DOI：10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.6007

基于 MILP-IGA 的群塔吊起重机同步控制方法

杨　环

（中铁十八局集团第四工程有限公司 天津 730100）

摘　要：塔吊起重机在变幅－回转－起升时存在非线性惯量时变特性，当单个塔吊驱动存在响应滞后时，对单独运动速度参数进行控制，会出现同步速度控制精度不足问题。为此，研究了一种基于 MILP-IGA 的群塔吊起重机同步控制方法。以多个起重机目标的同步速度偏差最小为优化目标，结合约束条件，构建混合整数线性规划（MILP）模型，利用免疫遗传算法（IGA）对 MILP 模型进行优化求解，得到同步速度偏差最小的最优同步参数。考虑受限空间内塔吊同速运动冲突，基于 PID 控制器设计群塔吊起重机错时间同步控制策略，通过时间差反馈补偿，提升群塔吊起重机同步速度控制精度。结果表明：随着塔吊起重机数量的增加，所研究方法的群塔吊起重机同步速度控制先决系数始终在 0.9 以上，具有较高的同步控制精度，且能够在多台设备拥挤的作业环境中保持精准的控制性能。

关键词：MILP 数学模型；IGA 算法；群塔吊起重机；PID 控制器；同步控制方法

中图分类号：TP29.33　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673-9833(2026)06-0050-06

引文格式：杨　环．基于 MILP-IGA 的群塔吊起重机同步控制方法 [J]. 湖南工业大学学报，2026，40(6)：50-55.

Synchronization Control Method for Group Tower Crane Based on MILP-IGA

YANG Huan

（China Railway 18th Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd.，Tianjin 730100，China）

Abstract：Due to the fact that tower crane exhibits nonlinear inertia time-varying characteristics during amplitude swing lifting, and that controlling the individual motion speed parameters may result in insufficient synchronization speed control accuracy a response lag in the driving of a single tower crane when there is a response lag in the driving of a single tower crane, a research is conducted on the synchronous control method for group tower crane based on MILP-IGA. Taking the minimum synchronization speed deviation of multiple crane targets as the optimization objective, combined with constraint conditions, a mixed integer linear programming (MILP) model is constructed. The immune genetic algorithm (IGA) is used to optimize and solve the MILP model, thus obtaining the optimal synchronization parameters with the minimum synchronization speed deviation. Considering the conflict between tower cranes moving at the same speed in confined spaces, a PID controller is used to design a synchronization control strategy for group tower cranes. Through time difference feedback compensation, the synchronization speed control accuracy of group tower cranes can be improved. The results show that with the increase of the number of tower cranes, the prerequisite coefficient for synchronous speed control of the studied method for group tower cranes is always above 0.9, which is characterized with a high synchronization control accuracy and can maintain precise control performance in crowded working environments with multiple devices.

Keywords：MILP mathematical model；IGA algorithm；group tower crane；PID controller；synchronous control method

收稿日期：2025-06-12

作者简介：杨　环，女，中铁十八局集团第四工程有限公司工程师，主要研究方向为控制理论，E-mail：iskjoijroti@yeah.net

1　研究背景

在现代大型建筑施工现场，群塔吊起重机的应用已成为不可或缺的一部分，极大地提升了施工效率，缩短了工期，为工程项目的顺利推进提供了有力的保障[1]。然而，当多台塔吊同时作业时，它们之间的空间关系变得异常复杂。如何确保这些群塔吊起重机在狭窄工地上互不干扰、协同完成作业，成为一大难题。如果塔吊之间的作业速度没有得到有效协调和同步，一方面，很容易发生碰撞事故，不仅会造成设备的损坏，更可能引发严重的人员伤亡，给施工安全带来极大威胁[2]；另一方面，也会导致施工效率下降[3]。因此，如何有效地控制群塔吊的同步速度，确保施工过程的安全、高效与有序，已成为当前建筑领域亟待解决的关键问题。

当前，针对同步控制领域的研究已取得诸多进展，但各类方法仍面临特定的应用瓶颈。例如，黄哲等[4]构建了起重机多绳系统的动力学模型，结合模糊 PID 控制策略，依据实时监测状态动态调整参数。然而，该方法受限于规则库的固定性，且仅针对单一速度参数进行调控，难以有效应对响应滞后带来的动态变化，制约了同步控制精度。针对扰动问题，姚仪遵等[5]提出一种基于分数阶积分滑模的调速控制器，通过设计多源快变扰动观测器实现未知扰动的实时估计。尽管该方法通过调整导数阶次优化了动态性能，但其观测精度易受升降任务中同步速度时差的影响，导致实际控制精度欠佳。刘佳辉等[6]尝试融合神经网络与滑模控制，利用神经网络学习系统特性以调节控制参数。但该方法存在固有的抖振现象，难以确保滑模面严格收敛于平衡点，致使输出速度与期望值存在显著偏差。此外，S. K. Bodapatla 等[7]引入了干扰估计器并结合 H_∞ 与 μ 综合控制策略，采用改进的优化算法整定参数。然而，当系统呈现非线性时变特征时，该控制器因自适应能力不足，其速度同步精度仍有待提升。

塔吊的变幅－回转－起升三自由度运动存在非线性惯量时变特性，当群塔吊起重机中的某个起重机驱动系统存在响应滞后，则群塔吊的运行速度会出现同步误差较大问题，降低同步控制精度。传统方法单独对某个起重机的变幅、回转或起升的运动速度进行同步控制，则无法解决多个起重机目标运动同步误差较大问题。而混合整数线性规划 MILP（mixed integer linear programming）可以描述复杂约束条件，且免疫遗传算法 IGA（immune genetic algorithm）具有强大的全局搜索能力，能够在复杂的搜索空间中快速找到近似最优解[8−9]。因此，本研究结合 MILP 和 IGA 优势，提出了一种基于 MILP-IGA 的群塔吊起重机同步控制方法。

2　基于 MILP-IGA 的群塔吊起重机同步速度参数寻优

本研究采用善于解决多目标问题的混合整数线性规划（MILP）和免疫遗传算法（IGA）对多目标运动参数进行寻优[10−11]。该方法首先利用 MILP 建立数学模型，以精确描述群塔吊作业中的约束条件和优化目标。然后，引入 IGA 对建立的 MILP 模型进行求解，通过模拟自然选择和遗传机制，在复杂的搜索空间中寻找满足约束条件且优化目标最优的解。

首先，利用 MILP 算法调整不同塔吊的变幅－回转－起升运动决策变量（相对速度）的取值，在满足一系列线性约束条件的前提下，以不同塔吊目标的同步速度偏差平方和最小为目标，构建参数寻优多目标函数：

$$G=\min\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}\left(v_i^k(t)-v_i^l(t)\right)^2。\tag{1}$$

式中：$v_i^k(t)$、$v_i^l(t)$ 为 t 时刻第 k、l 个塔吊起重机在吊点水平位置 i 进行变幅、回转或起升的同步速度；T 为总时长；N 为吊点数量。

多目标函数 G 的约束条件如下：

$$\text{s.t.}\begin{cases}\min v^k\leqslant v_i^k(t)\leqslant\max v^k,\\ \min v^l\leqslant v_i^l(t)\leqslant\max v^l。\end{cases}\tag{2}$$

式中：$\min v^k$、$\max v^k$，$\min v^l$、$\max v^l$ 为第 k、l 个塔吊起重机的最小、最大速度。

其次，进一步建立 MILP 模型，将群塔吊的速度边界约束条件和多目标优化权重协调公式转化为线性不等式组，利用离散决策变量表达塔吊启停状态、作业优先级等逻辑约束。将多目标函数 G 与约束条件共同构成群塔吊起重机同步速度参数寻优的 MILP 模型：

$$\begin{cases}G=\alpha G_1+\beta G_2;\\ \text{s.t.}\begin{cases}\min v^k\leqslant v_i^k(t)\leqslant\max v^k,\\ \min v^l\leqslant v_i^l(t)\leqslant\max v^l。\end{cases}\end{cases}\tag{3}$$

式中：α、β 分别为群塔吊中任意塔吊的 G_1 和 G_2 的权重系数；G_1 为安全类离散决策变量；G_2 为效率类离散决策变量。

约束条件能够限制决策变量的取值范围，从而缩小问题的可行解空间。这有助于在求解过程中排除不符合实际情况的解，提高求解准确性。

本研究中引入了 IGA 算法对 MILP 模型进行求

解。它保留了两种算法的优势，在很大程度上避免了MILP 模型“早熟”收敛于局部极值的问题[12−13]。通过不断迭代，得到最优的群塔吊起重机多目标同步速度参数组合，具体过程如下。

步骤 1 初始化。设置算法参数，如群体规模、交叉概率、变异概率等；同时，将待优化的群塔吊起重机同步作业参数取值问题视为抗原，并随机产生一组初始抗体（候选解）[14]。

步骤 2 参数编码。将群塔吊起重机的同步作业参数进行编码，并随机产生一组初始抗体（候选解）。每个抗体代表了一组可能的参数组合。

步骤 3 适应度计算评估。根据适应度函数计算每个抗体的适应度值，即该组同步作业参数在群塔吊起重机同步控制中的表现效果[15]。

$$F\left(p,\ q\right)_i=1/\left(G_i+U\right), \tag{4}$$

式中：$F(p,\ q)_i$ 为第 i 个抗体（候选参数组合）的适应度值；p、q 分别为速度同步和相对位置同步控制的参数；G_i 为第 i 个抗体（候选参数组合）的目标函数 G 值；U 为约束条件的惩罚函数。

步骤 4 根据适应值，计算第 i 个抗体与第 j 个抗体之间的亲和力 R_{ij}[16]。

$$R_{ij}=\begin{cases}1, & \left|F\left(p,\ q\right)_i-F\left(p,\ q\right)_j\right|\geqslant\gamma;\\ 0, & \left|F\left(p,\ q\right)_i-F\left(p,\ q\right)_j\right|<\gamma。\end{cases} \tag{5}$$

式中 γ 为预先设定的阈值。

步骤 5 根据亲和力 R_{ij} 值计算抗体浓度 H_i。

$$H_i=\sum_{j=1}^{n-1}R_{ij}\Big/(n-1), \tag{6}$$

式中 n 为抗体（候选参数组合）的数量。

步骤 6 选择操作。根据 H_i 选择优秀的抗体（候选参数组合）进行繁殖，同时抑制适应度值低的抗体进入下一代。

步骤 7 交叉与变异操作，产生新一代抗体群体[17]。

步骤 8 重复上述步骤，直到满足最大迭代次数终止算法。

通过不断迭代，找到最优的群塔吊起重机变幅－回转－起升多目标同步速度参数组合，将该参数组输入控制器，实现群塔吊起重机同步运行。

3 基于最优速度参数的群塔吊起重机同步 PID 控制

利用寻优获得的群塔吊起重机变幅－回转－起升的同步参数以输入电压形式控制起重机调整速度，但上述控制方法仅从时间、速度角度考虑，未考虑处于同一位置的不同塔吊起重机运行速度如果完全相同，则在有限空间内会出现冲突碰撞。因此本研究基于不同塔吊起始运动时间差，设计群塔吊起重机“错时间同步”控制策略，这种相对同步能够在空间受限的施工环境中避免在同一位置塔吊同速运动时起冲突。

PID 控制器通过比较实际输出值和期望输出值调整控制器的输入电压信号，以实现精准控制。PID 控制器具有较快的响应速度，能够迅速识别并调整偏差，确保起重机在同步控制过程中保持稳定[18−19]。基于 PID 控制器设计的群塔吊起重机“错时间同步”控制模型如图 1 所示。

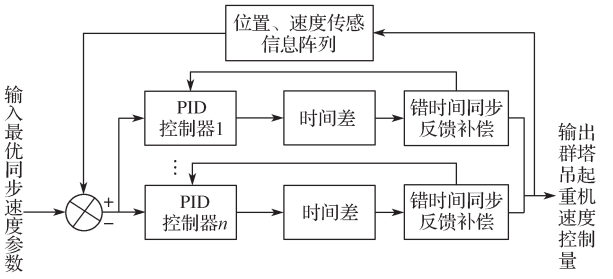

图 1 群塔吊起重机同步 PID 控制模型

Fig. 1 Synchronous PID control model for tower crane

如图 1 所示，塔吊群控制方式为使用高精度传感器（速度和位置传感器）实时监测群塔吊起重机速度和位置信息。首先，当两个塔吊的吊点水平位置信息、变幅、回转或起升动作相同时，采用 PID 控制器计算不同塔吊起始运动时间差。其次，将反馈补偿时间差输入 PID 控制器中，输出速度控制量，进行错时间同步反馈补偿，通过调整电机的输入电压改变同步速度，实现群塔吊起重机的同步控制。

1）考虑起始运动时间差，计算反馈时差为[20]

$$\Delta T(t)=\left[v(t)-\tilde{v}(t)\right]\Big/L, \tag{7}$$

式中：$\Delta T(t)$ 为时差；$v(t)$ 为上节求出的最优速度同步参数；$\tilde{v}(t)$为传感器实时监测到的群塔吊起重机速度；L 为速度同步参量。

2）将反馈补偿时间差输入 PID 控制器中，输出速度控制量，实现同步控制，其公式为

$$\begin{cases}I(t)=K_{\mathrm{P}}\Delta v(t)+K_{\mathrm{I}}\dfrac{1}{T_i}\displaystyle\int_0^t\Delta v(\tau)\,\mathrm{d}t+K_{\mathrm{D}}T_{\mathrm{D}}\dfrac{\mathrm{d}v(t)}{\mathrm{d}t},\\ J(t)=K_{PL}\Delta L(t)+K_{IL}\displaystyle\int_0^t\Delta L(\tau)\,\mathrm{d}t+K_{DL}\dfrac{\mathrm{d}L(t)}{\mathrm{d}t}。\end{cases} \tag{8}$$

式中：$I(t)$、$J(t)$ 为速度和位置同步作业控制量；K_{P} 为比例时间系数；K_{I} 为积分时间系数；K_{D} 为微分时间系数；K_{PL} 为比例位移系数；K_{IL} 为积分位移系数；K_{DL} 为微分位移系数。

4　实验测试

首先，确定一个 100 m × 100 m 的平坦、无障碍物的区域作为实验场地，安装两台不同型号的塔吊起重机，确保它们的工作范围覆盖整个实验区域，但存在潜在的交叉作业区域，实验现场如图 2 所示。



图 2　测试实验现场

Fig. 2　Test experimental site

以图 2 所示实验环境，进行基于 MILP-IGA 的群塔吊起重机同步控制方法测试。图 2 中两台塔吊起重机的工作参数如表 1 所示。

表 1　两台塔吊起重机工作参数表

Table 1　Operating parameters of two tower cranes

名称	塔吊起重机 1	塔吊起重机 2
最大起重量 /t	10	15
最大起升高度 /m	60	80
自由高度 /m	25	30
最大工作幅度 /m	55	65
工作半径 /m	50	60
固定高度 /m	45	55
旋转速度 /(°·min^{-1})	2.5	3
变幅速度 /(m·min^{-1})	40	50
起升速度 /(m·min^{-1})	多速（高速 90，低速 9）	多速（高速 120，低速 12）
电机功率 /kW	90	120

其次，设置免疫遗传算法（IGA）参数，如表 2 所示。为两台塔吊起重机设定吊运任务，包括吊运物料的起点、终点、优先级等，做好测试前的准备。

表 2　免疫遗传算法（IGA）参数表

Table 2　Parameters of immune genetic algorithm (IGA)

名称	取值	名称	取值
种群规模	50	交叉概率	0.7
迭代次数	100	变异操作	翻转变异
选择策略	轮盘赌选择	变异概率	0.01
交叉操作	单点交叉	亲和力阈值	1

4.1　基于 MILP-IGA 的同步速度参数寻优效果

利用免疫遗传算法（IGA）求取 MILP 模型的最优解，得出最优同步速度参数组合，为后续控制设置期望值，寻优结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出，两台塔吊起重机实际运行参数均偏离免疫遗传算法（IGA）求出的最优速度同步参数（期望值），说明二者处于相对独立的工作状态，未进行有效的协同工作，它们在工作区域内可能存在路径交叉的风险，从而增加碰撞的可能性。这不仅会损坏设备，还可能对操作人员和施工现场的其他人员构成严重威胁。

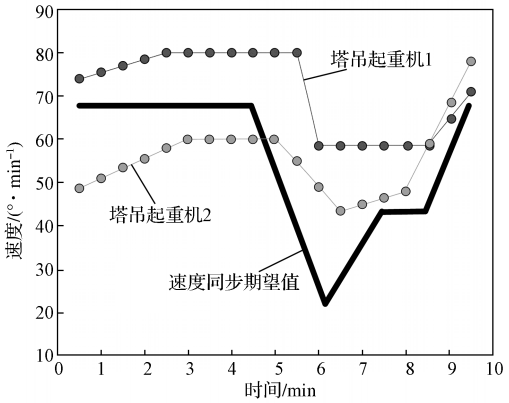

图 3　期望速度同步参数

Fig. 3　Expected speed synchronization parameters

4.2　群塔吊起重机同步 PID 控制效果

利用图 3 所示期望参数和 PID 控制器对两台塔吊起重机的速度进行同步控制，输入的控制信号见图 4。

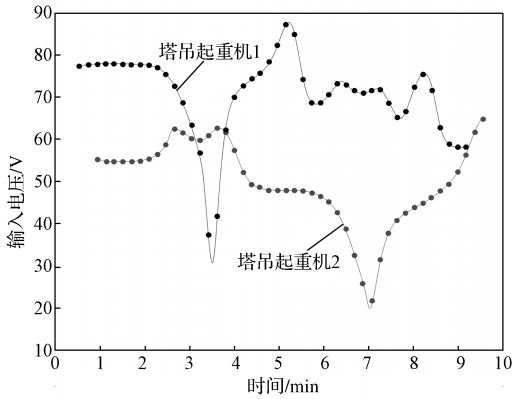

图 4　同步控制的电压信号

Fig. 4　Synchronous control voltage signal

在图 4 所示控制信号控制下，两台塔吊起重机的同步速度如图 5 所示。

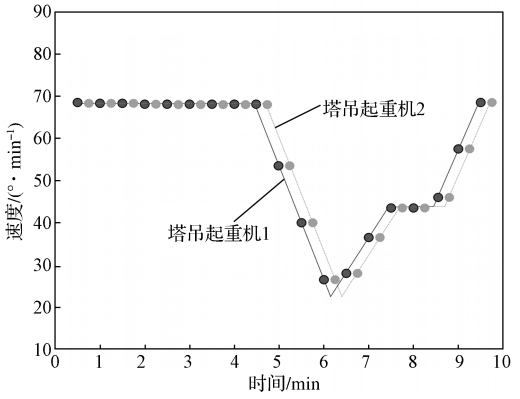

图 5　控制后的同步速度

Fig. 5　Synchronization speed after control

从图 5 中可以看出，通过 PID 控制器，塔吊起重机 1 和塔吊起重机 2 的运行速度有效实现了“错时间同步”，这种时间差的相对同步能够很大程度上避免在有限空间工作范围内交叉引起两个起重机相同位置塔吊冲突碰撞。

为进一步验证所研究方法的控制效果，在实际两台起重机的基础上，通过半实物仿真（hardware-in-the-loop，HIL）技术的Matlab平台，根据实际塔吊参数，按比例生成 20 台虚拟塔吊模型，扩展塔吊起重机数量至 20 台。采用先决系数作为同步控制测试指标，该值越接近 1，说明控制后的速度越接近期望的同步速度，控制精度越高。将其与文献 [4−6] 提出的同步控制方法进行对比，测试同步控制效果。先决系数计算公式如下：

$$\psi=1-\sum_{i=1}^{T}\left(v_i(t)-\tilde{v}_i(t)\right)\Big/\sum_{i=1}^{T}\left(v_i(t)-\overline{v}_i(t)\right)。\quad（9）$$

式中：$v_i(t)$、$\tilde{v}_i(t)$分别为第 i 个塔吊起重机的期望速度和实际速度；$\overline{v}_i(t)$为速度平均值。

4 种方法同步控制结果的先决系数对比结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出，随着要控制的塔吊起重机数量的增加，本文所研究方法的先决系数虽然有所下降，但是整体仍在 0.9 以上，控制后的塔吊起重机同步运行速度与期望速度一致，这表明该方法在多塔吊控制场景下仍然具有较高的控制精度。此外，随着塔吊数量的增加，所研究方法先决系数的下降幅度并不大，说明其具有较强的鲁棒性和适应性，能够在复杂拥挤的作业环境中保持稳定的控制性能。而其他 3 种传统方法在多塔吊控制场景下，随着塔吊数量的增加，先决系数出现明显下降，说明控制后的塔吊起重机同步运行速度无法有效达到期望的速度同步，这是因为传统方法在处理多塔吊协同作业时缺乏足够的灵活性和适应性，无法有效应对系统复杂性和不确定性增加。

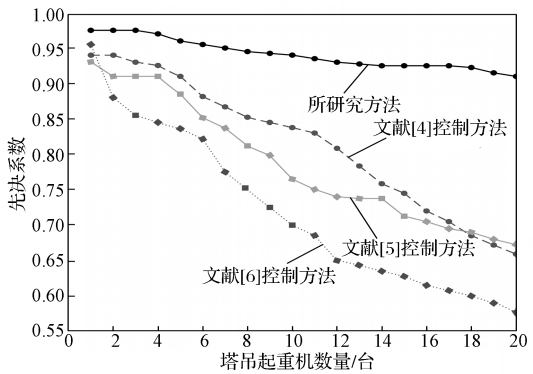

图 6 同步控制先决系数对比结果

Fig. 6 Comparison results of prerequisite coefficients for synchronous control

5 结语

本文研究了基于 MILP-IGA 的群塔吊起重机同步控制方法，通过 MILP 将同步控制问题转换为同步参数寻优问题，然后设计 IGA 求解模型，再通过 PID 控制器实现群塔吊起重机同步控制。结果表明，所研究方法在多塔吊起重机控制方面相对于传统方法具有显著的优势，在多塔吊场景中有效提升了控制精度，能够避免塔吊冲突碰撞。这一方法的应用将为大型建筑施工现场的群塔吊管理提供有力的技术支持，有助于推动建筑业向智能化、高效化和安全化方向发展。

参考文献：

[1] 唐钰淇，曾喆昭，张昌琪 . 双摆起重机的过阻尼自耦 PD 消摆控制方法 [J]. 兵器装备工程学报，2024，45(10)：302−308.
TANG Yuqi，ZENG Zhezhao，ZHANG Changqi. Over-Damped ACPD Anti-Swing Control Method of Double Pendulum Crane[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering，2024，45(10)：302−308.

[2] 王 祥，陈志梅，邵雪卷，等 . 基于滑模自抗扰控制的变绳长塔机防摆控制 [J]. 机电工程，2023，40(3)：444−451.
WANG Xiang，CHEN Zhimei，SHAO Xuejuan，et al. Anti-Sway Control for Changing Rope Length Tower Crane Based on Sliding Mode Active Disturbance Rejection Control[J]. Mechanical & Electrical Engineering，2023，40(3)：444−451.

[3] 邱泽昊，孙 宁，刘卓清，等 . 双桅杆式起重机的时变输入整形控制方法 [J]. 控制理论与应用，2023，40(8)：1509−1518.
QIU Zehao，SUN Ning，LIU Zhuoqing，et al. Time-Varying Input Shaping Control for Dual Boom Cranes[J]. Control Theory & Applications，2023，40(8)：1509−1518.

[4] 黄 哲，赵庭祺，王生海，等 . 船用起重机多绳系统同步运动控制策略 [J]. 科学技术与工程，2024，24(11)：4591−4598.
HUANG Zhe，ZHAO Tingqi，WANG Shenghai，et al. Control Strategy with Synchronous Motion for Multi-Cable System of Ship-Mounted Crane[J]. Science Technology and Engineering，2024，24(11)：4591−4598.

[5] 姚仪遵，覃尚活，郭 乾，等 . 多源快变干扰船舶永磁同步电机调速控制方法 [J]. 舰船科学技术，2024，46(21)：93−96.
YAO Yizun，QIN Shanghuo，GUO Qian，et al. Multi Source Fast Changing Interference Ship Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Control Method[J]. Ship Science and Technology，2024，46(21)：93−96.

[6] 刘佳辉，程文明，谌庆荣，等 . 带输入饱和的双摆桥式起重机神经网络滑模控制 [J]. 控制工程，2024，

31(4)：687−694.
LIU Jiahui，CHENG Wenming，CHEN Qingrong，et al. Neural Network Sliding Mode Control for Double-Pendulum Overhead Crane with Input Saturation[J]. Control Engineering of China，2024，31(4)：687−694.

[7] BODAPATLA S K，GADDAM M，SARMA P M. Robust H-Infinity and M-Synthesis Controllers to Mitigate Sub-Synchronous Control Interaction in DFIG Wind Farms Considering Time Delay[J]. Electrical Engineering，2024，106(5)：6019−6034.

[8] 张　政，武新宇，程春田，等 . 复杂约束下梯级水电站短期厂网协调多目标 MILP 模型 [J]. 电力系统自动化，2021，45(21)：197−205.
ZHANG Zheng，WU Xinyu，CHENG Chuntian，et al. Multi-Objective Mixed-Integer Linear Programming Model for Short-Term Coordination of Power Plants and Power Grid in Cascaded Hydropower Station Under Complex Constraints[J]. Automation of Electric Power Systems，2021，45(21)：197−205.

[9] 李炫锋，刘晟材，唐　珂 . 机会约束的多选择背包问题的遗传算法求解 [J]. 计算机应用，2024，44(5)：1378−1385.
LI Xuanfeng，LIU Shengcai，TANG Ke. Novel Genetic Algorithm for Solving Chance-Constrained Multiple-Choice Knapsack Problems[J]. Journal of Computer Applications，2024，44(5)：1378−1385.

[10] 贾润达，李志奇，张树磊，等 . 基于混合整数线性规划的浓密脱水过程协调优化 [J]. 控制与决策，2024，39(4)：1281−1287.
JIA Runda，LI Zhiqi，ZHANG Shulei，et al. Coordinated Optimization of Thickening-Dewatering Process Based on Mixed Integer Linear Programming[J]. Control and Decision，2024，39(4)：1281−1287.

[11] 徐海燕，李　栋，吴　浩，等 . 基于改进免疫遗传的配电网故障区段定位研究 [J]. 四川轻化工大学学报（自然科学版），2022，35(2)：63−69.
XU Haiyan，LI Dong，WU Hao，et al. Research on Fault Section Location of Distribution Network Based on Improved Immune Genetic Algorithm[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition)，2022，35(2)：63−69.

[12] 龚礼岳，方如胜，胡献竹，等 . 基于 IGA-AK 代理模型的边坡安全系数预测与滑动面定位研究 [J]. 中国安全生产科学技术，2024，20(增刊 1)：169−178.
GONG Liyue，FANG Rusheng，HU Xianzhu，et al. Research on Slope Safety Factor Prediction and Sliding Surface Localization Based on IGA-AK Surrogate Model[J]. Journal of Safety Science and Technology，2024，20(S1)：169−178.

[13] 陈　卓，金建海，张　波，等 . 基于多策略免疫遗传算法的无人艇航向自适应控制 [J]. 船舶力学，2023，27(9)：1273−1282.
CHEN Zhuo，JIN Jianhai，ZHANG Bo，et al. Adaptive Control Method of Unmanned Surface Vehicle Course Based on MSFIGA Algorithm[J]. Journal of Ship Mechanics，2023，27(9)：1273−1282.

[14] 陈发堂，李　璐，张若凡 . 基于改进式免疫遗传算法的车联网任务卸载方案 [J]. 计算机应用研究，2024，41(2)：558−562.
CHEN Fatang，LI Lu，ZHANG Ruofan. Task Offloading Scheme of Internet of Vehicles Based on Improved Immune Genetic Algorithm[J]. Application Research of Computers，2024，41(2)：558−562.

[15] 屈文涛，谢韩彧，刘　鑫，等 . 基于改进遗传算法的油气管道无人机航迹规划 [J]. 科学技术与工程，2024，24(27)：11901−11908.
QU Wentao，XIE Hanyu，LIU Xin，et al. Path Planning of UAV in Oil and Gas Pipeline Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Science Technology and Engineering，2024，24(27)：11901−11908.

[15] 闫　嘉，李林峰，林毓培，等 . 基于改进免疫遗传算法的汽车零件排样 [J]. 西南大学学报（自然科学版），2023，45(5)：204−214.
YAN Jia，LI Linfeng，LIN Yupei，et al. Automobile Parts Packing Based on Improved Immunogenetics Algorithm[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition)，2023，45(5)：204−214.

[17] 王　子，苌道方，范志川，等 . 基于免疫遗传算法考虑割缝及间隙补偿的矩形件排样优化研究 [J]. 制造业自动化，2023，45(3)：211−215.
WANG Zi，CHANG Daofang，FAN Zhichuan，et al. Research on Layout Optimization of Rectangular Parts Considering Slotting and Clearance Compensation Based on Immune Genetic Algorithm[J]. Manufacturing Automation，2023，45(3)：211−215.

[18] 孙良海，郑沧海，余玉洋，等 . 输灰系统杆驱机构双缸闭环同步模糊 PID 控制 [J]. 中国工程机械学报，2024，22(4)：501−505.
SUN Lianghai，ZHENG Canghai，YU Yuyang，et al. Double Cylinder Closed Loop Synchronous Fuzzy PID Control of Ash Conveyer Press[J]. Chinese Journal of Construction Machinery，2024，22(4)：501−505.

[19] 吕洪洋，陈东彦，石宇静 . 具有网络攻击和输出耦合的复杂网络输出反馈 PID 同步控制 [J]. 系统科学与数学，2024，44(5)：1337−1354.
LÜ Hongyang，CHEN Dongyan，SHI Yujing. Output Feedback PID Synchronization Control for Complex Networks with Cyber Attacks and Output Coupling[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences，2024，44(5)：1337−1354.

[20] 林　朝，王衍英，张耀东，等 . 基于 IGWO-BP-PID 的管廊吊具液压缸同步控制研究 [J]. 机床与液压，2024，52(7)：80−86.
LIN Zhao，WANG Yanying，ZHANG Yaodong，et al. Synchronous Control of Hydraulic Cylinders of Utility Tunnel Spreader Based on IGWO-BP-PID[J]. Machine Tool & Hydraulics，2024，52(7)：80−86.

（责任编辑：姜利民）