

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.051

高速列车 GMA 主动悬挂垂向振动集成控制策略

窦文略^{1a,2}, 孟建军^{1a,1b}, 刘洋^{1b}, 汤瑞^{1b}

(1. 兰州交通大学 a. 机电技术研究所; b. 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 中国铁路沈阳局集团有限公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要:为抑制列车垂向振动,针对搭载超磁致伸缩作动器的主动悬挂,以中国高速铁路无砟轨道谱作为线路激励源,构建一种遗传算法、模糊控制、PID 控制相结合的集成控制器。该控制器既有模糊 PID 控制收敛速度快、鲁棒性好的特点,又利用遗传算法解决了模糊 PID 控制参数调节存在反复试验且主观性较强的问题。通过 Simulink 联合仿真结果显示:参照列车平稳性指标计算标准,高速列车 GMA 悬挂系统采用集成控制器的平稳性,明显优于模糊 PID 控制器和普通 PID 控制器。

关键词:高速列车;垂向振动;主动悬挂;超磁致伸缩作动器;模糊 PID;遗传算法;平稳性

中图分类号:U270.33 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)05-0262-06

Integrated Control Strategy of High-speed Train with GMA Active Suspension Vertical Vibration

DOU Wenlue^{1a,2}, MENG Jianjun^{1a,1b}, LIU Yang^{1b}, TANG Rui^{1b}

(1. a. Mechatronics T&R Institute; b. School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. China Railway Shenyang Group Co., Ltd., Shenyang 110000, China)

Abstract: Aimed at the active suspension with the giant magnetostrictive actuator, and the ballastless track spectrum of China's high-speed railway taken as the excitation source of external disturbance, an integrated controller combining fuzzy control, PID control and genetic algorithm is constructed to suppress the vertical vibration of the train. The controller not only has the characteristics of fast convergence speed and good robustness of fuzzy PID control but also is able to solve the problem of repeated trials and the strong subjectivity of fuzzy PID control parameter adjustment by genetic algorithm. The joint simulation results of Simulink show that the stability of the GMA suspension system of a high-speed train is obviously better than that of fuzzy PID controller and ordinary PID controller with reference to the calculation standard of train stability index.

Keywords: high-speed train; vertical vibration; active suspension; giant magnetostrictive actuator; fuzzy PID; genetic algorithm; smoothness

0 引言

随着中国铁路的快速发展,列车开始向高速化、轻量化的方向发展^[1],但轻量化设计会导致车体振动的产生,而通过优化设计车辆的悬挂系统来抑制车体振动是目前最为经济有效的方法。主动悬挂是一个由传感器、控制器和作动器构成的闭环控制系统。由传感器来获取车体实时振动状态,根据状态信息生成控制量;控制器根据控制策略使作动器产生作动力反馈传递到车体上,以达到自适应调节车体振动的目的^[2]。

主动悬挂最核心部分是开发优质作动器和与之适配的控制系统^[3]。目前传统作动器主要以压

电型作动器、电磁型作动器为主,其中压电型作动器普遍存在着位移量和输出功率相对较小的问题,并且在设计时必须考虑冲击力和高压电驱动造成的短路,而普通电磁型作动器存在能耗较高、响应速度慢等缺陷。本文采用的超磁致伸缩作动器(GMA)^[4],不仅能克服传统主动悬挂系统中电致伸缩作动器的缺点,而且其电—机转换效率极高,使得其响应速度快、输出力大,更能满足高速车辆对主动悬挂的控制要求。

为了更好地使 GMA 悬挂系统发挥性能优势,减小模型失配和外界干扰的影响,提高主动悬挂系统的鲁棒性和抗干扰性,其控制策略也是目前的研究热点之一。较为突出的有 PID 控制、鲁棒

基金项目:国家自然科学基金项目(62063013)

第一作者简介:窦文略(1999—),女,吉林长春人,硕士研究生,研究方向为轨道车辆振动分析与控制,17393185302@163.com。

控制、最优控制等经典控制理论。随着工业 4.0 时代的到来,专家系统、模糊算法、遗传算法、神经网络算法等控制算法与传统控制算法的结合控制方式也逐渐增多^[5]。然而,高速车辆主动悬挂是一个多自由度的复杂系统,传统融合控制很难满足实际车辆振动智能控制工作的需求^[6-7]。PID 控制的参数整定具有一定局域性优化缺陷,模糊控制是根据专家知识库实现预定参数的控制,但随着输入、输出参量的增加,其逻辑推理将复杂化。因此,根据不同智能算法的特点和优势合理地选择和匹配各种智能控制算法,使超磁致伸缩作动器的快速响应、精密定位等控制要求都能够较好的契合,以达到高效隔离并减小车体振动,提高车辆运行品质的要求。本文构建一种遗传算法、模糊控制、PID 控制相结合的集成控制器。遗传算法(genetic algorithm, GA)是一种拟自然的随机优化算法,并行计算能力强大、精度高、可靠性好,将其与模糊控制、PID 控制相结合,使集成控制器既有收敛速度快、鲁棒性好的特点,又解决了模糊 PID 控制参数调节存在反复试验且主观性较强的问题,使悬挂控制系统更符合客观实际^[8-9]。

基于此,本文以中国高速铁路无砟轨道谱作为线路激励源,建立了高速列车 GMA 主动悬挂垂向 6 自由度的 1/2 车体模型,采用遗传算法、模糊控制、PID 控制相结合的集成控制器对列车的垂

向振动控制进行研究,在 MATLAB/Simulink 中仿真验证集成控制策略的可行性。

1 系统模型建立

1.1 高速列车主动悬挂系统模型

根据垂向振动状况和悬挂实际工作原理,建立列车悬挂动力学模型,如图 1 所示。该模型包括车体、前后构架的浮沉、点头 6 个自由度,并假设轮对、车体、构架及钢轨均为刚体^[10]。

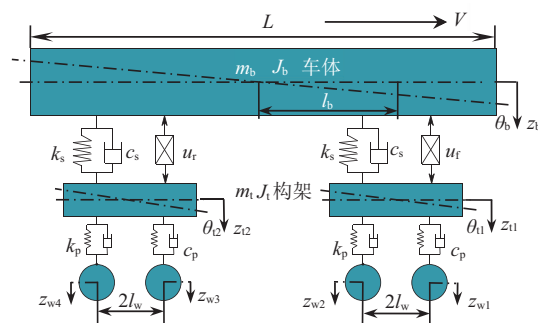


图 1 悬挂动力学模型

根据牛顿定律,可得列车主动悬挂的运动微分方程如式(1)所示。根据列车主动悬挂的运动微分方程,建立列车悬挂系统仿真模型。以某型高速客车主动悬挂为研究对象,其部分参数如表 1 所示。

$$\begin{cases} m_b \ddot{z}_b = -2k_s z_b + k_s z_{t1} + k_s z_{t2} - 2c_s \dot{z}_b + c_s \dot{z}_{t1} + c_s \dot{z}_{t2} - u_f - u_r \\ J_b \ddot{\theta}_b = -2k_s l_b^2 \theta_b + k_s l_b z_{t1} - k_s l_b z_{t2} - 2c_s l_b^2 \dot{\theta}_b + c_s l_b \dot{z}_{t1} - c_s l_b \dot{z}_{t2} - u_f l_b + u_r l_b \\ m_t \ddot{z}_{t1} = -(k_s + 2k_p) z_{t1} + k_s z_b + k_s l_b \theta_b + c_s \dot{z}_b + c_s l_b \dot{\theta}_b - (c_s + 2c_p) \dot{z}_{t1} + c_p \dot{z}_{w1} + c_p \dot{z}_{w2} + k_p z_{w1} + k_p z_{w2} + u_f \\ J_t \ddot{\theta}_{t1} = -2k_p l_w^2 \theta_{t1} + k_p l_w z_{w1} + k_p l_w z_{w2} - 2c_p l_w^2 \dot{\theta}_{t1} + c_p l_w \dot{z}_{w1} - c_p l_w \dot{z}_{w2} \\ m_t \ddot{z}_{t2} = -(k_s + 2k_p) z_{t2} + k_s z_b - k_s l_b \theta_b + c_s \dot{z}_b - c_s l_b \dot{\theta}_b - (c_s + 2c_p) \dot{z}_{t2} + c_p \dot{z}_{w3} + c_p \dot{z}_{w4} + k_p z_{w3} + k_p z_{w4} + u_r \\ J_t \ddot{\theta}_{t2} = -2k_p l_w^2 \theta_{t2} + k_p l_w z_{w3} - k_p l_w z_{w4} - 2c_p l_w^2 \dot{\theta}_{t2} + c_p l_w \dot{z}_{w3} - c_p l_w \dot{z}_{w4} \end{cases} \quad (1)$$

式中: \$l_b\$、\$l_w\$ 分别表示定距、轴距之半; \$z_b\$、\$z_{t1}\$、\$z_{t2}\$ 分别表示车体、前构架和后构架垂向位移; \$\theta_b\$、\$\theta_{t1}\$、\$\theta_{t2}\$ 分别表示车体、前构架和后构架的点头角; \$u_f\$、\$u_r\$ 分别表示二系悬挂前后作动力; \$z_{wi}\$、\$\dot{z}_{wi}\$ 分别表示第 \$i\$ 个轮对受到的垂向激励与振动速度。

表 1 高速客车的部分结构参数

主要参数	数值
车体质量 \$m_b/\text{kg}\$	36 000
构架质量 \$m_t/\text{kg}\$	2 100

表 1(续)

主要参数	数值
车体点头惯量 \$J_b/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)\$	2 300 000
构架点头惯量 \$J_t/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)\$	2 100
二系弹簧刚度 \$k_s/(\text{N/m})\$	520 000
一系弹簧刚度 \$k_p/(\text{N/m})\$	1 200 000
二系阻尼系数 \$c_s/(\text{N} \cdot \text{s/m})\$	40 000
一系阻尼系数 \$c_p/(\text{N} \cdot \text{s/m})\$	60 000

1.2 轨道激励输入模型

车辆在行驶过程中,由于轨道的不平顺而遭受扰动,这是使高速列车运行时产生振动的主要原因^[11]。针对高速列车的垂向振动问题,本文选取中国高速铁路无砟轨道谱作为外部扰动的激励源,可表示为

$$S(f) = A/f^K \quad (2)$$

式中: f 为空间圆频率; A 、 K 为拟合系数。

中国无砟高速轨道不平顺谱是按照空间频率分段点进行拟合,根据相应的空间频率、波长和拟合系数生成轨道空间谱^[12-13],为便于列车动力学分析,将空间(圆)频率轨道谱变换为时域上不平顺功率谱密度函数。取 $v = 300 \text{ km/h}$ 、 $f_{\max} = 200 \text{ Hz}$ 、 $f_{\min} = 0.5 \text{ Hz}$ 、 $T = 20 \text{ s}$ 、步长为 $t = 10^{-4} \text{ s}$,得到中国高速铁路轨道高低不平顺模拟时域信号,如图 2 所示。

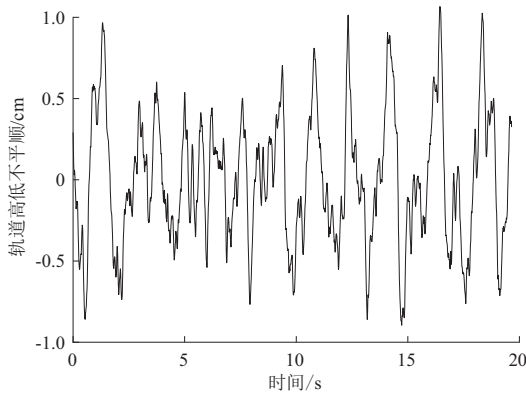


图 2 高速铁路轨道激励时域信号

1.3 超磁致伸缩作动器模型

超磁致伸缩作动器(GMA)是一种新型的高效节能型换能器,其输出性能与高速列车主动悬挂系统具有良好的适配性^[14-15],其参数如表 2 所示。建立作动器等效力学模型^[16],如图 3 所示。图 3 中, m_1 、 k_1 、 c_1 分别代表 GMM 棒的质量、刚度系数和阻尼系数, m_2 、 k_2 、 c_2 分别代表负载端的质量、刚度和阻尼系数。

表 2 超磁致伸缩作动器参数

参数名称	数值
GMM 棒长 l_1/mm	140
GMM 棒直径 D/mm	30
GMM 棒弹性模量 E/GPa	25
GMM 棒刚度系数 $k_1/(\text{N/m})$	1.34×10^8

表 2(续)

参数名称	数值
GMM 棒阻尼系数 $c_1/(\text{N} \cdot \text{s/m})$	9.3×10^3
GMM 棒压磁系数 $d_{33}/(\text{m/A})$	3.73×10^{-8}
GMM 棒柔顺系数 $S^H/(\text{m}^2/\text{N})$	3.79×10^{-11}
GMM 棒密度 $\rho/(\text{kg/m}^3)$	9.2×10^3
预紧弹簧阻尼 $c_2/(\text{N} \cdot \text{s/m})$	1.8×10^3
预紧弹簧刚度 $k_2/(\text{N/m})$	1.4×10^6
负载质量 m_2/kg	0.2
驱动线圈匝数 N/T	320

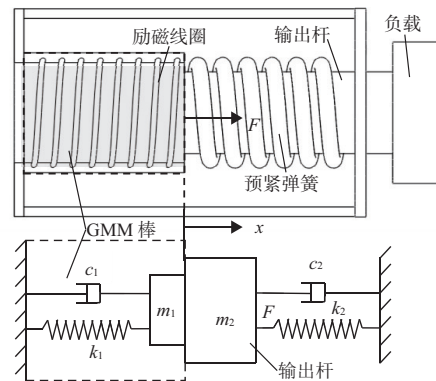


图 3 GMA 等效力学模型

根据动能等效原理,GMM 棒的等效质量、等效阻尼系数和等效刚度系数分别为 $M = m_1/3$ 、 $C = Ac_1/l_1$ 、 $K = AE^H/l_1$ 。GMM 棒的轴向应变是其内部弹性变形和外部磁场产生的磁感应伸缩形变之和,通过输出杆直接传递,使作动器输出位移^[17]。同时,在计算过程中需考虑 GMM 棒的质量以及阻尼,得到 X 与 I 间的传递函数,即

$$\frac{X(S)}{I(S)} = \frac{d_{33}AN/S^H l_1}{(m_2 + m_1/3)S^2 + (Ac_1/l_1 + c_2)S + (k_2 + A/l_1 S^H)} \quad (3)$$

将其转化为二阶系统标准形式,则有

$$G(s) = \frac{K^* \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

$$\text{式中: } K^* = \frac{d_{33}AN}{S^H l_1 (K + k_2)}; \xi = \frac{C + c_2}{2\sqrt{(K + k_2)(M + m_2)}};$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K + k_2}{M + m_2}}。$$

2 控制器设计

由于车体在理想平稳运行状态下无振动,因此以车体的振动加速度等于 0 为控制目标,由列车主动悬挂的运动微分方程可得:

$$\begin{cases} u_f = -k_s(z_b - z_{t1} - l_b\theta_b) - c_s(\dot{z}_b - \dot{z}_{t1} - l_b\dot{\theta}_b) \\ u_r = -k_s(z_b - z_{t2} - l_b\theta_b) - c_s(\dot{z}_b - \dot{z}_{t2} - l_b\dot{\theta}_b) \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)可知,高速列车二系悬挂前动挠度为 $z_b - z_{t1} - l_b\theta_b$,后动挠度为 $z_b - z_{t2} - l_b\theta_b$,且其直接影响作动器提供的作动力大小,因此控制器的输入选择二系悬挂动挠度,输出选择作动器的作动力。

2.1 主动悬挂模糊 PID 控制

模糊 PID 控制器是将输入变量经过模糊算法规则推理以实时调整 PID 控制参数,它具备常规 PID 控制的稳定性和模糊控制优秀的动态追踪性能^[18]。其工作原理如图 4 所示。

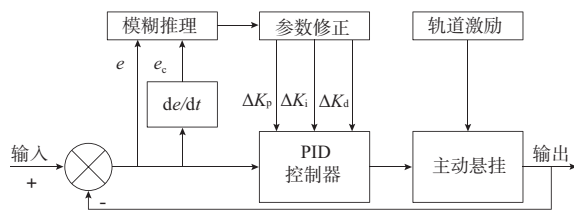


图 4 模糊 PID 控制器原理图

模糊 PID 控制采用两输入三输出的控制器,以二系悬挂动挠度 e 及其变化率 e_c 作为控制器的输入,输出为 GMA 悬挂系统的作动力。

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + K_{pi}\Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + K_{li}\Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + K_{Di}\Delta K_d \end{cases} \quad (6)$$

式中: K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 为 PID 初始控制参数; K_{pi} 、 K_{li} 、 K_{Di} 为比例因子; ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 为自适应模糊控制整定参数。

采取试凑法对其参数进行整定,经多次仿真表明 $K_{p0} = 2\ 000$ 、 $K_{i0} = 20$ 、 $K_{d0} = 30$ 时最大超调量、调整时间、稳态误差均可达到列车主动减振要求。输入、输出变量模糊论域均设定为 $[-6, 6]$,采用模糊子集 $[NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB]$ 描述。输入变量的隶属度函数选用平稳性较好的高斯形(gaussmf)函数,输出变量的隶属度函数选用较灵敏的三角形(trimf)函数,使用 Mamdani 法进行模糊推理和重心法解模糊,模糊规则如表 3 所示。

表 3 模糊规则表

e	$K_p/K_i/K_d$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/ZE	PM/NB/ZE	PM/NM/ZE	PM/NS/PB	PS/ZE/PB	ZE/ZE/PS
NM	PB/NB/NS	PM/NB/NS	PM/NB/NS	PS/NS/ZE	PS/NS/PS	ZE/ZE/PM	NS/ZE/NS
NS	PM/NB/NB	PM/NM/NM	PS/NS/NS	PS/NS/ZE	ZE/ZE/PS	NS/PS/PM	NS/PS/NB
ZE	PM/NM/NM	PS/NM/NM	ZE/NS/NS	ZE/ZE/ZE	ZE/PS/PS	NS/PM/PM	NM/PM/NB
PS	PS/NM/NM	PS/NS/NS	ZE/ZE/NS	NS/PS/ZE	NS/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/NB
PM	PS/ZE/NS	ZE/ZE/NS	NS/PS/NS	NM/PS/ZE	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/NM
PB	ZE/ZE/ZE	ZE/ZE/ZE	NM/PS/ZE	NB/PM/ZE	NB/PM/PB	NB/PB/PB	NB/PB/PS

2.2 GA 优化模糊 PID 控制

1) 设计变量选择

遗传算法通过随机生成初始种群进行交叉和变异等操作,逐步优化参数,避免模糊 PID 控制器陷入局部最优,其优化流程如图 5 所示^[19]。

2) 目标函数选择

选取前后悬挂模糊 PID 控制器的比例因子 K_{p1} 、 K_{i1} 、 K_{d1} 、 K_{p2} 、 K_{i2} 、 K_{d2} 作为设计变量。以快速衰减车体垂向振动加速度作为控制目标,选择车体垂向加速度 $\ddot{z}_b$ 、车体点头角加速度 $\ddot{\theta}_b$ 、前悬挂动挠度 e_1 和后悬挂动挠度 e_2 作为性能优化指标,建立目标函数,如式(7)所示。

$$\min Q(x) = q_1 \ddot{z}_b + q_2 \ddot{\theta}_b + q_3 e_1 + q_4 e_2 \quad (7)$$

式中: $Q(x)$ 为目标函数; q_1 为车体垂向加速度的

权重系数 0.5; q_2 为车体点头角加速度的权重系数 0.2; q_3 为前悬挂动挠度权重系数 0.15; q_4 为后悬挂动挠度权重系数 0.15。

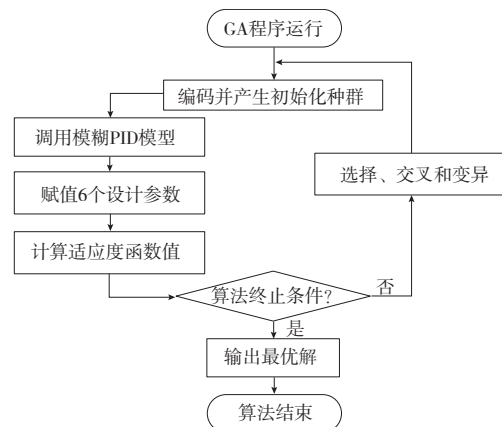


图 5 遗传算法基本流程

3) GA 优化算法

Step1.编码建立初始种群。设计变量采用二进制编码,初始种群的规模设定为 20。

Step2.选择适应度函数。适应度越高,个体遗传给下一代的几率越大。选择目标函数的倒数为适应度函数,当目标函数值越小时,种群个体适应环境的能力越强,如式(8)所示。

$$f = \frac{1}{Q(x)} = \frac{1}{q_1 \ddot{z}_b + q_2 \ddot{\theta}_b + q_3 e_1 + q_4 e_2} \quad (8)$$

Step3.选择、交叉和变异操作。利用遗传算法进行选择、交叉和变异操作,生成新一代种群,再去开展上一代的操作,从而实现全局最优。选择概率定为 0.25,交叉概率定为 0.6,变异概率定为 0.2。

Step4.算法终止条件。最优个体适应度满足设定阈值时或迭代次数满足预设时算法结束,本文设 20 为最大迭代次数。

Step5.输出最优解。在 Simulink 环境下构建 GMA 悬挂集成控制器,获得适应度函数变化曲线,如图 6 所示。适应度函数值由 0.265 7 增加到 0.295 6,则目标函数值由 3.763 6 减小至 3.382 9,对应的最优个体 $(K_{P1}, K_{I1}, K_{D1}, K_{P2}, K_{I2}, K_{D2}) = (211.569\ 2, 0.420\ 6, 0.121\ 3, 211.096\ 5, 0.826\ 8, 0.456\ 1)$ 。

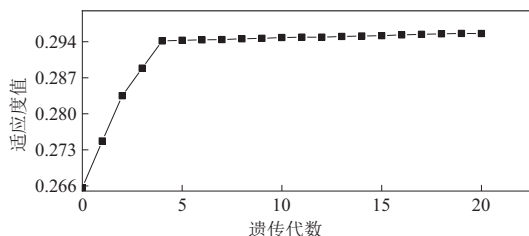


图 6 适应度函数值变化曲线

3 仿真试验与结果分析

3.1 振动特性分析

在 MATLAB/Simulink 环境下构建控制模型,如图 7 所示,其中车速设置为 300 km/h,轨道激励选用中国无砟轨道不平顺谱,并设定步长为 10^{-4} s,时间为 20 s,进行仿真,得到搭载 GMA 的列车悬挂系统在被动控制以及 3 种不同控制器主动控制下的车体垂向加速度与车体点头角加速度的时间域比较图,如图 8、图 9 所示。

从图 8 和图 9 中可知,经 GA 优化的模糊 PID 控制器效果最好,单一 PID 控制器效果较差。这说明集成控制系统具有较好的降低列车垂直振动

方向加速度、悬架动行程以及列车车轮动载荷的能力。

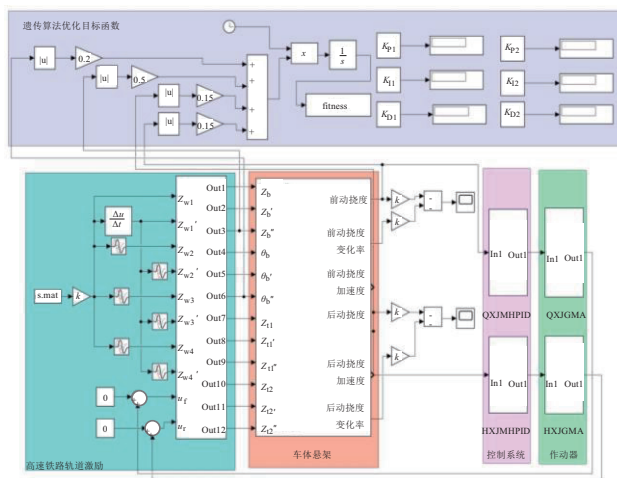


图 7 GA 优化模糊 PID 控制模型

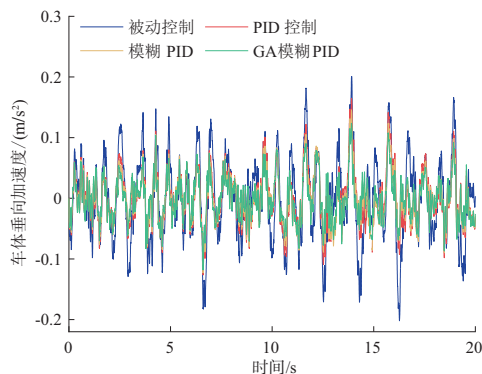


图 8 车体垂向振动加速度时域对比图

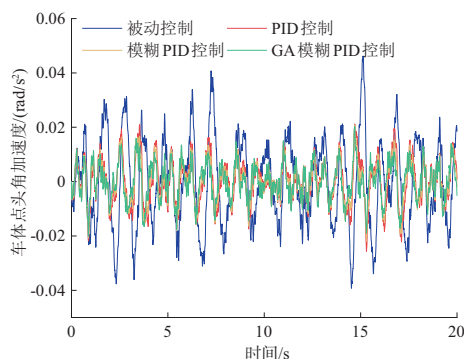


图 9 车体点头角加速度时域对比图

3.2 平稳性分析

为了进一步定性分析,将车体垂向振动加速度数据进行处理,利用加速度方均根值及 Sperling 平稳性指标^[20]对列车运行平稳性进行了评估,获得了 4 种控制方式下垂向振动加速度的幅频特性如图 10 所示。不同控制条件下列车平稳性指标

如表 4 所示。

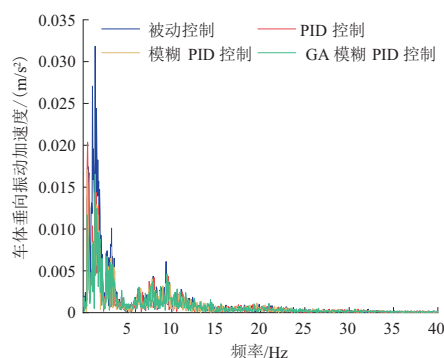


图 10 车体垂向振动加速度频域对比图

表 4 不同控制条件下列车平稳性指标

控制条件	方均根值	平稳性指标
被动控制	0.015 0	2.701 5
PID 控制	0.009 9	2.314 4
模糊 PID 控制	0.008 9	2.250 1
GA 优化模糊 PID 控制	0.008 0	2.220 8

从表 4 可知,相比于被动控制,PID 控制、模糊 PID 控制和 GA 优化模糊 PID 控制的列车加速度方均根值分别降低了 34%,40.67%,46.67%,而列车运行平稳性指标分别优化了 14.33%,16.71%,17.79%。

4 结语

针对高速列车运行平稳性问题,传统作动器具有一定的局限性,且控制算法单一,无法满足高速列车复杂的运行状况。本文以搭载超磁致伸缩作动器的高速列车主动悬挂系统为研究对象,设计了遗传算法、模糊控制、PID 控制相互结合的集成控制器,有效利用 3 种算法的优势,使得 GMA 悬挂系统性能得以发挥,提高列车运行平稳性。高速列车 GMA 悬挂系统采用集成控制器能够有效改善列车运行平稳性,且其性能明显优于模糊 PID 控制器和普通 PID 控制器。

参考文献:

- [1] 孔凡跃,谢素明,程亚军. 高速列车车体主结构型材分级优化设计[J]. 机械工程与自动化,2025(1):57-61.
- [2] 毕厚煌. 基于 LQR 控制的车辆悬架系统设计与研究[J]. 车辆与动力技术,2025(2):17-20.
- [3] NITISH, SINGH A K. Design of robust active suspension system for performance improvement and vibration control of railway vehicles: An H_{∞} and μ -synthesis perspective [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2024, 238(22): 10609-10631.

- [4] 孟建军,陈彦丰,祁文哲,等. 超磁致伸缩作动器结构设计与分析[J]. 磁性材料及器件,2021,52(2):46-50.
- [5] 荆航,续彦芳. 基于改进人工蜂群算法优化的汽车主动悬架 PID 控制[J]. 机械制造与自动化,2023,52(5):232-235.
- [6] 王康. 基于主动抗蛇行减振器的高速列车转向架蛇行运动控制研究[D]. 成都:西南交通大学,2023.
- [7] 李俊聪,黄翔,曾京,等. 高速列车蛇行稳定性自适应控制策略研究[J]. 现代制造工程,2025(2):61-68.
- [8] 李志清,李美,付丽荣,等. 遗传算法优化的空气悬架模糊 PID 控制[J]. 机械设计与制造,2023(4):22-25,33.
- [9] 张瑞东,孟建军,李德仓,等. 高速列车半主动悬挂系统模糊自适应 PID 控制研究[J]. 铁道机车车辆,2023,43(2):1-7.
- [10] 周劲松. 铁道车辆振动与控制[M]. 北京:中国铁道出版社,2012:23-25.
- [11] 陈春俊. 高速列车主动与半主动控制[M]. 成都:西南交通大学出版社,2015:10-17.
- [12] 王靖铭,宁静,赵飞,等. 不同频率轨道激励下列车横向半主动控制研究[J]. 中国测试,2020,46(8):116-120.
- [13] 李帅,李向国,王凯,等. 不同轨道不平顺激励下线形关键点处列车走行性分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2024,37(1):74-80.
- [14] 张茉颜,肖宏. 强横风与轨道不平顺耦合作用对高速列车运行安全性影响分析[J]. 铁道标准设计,2018,62(12):11-15.
- [15] 陈奕霖,陈继伟,董世昌,等. 基于超磁致伸缩作动器的列车主动悬挂控制算法研究[J]. 现代城市轨道交通,2025(4):53-57.
- [16] DONG S C, MENG J J, LI D C, et al. Performance analysis of giant magnetostrictive actuator and its application on active suspension of train [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2021, 18(6):e393.
- [17] 贾振元,郭东明. 超磁致伸缩材料微位移执行器原理与应用[M]. 北京:科学出版社,2008:137-142.
- [18] 牟如强,陈春俊. 基于模糊 PID 的高速列车横向振动控制研究[J]. 机械设计与研究,2023,39(5):158-165,171.
- [19] 赵倩,陈杨军,胡珍妮. 基于参数自适应 PID 控制器的轨道车辆振动控制[J]. 电子设计工程,2022,30(14):185-189.
- [20] JIANG Y R, CHEN B K, THOMPSON C. A comparison study of ride comfort indices between Sperling's method and EN 12299 [J]. International Journal of Rail Transportation,2019,7(4):279-296.

收稿日期:2023-10-30