪精度、响应速度及抗干扰能力的综合提升，并有效抑制了控制器的抖振现象．

2）为进一步提升本文所提控制器的控制效果，设计一种新型非线性函数对扩张状态观测器进行优化，同时提出一种基于饱和函数的新型自适应变速趋近律，将其与非奇异快速终端滑模面相结合得出滑模控制律．这一策略不仅进一步减轻了控制器的抖振现象，还有助于提升收敛速率．

3）仿真结果表明：本文所提控制策略具有良好的速度跟踪精度和鲁棒性，并且无论外界扰动存在与否，均能有效实现对速度指令的精准追踪．相较于 PID 控制、NFTSMC 及 SM-LADRC，所提控制方法具有更好的跟踪性能，速度跟踪误差范围为 −0.1～0.2 km/h，稳态时的速度跟踪误差相比其他3种方法分别降低了 95%、89% 和 49%，预示其在实际应用中具备广阔的发展潜力．

本文在设计高速列车速度跟踪控制算法时，是针对单质点模型进行研究的．这虽然简化了分析的过程，但单质点模型忽略了车厢间的作用力，导致其不能完全反映出列车运行时的状态．此外，在列车实际运行过程中，执行器一旦出现故障，不仅会影响牵引系统的性能，还会降低列车的运行效率．因此，在下一步工作中，将针对多质点模型进行研究，并考虑执行器故障的情况，使得列车在该种情况下仍能对目标速度曲线实现较为精确的跟踪．

参考文献（References）：

[1] 董昱，魏万鹏．基于RBF神经网络PID控制的列车ATO系统优化[J]．电子测量与仪器学报，2021，35(1)：103－109.
Dong Yu，Wei Wanpeng. Optimization of train ATO system based on RBF neural network PID control[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation，2021，35(1)：103－109.(in Chinese)

[2] 祁正升．高速列车ATO多目标优化的控制策略研究[D]．兰州：兰州交通大学，2023：56.
Qi Zhengsheng. Research on ATO multi-objective optimization control strategy for high-speed train[D]. Lanzhou：Lanzhou Jiaotong University，2023：56.(in Chinese)

[3] 杨辉，丁盼，谭畅．基于多质点模型的高速列车自适应速度跟踪[J]．控制工程，2023，30(3)：393－400.
Yang Hui，Ding Pan，Tan Chang. A multiple point-mass model based high-speed train adaptive speed tracking control scheme[J]. Control Engineering of China，2023，30(3)：393－400.(in Chinese)

[4] 侯涛，周文琪，牛宏侠．基于补偿函数观测器的高速列车速度运行曲线跟踪控制研究[J]．北京交通大学学报，2025，49(3)：100－110.
Hou Tao，Zhou Wenqi，Niu Hongxia. Research on high-speed train speed running curve tracking control based on compensating function observer[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2025，49(3)：100－110.(in Chinese)

[5] 韩兆玉，徐传芳，高晨旺．基于RBFNN的高速列车分数阶滑模速度跟踪控制[J]．铁道科学与工程学报，2026，23(2)：542－550.
Han Zhaoyu，Xu Chuanfang，Gao Chenwang. Fractional-Order sliding mode speed tracking control of high-speed train based on RBFNN[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2026，23(2)：542－550.(in Chinese)

[6] Guo Y X，Sun P F，Feng X Y，et al. Adaptive fuzzy sliding mode control for high-speed train using multi-body dynamics model[J]. IET Intelligent Transport Systems，2023，17(2)：450－461.

[7] 张鑫，祝子钧，陈凯生．基于自适应终端滑模的高速列车迭代学习速度控制[J]．铁道学报，2024，46(9)：76－84.
Zhang Xin，Zhu Zijun，Chen Kaisheng. Adaptive terminal sliding mode based iterative learning speed control for high-speed trains[J]. Journal of the China Railway Society，2024，46(9)：76－84.(in Chinese)

[8] Yao X M，Park J H，Dong H R，et al. Robust adaptive nonsingular terminal sliding mode control for automatic train operation[J]. IEEE Transactions on Systems，Man，and

Cybernetics: Systems, 2019, 49(12): 2406－2415.

[9] 李自康,戴春辉,黄翠翠,等.基于多种群遗传算法的磁浮列车自抗扰速度控制[J].西南交通大学学报,2025,60(4):912－920.
Li Zikang, Dai Chunhui, Huang Cuicui, et al. Active disturbance rejection speed control for maglev trains based on multiple population genetic algorithm[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2025, 60(4): 912－920.(in Chinese)

[10] Xue J Z, Zhuang K Y, Zhao T, et al. Speed tracking control of high-speed train based on particle swarm optimization and adaptive linear active disturbance rejection control[J]. Applied Sciences, 2022, 12(20): 10558.

[11] 安柯欣,陈光武,石建强.基于强化学习的高速列车速度跟踪改进自抗扰控制[J].北京交通大学学报,2023,47(2):86－94.
An Kexin, Chen Guangwu, Shi Jianqiang. Improved active disturbance rejection control of high-speed train speed tracking based on reinforcement learning[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(2): 86－94.(in Chinese)

[12] Zhou C, Peng L, Yan H C. Active-Disturbance-Rejection cooperative control for multi-train system with constraints and collision avoidance[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2025, 26(12): 22583－22591.

[13] 梁乐观,牛宏侠.基于SM-LADRC的高速列车自动驾驶速度控制[J].北京交通大学学报,2022,46(5):114－121.
Liang Leguan, Niu Hongxia. Automatic operation and speed control of high-speed train based on SM-LADRC[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(5): 114－121.(in Chinese)

[14] 张鑫,李江雪.基于分数阶积分滑模的高速列车速度跟踪自抗扰控制[J].北京交通大学学报,2025,49(6):101－109.
Zhang Xin, Li Jiangxue. Active disturbance rejection control for high-speed train speed tracking based on fractional order integral sliding mode[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2025, 49(6): 101－109.(in Chinese)

[15] 李中奇,余剑烽,周靓.重载列车运行过程的滑模自抗扰控制方法[J].西南交通大学学报,2026,61(1):197－206.
Li Zhongqi, Yu Jianfeng, Zhou Liang. Operation control method of heavy duty train based on sliding mode active disturbance rejection control[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2026, 61(1): 197－206.(in Chinese)

[16] 邵保领,刘凌,胡铭遥.面向永磁同步电机负载转矩观测的自抗扰改进滑模控制[J].西安交通大学学报,2024,58(3):204－211.
Shao Baoling, Liu Ling, Hu Mingyao. Improved sliding mode control with disturbance rejection for load torque observation of permanent magnet synchronous motors[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(3): 204－211.(in Chinese)

[17] Li G X, Wang H B, Liu X, et al.A sliding mode active disturbance rejection control of DC active power filter for enhancing DC microgrid voltage robustness[J]. Electric Power Systems Research, 2025, 241: 111－388.

[18] Chen G P, Jiang Y, Tang Y J, et al. Revised adaptive active disturbance rejection sliding mode control strategy for vertical stability of active hydro-pneumatic suspension[J]. ISA Transactions, 2023, 132: 490－507.

[19] Miranda-moya A, Castañeda H, Wang H S. Disturbance rejection-based adaptive non-singular fast terminal sliding mode control for a quadrotor under severe turbulent wind[J]. ISA Transactions, 2025, 157: 248－257.

[20] Sun H L, Gao L L, Zhao Z X. Adaptive super-twisting fast nonsingular terminal sliding mode control with ESO for high-pressure electro-pneumatic servo valve [J]. Control Engineering Practice, 2023, 134: 105－483.

[21] 刘文婧,陈腾宇,湛春颖,等.基于改进fal函数的四旋翼无人机姿态运动控制[J].科学技术与工程,2025,25(6):2453－2460.
Liu Wenjing, Chen Tengyu, Zhan Chunying, et al. Quadrotor UAV attitude motion control based on improved fal function[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(6): 2453－2460.(in Chinese)

[22] 李中奇,黄琳静,周靓,等.高速列车滑模自抗扰黏着控制方法[J].交通运输工程学报,2023,23(2):251－263.
Li Zhongqi, Huang Linjing, Zhou Liang, et al. Sliding mode active disturbance rejection adhesion control method of high-speed train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(2): 251－263.(in Chinese)

[23] 陈彤,蒋强,金博丕,等.基于改进ESO的PMSM滑模自抗扰控制研究[J].微电机,2024,57(12):40－46.
Chen Tong, Jiang Qiang, Jin Bopi, et al. Sliding mode active disturbance rejection control for PMSM based on improved ESO[J]. Micromotors, 2024, 57(12): 40－46.(in Chinese)

[24] 肖伸平,张智恒,刘政轩,等.自适应变速趋近律的PMSM终端滑模控制[J/OL].控制工程,2025. doi: 10.14107/j.cnki.kzgc.20240876.
Xiao Shenping, Zhang Zhiheng, Liu Zhengxuan, et al. Permanent magnet synchronous motor terminal sliding mode control with adaptive variable speed reaching law [J/OL]. Control Engineering of China, 2025. doi: 10.14107/j.cnki.kzgc.20240876.(in Chinese)