

含时滞电磁悬浮系统的 Smith 预估 线性自抗扰控制研究*

万成麒¹ 冯洋¹ 赵春发^{1†} 舒瑶² 和风¹

(1. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室, 成都 610031)

(2. 中车株洲电力机车有限公司, 株洲 412001)

摘要 主动电磁悬浮系统中的时滞显著影响磁浮列车运行稳定性和乘坐舒适性, 是电磁悬浮型磁浮列车提速改造需要重点关注的问题. 采用 Smith 预估器对电磁悬浮系统的时滞进行补偿, 同时引入线性自抗扰控制器(LADRC), 将预估时滞与实际时滞的误差作为内部扰动进行估计和补偿, 提出了具有时滞补偿和自抗扰功能的 Smith-LADRC 悬浮控制方法. 然后, 开展磁浮车辆垂向动力学仿真分析, 比较了采用 PID、LADRC、Smith-PID 和 Smith-LADRC 控制算法时磁浮车辆稳定悬浮的时滞阈值, 验证了 Smith-LADRC 悬浮控制器具有更强的时滞补偿能力和抗干扰能力. 最后, 研究了 Smith-LADRC 悬浮控制器参数对磁浮车辆动力学性能的影响, 综合权衡时滞稳定裕度和悬浮间隙波动幅值, 给出了 LADRC 控制器带宽、观测器带宽和控制器增益的优选范围.

关键词 磁浮列车, 电磁悬浮, 时滞系统, Smith 预估器, 自抗扰控制

中图分类号: U237; TP273

文献标志码: A

Study on Smith Predictive Linear Active Disturbance Rejection Control of the Electromagnetic Levitation System with Time Delays*

Wan Chengqi¹ Feng Yang¹ Zhao Chunfa^{1†} Shu Yao² He Feng¹

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Chengdu 610031, China)

(2. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract Time delays (TDs) in the active electromagnetic levitation system significantly affect the running stability and ride comfort of Maglev trains, so it is a critical issue for the technical reform of the speed-up electromagnetically suspended Maglev trains. In this paper, a Smith predictor is employed to compensate for the TD in the electromagnetic levitation system. Simultaneously, a linear active disturbance rejection controller (LADRC) is introduced to estimate and compensate for the errors between the predicted TD and actual TDs as internal disturbances. In this way, we developed a Smith-LADRC levitation controller with the time-delay compensation and active disturbance rejection capabilities. Subsequently, vertical dynamic response of maglev vehicles adopting respectively PID, LADRC, Smith-PID, and Smith-LADRC control algorithm are simulated, and the TD thresholds for stable levitation are compared. The results confirm that the Smith-LADRC levitation controller exhibits the stronger time-delay

2024-02-27 收到第 1 稿, 2024-04-18 收到修改稿.

* 国家自然科学基金项目(52172375), 国家资助博士后研究人员计划(GZB20230612), 轨道交通运载系统全国重点实验室自主研究课题(2023TPL-T01), 高速磁浮运载技术全国重点实验室开放课题(SKLM-SFCF-2023-012), 湖南省科技创新计划项目(2020GK2084), National Natural Science Foundation of China(52172375), Postdoctoral Fellowship Program of CPSF(GZB20230612), Independent Research Project of State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System (2023TPL-T01), Open Foundation of State Key Laboratory of High-speed Maglev Transportation Technology(SKLM-SFCF-2023-012), Science and Technology Innovation Program of Hunan Province(2020GK2084).

† 通信作者 E-mail: cfzhao@swjtu.edu.cn

compensation and anti-disturbance capabilities. Finally, the influence of Smith-LADRC controller parameters on dynamic performances of maglev vehicle is investigated. By balancing the TD stability margin and the fluctuation amplitude of levitation gap, optimal ranges for the controller bandwidth, the observer bandwidth and the controller gain of LADRC are presented.

Key words Maglev train, electromagnetic suspension, time delay system, Smith predictor, active disturbance rejection control

引言

电磁悬浮型 (Electromagnetic Suspension, EMS) 磁浮列车具有振动小、噪声低、转弯与爬坡能力强、维护成本低等优点,近年来在我国得到快速发展和示范应用^[1].长沙磁浮快线、北京地铁 S1 线、凤凰磁浮观光线和清远磁浮旅游线均采用了我国自主研发的中低速 EMS 磁浮交通系统,最高运营速度达到 140km/h,充分展示了城轨磁浮交通的技术优势.然而,由于轨道不平顺的动力作用、电磁悬浮系统的时滞效应、导轨的涡流效应等均随速度提高而增大,当速度高于 140km/h 以后,悬浮间隙波动幅值和车辆振动显著增大,列车运行平稳性难以达到优秀级别,甚至出现悬浮失效和电磁铁碰轨现象^[2-4].相关理论和数值分析表明,提速后磁浮列车振动加剧和悬浮失稳的原因之一是电磁悬浮系统中存在着各种时滞环节,如电磁铁电感使得线圈绕组的电流滞后于其控制电压(执行器时滞),传感器及控制器信号采集、处理、运算、传输等存在延时,时滞不仅加剧了悬浮间隙波动,还会诱发混沌和分岔等非线性动力学现象^[5-9],其不利影响随行车速度提高而愈加显著^[10],需要在悬浮控制系统设计时给予重视并加以解决.

国内外已广泛开展了电磁悬浮控制技术研究,针对磁浮交通应用需求提出了 PID 控制、反馈线性化控制、滑模控制、自适应控制、模型预测控制、鲁棒控制、模糊控制、神经网络控制及各种复合控制算法^[11-13].然而,大部分已有研究通常简化或忽略了时滞的影响,专门针对含时滞电磁悬浮系统的控制研究还不多见. Kumar 等^[14]提出了一种分数阶悬浮控制方法,改善了不同时滞条件下悬浮系统的上升时间、稳定时间、超调量及频域指标. Sun 等^[15-17]提出基于 Takagi-Sugeno 模糊模型的鲁棒控制器、基于神经网络的监督控制器和基于强化学

习的最优跟踪控制器,结果表明这些控制算法能够提高系统在质量参数不确定、随机扰动和时滞条件下的稳定性.以上研究为抑制时滞对电磁悬浮系统的影响提供了新思路,但提出的控制算法较为复杂,不利于工程实施.

Smith 预估控制^[18]是一种针对纯滞后系统设计的控制策略,在工业控制中得到大量应用,可供电磁悬浮控制设计借鉴和参考.然而,当被控对象实际模型和预估模型不匹配时,Smith 预估器的补偿作用会明显降低,甚至影响系统的稳定性.因此,学者们在 Smith 预估器的基础上提出了改进方案.邹丽和杨献勇^[19]将外扰和模型不确定性均看作外部扰动,设计扰动观测器进行估计,减小了 Smith 预估器模型不确定性对系统性能的影响.齐朝阳等^[20]提出迭代模型 Smith 预估控制,可自适应得到精确的预估模型,并辨识过程的时滞,但迭代计算降低了控制系统的实时性.为了改善预估模型失配的问题,郑仰东^[21]提出基于李雅普诺夫稳定性理论的模型参考自适应控制方案,但该方法未考虑预估时滞不匹配的情况. Zheng 和 Gao^[22]根据 Smith 预估控制思想对自抗扰控制的扩张状态观测器进行改进,得到 Smith-ADRC 控制器,相较于 Smith-PI 控制器,该方法在补偿时滞的同时保持了良好的瞬态响应和鲁棒性. Zhang 等^[23]针对输入时滞系统设计了前馈补偿自抗扰控制,利用跟踪微分器获取预估控制信号,实现控制信号的相位超前,并增大扩张状态观测器的允许带宽,从而获得更强的抗时滞扰动能力.陈增强等^[24]针对含不稳定极点的一阶时滞对象设计了新型 Smith 自抗扰控制器,通过蒙特卡罗试验验证了该控制器的抗扰能力优于改进的 Smith-PID 控制器.

参考前人研究工作,本文以中低速 EMS 磁浮列车单点悬浮系统为对象,将 Smith 预估器和线性自抗扰控制 (Linear Active Disturbance Rejection

Control, LADRC)相结合,提出了可补偿反馈通道时滞的 Smith-LADRC 悬浮控制器.然后,建立中低速 EMS 磁浮车辆垂向动力学模型,仿真验证了 Smith-LADRC 控制器时滞补偿的有效性.最后开展了 LADRC 控制参数对时滞补偿效果的影响分析,给出了其参数优化设计建议,为中低速磁浮列车提速技术改造提供参考.

1 电磁悬浮系统模型及双环控制策略

1.1 单点悬浮系统模型

中低速磁浮列车每车配备 5 个悬浮架单元,悬浮架主要由左右两个悬浮模块和前后两对防侧滚梁组成,悬浮模块由托臂、箱梁、悬浮电磁铁和直线电机短定子等部件构成.悬浮电磁铁由 4 个励磁线圈、极板和铁芯组成,其中前、后 2 个励磁线圈分别受控于 2 个独立的悬浮控制器,形成 2 个单点悬浮系统.因此,悬浮控制器设计通常以图 1 所示单点悬浮系统为对象,图中 $z(t)$ 为悬浮间隙, Φ_m 为磁路磁通, F_m 为电磁力, f_d 表示干扰力, m 是悬浮体质量, $u(t)$ 和 $i(t)$ 分别表示电磁铁线圈的电压和电流.

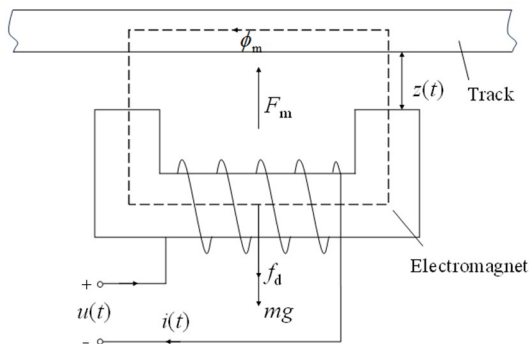


图 1 单点悬浮系统

Fig. 1 Single point levitation system

假定悬浮间隙均匀分布,不考虑铁芯和导轨的磁阻,忽略磁通泄漏,电磁铁吸力可表示为:

$$F_m(i, z) = \frac{\mu_0 N^2 S}{4} \left(\frac{i}{z} \right)^2 \quad (1)$$

式中, μ_0 为空气磁导率, N 为线圈匝数, S 是电磁铁有效磁极面积.

依据牛顿第二定律,悬浮体垂向运动方程为:

$$m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} = mg - F_m(i, z) + f_d(t) \quad (2)$$

将式(1)在平衡点 (i_0, z_0) 处进行泰勒展开并

忽略高次项,代入式(2)后得到平衡点附近悬浮体的运动微分方程:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} &= k_z [z(t) - z_0] - k_i [i(t) - i_0] + f_d(t) \\ &= k_z z(t) - k_i i(t) + f_d(t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{式中, } k_z = \frac{\mu_0 N^2 S i_0^2}{2 z_0^3}, k_i = \frac{\mu_0 N^2 S i_0}{2 z_0^2}.$$

电磁铁线圈电压方程为:

$$u(t) = R_c i(t) + \frac{\mu_0 N^2 S}{2 z(t)} i(t) - \frac{\mu_0 N^2 S i(t)}{2 [z(t)]^2} \dot{z}(t) \quad (4)$$

式中, R_c 表示线圈电阻.

将式(4)在平衡点处进行泰勒展开并忽略高次项,可得到线圈电压的线性化表达式:

$$u(t) = R_c i(t) + L_0 \dot{i}(t) - k_i \dot{z}(t) \quad (5)$$

$$\text{式中, } L_0 \text{ 表示平衡点处电磁铁电感, } L_0 = \frac{\mu_0 N^2 S}{2 z_0}.$$

式(3)和式(5)组成单点悬浮系统在平衡点处的线性化模型,单点悬浮系统的参数如表 1 所列.

表 1 单点悬浮系统参数值

Table 1 Parameter values of the single point levitation system

Parameter	Symbol	Value
Rated levitation gap	z_0	8mm
Rated current	i_0	25A
Number of coils	N	360
Effective area of the magnetic poles	S	0.024m^2

1.2 串级双环控制策略

式(1)中电磁吸力大小与悬浮间隙二次方成反比,意味着开环电磁悬浮系统是不稳定的,需要根据悬浮间隙大小实时调节电磁铁的电压/电流,主动控制电磁力大小,以维持相对稳定的悬浮间隙.当直接采用状态反馈法进行反馈控制时,电磁铁大电感引起的电流延迟增加了悬浮控制系统设计和调试的难度.因此,一般采用串级控制思想将悬浮控制系统分解为电流环和位置环两个子系统设计^[25].后级电流环可使得线圈电流快速跟踪前级位置环的输出电压,确保设计位置环时可以将电流环看作一个比例环节.

图 2 给出了双环串级悬浮控制系统方框图.在实际工程中,位置环一般采用 PID 控制算法,其电

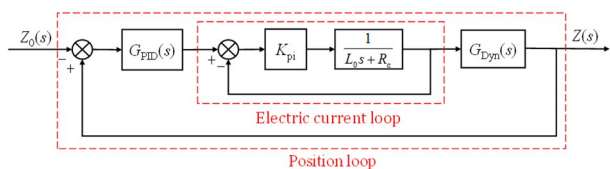


图2 双环串级控制系统方框图

Fig. 2 Block diagram of double loop cascade control system

压控制律为:

$$u(t) = K_p [z(t) - z_0] + K_i \int_0^t [z(t) - z_0] dt + K_d \frac{dz(t)}{dt} \quad (6)$$

式中, K_p 、 K_i 和 K_d 分别表示位置环的比例系数、积分系数和微分系数。

电流环可等效为一阶惯性环节, 采用比例控制加快电流响应速度, 电流环传递函数为:

$$G_i(s) = \frac{K_{pi}}{K_{pi} + L_0 s + R_c} \quad (7)$$

式中, K_{pi} 为电流环比例系数。

2 Smith-LADRC 悬浮控制器

PID 位置环+比例电流环的双环悬浮控制器在 EMS 磁浮列车中得到了广泛应用, 但工程调试难度较大. 当中低速 EMS 磁浮列车速度超过 140km/h 以后, 现有悬浮控制器不能很好地满足行车安全性和舒适性需求. 为了探索性能更优的悬浮控制器, 在继承串级控制思想的基础上, 本文将 Smith 预估控制和线性自抗扰控制相结合, 设计了 LADRC 位置环+比例电流环+Smith 预估器的复合控制器, 称之为 Smith-LADRC 悬浮控制器。

2.1 Smith 预估器

电磁悬浮系统中执行器的时滞问题尤为突出, 即使采用电流环仍会存在不超过 10ms 的电流延时, 其他环节的时滞虽然较小, 但累加到一起后仍可达到毫秒级, 不可忽视. 将电磁悬浮系统中各种时滞累加考虑为控制回路的反馈通道时滞, 图 3 给出了含时滞的闭环控制系统方框图, 图中 $G_c(s)$ 表

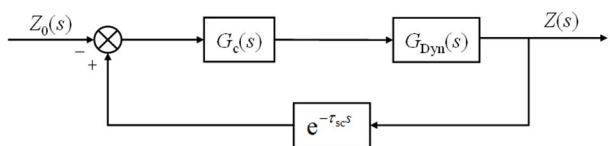


图3 含反馈通道时滞的控制系统方框图

Fig. 3 Block diagram of control system with time delays in the feedback path

示双环控制器, $G_{Dyn}(s)$ 为被控对象模型, $e^{-\tau_{sc}s}$ 是反馈通道时滞环节。

图 3 所示时滞控制系统的闭环传递函数为:

$$\frac{Z(s)}{Z_0(s)} = \frac{G_c(s)G_{Dyn}(s)}{G_c(s)e^{-\tau_{sc}s}G_{Dyn}(s) - 1} \quad (8)$$

式(8)中时滞项 $e^{-\tau_{sc}s}$ 改变了系统极点, 从而影响系统稳定性. Smith^[18] 提出了一种纯滞后补偿控制策略, 通过引入与控制器反向并联的补偿器, 对系统的纯滞后环节进行削弱和消除. 图 4 是加入 Smith 预估器后闭环控制系统的方框图, 图中 $G_{mDyn}(s)$ 表示被控对象预估模型, $e^{-\tau_m s}$ 为预估时滞。

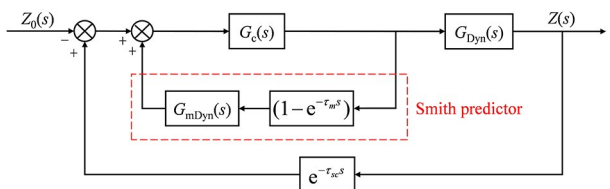


图4 含反馈通道时滞和 Smith 预估器的控制系统方框图

Fig. 4 Block diagram of control system with the Smith predictor and time delays in the feedback path

图 4 所示系统的闭环传递函数为:

$$\frac{Z(s)}{Z_0(s)} = \frac{G_c(s)G_{Dyn}(s)}{G_c(s)[G_{mDyn}(s) + G_{Dyn}(s)e^{-\tau_{sc}s} - G_{mDyn}(s)e^{-\tau_m s}] - 1} \quad (9)$$

如果 $G_{Dyn}(s) = G_{mDyn}(s)$ 且 $e^{-\tau_{sc}s} = e^{-\tau_m s}$, 即预估模型和预估时滞都准确时, 图 4 闭环系统的传递函数退化为:

$$\frac{Z(s)}{Z_0(s)} = \frac{G_c(s)G_{Dyn}(s)}{G_c(s)G_{mDyn}(s) - 1} \quad (10)$$

式(10)已没有时滞项, 系统的极点不再受时滞的影响, 即系统稳定性不再受时滞影响. 然而, 实际工程中系统时滞通常是变化的, 被控对象模型也随服役条件变化而变化, 即预估时滞和预估被控对象模型与实际情况存在误差. 当误差较大时, 系统仍会失稳, 故需要对 Smith 预估器预估误差造成的扰动进行限制, 以提高系统的时滞稳定裕度。

2.2 LADRC 控制器

自抗扰控制^[26]最显著的优势是可以对系统总扰动进行估计和补偿. 如果将 Smith 预估器的预估误差当作自抗扰控制系统的扰动而进行控制, 理论上可以改善 Smith 预估误差导致的性能劣化问题. 因此, 针对单点悬浮系统, 本文采用 Gao^[27] 提出的

轨道几何不平顺是磁浮车辆的主要外部激励,但目前国内外尚无成熟的中低速磁浮轨道不平顺谱,本文使用了德国低干扰轨道谱生成图 7 所示轨道垂向不平顺样本^[28],将其作为车辆动力学模型的外部输入激励.表 2 给出了车辆动力学模型参数.

使用图 6 模型计算不同时滞和不同悬浮控制算法下车辆的动力学响应时,反馈通道时滞在 0~20ms 范围内取值,控制系统均采用了位置环+电流环的串级控制策略,位置环分别采用 PID 控制、LADRC 控制、Smith-PID 控制和 Smith-LADRC 控制算法,电流环比例系数均相同.主要采用理论

算法对各悬浮控制器的参数进行了整定,见表 3 所列,其中 PID 控制器参数选取参考了我国中低速磁浮运营线调试结果.

3.2 无 Smith 预估器时控制系统的时滞稳定裕度

分别采用无 Smith 预估器的 PID 和 LADRC 悬浮控制器,计算了速度 160km/h 时磁浮车辆的动力学响应.图 8 给出了车辆前端第 1 位悬浮控制点的悬浮间隙响应曲线.由图 8(a)结果可知,对于 PID 悬浮控制系统,当反馈通道时滞为 0 时悬浮间隙跟随轨道不平顺平稳波动; $\tau_{sc}=3.2$ ms 时车辆走行约 2.5s 后悬浮间隙振荡发散,间隙动态偏差值瞬间超过其允许值 4mm^[29];当 τ_{sc} 进一步增大至 5.4ms 和 10ms 时,0.5s 内系统就已经失稳.从图 8(b)可以看出,采用 LADRC 悬浮控制器以后,当 $\tau_{sc}<5.4$ ms 时系统是稳定的,否则发生悬浮失稳.

比较图 8(a)和图 8(b)可知,在不设置 Smith 预估器的前提下,PID 和 LADRC 控制作用下系统稳定悬浮的时滞阈值分别为 3.2ms 和 5.4ms,说明 LADRC 控制器抵抗时滞扰动的能力强于 PID 控制器,但其改善效果还不够理想.为了使系统稳定悬浮的时滞阈值达到 10ms 以上,有必要在 PID 或 LADRC 控制的基础上增加 Smith 预估器以补偿系统时滞.

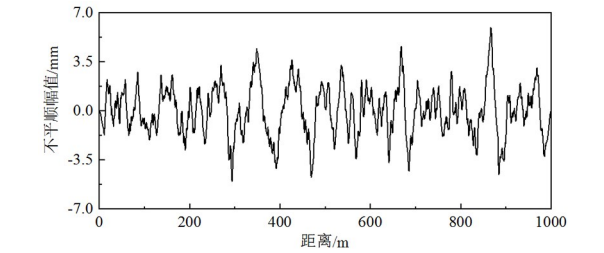


图 7 轨道垂向不平顺样本^[28]
Fig. 7 Sample of track vertical irregularities^[28]

表 2 磁浮车辆垂向动力学模型参数值
Table 2 Parameter values of vertical dynamic model of maglev vehicle

Parameter	Symbol	Value
Mass of the carriage	m_c	21 500kg
Mass of the levitation bogie	m_f	2000kg
Pitching moment of inertia of the carriage	J_c	$71\ 375\text{kg}\cdot\text{m}^2$
Pitching moment of inertia of the levitation bogie	J_f	$1800\text{kg}\cdot\text{m}^2$
Stiffness of the air spring	K_{sp}	100kN/m
Damping of the air spring	C_{sp}	5000N·s/m

表 3 悬浮控制器参数值
Table 3 Parameter values of the levitation controllers

Controller unit	Parameter	Symbol	Value
Current loop	Proportional coefficient	K_{pi}	300
	Proportional coefficient	K_p	6000
PID	Integral coefficient	K_i	1000
	Differential coefficient	K_d	70
	Controller bandwidth	ω_c	170rad/s
LADRC	Observer bandwidth	ω_0	12 000rad/s
	Controller gain	b_0	2.5
Smith predictor	Predicted time delay	τ_m	6ms

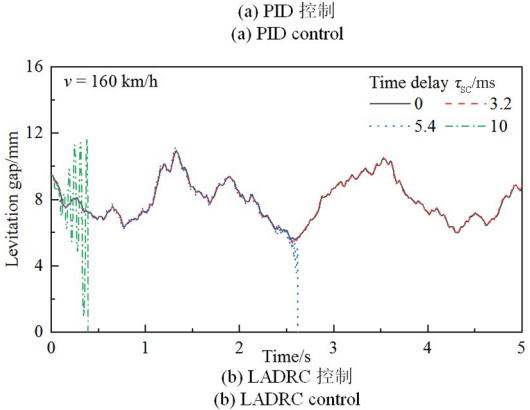
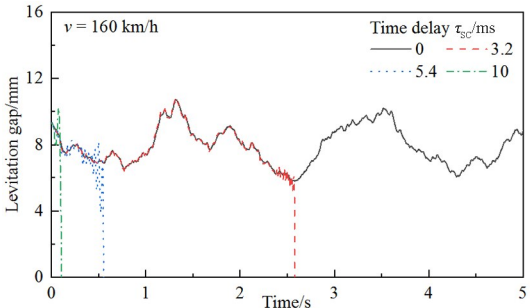


图 8 无 Smith 预估器时不同时滞条件下悬浮系统的间隙响应
Fig. 8 Gap response of the levitation system without a Smith predictor under different time delays

3.3 有 Smith 预估器时控制系统的时滞稳定裕度

假定 Smith 预估模型与实际对象模型完全匹配,将预估时滞设定为 6ms,反馈通道时滞 τ_{sc} 在 0~20ms 范围内变化,计算了采用 Smith-PID 和 Smith-LADRC 控制算法时磁浮车辆的动力学响应(行车速度为 160km/h).图 9 给出了两种复合控制下车辆第 1 位悬浮控制点的悬浮间隙响应曲线.结果表明,当 $\tau_m = \tau_{sc}$ 时(6ms),无论采用 Smith-PID 还是 Smith-LADRC 控制算法,悬浮间隙均随轨道不平顺而平稳波动,契合 Smith 预估控制的基本原理.当通道时滞 τ_{sc} 等于 0 或 10ms 时,两种复合控制下悬浮间隙响应曲线均与 $\tau_{sc} = 6\text{ms}$ 时基本重合.但是,当 $\tau_{sc} \geq 13.8\text{ms}$ 时 Smith-PID 悬浮控制系统失稳, $\tau_{sc} \geq 15.7\text{ms}$ 时 Smith-LADRC 悬浮控制系统失稳.

比较图 8 和图 9 结果可知,增设 Smith 预估器以后, PID 控制系统的时滞稳定阈值从 3.2ms 变为 13.8ms,增大约 3.3 倍; LADRC 控制系统的时滞稳定阈值从 5.4ms 变为 15.7ms,增大了约 1.9 倍.上述对比分析表明 Smith 预估器对控制系统的时滞进行了有效补偿,使时滞稳定阈值均大于 10ms,显著提高了悬浮系统的时滞稳定裕度,且 Smith-LADRC 控制系统抵抗时滞干扰能力更强.

4 Smith-LADRC 控制器参数优化

对于 EMS 磁浮列车而言,电磁悬浮系统既要有足够的时滞稳定裕度,还要尽量减小悬浮间隙的动态变化量(悬浮架的振动响应幅值).因此,本节进一步研究了 Smith-LADRC 控制算法中控制器带宽、观测器带宽和控制器增益对磁浮车辆动力学性能的影响,从保证时滞稳定裕度和减小悬浮间隙波动幅值的角度,提出 LADRC 控制器参数优化设计依据及建议取值.本节仿真计算时车辆运行速度仍设置为 160km/h, Smith 预估时滞 τ_m 为 6ms,系统激励为轨道垂向不平顺(图 7)和反馈通道时滞.

4.1 控制器带宽

控制器带宽 ω_c 决定了状态反馈增益,影响控制器的响应速度, ω_c 越大电磁悬浮刚度也越大,系统响应速度越快.将反馈通道时滞 τ_{sc} 设为 10ms,观测器带宽 $\omega_o = 12\,000\text{rad/s}$,控制器增益 $b_o = 2.5$,改变控制器带宽 ω_c 取值,计算得到车辆第 1 位悬浮控制点的悬浮间隙波动幅值(动态偏移量最大值)随控制器带宽的变化曲线,如图 10 所示.可以看出,悬浮间隙波动幅值随 ω_c 增大而减小;当 $\omega_c = 160\text{rad/s}$ 时间隙动态偏移量最大值为 4.01mm,稍大于其允许限值 4mm; ω_c 分别增大至 170rad/s 和 180rad/s 时,间隙偏移量最大值分别降为 3.09mm 和 2.49mm,均小于允许限值; ω_c 进一步增大至 210rad/s 时,间隙偏移量最大值仅为 1.48mm,从减小间隙波动幅值的角度来看,控制器带宽取值越大越好.

但是, ω_c 过大会影响系统时滞稳定裕度,故进一步检算了控制器带宽为 170rad/s~210rad/s 时系统稳定悬浮的时滞阈值,结果如图 11 所示.可以发

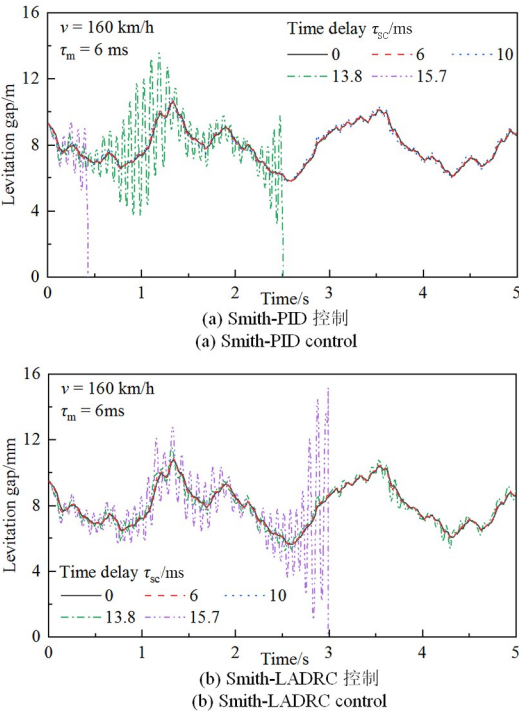


图 9 有 Smith 预估器时不同时滞条件下悬浮系统的间隙响应
Fig. 9 Gap response of the levitation system with a Smith predictor under different time delays

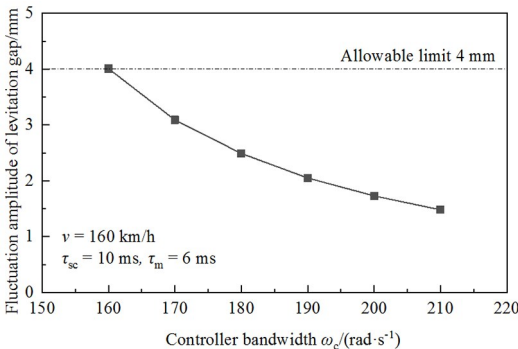


图 10 悬浮间隙波动幅值与控制器带宽的关系
Fig. 10 Relationship between the fluctuation amplitude of levitation gap and the controller bandwidth

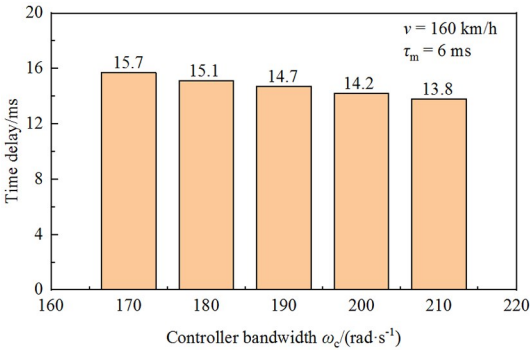


图 11 稳定悬浮的时滞阈值与控制器带宽的关系
Fig. 11 Relationship between the delay threshold of stable levitation and the controller bandwidth

现,悬浮控制系统的时滞阈值随 ω_c 增大而单调减小;当 $\omega_c=170\text{rad/s}$ 时时滞阈值最大,为 15.7ms .综合图 10 和图 11 结果可知, ω_c 取值应综合权衡系统时滞稳定裕度和悬浮间隙波动幅值,在本文计算条件下,控制器带宽的优选范围为 $170\text{rad/s}\sim 180\text{rad/s}$.

4.2 观测器带宽

观测器带宽 ω_o 决定了观测器的跟踪速度, ω_o 越大观测器的估计精度越高.将 τ_{sc} 设为 10ms , ω_c 取为 170rad/s , b_o 为 2.5 ,改变观测器带宽 ω_o 取值,计算得到悬浮间隙波动幅值随观测器带宽的变化曲线,如图 12 所示.当 ω_o 在 $8000\text{rad/s}\sim 13000\text{rad/s}$ 之间变化时,悬浮间隙波动幅值基本不变,约为 3.09mm .进一步检算不同观测器带宽条件下系统稳定悬浮的时滞阈值,结果表明时滞阈值基本不受 ω_o 的影响,说明在上述观测器带宽取值范围内,Smith 预估器对系统的时滞补偿效果基本相同.

图 12 仿真分析所采用的轨道不平顺(图 7)没有很好地体现磁浮线路上普遍存在的轨道接头错台、折角等“高频”激励,观测器性能没有得到严格的考验.因此,在图 7 轨道不平顺样本基础上叠加 0.5mm 的垂向错台,重新计算得到不同观测器带宽条件下悬浮间隙的时程响应,如图 13 所示.可以发现,车辆走行约 1.69s 后受到 0.5mm 垂向错台激励,悬浮间隙出现较大波动;该时刻悬浮间隙动态偏移量随 ω_o 增大而略有减小,当 $\omega_o=8000\text{rad/s}$ 时,间隙偏移量极值为 2.59mm ;当 ω_o 为 12000rad/s 和 13000rad/s 时,间隙偏移量极值均约 2.31mm .综合图 12 和图 13 结果可知,较大的观测器带宽可增强 LADRC 控制器抵抗高频扰动

的能力,且 Smith 预估器的补偿效果不受影响,本文中 ω_o 取 12000rad/s 是合适的.

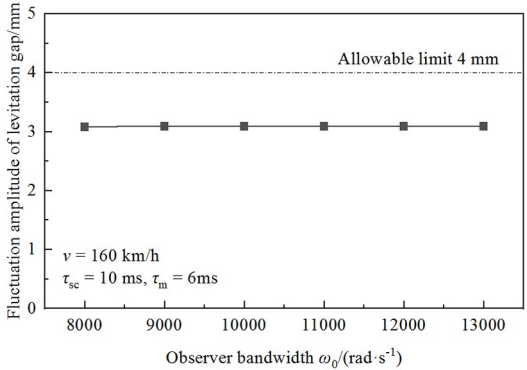


图 12 悬浮间隙波动幅值与观测器带宽的关系
Fig. 12 Relationship between the fluctuation amplitude of levitation gaand the observer bandwidth

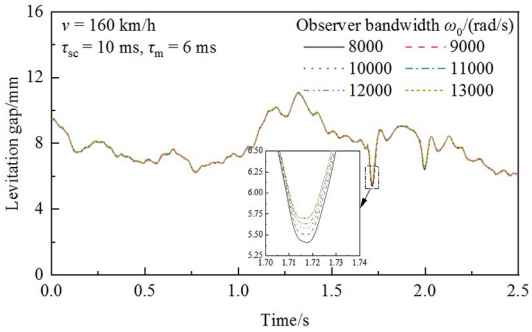


图 13 叠加垂向错台激励后不同观测器带宽条件下悬浮间隙响应
Fig. 13 Gap response of the levitation system under different observer bandwidth after adding the vertical offset excitation

4.3 控制器增益

控制器增益 b_o 相当于系统总扰动的补偿系数,增益 b_o 越大控制电压越小,电磁悬浮刚度越小.将 τ_{sc} 取为 10ms , ω_c 为 170rad/s , ω_o 为 12000rad/s ,改变控制器增益 b_o ,计算得到悬浮间隙波动幅值随 b_o 的变化曲线,如图 14 所示.可以看出,悬浮间隙波动幅值随 b_o 增大而明显增大; $b_o=1.75$ 时,间隙波动幅值为 1.61mm ,当 b_o 增大到 2.75 时,间隙波动幅值变为 3.81mm ,接近其允许限值 4mm ; b_o 进一步增大至 3.0 时,间隙偏移量最大值超过了允许限值,达到 4.74mm ,意味着悬浮模块与轨道之间发生机械碰撞的风险很大.

同样,检算了 b_o 在 $1.75\sim 2.75$ 之间取值时系统稳定悬浮的时滞阈值.图 15 中计算结果表明,系统稳定悬浮的时滞阈值随 b_o 增大先略微增大后略微减小,说明控制器增益对时滞阈值的影响较小; b_o 取值为 2.5 时,时滞阈值最大,约 15.7ms .综合图 14 和图 15 结果可知,控制器增益主要影响悬浮

控制系统的动态响应幅值,为减小间隙波动幅值且不降低时滞稳定裕度, b_0 应在 2.0~2.5 之间选取。

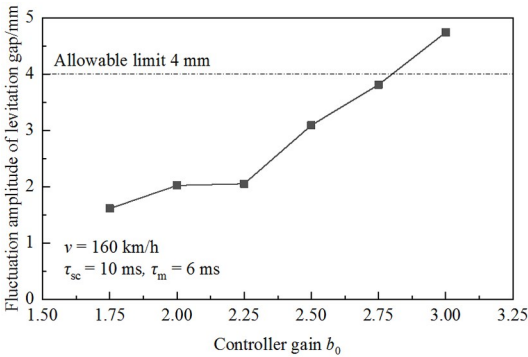


图 14 悬浮间隙波动幅值与控制器增益的关系
Fig. 14 Relationship between the fluctuation amplitude of levitation gap and the controller gain

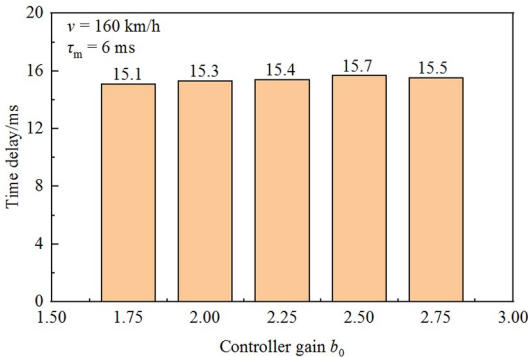


图 15 稳定悬浮的时滞阈值与控制器增益的关系
Fig. 15 Relationship between the delay threshold of stable levitation and the controller gain

5 结论

(1)采用PID和LADRC悬浮控制算法的磁浮列车以160km/h通过随机不平顺线路时,电磁悬浮系统稳定悬浮的时滞阈值分别为3.2ms和5.4ms,难以满足实际应用需求。

(2)增设Smith预估器且预估时滞为6ms时,Smith-PID和Smith-LADRC悬浮控制系统的时滞阈值均超过10ms,分别达到13.8ms和15.7ms;Smith预估器有效补偿了悬浮控制系统的时滞,显著提高了系统时滞稳定裕度。由于Smith-LADRC控制系统对预估时滞与实际时滞误差进行了估计和补偿,较Smith-PID控制系统具有更大的时滞稳定裕度。

(3)在悬浮间隙动态偏移量不允许超过4mm的前提下,间隙偏移量最大值随控制器带宽增大而明显减小,但系统时滞稳定裕度略有降低,综合权衡后建议控制器带宽在170rad/s~180rad/s范围

内取值。观测器带宽在8000rad/s~13000rad/s之间取值时系统的时滞稳定裕度和间隙偏移量最大值变化很小,为提高系统抗干扰能力,观测器带宽取12000rad/s较合适。Smith-LADRC控制器增益对系统时滞稳定裕度的影响较小,对悬浮间隙波动幅值影响显著,建议在2.0~2.5之间选取。

参考文献

[1] 邓自刚,刘宗鑫,李海涛,等. 磁悬浮列车发展现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(3): 455—474+530.

DENG Z G, LIU Z X, LI H T, et al. Development status and prospect of maglev train [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(3): 455—474+530. (in Chinese)

[2] 赵春发,冯洋,翟婉明. 面向列车稳定舒适运行的磁浮交通车线动力学参数匹配设计[J]. 前瞻科技, 2023, 2(4): 49—60.

ZHAO C F, FENG Y, ZHAI W M. Matching design of train and line dynamics parameters of maglev transportation oriented toward stable and comfortable train running [J]. Science and Technology Foresight, 2023, 2(4): 49—60. (in Chinese)

[3] FENG Y, ZHAO C F, ZHAI W M, et al. Dynamic performance of medium speed maglev train running over girders: field test and numerical simulation [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2023, 23(1): 2350006.

[4] WANG D X, LI X Z, WANG C G. Measurement and numerical analysis on dynamic performance of the LMS maglev train-track-continuous girder coupled system with running speed-up state [J]. Measurement, 2023, 217: 113052.

[5] WANG H P, LI J, ZHANG K. Stability and Hopf bifurcation of the maglev system with delayed speed feedback control [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(8): 829—834.

[6] ZHANG L L, HUANG L H, ZHANG Z Z. Stability and Hopf bifurcation of the maglev system with delayed position and speed feedback control [J]. Nonlinear Dynamics, 2009, 57(1): 197—207.

[7] XU J Q, CHEN C, GAO D G, et al. Nonlinear dynamic analysis on maglev train system with flexible guideway and double time-delay feedback control [J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(8):

6346—6362.

- [8] 吴晗, 曾晓辉, 史禾慕. 考虑间隙反馈控制时滞的磁浮车辆稳定性研究[J]. 力学学报, 2019, 51(2): 550—557.
WU H, ZENG X H, SHI H M. Stability analysis of maglev vehicle with delayed position feedback control [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(2): 550—557. (in Chinese)
- [9] 孙中奎, 金晨. 时滞系统非线性动力学研究进展[J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(8): 6—18.
SUN Z K, JIN C. Advances in nonlinear dynamics for delayed systems [J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(8): 6—18. (in Chinese)
- [10] FENG Y, ZHAO C F, WU D H, et al. Effect of levitation gap feedback time delay on the EMS maglev vehicle system dynamic response [J]. Nonlinear Dynamics, 2023, 111(8): 7137—7156.
- [11] 龙志强, 窦峰山, 王志强, 等. 高速磁浮悬浮导向控制技术现状及展望[J]. 前瞻科技, 2023, 2(4): 78—88.
LONG Z Q, DOU F S, WANG Z Q, et al. Current status and prospects of high-speed maglev suspension and guidance control technology [J]. Science and Technology Foresight, 2023, 2(4): 78—88. (in Chinese)
- [12] LI F X, SUN Y G, XU J Q, et al. Control methods for levitation system of EMS-type maglev vehicles; an overview Energies, 2023, 16(7): 2995.
- [13] PANDEY A, ADHYARU D M. Control techniques for electromagnetic levitation system: a literature review [J]. International Journal of Dynamics and Control, 2023, 11(1): 441—451.
- [14] KUMAR T, MISHRA S K, SWAIN S K. Design of fractional order controllers satisfying frequency domain specifications for magnetic levitation system with time delay [C]//2017 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS). Srivilliputtur, India. IEEE, 2017: 1—7.
- [15] SUN Y G, WANG S M, LU Y, et al. Control of time delay in magnetic levitation systems [J]. IEEE Magnetics Letters, 2022, 13: 8100305.
- [16] SUN Y G, XU J Q, LIN G B, et al. RBF neural network-based supervisor control for maglev vehicles on an elastic track with network time delay [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(1): 509—519.
- [17] SUN Y G, XU J Q, CHEN C, et al. Reinforcement learning-based optimal tracking control for levitation system of maglev vehicle with input time delay [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 7500813.
- [18] SMITH O. Closer control of loops with dead time [J]. Chemistry Engineering Progress, 1957, 53(5): 217—219.
- [19] 邹丽, 杨献勇. 具有扰动观测器的改进 SMITH 预估控制[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, 43(12): 1664—1667.
ZOU L, YANG X Y. Improved SMITH predictive control with disturbance observer [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2003, 43(12): 1664—1667. (in Chinese)
- [20] 齐朝阳, 郑恩让, 侯再恩. 迭代模型 Smith 预估控制: 算法和稳定性[J]. 控制工程, 2015, 22(1): 133—138.
QI Z Y, ZHENG E R, HOU Z E. Iterative model Smith predictive control: algorithm and stability [J]. Control Engineering of China, 2015, 22(1): 133—138. (in Chinese)
- [21] 郑仰东. 采用 Smith 预估器模型的时滞系统自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(3): 416—424.
ZHENG Y D. Adaptive control for time-delay systems adopting Smith predictor models [J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(3): 416—424. (in Chinese)
- [22] ZHENG Q L, GAO Z Q. Predictive active disturbance rejection control for processes with time delay [J]. ISA Transactions, 2014, 53(4): 873—881.
- [23] ZHANG D Y, YAO X L, WU Q H, et al. ADRC based control for a class of input time delay systems [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2017, 28(6): 1210—1220.
- [24] 陈增强, 王永帅, 孙明玮, 等. 非最小相位时滞系统新型 Smith 自抗扰控制及其鲁棒性[J]. 大连理工大学学报, 2019, 59(1): 88—96.
CHEN Z Q, WANG Y S, SUN M W, et al. A new type of active disturbance rejection control with Smith and its robustness for non-minimum phase time-delay systems [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2019, 59(1): 88—96. (in Chinese)
- [25] 李云钢, 常文森. 磁浮列车悬浮系统的串级控制[J]. 自动化学报, 1999, 25(2): 247—251.

- LI Y G, CHANG W S. Cascade control of an EMS maglev vehicle's levitation control system [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1999, 25 (2): 107—111. (in Chinese)
- [26] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900—906.
- [27] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]//*Proceedings of the 2003 American Control Conferenc*. New York: IEEE, 2003: 4989—4996.
- [28] 冯洋. 提速常导磁浮列车—轨道—桥梁耦合振动特性及关键参数影响研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2022: 47—50.
- FENG Y. Investigation on speed-increasing EMS maglev train-track-bridge coupled vibration characteristics and key parameters effect [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022: 47—50. (in Chinese)
- [29] 国家标准化管理委员会. 城市轨道交通中低速磁浮车辆悬浮控制系统技术条件: GB/T 39902—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical specification for the levitation control system of medium-low speed maglev vehicle of the urban rail transit: GB/T 39902—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)