

7-15-2024

Maglev Ball Control Algorithm Based on Levant Differentiator

Zhenli Zhang

School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; Institute of Permanent Magnet Maglev and Rail Transit, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China, 47717770@qq.com

Yongzhuan Wang

School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; Institute of Permanent Magnet Maglev and Rail Transit, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China

Yao Qin

School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; Institute of Permanent Magnet Maglev and Rail Transit, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China

Jie Yang

School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; Institute of Permanent Magnet Maglev and Rail Transit, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Maglev Ball Control Algorithm Based on Levant Differentiator

Abstract

Abstract: To solve the problem of unsatisfactory control effect of permanent magnet electromagnetic hybrid suspension system caused by signal mutation and noise interference, the control method ILevant-PID, the combination of an improved Levant differentiator and PID, is proposed. The proposed method combines the strong adaptability of PID control and the robust characteristic of Levant differentiator on input noise to solve the chattering problem of the system output. The simulated anneal-particle swarm optimization is utilized to solve the constraints of the ILevant-PID controller, such as multiple parameters and strong correlation. The simulation results show that compared with the traditional PID control method, the ILevant-PID control method starts more gently under the step input, the adjustment time is reduced by 41.19%, and the overshoot is reduced by 40.36%. Experimental verification shows that under the condition of noiseless step input, the steady-state errors of the ILevant-PID controller are ± 0.37 mm and ± 0.23 mm respectively, which are more than 87% lower than PID. When tracking square wave input, ILevant-PID can realize non-overshoot tracking of 8 mm given signal that cannot be achieved by PID, which can improve the control performance of the PEMS system.

Keywords

PEMS (permanent magnet electro magnetic hybrid suspension) system, ILevant-PID (improve Levant-PID) controller, simulated annealing algorithm, PSO algorithm, control performance

Recommended Citation

Zhang Zhenli, Wang Yongzhuang, Qin Yao, et al. Maglev Ball Control Algorithm Based on Levant Differentiator[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(7): 1586-1595.

基于Levant微分器的磁浮球控制算法研究

张振利^{1,2}, 汪永壮^{1,2}, 秦耀^{1,2}, 杨杰^{1,2}

(1. 江西理工大学 电气工程与自动化学院, 江西 赣州 341000; 2. 江西理工大学 永磁磁浮与轨道交通研究院, 江西 赣州 341000)

摘要: 针对永磁电磁混合悬浮系统控制中因信号突变和噪声干扰引起的控制效果不理想等问题, 提出一种改进型Levant微分器和PID相结合的控制方法(improve Levant-PID, ILevant-PID)。融合PID控制适应性强和Levant微分器对输入噪声的鲁棒特性优势, 解决系统输出抖振问题, 利用模拟退火-粒子群优化解决ILevant-PID控制器参数多、关联性强等制约问题。仿真实验表明: 与传统PID控制方法相比, ILevant-PID控制方法在阶跃输入下, 启动更为平缓, 调节时间减小了41.19%, 超调量减小了40.36%。ILevant-PID控制器在阶跃输入时有无噪声条件下的稳态误差分别为 ± 0.37 mm及 ± 0.23 mm, 相对于PID降低了87%以上。在跟踪方波输入时, ILevant-PID可实现PID无法对8 mm给定信号无超调跟踪, 较好地改善PEMS(permanent magnet electro magnetic hybrid suspension)系统控制性能。

关键词: 混合悬浮系统; ILevant-PID控制器; 模拟退火算法; 粒子群优化算法; 控制性能

中图分类号: N945.13; TP273 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)07-1586-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0360

引用格式: 张振利, 汪永壮, 秦耀, 等. 基于Levant微分器的磁浮球控制算法研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(7): 1586-1595.

Reference format: Zhang Zhenli, Wang Yongzhuang, Qin Yao, et al. Maglev Ball Control Algorithm Based on Levant Differentiator[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(7): 1586-1595.

Maglev Ball Control Algorithm Based on Levant Differentiator

Zhang Zhenli^{1,2}, Wang Yongzhuang^{1,2}, Qin Yao^{1,2}, Yang Jie^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. Institute of Permanent Magnet Maglev and Rail Transit, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: To solve the problem of unsatisfactory control effect of permanent magnet electromagnetic hybrid suspension system caused by signal mutation and noise interference, the control method ILevant-PID, the combination of an improved Levant differentiator and PID, is proposed. *The proposed method combines the strong adaptability of PID control and the robust characteristic of Levant differentiator on input noise to solve the chattering problem of the system output. The simulated anneal-particle swarm optimization is utilized to solve the constraints of the ILevant-PID controller, such as multiple parameters and strong correlation.* The simulation results show that compared with the traditional PID control method, the ILevant-PID control method starts more gently under the step input, the adjustment time is reduced by 41.19%, and the overshoot is reduced by 40.36%. Experimental verification shows that under the condition of noiseless step input, the steady-state errors of the ILevant-PID controller are ± 0.37 mm and ± 0.23 mm respectively, which are more than 87% lower than PID. When tracking square wave input, ILevant-PID can realize non-overshoot tracking of 8 mm given signal that cannot be achieved by PID,

收稿日期: 2023-04-03 修回日期: 2023-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(62063009)

第一作者: 张振利(1976-), 男, 副教授, 硕士, 研究方向为磁悬浮交通系统。E-mail: 47717770@qq.com

which can improve the control performance of the PEMS system.

Keywords: PEMS (permanent magnet electro magnetic hybrid suspension) system; ILevant-PID (improve Levant-PID) controller; simulated annealing algorithm; PSO algorithm; control performance

0 引言

磁浮列车作为一种非接触式新型城市轨道交通工具,通过电磁力来实现悬浮、导向和牵引^[1]。常导电磁悬浮(electro magnetic suspension, EMS)列车悬浮间隙为8~10 mm,因悬浮间隙较小,对轨道的加工精度要求高。在电磁悬浮系统中引入永磁体,形成“永磁磁场为基础承载,电磁控制为辅助手段”的结构,可降低悬浮功耗、增大悬浮间隙和降低轨道加工精度。EMS系统是非线性系统,引入的永磁材料具有不可控和非线性特点,导致永磁电磁混合悬浮(permanent magnet electro magnetic hybrid suspension, PEMS)系统的非线性加剧,易导致系统响应超调、稳定性变差,进而存在撞击、吸死轨道的安全隐患^[2]。因此,设计一套完整的PEMS控制系统是很有意义和挑战性的工作。

近年来,专家学者们在磁悬浮系统的控制策略上做了大量的探索和研究。文献[3]针对磁悬浮系统的非线性及难以建立精确数学模型的问题,提出无模型自适应控制方法,控制器具备良好的自适应性和鲁棒性;文献[4]针对混合磁悬浮系统提出基于零功率控制策略,实现大间隙、低能耗的稳定悬浮;文献[5]针对混合悬浮系统响应阶跃信号产生超调而撞击甚至吸死轨道问题,提出速度信号重构的方法抑制超调。虽然磁浮领域已出现较多控制方法,但目前已经商业化运营的磁悬浮列车仍是以PID为主,主要原因是其结构较为简单,易于实现。简单的结构同样带来一些不足之处:①对反馈信号非常敏感。当控制系统涉及模拟信号采集时,噪声信号无法完全去除,致使系统非常依赖于软、硬件滤波;②当进行给定信号跟踪时,给定信号的突变会导致波动较大甚至致使系统发散。而Levant微分器具有滤波效果好且对特定噪声干扰不敏感的特点可以在很大程度

上对信号进行滤波。但Levant微分器中由于存在不连续切换函数,导致其输出信号存在抖振,在应用时一般需要加以改进。

综上所述,本文结合改进Levant微分器柔化信号并且对信号的误差和噪声具有鲁棒性的优势,设计一种改进型Levant微分器的PID控制方法(improve Levant-PID, ILevant-PID)。为解决ILevant-PID控制器参数多且关联性强等制约问题,引入模拟退火-粒子群优化(simulated annealing-particle swarm optimization, SA-PSO)算法。基于PEMS系统整体结构,搭建悬浮控制实验台,并进行模型分析,对上述算法加以验证。

1 PEMS系统设计与模型分析

1.1 PEMS系统设计

本文以“兴国号”永磁磁浮列车^[6]为前期研究背景,搭建“上拉式”单点永磁电磁混合悬浮控制实验台,分析所设计控制方法对系统的控制效果。

PEMS系统控制平台结构如图1所示,电磁部分采用线圈搭配铁芯组成,悬浮体由永磁体及小球组成。

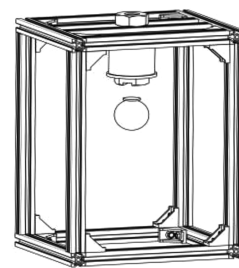


图1 PEMS系统平台结构

Fig. 1 PEMS system platform structure

PEMS系统采用模块化设计方案,包括主控制器模块、传感器模块、驱动模块、通信模块、上位机及混合悬浮实验平台共6部分,系统框架如图2所示。

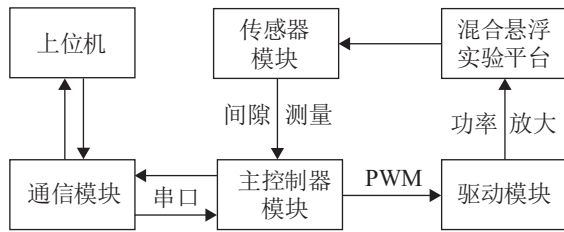


图2 PEMS系统控制框图
Fig. 2 Control block of PEMS system

PEMS系统控制平台参数如表1所示。

表1 单点PEMS系统平台参数
Table 1 Single-point PEMS system platform parameters

符号	含义	取值
m/kg	钢球质量	11.5
N	电磁铁线圈匝数	500
R/Ω	总电阻	10
$S/(\text{mm}^2)$	电磁铁磁极面积	415.48
h_{mp}/mm	永磁体厚度	30
$\mu_0/(\text{H/m})$	真空磁导率	$4\pi \times 10^{-7}$
i_0/A	平衡点电流	0
$H_c/(\text{A/m})$	永磁体矫顽力	800×10^3
μ_r	永磁体相对磁导率	1
x_0/mm	平衡气隙	15

1.2 PEMS系统数学模型分析

充分利用平台现有的信息，可达到更好的控制效果并缩短控制器参数整定时间^[7]。根据文献[8-9]，单点PEMS系统悬浮间隙 Δx 对输入电压 ΔU 的传递函数可表示为

$$\frac{\Delta x}{\Delta U} = \frac{-\frac{k_i}{mL_0}}{S^3 + \frac{R}{L_0}S^2 - \frac{k_x R}{mL_0}} \quad (1)$$

$$k_i = \left(\frac{\partial F}{\partial i} \right) \Big|_{(i_0, x_0)} = \frac{2\mu_0 NS(Ni_0 + H_c h_{\text{mp}})}{(2x_0 + h_{\text{mp}}/\mu_r)^2}$$

$$k_x = - \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right) \Big|_{(x_0, i_0)} = \frac{4\mu_0 S(Ni_0 + H_c h_{\text{mp}})^2}{(2x_0 + h_{\text{mp}}/\mu_r)^3}$$

$$L_0 = \frac{\mu_0 N^2 S}{2x_0 + h_{\text{mp}}/\mu_r}$$

系统的特征方程为

$$S^3 + \frac{R}{L_0}S^2 - \frac{k_x R}{mL_0} = 0 \quad (2)$$

由Routh判据可知，该系统为不稳定系统；由

秩判据可知，系统能观且能控，通过设计反馈控制器和观测器可以使系统达到稳定。

一般情况下 $R \gg L_0$ ，结合表1实验平台参数，可实化式(1)所表示的输出间隙 Δx 对输入电压的 ΔU 标称传递函数：

$$\frac{\Delta x}{\Delta U} \approx \frac{-\frac{k_i}{mR}}{S^2 - \frac{k_x}{m}} = \frac{-2.833}{S^2 - 4638.6} \quad (3)$$

2 控制器设计

2.1 Levant微分器分析

Levant微分器^[10]既可对输入信号跟踪和准确求导，又对信号的测量误差和输入噪声具有鲁棒性，其表达式为

$$\begin{cases} \frac{d\tau}{dt} = \zeta \\ \zeta = \zeta_1 - \lambda|\tau - v(t)|^{1/2} \text{sgn}[\tau - v(t)] \\ \frac{d\zeta_1}{dt} = -\alpha \text{sgn}[\tau - v(t)] \end{cases} \quad (4)$$

式中： $v(t)$ 为微分器的输入信号； τ 、 ζ_1 为微分器的输出信号， τ 跟踪 $v(t)$ ， ζ_1 跟踪 $dv(t)$ ； α 、 λ 为微分器的参数变量， $\lambda^2 > 4C(\alpha + C)/(\alpha - C)$ $\alpha > C > 0$ ， C 为 $v(t)$ 导数的Lipschitz常数上界。

从式(4)可以看出该函数不连续，导致微分器输出信号不连续切换，进而引起输出信号抖振。因此，采用双曲正切函数 $\tanh(x/\Delta)$ 代替符号函数 $\text{sgn}(x)$ 降低抖振。改进后Levant表达式为

$$\begin{cases} \frac{d\tau}{dt} = \zeta \\ \zeta = \zeta_1 - \lambda|\tau - v(t)|^{1/2} \frac{e^{\frac{\tau - v(t)}{\Delta}} - e^{-\frac{\tau - v(t)}{\Delta}}}{e^{\frac{\tau - v(t)}{\Delta}} + e^{-\frac{\tau - v(t)}{\Delta}}} \\ \frac{d\zeta_1}{dt} = -\alpha \frac{e^{\frac{\tau - v(t)}{\Delta}} - e^{-\frac{\tau - v(t)}{\Delta}}}{e^{\frac{\tau - v(t)}{\Delta}} + e^{-\frac{\tau - v(t)}{\Delta}}} \end{cases} \quad (5)$$

其中， Δ 越小，双曲正切函数在原点附近越陡峭，曲线接近于符号函数图像。

为对比改进前后Levant性能，设计以下仿真实验：①输入阶跃信号，对比分析二者在无噪声条

件下柔化过渡作用时输出性能, 仿真结果如图3所示; ②输入阶跃信号, 并在 $t=2$ s时施加幅值为给定信号15%的随机毛刺噪声, 测试改进前后微分器对噪声抑制性能, 仿真结果如图4所示。

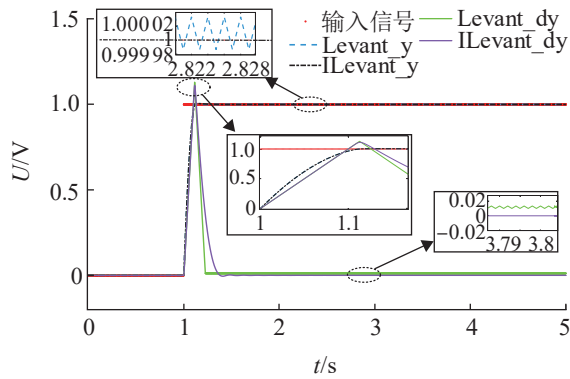


图3 无噪声条件下柔化过渡Levant微分器与改进Levant微分器性能对比

Fig. 3 Performance comparison of soft transition Levant differentiator and improved Levant differentiator without noise

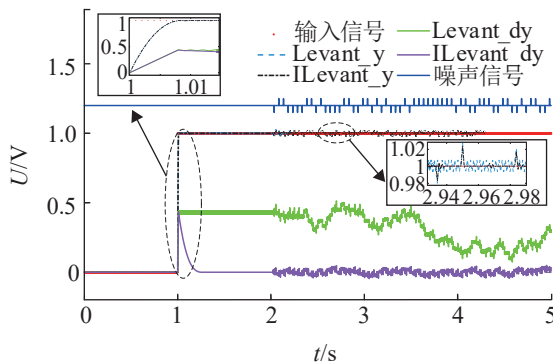


图4 噪声条件下柔化过渡Levant微分器与改进Levant微分器性能对比

Fig. 4 Performance comparison of soft transition Levant differentiator and improved Levant differentiator with noise interference

由仿真图3可知: 相同参数($\alpha=10$, $\lambda=15$)情况下, 改进前后Levant微分器输出的跟踪信号响应时间几乎同步, 为0.99 s。但由于传统Levant微分器中含有不连续切换项, 导致其微分输出存在静差且伴随抖振, 根据式(4)可知, 会进一步导致跟踪信号产生抖振。相比于传统Levant微分器, ILevant微分器很好的解决了抖振问题, 随着仿真时间的增加, 其输出微分信号抖振减小, 并且无静差, 表明ILevant微分器跟踪输入信号时性能更好。

为了直观地表示噪声信号, 已将图4中噪声信号上移1.2个单位刻度值。

由仿真图4可知: 改进前后Levant微分器输出的跟踪信号均能很好的跟踪实时信号, 并对噪声具有一定的鲁棒性, 跟踪滞后时间不超过1 ms。但由于微分器参数改变, 传统Levant微分器微分信号静差更大, 导致输出抖振更大, 而ILevant微分器仍能保持较好的输出性能。

当施加噪声信号时, 传统Levant微分器微分信号波动较为剧烈, 且跟踪信号抖振频率及幅度均有所增加, 而ILevant微分器对信号中的噪声抑制效果更好, 其输出微分信号在理想微分上下小幅波动, 且跟踪信号在噪声扰动情况下波动幅值更小。实验选取参数: $\alpha=55$, $\lambda=240$ 。

2.2 ILevant-PID控制器设计

综合前文分析, 本文以PID为基础, 结合ILevant微分器柔化信号和对测量误差和噪声具有鲁棒性的优势, 设计ILevant-PID。该控制器在信号给定环节加入ILevant1微分器, 降低初始误差和初始阶段对系统的冲击, 有效解决超调与快速性矛盾; 在测量变送环节加入ILevant2微分器, 降低传感器检测噪声对控制系统的影响。ILevant-PID控制器结构如图5所示。

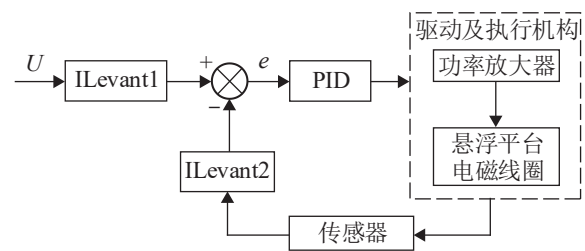


图5 ILevant-PID控制器结构图

Fig. 5 ILevant-PID controller structure

在PEMS控制系统中, ILevant1微分器对期望信号为柔化过渡作用, 在反馈环节ILevant2微分器则需要尽可能快地跟踪测量信号, 因此, 两个环节中对ILevant微分器的性能要求不同, 即微分器参数不同。

3 SA-PSO 控制器参数设计

综合前两节对PEMS系统模型分析和控制器设计,可知该系统是本质不稳定的、非线性的,有 K_p 、 K_i 、 K_d 、 α_1 、 λ_1 、 α_2 、 λ_2 共7个参数需要整定。其中 K_p 、 K_i 、 K_d 分别为PID控制器比例、积分、微分数; α_1 与 λ_1 为ILevant1参数变量; α_2 与 λ_2 为ILevant2参数变量。若采用常规的试凑法难以得到较优的控制性能,且过程繁琐,效率偏低,难以达到最优。因此本文采用基于粒子群的人工智能方法对参数进行整定与优化。

3.1 SA-PSO 算法原理

粒子群算法是计算机智能领域的一种群体智能优化算法^[11],具有参数少、规则简单和收敛速度快的优点,但其算法局部搜索能力较差,精度不高,而模拟退火算法(simulated annealing, SA)对于局部搜索算法的拓展有一定的优势^[12],因此,本文结合SA与PSO算法各自的优势,提出SA-PSO算法,对参数进行寻优,以典型的测试优化程序效率的Griewank函数为例,函数图像如图6所示。

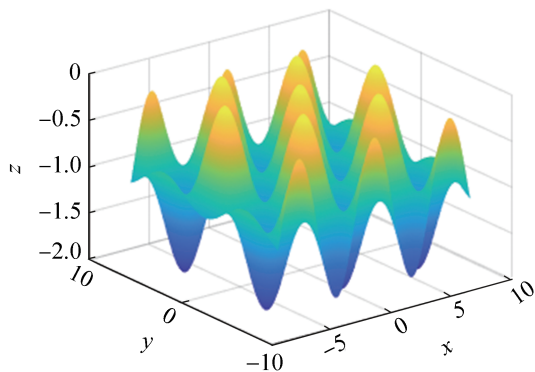


图6 Griewank测试函数图像
Fig. 6 Griewank test function image

对比PSO与SA-PSO参数寻优效率,两种优化算法寻参结果如图7所示。

通过图7所示的适应度变化曲线可知:PSO优化算法迭代11次时收敛,极值为-2.0047;SA-PSO算法迭代12次时收敛,极值为-2.0079。相

比于PSO算法,SA-PSO算法在保证PSO优势的前提下,提高了全局搜索能力。

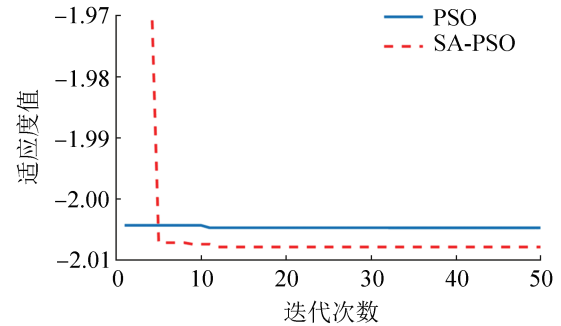


图7 两种优化算法适应度变化曲线
Fig. 7 Fitness curves of two optimization algorithms

3.2 SA-PSO 算法优化 ILevant-PID 参数步骤

SA-PSO算法粒子的速度和位置的更新规则为

$$\begin{cases} v_{ij}(k+1) = wv_{ij}(k) + c_1r_1[x_{p_{ij}} - x_{ij}(k)] + \\ c_2r_2[x_{g_{ij}} - x_{ij}(k)] \\ x_{ij}(k+1) = x_{ij}(k) + v_{ij}(k+1) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $x_{ij}(k)$ 、 $v_{ij}(k)$ 分别为第*i*个粒子在第*k*时刻所处的第*j*维位置分量和速度分量; w 为粒子的惯性权重; c_1 、 c_2 分别为认知因子和种群因子; r_1 、 r_2 为[0,1]之间的随机因子; $x_{p_{ij}}$ 、 $x_{g_{ij}}$ 分别为第*i*个粒子和全部粒子当前所经过的第*j*维最好位置分量。

初步选用ITAE(integral of time and absolute error)指标作为粒子群的适应度函数:

$$J_{ITAE} = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (7)$$

式中: t 为计算时间; $e(t)$ 为误差函数。

利用SA-CFPSO优化算法整定ILevant-PID控制器参数,主要步骤^[13]如图8所示。

step 1: 设置群体粒子数目*N*,学习因子 c_1 、 c_2 ,初始温度 T_0 ,退火常数惯性权重 δ ,最大迭代次数*M*,搜索空间维数*D*,初始化各粒子的速度与位置,根据适应度函数式(7)计算各粒子适应度,确定初始群体最优粒子位置;

step 2: 执行PSO算法,利用式(6)更新各粒子

的速度与位置, 计算各粒子的适应度, 根据适应度更新个体最优位置与群体最优位置, 若 PSO 算法收敛, 则进行下一步, 否则重复执行 step 2;

step 3: 引入 SA 算法, 设置 SA 算法初始位置为 PSO 当前群体最优位置, 在其领域内随机选取一新位置, 通过 Metropolis 准则和温度指导种群以一定的概率接受差解;

step 4: 若 SA 算法最终位置的适应度小于 PSO 算法当前群体最优位置, 则将其作为 PSO 算法新的群体最优位置, 并更新退火温度 $T_0(k+1) = T_0(k) \times \delta$;

step 5: 返回并继续执行 step 2, 直至达到最大迭代次数 M 停止, 得到种群最优位置与适应度。

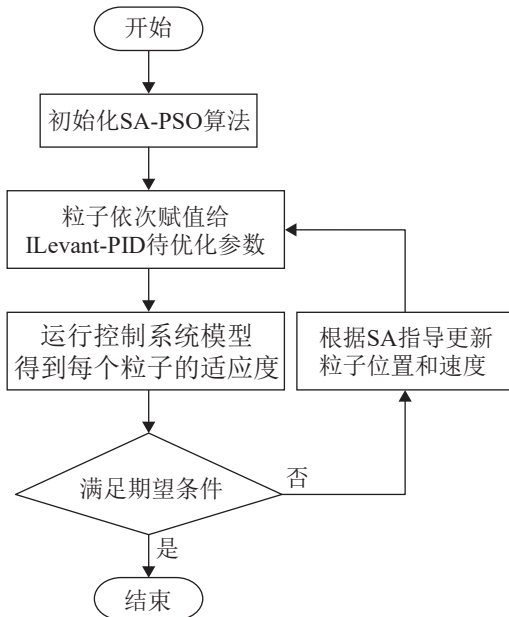


图8 SA-PSO 算法优化参数过程示意图

Fig. 8 Parameter optimization process of SA-PSO algorithm

4 悬浮控制仿真

为了验证 ILevant-PID 控制算法的可行性, 在 Matlab 中搭建基于 PEMS 的 ILevant-PID 及 PID 控制方法模型, 以 15 mm 为参考位移, 阶跃信号作为控制器输入, 结合 SA-PSO 优化算法对控制器参数优化, 固定 PID 参数与 ILevant-PID 参数一样。

SA-PSO 算法参数见表 2, 适应度变化曲线见

图 9, 整定后控制器参数见表 3。

表 2 SA-PSO 算法参数
Table 2 Parameters of SA-PSO algorithm

序号	符号	含义	数值
1	M	最大迭代次数	90
2	N	种群个体数目	80
3	c_1	学习因子 1	1.8
4	c_2	学习因子 2	1.8
5	T_0	模拟退火初始温度	1 000
6	δ	退火常数惯性权重	0.8

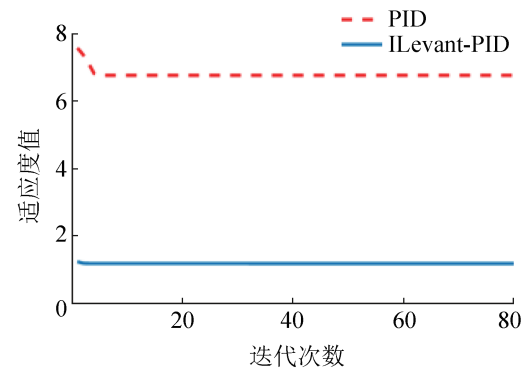


图 9 控制器参数整定适应度变化曲线

Fig. 9 Controller parameters set fitness curves

表 3 控制器仿真参数

Table 3 Controller simulation parameters

控制器	参数	数值
PID	K_p	8 078.858
	K_i	352 338.134
	K_d	200.114
ILevant-PID	K_p	8 078.858
	K_i	352 338.134
	K_d	200.114
	λ_1	17.995
	λ_2	53.272
	α_2	601.221

通过图 9 所示的适应度变化曲线可知: PID 控制方法的最优 ITAE 性能指标为 6.767; ILevant-PID 方法的最优 ITAE 性能指标为 1.174, 相比于 PID 控制减小了 82.65%。

将 ILevant-PID 控制器与传统的 PID 控制器针对不同类型的输入进行仿真, 对比两者响应曲线。

两种控制方法在理想输入、输出环境时的阶跃响应曲线如图10所示。

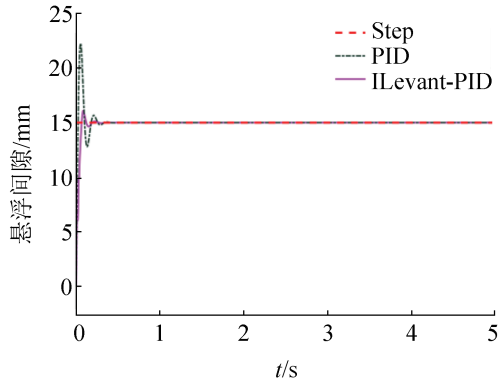


图10 阶跃信号下两种控制器响应曲线

Fig. 10 Two controller response curves under step signal

由于在反馈信号进行采样时存在噪声，因此在仿真系统反馈环节施加噪声干扰更能贴近实际系统，施加幅值为给定值5%的随机噪声干扰信号后的阶跃响应曲线如图11所示，其仿真结果对比如表4所示。

结合表4，分析仿真图10可知：系统在阶跃信号输入下，ILevant-PID控制方法启动更为平缓，与传统PID控制方法相比，调节时间减少了41.19%，超调量减小了40.36%，减小了信号的突变给系统带来的影响，解决了混合悬浮系统中因信号突变或干扰造成超调过大，导致悬浮体“撞轨”甚至“吸死”的问题。

分析图11可知：当系统受到外界噪声影响时，

ILevant-PID控制方法具有很好的鲁棒性，而传统的PID控制算法难以维持原来悬浮状态，抖振现象明显。

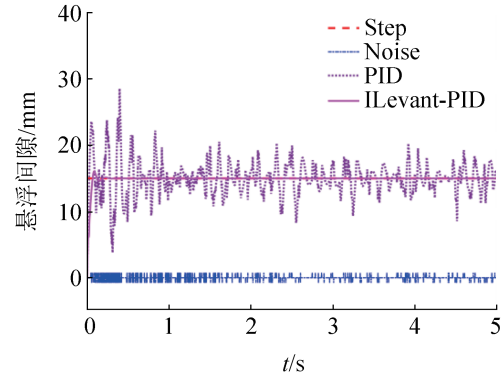


图11 含噪声干扰下两种控制器响应曲线

Fig. 11 Response curves of two controllers with noise interference

表4 两种控制器仿真结果对比

Table 4 Comparison of simulation results of two controllers

信号类型	控制方法	调节时间/s	超调量/%	稳态误差/%
阶跃	PID	0.335	47.935	0
	Levant-PID	0.197	7.573	0
噪声输入	PID	∞	58.773	24.571
	Levant-PID	0.261	7.623	0.383

5 悬浮控制实验

结合上述仿真分析，通过实验进一步分析两种控制方法的控制性能。实验前基于两种控制算法搭建半实物系统实验平台，结构如图12所示。

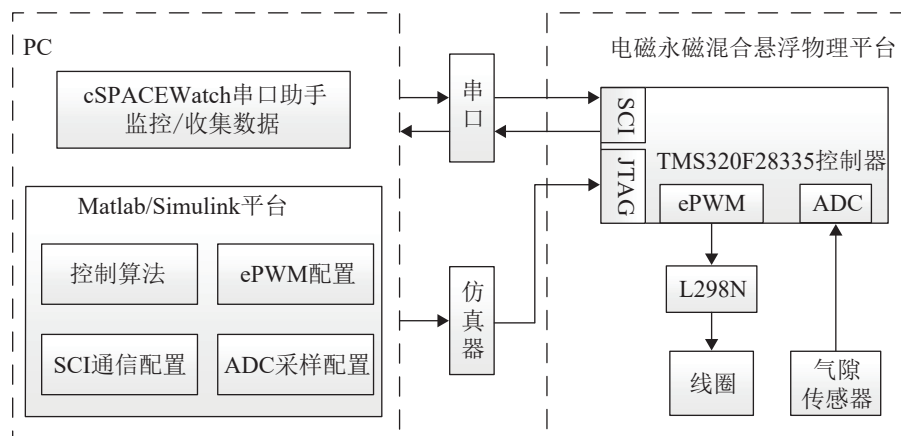


图12 PEMS系统半实物仿真平台结构

Fig. 12 Structure block of PEMS system semi-physical simulation platform

<http://www.china-simulation.com>

平台由PC端和永磁电磁混合悬浮实验平台组成。PC端利用Simulink中代码生成工具包,生成对应的工程文件,经仿真器下载到TMS320F28335控制器中,控制悬浮体稳定悬浮,同时,通过串口通讯模块建立与PC端的上位机通讯,实现上位机在线调试悬浮间隙、控制参数等,并通过上位机收集混合悬浮实验平台运行数据。

通过实验对平台悬浮间隙与ADC采集电压量值进行标定,测量结果与数据拟合结果如图13所示。

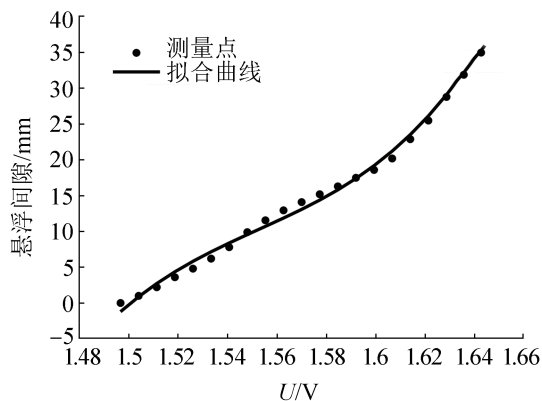


图13 悬浮间隙测量结果

Fig. 13 Suspension gap measurement results

实际悬浮距离计算公式为

$$x = 15\,776 U^3 - 73\,479 U^2 + 114\,237 U - 59\,271 \quad (8)$$

式中: U 为控制器输出电压值。

由于仿真建模时对系统进行了一定简化,因此仿真与实际存在一定的差异,导致仿真和实验时的控制器参数不完全一致,结合仿真参数对实际系控制参数进行优化,各悬浮控制器优化后的实验参数见表5。

单点PEMS系统悬浮实验如图14所示,设计如下测试方案:①噪声抑制性能测试。在悬浮稳定情况下对系统施加噪声干扰,比较两种控制方法的鲁棒性;②适应性测试。给定输入幅值为8 mm的方波信号,对比观察两种控制方法的跟踪性能。

(1) 噪声抑制性能测试

在15 mm处悬浮稳定的基础上,施加幅值为

给定信号10%的随机噪声,两种控制方法下悬浮体响应轨迹分别见图15~16。

表5 控制器实验参数

Table 5 Experiment parameters of controller		
控制器	参数	数值
PID	K_p	3 000
	K_i	50 030
	K_d	100
ILevariant-PID	K_p	3 000
	K_i	5 000
	K_d	50
	λ_1	17.995
	λ_2	100
	α_2	500

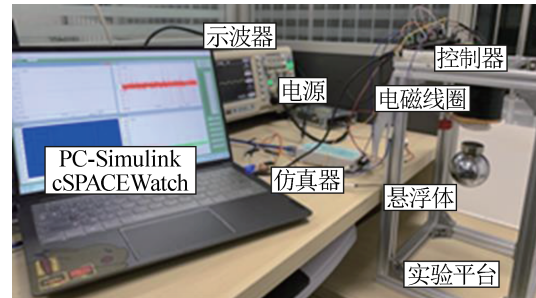


图14 单点PEMS系统悬浮示意图

Fig. 14 Levitation diagram of single point PEMS system

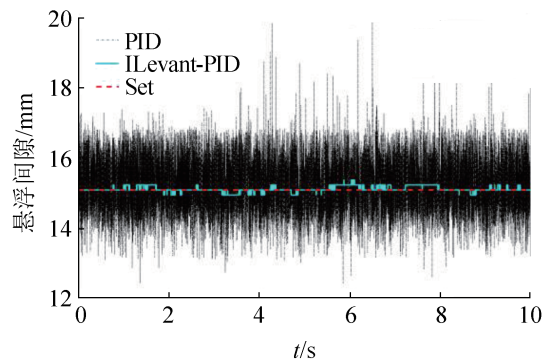


图15 无噪声干扰定间隙下悬浮体响应轨迹

Fig. 15 Response trajectory of suspended body at constant gap without noise

分析图15可知:无噪声干扰时,悬浮体平衡均能达到平衡,PID控制下有 ± 1.81 mm波动;ILevariant-PID控制下有 ± 0.23 mm波动,相比于PID控制稳态误差减小了87.29%,说明ILevariant-PID大幅度减小了测量变送环节的噪声影响。

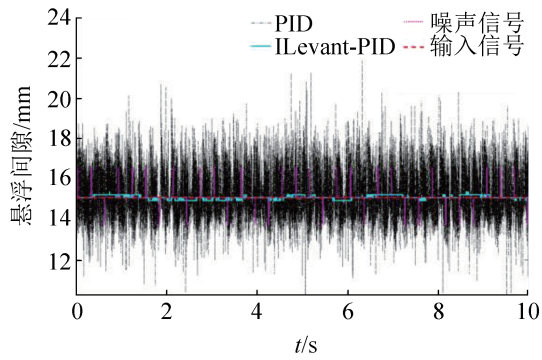


图16 噪声干扰下悬浮体响应轨迹

Fig. 16 Response trajectory of suspended body under noise interference

分析图16可知：施加噪声干扰时，在传统PID控制作用下，悬浮体整体悬浮稳定，但存在较大波动，甚至出现震荡发散情况，相对稳定时悬浮体在 ± 2.98 mm振动；在ILevariant-PID控制作用下，悬浮体在 ± 0.37 mm波动，相比于PID控制下减小了87.58%，说明ILevariant-PID控制器具有较强的鲁棒性。

(2) 适应性测试

通过改变预设的悬浮间隙，观察其适应与跟随变间隙能力，两种控制方法作用下悬浮体响应轨迹如图17所示。

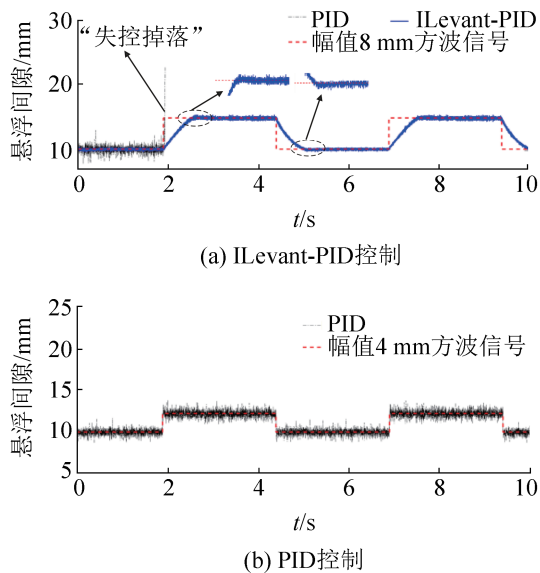


图17 跟踪方波信号悬浮体响应轨迹

Fig. 17 Response trajectory of suspension tracking square wave signal

分析图17可知：传统PID控制作用下，悬浮体难以跟踪幅值为8 mm的方波信号，出现失控掉落现象，故减小方波信号幅值至4 mm分析性能，其超调量、稳态误差均出现较大波动，平衡时在 ± 1.96 mm振动；在ILevariant-PID控制作用下，悬浮体几乎能无超调的跟踪幅值为8 mm的方波信号，且悬浮体平衡时在 ± 0.51 mm波动，说明ILevariant-PID控制器具有较强的适应性和良好的动态性能。

6 结论

本文以单点PEMS控制系统为研究对象，对系统模型进行分析；针对信号突变和噪声干扰引起控制效果不理想问题，提出了一种改进型Levant微分器和PID控制相结合的ILevariant-PID方法，有效提高了系统的抗扰能力、鲁棒性和适应性。不仅为磁悬浮系统的稳定控制提供了支撑，而且对于其他输入变化范围大且噪声环境复杂的系统具有很好的普适性。下一步考虑通过引入扩张状态观察器对未知扰动进行估计，从而使控制器对外部干扰的实时适应。

参考文献：

- [1] 黎松奇, 张昆仑, 刘国清, 等. EMS型磁浮列车上下坡过程仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(1): 255-260.
Li Songqi, Zhang Kunlun, Liu Guoqing, et al. Simulation Research of Maglev Train During Uphill and Downhill Process[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(1): 255-260.
- [2] 吕治国, 龙志强. 磁悬浮球系统的非线性自适应控制方法[J]. 控制工程, 2020, 27(1): 127-133.
Lü Zhiguo, Long Zhiqiang. Method on Nonlinear Adaptive Controller for Maglev Levitation Ball System [J]. Control Engineering of China, 2020, 27(1): 127-133.
- [3] 钟志贤, 蔡忠侯, 祁雁英. 单自由度磁悬浮系统无模型自适应控制的研究[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(3): 549-557, 581.
Zhong Zhixian, Cai Zhonghou, Qi Yanying. Model-free Adaptive Control for Single-degree-of-freedom Magnetically Levitated System[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(3): 549-557, 581.
- [4] 王莉, 张昆仑. 基于零功率控制策略的混合磁悬浮系统[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(5): 667-672.

- Wang Li, Zhang Kunlun. Hybrid Magnetic Suspension System Based on Zero Power Control Strategy[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(5): 667-672.
- [5] 龙鑫林, 余龙华, 常文森. 电磁永磁混合型EMS磁悬浮非线性控制算法研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(9): 36-39.
Long Xinlin, She Longhua, Chang Wensen. Study on Nonlinear Control Method for Hybrid EMS Maglev Train [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(9): 36-39.
- [6] Gao Tao, Yang Jie, Jia Limin, et al. Design of New Energy-efficient Permanent Magnetic Maglev Vehicle Suspension System[J]. IEEE Access, 2019, 7: 135917-135932.
- [7] 朱斌. 自抗扰控制入门[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2017.
- [8] 王莉, 熊剑, 张昆仑, 等. 永磁和电磁构成的混合式悬浮系统研究[J]. 铁道学报, 2005, 27(3): 50-54.
Wang Li, Xiong Jian, Zhang Kunlun, et al. Research of Hybrid Suspension System Made of Permanent-and Electromagnets[J]. Journal of the China Railway Society, 2005, 27(3): 50-54.
- [9] 苏芷玄, 杨杰, 彭月, 等. 单点混合磁悬浮系统的自抗扰控制仿真研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(4): 864-873.
Su Zhixuan, Yang Jie, Peng Yue, et al. Simulating Active Disturbance-resistant control of Single-point Hybrid Magnetic Suspension System[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(4): 864-873.
- [10] Arie Levant. Robust Exact Differentiation via Sliding Mode Technique[J]. Automatica, 1998, 34(3): 379-384.
- [11] 杨杰, 陈昱圻, 王盼盼. 基于改进粒子群算法的列车速度跟踪自抗扰控制器设计[J]. 铁道学报, 2021, 43(7): 40-46.
Yang Jie, Chen Yuqi, Wang Panpan. Design of Active Disturbance Rejection Controller for Train Speed Tracking Based on Improved Particle Swarm Optimization[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(7): 40-46.
- [12] 耿亚, 吴访升. 基于粒子群-模拟退火算法的背包问题研究[J]. 控制工程, 2019, 26(5): 991-996.
Geng Ya, Wu Fangsheng. Research on Knapsack Problem Based on the Hybrid Algorithm of Particle Swarm Optimization and Simulated Annealing[J]. Control Engineering of China, 2019, 26(5): 991-996.
- [13] 张文静, 曹博文, 李宽欣, 等. 中速磁悬浮列车的分数阶运行控制方法[J]. 铁道学报, 2022, 44(2): 42-48.
Zhang Wenjing, Cao Bowen, Li Kuanxin, et al. A Fractional Order Operation Control Method for Medium-speed Maglev Trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(2): 42-48.