

导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮动频率控制方法

郭迎辉

(西安交通工程学院 机械与电气工程学院, 西安 710300)

摘要: 导弹发射车起竖时, 导弹可能因任务载荷变化致重量增加, 或起竖角度出现意外偏差, 使齿轮负载偏离优化预期, 啮合力和传动特性改变; 单一控制方式难以应对复杂激励, 导致起竖装置动频率不稳, 削弱快速反应能力; 因此, 提出导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮动频率控制方法: 在齿轮箱体安装压电式加速度传感器, 捕捉运转时的微小振动信号, 经盲源分离与快速傅里叶变换, 通过频谱分析确定动频率; 在静态控制层面, 用海鸥算法优化压力角、螺旋角、轴向与径向间隙参数, 补偿制造和安装误差导致的动频率波动; 在动态控制层面, 利用传感器实时监测振动信号以确定动频率, 及时捕捉因导弹重量和起竖角度变化引起的波动, 并将动频率实时值与预期设定值的差值作为分数阶内模 PID 控制器输入, 通过自适应调整确保齿轮系统全工况稳定运行, 实时响应复杂激励; 实验结果表明: 静态控制后弧齿锥齿轮的振动加速度 RMS 值可以降低至 16 以下, 且面对转速突变、负载突变两种工况, 分数阶内模 PID 控制方法的超调量均在 1.0% 以下, 说明所研究方法通过动态、静态结合的控制方法可以使导弹发射车起竖装置具有更好的动态响应性能和适应性。

关键词: 导弹发射车; 起竖装置; 弧齿锥齿轮; 动频率; 海鸥算法; 分数阶内模 PID 控制器

Dynamic Frequency Control Method for Arc Bevel Gear of Missile Launch Vehicle Vertical Device

GUO Yinghui

(School of Mechanical & Electrical Engineering, Xi'an Traffic Engineering University, Xi'an 710300, China)

Abstract: During the erection process of a missile launcher, the missile's weight may increase due to variations in mission payloads, or there may be unexpected deviations in the erection angle, causing the gear load to deviate from the optimized expectation and altering the meshing force and transmission characteristics. It is difficult for a single control method to handle such complex incentives, leading to instability in the dynamic frequency of the erection device and weakening its rapid response capability. Therefore, a dynamic frequency control method for the spiral bevel gears of the missile launcher erection device is proposed. Piezoelectric acceleration sensors are installed on the gearbox housing to capture the minimum vibration signals during operation. These signals are processed through blind source separation and fast Fourier transform (FFT), and the dynamic frequency is determined through spectral analysis. In the static control, the seagull optimization algorithm (SOA) is employed to optimize parameters such as the pressure angle, helix angle, axial clearance, and radial clearance, compensating for the dynamic frequency fluctuations caused by manufacturing and installation errors. In the dynamic control, the sensors are utilized to monitor vibration signals in real time to determine the dynamic frequency, accurately capturing the fluctuations caused by changes in missile weight and erection angle. The real-time difference between the monitored dynamic frequency and the expected set value is taken as the input of a fractional-order internal model PID controller, this adaptive adjustment is ensured to stably operate the gear system under all operating conditions, enabling a real-time response to complex incentives. Experimental results demonstrate that after static control, the root mean square (RMS) value of the vibration acceleration of the spiral bevel gears can be reduced to below 16 g. Moreover, with two operating conditions of speed mutation and load mutation, the overshoot of the fractional-order internal model PID control method is below 1.0%, which indicates that through a combination of dynamic and static control, the proposed method has a better dynamic response performance and adaptability for the missile launcher erection device.

收稿日期:2025-05-13; 修回日期:2025-06-24。

基金项目:西安市科学技术局项目(2024JH-GXFW-0127)。

作者简介:郭迎辉(1981-),女,硕士研究生,高级工程师。

引用格式:郭迎辉. 导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮动频率控制方法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(11):183-191.

Keywords: missile launch vehicle; vertical device; spiral bevel gear; dynamic frequency; seagull algorithm; fractional order internal model PID controller

0 引言

导弹发射车是用于运输、起竖和发射导弹的特种车辆,是导弹武器系统的重要组成部分,因此对其性能和可靠性具有极高的要求。起竖装置是导弹发射车的重要组成部分之一,承担着将导弹从水平状态安全、准确地起竖至发射位置的重要使命^[1]。起竖装置弧齿锥齿在运行过程中,会受到多种因素的影响,导致产生振动问题,而振动问题会直接影响弧齿锥齿轮动态特性,不仅会造成导弹发射车起竖装置疲劳损伤、磨损加剧,严重时甚至会造成齿轮故障,影响直接关系到导弹发射的精度和作战效能^[2]。因此,如何实现导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮动频率的精准控制是军事装备领域研究的重点课题。

文献 [3] 基于神经网络设计了一个控制器并用自适应引力搜索算法对控制器参数进行优化,该控制器将齿轮的振动和噪声作为误差指标,通过神经网络计算控制量,从而调整齿轮的传动性能。导弹发射车起竖过程中,负载增加和起竖角度偏差这两个因素是相互耦合的,它们共同影响齿轮的啮合力和传动特性。该方法主要基于齿轮振动和噪声这一指标进行控制,没有全面考虑这两个因素之间的耦合关系,从而难以准确控制齿轮的动力特性。文献 [4] 将高速重载弧齿锥齿轮动频率控制问题转换为多目标求解问题,然后通过带精英策略非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 对多目标进行求解,得出最佳调整参数。当导弹携带的任务载荷突然增加时,原方法无法立即根据新的负载情况调整最佳调整参数,只能依靠原有的参数进行控制,这可能导致齿轮传动性能恶化,动频率不稳定。文献 [5] 设计一个自耦 PID 控制器,通过该控制器进行传动系统的控制,通过耦合方式将比例、积分和微分控制环节相互关联起来,使它们之间能够相互影响、相互调节,然后将计算出的控制量作用于传动系统的执行机构,调节执行机构的输出,使传动系统的输出信号能够快速、准确地跟踪设定值。自耦 PID 控制器虽然通过耦合方式将比例、积分和微分控制环节相互关联起来,但这种耦合主要是基于单一控制目标下的内部参数调整,对于多因素耦合的复杂情况,其应对能力有限。文献 [6] 将传动系统的输入作为 RBF 神经网络的输入,将控制量作为网络的期望输出。通过训练 RBF 神经网络,使其能够准确地模拟传动系统的输入输出关系,然后将输出作用于传动系统的执行机构,实现控制。当负载增加和起竖角度偏差同时出现时,齿轮的啮合力、传动比、摩擦力等多个参数都会发生变化,且这些变化之间存在复杂的相互关

系。RBF 神经网络可能无法准确捕捉这些多因素之间的耦合关系,导致其控制效果不理想。

本文研究一种导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮动频率控制方法,以期能够使齿轮的啮合更加平稳,减少因频率波动导致的冲击和振动,降低传动误差,提高发射车的稳定性。

1 导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮动频率控制

导弹发射车起竖过程中,导弹重量因任务需求不同而变化,且起竖角度持续改变,这使得负载在齿轮上的分布和大小不断波动。导致齿轮啮合力和传动特性难以稳定,动频率随之波动,增加了控制的难度。为此本文结合静、动态相结合的手段,分两层进行全面控制,即静态控制——优化弧齿锥齿轮参数,动态控制——实时监测与自适应调整。通过双层控制为提高导弹发射车起竖装置的性能和可靠性提供技术支持。

1.1 导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮动频率监测

弧齿锥齿轮动频率是指弧齿锥齿轮在单位时间内运转过程中所对应的振动频率。导弹发射车起竖装置中的弧齿锥齿轮在运行过程中,其动频率会受到多种因素的影响,如负载变化、传动系统激励等。通过动频率监测,可以实时获取齿轮的动频率数据,从而准确掌握齿轮的运行状态^[7]。为获取弧齿锥齿轮动频率,将压电式加速度传感器安装在齿轮箱体上,靠近齿轮啮合区域。当弧齿锥齿轮运动时,受到其振动影响,压电式加速度传感器内部的压电材料会发生一定的形变,以准确捕捉弧齿锥齿轮在运转过程中产生的微小振动信号^[8]。

在压电效应下,压电材料会在其表面产生与加速度成正比的电荷^[9]:

$$A = \varphi \cdot b \cdot a \quad (1)$$

式中, A 代表电荷量; φ 代表压电系数; b 代表压电材料的质量; a 代表振动加速度。

接着,压电材料产生的电荷会在传感器的测量电路中形成电压信号:

$$U = \frac{A}{B} \quad (2)$$

式中, U 代表输出电压; B 代表压电式加速度传感器的等效电容。

最后,根据输出电压 U 并结合输出电压计算振动加速度,即:

$$a = \delta \cdot U \quad (3)$$

式中, δ 代表压电式加速度传感器的灵敏度。

针对获取的振动信号,进行滤波处理,因为导弹发射车起竖装置在运行时,机械部件之间的摩擦、碰撞,

轴承的转动等都会产生额外的振动信号，压电式加速度传感器捕捉弧齿锥齿轮在运转过程中的振动信号时，也会将这些额外的振动信号捕捉进去并将其叠加在真实的振动信号上，导致弧齿锥齿轮真实的振动信号被干扰和隐藏^[10-11]。因此，为了能够让真实的振动信号更加清晰，利用独立成分分析（ICA）进行盲源分离，原理是找到一个分离矩阵 \mathbf{I} ，将噪声信号与真实振动信号进行分离，并使得分离后的信号 $\hat{a}(t)$ 尽可能接近源信号 $a(t)$ ：

$$\hat{a}(t) = \mathbf{I}\mathbf{C}(t) \tag{4}$$

式中， $\mathbf{C}(t)$ 代表混合了噪声的振动信号。

具体过程如下：计算混合了噪声的振动信号 $\mathbf{C}(t)$ 的均值并进行去中心化，得到 $\tilde{\mathbf{C}}(t)$ 。接着，计算中心化后观测信号 $\tilde{\mathbf{C}}(t)$ 的协方差矩阵 $\mathbf{D}(t)$ 并对其进行特征值分解，即：

$$\mathbf{D}(t) = \mathbf{\Lambda}\mathbf{d}\mathbf{d}^T \tag{5}$$

式中， \mathbf{d} 代表特征向量矩阵； $\mathbf{\Lambda}$ 代表特征值对角矩阵。计算计算白化矩阵：

$$\mathbf{E} = \mathbf{\Lambda}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{d}^T \tag{6}$$

白化后的振动信号为：

$$\tilde{\mathbf{C}}(t) = \mathbf{E}\tilde{\mathbf{C}}(t) \tag{7}$$

选择负熵作为独立性度量准则，即：

$$J(\mathbf{I}) = [d(G(\mathbf{I}^T\tilde{\mathbf{C}}(t))) - d(G(\nu))]^2 \tag{8}$$

式中， $J(\mathbf{I})$ 代表负熵； χ 代表； $G(\cdot)$ 代表非线性函数； ν 代表标准高斯随机变量。采用迭代优化（牛顿法）对 $J(\mathbf{I})$ 进行求解，得到分离矩阵 \mathbf{I} 。将得到的分离矩阵 \mathbf{I} 代入到公式（4）中，就可以实现弧齿锥齿轮真实振动信号与噪声信号的分离。

针对分离后的 $\hat{a}(t)$ ，进行快速傅里叶变换^[12-13]（FFT），将时域振动信号转换为频域信号，得到信号的频谱：

$$g(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{a}(t)e^{-j\omega t} dt \tag{9}$$

式中， $g(\omega)$ 代表连续时间傅里叶变换结果； j 代表虚数单位； ω 代表频率。根据连续时间傅里叶变换结果确定弧齿锥齿轮的动频率 ω 。

1.2 弧齿锥齿轮动频率静态控制

在弧齿锥齿轮的制造和安装过程中，难免会存在一定的误差，如齿形误差、齿距误差、轴线不平行等。这些误差会导致监测到的齿轮动频率偏离理论值，影响传动性能。通过参数优化进行静态控制，可以使齿轮的动频率保持在合理的范围内，在一定程度上补偿这些误差减少交变应力的幅度和频率，降低齿轮的疲劳损伤风险。

通过优化压力角、螺旋角、轴向与径向间隙等参数，进行弧齿锥齿轮动频率静态控制。这些参数的定义和取值范围如表 1 所示^[14]。

针对表 1 中 4 个参数，利用海鸥优化算法对其进行

表 1 弧齿锥齿轮参数

参数	定义	取值范围
压力角	在分度圆锥齿面上，过齿廓接触点的公法线与该点圆周速度方向之间的锐角	20°~25°
螺旋角	齿线任意点的切线与分度圆锥母线之间的夹角	25°~35°
轴向间隙	齿轮副非工作齿面间沿轴线方向的间隙	0.05~0.15 mm
径向间隙	齿轮副非工作齿面间沿径向的间隙	0.8~2.4 mm

优化。海鸥算法是一种模拟海鸥捕猎行为的寻优算法，通过不断迭代，找到最佳的 4 个参数组合，以调整弧齿锥齿轮装配^[15]。具体过程如下。

步骤 1：设置算法参数并在弧齿锥齿轮四个参数的取值范围内随机初始化海鸥的位置，每个海鸥位置代表一组参数组合（压力角、螺旋角、轴向间隙、径向间隙），表示为 $x_i = \{\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \bar{\omega}_3, \bar{\omega}_4\}$ 。

步骤 2：以最小化振动加速度 RMS 值作为适应度函数，对每个海鸥的位置（即参数组合）计算适应度：

$$f(x_i) = \sqrt{\frac{\int_0^T \omega(t)^2 dt}{T}} \tag{10}$$

式中， $f(x_i)$ 代表第 i 个海鸥位置（参数组合） x_i 的适应度函数值； $\omega(t)$ 代表 t 时刻的导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮动频率； T 代表时间长度。

步骤 3：根据 $f(x_i)$ 选出当前最优位置 $x^{best}(k)$ ；

步骤 4：根据 SOA 的更新规则，模拟海鸥的迁徙和攻击行为，更新海鸥的位置（参数组合）。迁徙行为可以表示为：

$$\begin{cases} x_i^s(k) = \eta \cdot x_i(k) \\ \theta_i^s(k) = \mu[x^{best}(k) - x_i(k)] \\ \bar{x}_i^s(k) = |x_i^s(k) + \theta_i^s(k)| \end{cases} \tag{11}$$

式中， $x_i^s(k)$ 代表为了避免海鸥（参数组合）与其它个体（其他参数组合）之间产生碰撞，海鸥移动的新位置； $\theta_i^s(k)$ 代表最优位置（最优参数组合）所在的方向； η 代表海鸥（参数）在搜索空间（取值范围）中的运动行为； $x_i(k)$ 代表当前的海鸥位置； $x^{best}(k)$ 代表当前最优位置； μ 代表自适应平衡系数； $\bar{x}_i^s(k)$ 代表避免碰撞后，海鸥向最佳位置方向移动的后位置； k 代表迭代次数^[16]。

攻击行为可以表示为：

$$\bar{x}_i(k) = \bar{x}_i(k)XYZ + x^{best}(k) \tag{12}$$

式中， $\bar{x}_i(k)$ 代表海鸥个体追捕猎物时的攻击位置。 X 、 Y 、 Z 代表海鸥个体运动行为在 3 个方向上的分量。

步骤 5：在更新海鸥位置后，需要检查新位置是否在问题的取值范围内。如果超出范围，则将其重新设置

为边界值或重新随机生成。

步骤 6: 按照公式 (10) 计算所有海鸥新位置 (新参数组合) 的适应度值并与之前的适应度相比较, 更新全局最优解 $x^{best}(k)$ 。

步骤 7: 检查是否达到最大迭代次数。如果满足终止条件, 则算法结束, 输出最优解 (参数组合); 否则, 返回步骤 2 继续迭代。

经过上述过程, 完成了压力角、螺旋角、轴向与径向间隙四个参数的优化。导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮按照优化的参数进行调整, 实现静态控制。

1.3 基于分数阶内模 PID 的弧齿锥齿轮动频率动态控制

静态优化参数虽然可以在一定程度上考虑制造误差和安装偏差的可能范围, 但实际制造和安装过程中存在的误差和偏差通常是随机的、动态的。静态控制无法根据这些动态变化实时调整齿轮的工作状态。动态控制系统可以实时监测齿轮的振动和噪声等信号, 分析其中反映的动频率信息。一旦发现动频率出现异常波动, 控制系统能够迅速做出反应, 通过调整齿轮的工作状态进行自适应调整, 使动频率恢复到稳定状态。因此, 在完成静态控制后, 基于弧齿锥齿轮的运行进行实时频率动态控制, 确保齿轮系统在全工况下稳定运行。

为确保齿轮系统在全工况下稳定运行, 降低振动幅度, 使起竖过程更加安静、平稳, 提高设备的可靠性和使用寿命, 设计一个分数阶内模 PID 控制器。分数阶内模 PID 控制器是内模控制和分数阶 PID 控制^[17-18]相结合的一种综合控制方法, 前者内模控制结构简单、设计直观、对模型失配具有较好的鲁棒性, 且能方便地处理纯滞后系统, 而后者分数阶 PID 能够更灵活地调整控制系统的动态性能和稳态性能, 将二者结合, 能够更好地适应被控对象参数的变化和外部干扰, 能够及时调整控制参数, 提高控制的适应性和稳定性, 实现更优的控制效果^[19]。基于分数阶内模 PID 的弧齿锥齿轮动频率动态控制器构建过程如下:

根据内模控制原理, 为保证弧齿锥齿轮动频率动态控制的稳定性, 将被控目标——弧齿锥齿轮的被控过程模型 $H(t)$ 进行分解, 即:

$$H(t) = \frac{x^{best}(k)}{ut^{1+\epsilon} + vt + 1} e^{-\varphi t} \quad (13)$$

$$H(t) = H+(t)H-(t) \quad (14)$$

式中, $H+(t)$ 、 $H-(t)$ 代表模型的不可逆部分、可逆部分; ϵ 代表大于 0 的任意实数; u 、 v 代表常数; φ 代表时滞^[20]。

设计内模控制器为 $H-(t)$ 的低通滤波形式, 即:

$$L(t) = H^{-1}(t)\varphi(t) \quad (15)$$

$$\varphi(t) = \frac{1}{(vt + 1)^r} \quad (16)$$

式中, $\varphi(t)$ 代表低通滤波器; v 代表滤波器参数; r 代表滤波器阶次; $L(t)$ 代表内模控制器。

联立公式 (13)、(15)、(16), 得到:

$$L(t) = \frac{ut^{1+\epsilon} + vt + 1}{ke^{-\varphi t}} \frac{1}{(vt + 1)^r} \quad (17)$$

将设计好的内模控制器 $L(t)$ 进行等效变换, 转换为反馈控制器的形式, 即:

$$H_c(t) = \frac{L(t)}{1 - H(t)L(t)} \quad (18)$$

式中, $H_c(t)$ 代表反馈控制器。为了使式 (18) 具有分数阶 PID 控制器的形式, 用 1 阶泰勒表达式逼近时滞项, 得到:

$$e^{-\varphi t} = 1 - \varphi t \quad (19)$$

由此可得分数阶 PID 控制器传递函数如下:

$$H_c(t) = \frac{ut^{1+\epsilon} + vt + 1}{k(v + \varphi)t} = \frac{v}{k(v + \varphi)} + \frac{1}{k(v + \varphi)t} + \frac{ut^\epsilon}{k(v + \varphi)} \quad (20)$$

其中:

$$\begin{cases} K_p = \frac{v}{k(v + \varphi)} \\ K_i = \frac{1}{k(v + \varphi)} \\ K_d = \frac{u}{k(v + \varphi)} \end{cases} \quad (21)$$

式中, K_p 代表比例增益; K_i 代表积分增益; K_d 代表微分增益^[21]。

分数阶内模 PID 控制器的输出为:

$$Z(t) = K_p \Delta h(t) + K_i \xi^{-\alpha} \Delta h(t) + K_d \xi^{\beta} \Delta h(t) \quad (22)$$

其中:

$$\Delta h(t) = \tilde{w}(t) - w(t) \quad (23)$$

式中, $Z(t)$ 代表弧齿锥齿轮动频率动态控制量; $\Delta h(t)$ 代表章节 1.1 监测到的导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮动频率实时值与预期设定值之间的差值; $\tilde{w}(t)$ 代表导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮动频率预期设定值; $w(t)$ 代表导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮动频率实时值, 由章节 1.1 监测得到; $\xi^{-\alpha}$ 代表分数阶积分算子; ξ^{β} 代表分数阶微分算子; α 代表积分阶次; β 代表微分阶次^[22]。

经过上述研究过程的在线监测和反馈调整, 能够根据导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮的具体情况, 实时调整控制量, 确保导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮运动能够尽可能的接近设定的预期值。

综上所述, 静、动态相结合的控制方式可以使导弹发射车起竖装置具有更强的适应性和可靠性。无论导弹重量和起竖角度如何变化, 系统都能通过静态控制和动态控制的协同作用, 保证齿轮的正常运转和动频率的稳定, 从而确保导弹发射任务的顺利进行。

2 实验分析

为验证所研究控制方法在导弹发射车起竖装置弧齿

锥齿轮动频率控制中的应用效果，在标准实验室中（温度在 20 ℃ 之间，相对湿度在 40％ 之间）进行测试。以导弹发射车起竖装置为例，搭建实验测试平台，如图 1 所示。

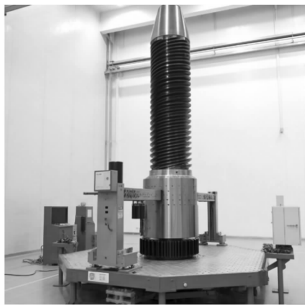


图 1 实验测试平台

实验测试平台采用的是定制的齿轮试验台，其仿起竖装置传动链设计，能模拟实际工况动力传递。但与真实的导弹发射车起竖装置传动链相比，在结构完整性、零部件配合精度以及实际使用过程中的磨损、老化等因素上存在差异。

针对图 1 导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮动频率控制方法验证的实验测试平台，设置实验环境，如表 2 所示。

表 2 实验环境配置表

类别	项目	型号/规格	关键参数	用途
硬件设备	齿轮试验台	定制(仿起竖装置传动链)	最大转速 5 000 rpm, 扭矩容量 8 000 Nm, 轴向负载 50 kN	模拟实际工况动力传递
	电液伺服加载系统	MTS 244.21	±50 kN 动态力, 频响 100 Hz	模拟导弹起竖动态负载
	高速扭矩传感器	HBM T40B	0~5 000 Nm, 精度 ±0.1%, 带宽 5 kHz	实时扭矩监测
	振动加速度传感器	Brüel & Kjær 4514B	量程 ±500 g, 频响 0.5 Hz~10 kHz	齿轮箱振动信号采集
	激光位移传感器	Keyence LK-G5000	0.05 μm 分辨率, 采样频率 392 kHz	传动误差动态测量
	实时控制器	dSPACE DS1202	PowerPC 处理器, 步长最小 10 μs	控制算法实时运行
软件环境	动态信号分析软件	LMS Test. Lab	支持 PolyMAX 模态分析, 阶次跟踪	模态参数辨识与振动分析
	实时控制开发环境	MATLAB/Sim-ulink+dSPAC-E ControlDesk	支持自动代码生成(RTI)	控制算法部署与调试
	有限元分析软件	ANSYS Mechanical	瞬态动力学模块, 支持非线性接触	齿轮系统动态特性仿真
	数据采集系统	NI PXIe-4499	24 位 ADC, 同步采样率 204.8 kS/s/ch	多通道高速数据同步采集

齿轮箱关键点布置振动加速度传感器，然后采用多

点激励单点响应（MISO）法，设置采样频率 20 kHz 对导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮动频率进行实时监测，监测场景如图 2 所示。



图 2 振动加速度传感器监测现场

在振动加速度传感器监测前，对振动加速度传感器进行校准，保证测量精度和灵敏度能够达到实验要求，避免对实验测试结果造成干扰，然后进行多次的调试，确保振动加速度传感器与数据采集系统的连接稳定，最后对测试平台进行通电，实时监测并记录弧齿锥齿轮的振动加速度数据并进行盲源分离，如图 3 所示。

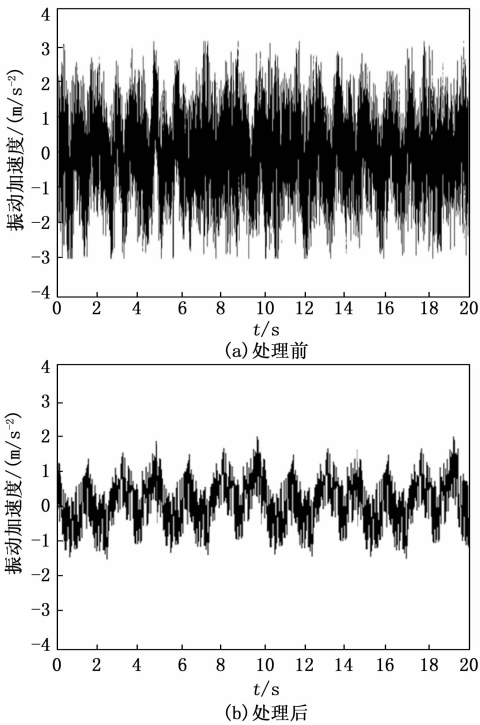


图 3 弧齿锥齿轮的振动加速度数据处理前后对比示例

从图 3 中可以看出，盲源分离处理前，弧齿锥齿轮的振动加速度信号整体表现为一种复杂且杂乱无章的形态。这是因为在处理前后振动信号受到大量的高频噪声成分的干扰，导致振动信号的幅值波动范围较大且没有明显的规律性。而经过盲源分离处理之后，振动加速度信号原有复杂且杂乱无章的形态发生了显著的变化，这是因为经过盲源分离，高频噪声从混合信号中分离出来

并得到了有效的抑制，因此信号中一些与齿轮运转相关的动态频率特征逐渐凸显出来，这有助于更直观地发现齿轮动频率随时间的变化情况，为导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮动频率的控制提供了可靠的依据。

基于章节 1.1 研究，对弧齿锥齿轮的振动加速度数据进行连续时间傅里叶变换，确定弧齿锥齿轮的动频率。然后，设置海鸥算法的参数，如表 3 所示。

表 3 海鸥算法参数表

参数类别	参数名称	取值
种群参数	种群规模	50
	最大迭代次数	200
	变量维度	4
迁徙行为参数	初始探索系数	2.0
	衰减因子	0.9
攻击行为参数	螺旋系数	1.0
	螺旋形状因子	1.0
	最大攻击角	2π

在表 3 中的参数中，种群规模为 50 时，能够在计算效率和搜索效果之间取得较好的平衡，既能保证算法有足够的多样性去探索搜索空间，又不会使计算量过大。

当最大迭代次数设置为 200 时，算法能够在合理的时间范围内收敛到较为满意的解，且继续增加迭代次数对性能提升有限。

初始探索系数设置为 2.0 时，能够在前期较好地探索搜索空间，避免过早陷入局部最优。

衰减因子为 0.9 时，探索范围随着迭代进行平稳减小，符合算法从全局探索到局部精细搜索的过渡需求。

螺旋系数设置为 1.0 时，海鸥的攻击行为能够较好地模拟实际捕猎过程，有助于提高算法的搜索效率。

螺旋形状因子决定了螺旋轨迹的形状。设置为 1.0 时，螺旋轨迹能够较好地平衡搜索的广度和深度，使海鸥在攻击过程中能够覆盖一定的区域，同时又能逐步逼近最优解。

最大攻击角限制了海鸥在攻击过程中的旋转角度范围。设置为 2π 可以使海鸥在攻击时有足够的旋转角度进行搜索，同时也不会使旋转角度过大导致搜索过于分散。

由此，利用海鸥算法优化压力角、螺旋角、轴向间隙、径向间隙四个参数，实现对弧齿锥齿轮动频率的静态控制。具体步骤如下。

步骤 1：在压力角（ $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ）、螺旋角（ $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ）、轴向间隙（0.05~0.15 mm）、径向间隙（0.8~2.4 mm）这四个参数的取值范围内，随机生成 50 组参数组合，每组参数组合代表一个“海鸥”的位置。

步骤 2：对于每个海鸥位置，将其应用到弧齿锥齿轮实际装置中，获取在一定时间长度 T 内的动频率数

据 $w(t)$ ，然后根据公式计算振动加速度 RMS 值，进而得到适应度 $f(x_i)$ 。

步骤 3：对 50 个海鸥位置的适应度值进行排序，找出适应度值最大的海鸥位置，记录其对应的参数组合。

步骤 4：根据公式（11）计算每个海鸥的新位置。首先计算最优位置方向 $\theta_i(k)$ 、海鸥运动行为 η 等参数，然后得到新位置 $x_i(k)$ 。在计算过程中，自适应平衡系数 μ 会随着迭代次数 k 的增加而变化，通过衰减因子 0.9 逐渐减小，从而控制探索范围的变化。

步骤 5：根据公式（12）计算每个海鸥的攻击位置 $\bar{x}_i(k)$ 。

步骤 6：检查每个海鸥更新后的位置（参数组合）是否在压力角（ $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ）、螺旋角（ $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ）、轴向间隙（0.05~0.15 mm）、径向间隙（0.8~2.4 mm）的取值范围内。如果超出范围，则将其重新设置为边界值或重新随机生成。

步骤 7：按照公式（10）计算所有海鸥新位置（新参数组合）的适应度值，并与之前记录的适应度值进行比较。如果新位置的适应度值更大，则更新全局最优解，记录对应的参数组合。

步骤 8：检查当前迭代次数是否达到 200。如果满足终止条件，则算法结束，输出最优解（参数组合），即最优的压力角、螺旋角、轴向间隙、径向间隙参数；否则，返回步骤 2 继续迭代。

经过上述过程，得到最优的压力角、螺旋角、轴向间隙、径向间隙参数组合后，将其应用到弧齿锥齿轮的制造和安装过程中。在制造过程中，根据优化后的压力角和螺旋角调整齿轮刀具的安装角度或挂轮系统；在安装过程中，根据优化后的轴向间隙和径向间隙调整齿轮副的轴向位置和齿轮箱体的尺寸或使用调整垫片。通过这些调整，使弧齿锥齿轮的动频率保持在合理的范围内，实现对动频率的静态控制，提高齿轮的传动性能和可靠性。

弧齿锥齿轮参数静态控制结果如表 4 所示。

表 4 弧齿锥齿轮参数静态控制前后对比

参数	取值范围	控制前	控制后
压力角	$20^{\circ}\sim 25^{\circ}$	22°	23.5°
螺旋角	$25^{\circ}\sim 35^{\circ}$	30°	28.2°
轴向间隙/mm	0.05~0.15	0.12	0.07
径向间隙/mm	0.8~2.4	1.05	0.92

从表 4 中可以看出：压力角从 22° 调整至 23.5° ，接近取值范围的上限，这种调整旨在优化齿轮的啮合性能，提高承载能力或降低啮合冲击。螺旋角从 30° 减小至 28.2° ，螺旋角的调整会影响齿轮的传动平稳性、噪声水平和轴向力，这一调整旨在减少轴向力或改善传动

平稳性。轴向间隙从 0.12 mm 减小至 0.07 mm，显著缩小了间隙范围。轴向间隙的减小有助于提高齿轮的传动精度和稳定性，减少因间隙引起的振动和噪声。径向间隙从 1.05 mm 减小至 0.92 mm，径向间隙会影响齿轮的啮合刚度和传动误差，通过径向间隙调整旨在提高齿轮的传动精度和刚度。总之，静态控制后，弧齿锥齿轮的各项参数均发生了显著变化，这些变化旨在优化齿轮的传动性能、稳定性和精度。

基于表 4，利用有限元分析软件模拟弧齿锥齿轮参数静态控制后的弧齿锥齿轮的运动。首先，利用 ANSYS 软件内置的建模工具，创建弧齿锥齿轮的三维几何模型，然后定义弧齿锥齿轮的弹性模量、泊松比、密度、屈服强度等力学性能参数，划分弧齿锥齿轮的三维几何模型的网格模型并设置边界条件，在齿轮的齿面上施加静态扭矩或力，模拟齿轮在实际工作中的受力情况。运行有限元分析软件进行求解计算，得到齿轮在静态控制参数下的振动响应结果。根据响应结果确定振动加速度 RMS 值，如图 4 所示。

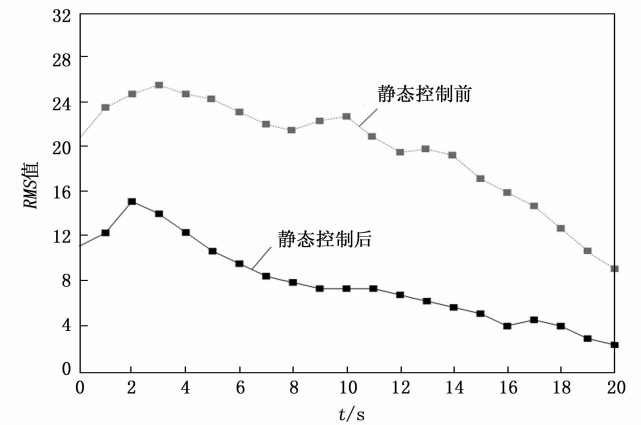


图 4 静态控制前后的振动加速度 RMS 值对比

RMS 值是衡量导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮动频率强度的一种指标。从图 4 中可以看出，静态控制后弧齿锥齿轮的振动加速度 RMS 值可以降低至 16 以下。表明基于压力角、螺旋角、轴向间隙、径向间隙四个参数优化的静态控制方法在一定程度上有效地减少了齿轮的弧齿锥齿轮动频率强度，提高了其运行的平稳性。

接下来，在弧齿锥齿轮参数静态控制的基础上，进行动态控制效果测试。利用分数阶内模 PID 进行导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮动频率动态控制，并对每种工况进行多次测试，以确保数据的可靠性和重复性，然后求取平均值。控制结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出与控制前相比，在经过第一重静态控制后，弧齿锥齿轮动频率波动均在一定程度上得到了改善，但是与弧齿锥齿轮动频率预期情况仍存在一定差距，尤其到后期，弧齿锥齿轮动频率波动反而有增大的趋势，这是因为压力角、螺旋角、轴向间隙、径向间

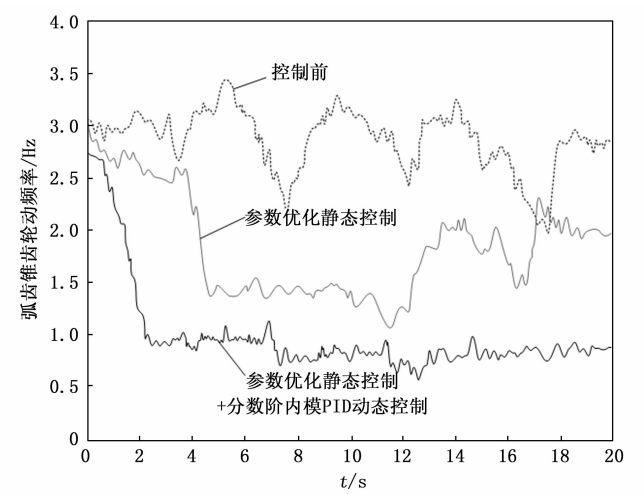


图 5 弧齿锥齿轮动频率动态控制结果

隙四个参数的静态控制效果有限，后期随着弧齿锥齿轮的运行，在外部因素的不断干扰、非线性因素的持续影响下，误差不断累积，导致控制效果较差。而在叠加动态控制后，优化了前期静态控制效果并同时弥补了静态控制的不足，与弧齿锥齿轮动频率预期情况基本吻合，说明导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮动频率得到了很好的控制。

同时，从图 5 中可以看出，所提方法应用后，可以在 2 s 内完成对弧齿锥齿轮动频率的抑制，将其控制在 1.0 Hz 左右。这是因为本文当监测到的动频率实时值与预期设定值之间出现差值时，控制器能够根据这个差值自适应地调整控制参数。例如，当导弹重量增加或起竖角度改变导致动频率上升时，控制器可以迅速调整控制量，使齿轮系统的动频率恢复到设定的 1.0 Hz 左右。这种自适应调整能力使得控制器能够实时响应复杂激励因素带来的变化，确保齿轮系统在全工况下稳定运行。

为进一步证明所研究方法的控制性能，与 3 种传统方法进行对比，即基于神经网络的控制方法、自耦 PID 控制方法，基于 RBF 神经网络的控制方法。首先，设置 2 种扰动工况，具体情况如下。

- 1) 转速突变：导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮系统在 1 000 rpm 稳态运行，然后逐渐增加转速至 1 500 rpm，最后再逐渐降低转速至 1 000 rpm。
 - 2) 负载突变：导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮系统系统在 50% 额定扭矩稳态运行，然后逐渐增加负载至 200% 额定扭矩。
- 对比实验步骤如下。
- 1) 模型训练：对 NN Control 和 RBF-NN Control 进行离线训练，使用历史数据优化网络参数。
 - 2) 参数整定：对 Auto-Tuned PID 进行初始参数整定，确保其在稳态工况下表现良好。
 - 3) 动态测试：在相同工况下依次运行 4 种控制方

法,记录关键性能指标——超调量(%),即输出最大值与稳态值之差占稳态值的百分比。

4) 重复性验证:每种工况下重复测试 3~5 次并取均值,确保数据可靠性。

4 种控制方法的对比实验结果如图 6 所示。

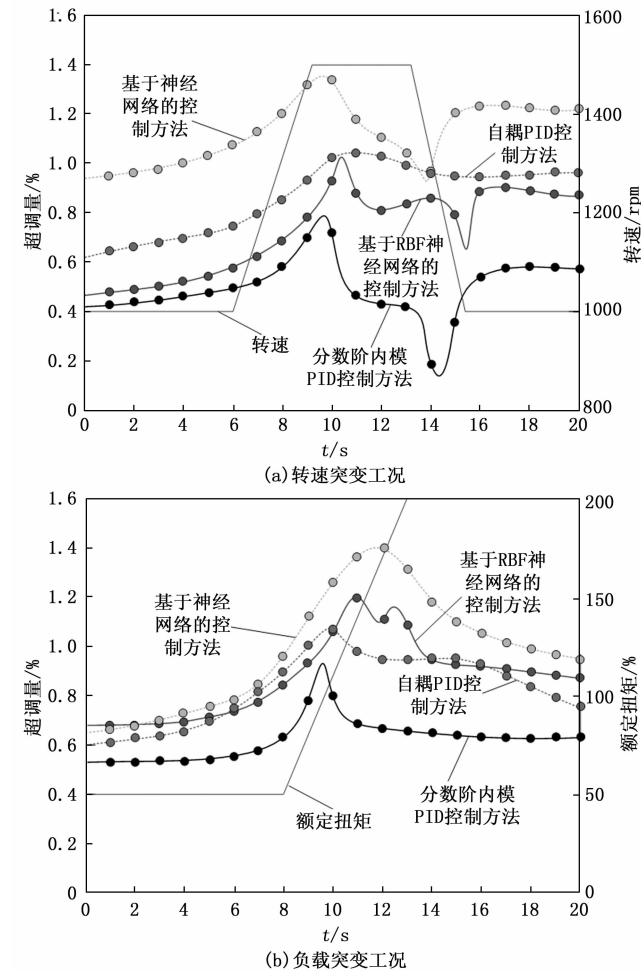


图 6 4 种控制方法的超调量对比结果

从图 6 中可以看出,面对转速突变工况,基于 RBF 神经网络的控制方法的超调量低于基于神经网络的控制方法和自耦 PID 控制方法,但与所研究的分数阶内模 PID 控制方法相比,则相对较高,表明基于 RBF 神经网络的控制方法在非线性动态控制方面具有优势,但相比所研究方法仍有差距。面对负载突变工况,所研究方法仍具有显著优势,高于 3 种传统方法,说明分数阶内模 PID 控制方法通过引入分数阶微积分算子,增强了控制器的灵活性和适应性,使其能够更好地处理非线性动态系统,有效抑制超调,提高系统的动态响应性能和适应性。

4 种控制方法的弧齿锥齿轮动频率控制误差结果如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,随着迭代次数的增加,4 种控

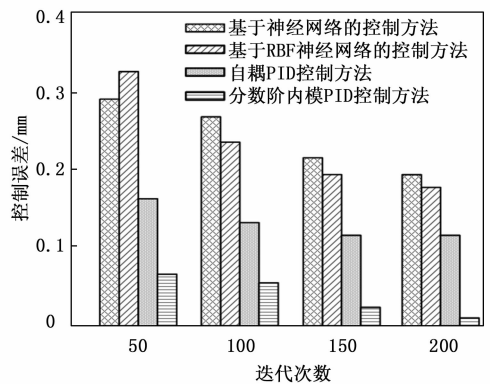


图 7 弧齿锥齿轮动频率控制误差

制方法的控制误差均呈现出下降趋势。其中所提方法可以将控制误差保持在 0.1 mm 以下,相对较小。这是因为所提方法利用海鸥算法对关键参数进行优化,从静态控制层面补偿制造和安装误差导致的动频率波动,提高了系统的初始稳定性。

在此基础上,对不同环境条件下所提方法的稳定性进行测试。环境条件如下。

条件 1:湿度不变,将实验室温度从 20 °C 逐步升高到 25 °C,再逐步降低到 20 °C,每个温度阶段持续 2 小时,持续监测弧齿锥齿轮动频率;条件 2:温度不变将实验室相对湿度从 40% 逐步升高到 60%,再逐步降低到 40%,每个湿度阶段持续 2 小时,同时监测弧齿锥齿轮动频率。

在这两个环境条件下,得到的结果如图 8 所示。

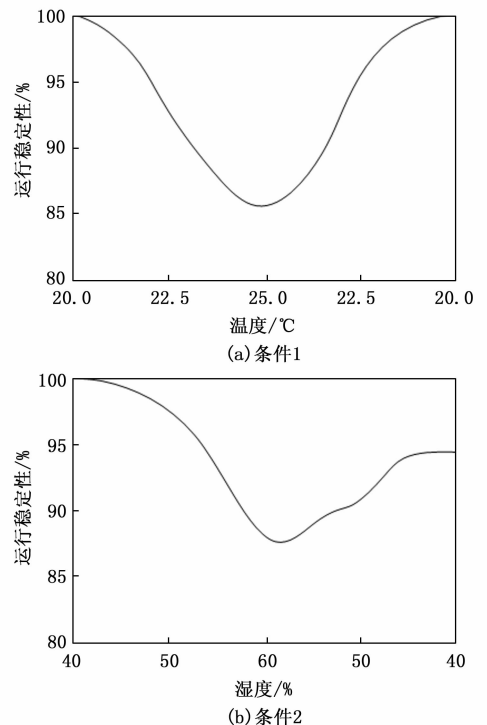


图 8 不同环境条件下所提方法的稳定性结果

从图 8 中可以看出, 在不同环境条件下, 所提方法均可以将运行稳定性保持在 85% 以上。表明所提方法在面对环境因素(如温度和湿度)的变化时, 能够有效地维持弧齿锥齿轮的运行稳定性。这表明该方法具有实际应用价值, 能够在复杂多变的环境中保证导弹发射车起竖装置的可靠运行。

3 结束语

深入研究导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮动频率的控制方法, 对于提高弧齿锥齿轮的运行稳定性、延长其使用寿命、保障导弹发射车起竖装置的可靠运行具有重要的现实意义。为此, 展开了全面且深入的研究, 在理论分析、方法提出以及实验验证等多个层面均取得了一定成果。

1) 利用海鸥算法优化压力角、螺旋角、轴向与径向间隙参数, 实现弧齿锥齿轮动频率静态控制。

2) 通过建立导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮模型和设计内模控制器, 然后将其转换为分数阶 PID 控制器形式, 实现弧齿锥齿轮动频率动态控制。

综上所述, 该方法在降低动频率波动表现出色, 充分证明了其有效性和可行性。不仅为导弹发射车起竖装置弧齿锥齿轮的设计与优化提供了新的思路和方法, 也为类似复杂机械传动系统的动频率控制提供了有益的参考。

然而, 本研究仍存在一定局限性。一方面, 实验结果主要展示了短期控制效果, 对于弧齿锥齿轮在长期运行过程中的动频率稳定性评估不足。未来, 将补充长期运行实验数据, 通过长时间监测弧齿锥齿轮系统的运行状态, 观察所提方法在长时段内的控制效果是否保持稳定, 深入研究齿轮磨损、疲劳等因素对控制性能的影响机制, 并探索相应的补偿和优化策略。

参考文献:

- [1] 杜文龙, 陈唐炜, 张建兴, 等. 基于渗碳-啮合耦合效应的弧齿锥齿轮热处理变形半解析预测方法 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2025, 56 (2): 487-500.
- [2] 姚立纲, 黄思捷, 贾超, 等. 弧齿锥齿轮齿面建模和参数化设计系统软件开发 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 2024, 52 (5): 560-568.
- [3] 田亚平, 杨江辉, 王瑞邦, 等. 弧齿锥齿轮动力特性分析及其神经网络控制 [J]. 振动与冲击, 2024, 43 (12): 166-172.
- [4] 任鸿飞, 王三民, 陈鹏, 等. 高速重载弧齿锥齿轮齿面多目标优化设计 [J]. 机械科学与技术, 2024, 43 (2): 225-231.
- [5] 曾鹏, 曾喆昭. 三明治结构挠性传动系统的自耦 PID 控制 [J]. 空间控制技术与应用, 2023, 49 (5): 73-79.
- [6] 宋港, 陈满意, 邱临风, 等. 基于 RBF 神经网络的谐波传动自适应反演控制研究 [J]. 机械传动, 2023, 47 (8): 116-122.
- [7] 莫中华, 王德林, 杨映海, 等. 基于限功率运行模式的双馈风电机组自适应频率控制研究 [J]. 电工电能新技术, 2025, 44 (3): 36-47.
- [8] 吴佳璐, 夏链, 韩江, 等. 基于电子齿轮箱的内齿珩轮强力珩齿轮廓误差补偿控制研究 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46 (3): 303-307.
- [9] 樊垚森, 杨梅, 张梅蕊, 等. 基于滑模变结构的凸版印刷机无轴传动控制系统设计 [J]. 包装工程, 2024, 45 (21): 217-224.
- [10] 余建国, 田宝, 周鹏, 等. 基于 CPSO-ICA 的航空瞬变电磁信号去噪方法研究 [J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2023, 36 (4): 611-617.
- [11] 吴健华, 张晓锋, 陈亮. OVMD-ICA 算法用于光纤电流传感器降噪 [J]. 光学学报, 2023, 43 (2): 43-52.
- [12] 司召鹏, 毛邦宁, 卜泽华, 等. 基于快速傅里叶变换的分布式振动传感信号解调分析 [J]. 中国激光, 2023, 50 (5): 100-106.
- [13] 贾徐庆, 李杰, 曹鹏飞. FFT 算法下物联网异构节点部署优化仿真 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (12): 446-450.
- [14] 赵晏淇, 李伯群, 张春宇, 等. 基于改进海鸥优化算法的热连轧板带轧制规程优化 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (11): 97-104.
- [15] 王聪, 赵杰, 李亮, 等. 一种嵌入改进海鸥算法的水光储鲁棒控制研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51 (24): 143-153.
- [16] 闫向彤, 张健, 乔煜哲, 等. 基于改进海鸥优化算法的 BP 神经网络及其应用 [J]. 传感器与微系统, 2024, 43 (7): 165-168.
- [17] 田闯, 黄鹤, 林国庆, 等. 融合多策略天鹰算法优化汽车 ABS 的 PID 控制 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2025, 57 (4): 52-61.
- [18] 龚小容, 王鑫, 熊维清, 等. 电驱车间空调系统 IC-PO-IFNN 二阶段 PID 控制方法 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2025, 39 (3): 75-84.
- [19] 张宇, 赵志诚, 刘宁, 等. 一种新的直流调速系统分数阶内模 PID 控制方法 [J]. 火力与指挥控制, 2025, 50 (3): 56-61.
- [20] 郭志坚, 于少娟. 无刷直流电机短反馈分数阶 PID 滑模的优化控制 [J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45 (9): 291-299.
- [21] 刘福才, 王海澎. 分数阶 PID 控制在电动变载荷加载系统中的应用 [J]. 电机与控制学报, 2023, 27 (8): 91-99.
- [22] 施昕昕, 李冠飞. 基于 ESO 和分数阶 PID 的改进 P&O 控制策略 [J]. 电力工程技术, 2023, 42 (3): 179-187.