

基于智能优化算法的渔业资源管理模型的优化脉冲控制研究

谢逸轩*, 张 蒙

北京建筑大学理学院, 北京

收稿日期: 2024年5月26日; 录用日期: 2024年6月21日; 发布日期: 2024年6月27日

摘 要

本文建立了一类渔业脉冲捕捞控制模型。考虑模型会发生更符合现实情况的多次脉冲捕捞情况, 引入使得鱼群可持续发展的循环指标为优化目标, 将智能优化算法与渔业捕捞脉冲控制模型相结合, 利用不同优化算法对模型进行优化分析, 得出了对模型适应度最高的算法。最后通过数值模拟, 得出了在不同脉冲次数下的最优脉冲控制策略。

关键词

脉冲模型, 优化算法, 渔业捕捞, 最优控制

Research on Optimal Impulse Control of Fishery Resource Management Model Based on Intelligent Optimization Algorithm

Yixuan Xie*, Meng Zhang

School of Science, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing

Received: May 26th, 2024; accepted: Jun. 21st, 2024; published: Jun. 27th, 2024

Abstract

In this paper, we develop a model of impulse catch control in a fishery. Considering that the model

*通讯作者。

文章引用: 谢逸轩, 张蒙. 基于智能优化算法的渔业资源管理模型的优化脉冲控制研究[J]. 应用数学进展, 2024, 13(6): 2869-2879. DOI: 10.12677/aam.2024.136275

will have multiple pulse fishing more in line with the reality, the cycle index that makes the sustainable development of fish stocks is introduced as the optimization goal, the intelligent optimization algorithm is combined with the fishery capture pulse control model, and different optimization algorithms are used to optimize and analyze the model, and the algorithm with the highest fitness for the model is obtained. Finally, through numerical simulation, the optimal pulse control strategy under different pulse times is obtained.

Keywords

Impulse Model, Optimization Algorithm, Fishery Capture, Optimal Control

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

如何对可再生资源进行适当的管理是许多数学家、生态学家甚至经济学家十分关心的问题,他们通过研究种群资源的脉冲模型[1]-[5]来实现这一目标。在渔业资源管理领域,赵[6]基于生态学理念,构建了一个 Logistic 模型,研究脉冲捕捞优化控制,运用最优脉冲控制原理[7],深入探讨了对于该模型的优化管理问题,并成功得出了模型的最优脉冲捕获时刻以及相应的捕获水平。运用最优脉冲原理可以对单次捕捞的渔业资源管理模型进行分析,然而,在现实生活中,渔民往往会在长时间内持续经营渔场,这意味着脉冲捕捞行为会发生多次。面对这种多次捕捞的情况,最优脉冲控制原理在策略制定方面存在一定的局限性。因此,本文将采用不同的智能优化算法对模型进行优化分析。目前有部分学者将算法与微分方程相结合,例如刘等[8]-[12]研究了脉冲模型优化的算法问题,使用梯度计算、最速下降法、并行粒子群算法、精确罚方法等方式进行数值模拟,求得了复杂脉冲系统的最优控制策略。王等[13][14]将优化算法与脉冲微分方程相结合,为脉冲微分系统的最优控制问题提供了全新思路。基于此,本文创新性地考虑将智能优化算法与渔业捕捞脉冲控制模型相结合,考虑进行多次脉冲捕捞,同时引入鱼群可持续发展的循环指标作为管理目标。脉冲捕捞系数和脉冲捕捞的时间是影响这一管理目标的主要参数。因此,本文将这两个参数设定为优化目标,采用智能优化算法对模型进行优化分析。通过比较多种算法的适应度得分,我们选择了效果最佳的优化算法,并据此得出相应的最优脉冲控制策略。

2. 模型建立

假设鱼种群的个体具有相同的动态特性并且增长服从 Logistic 模型规律,建立模型为:

$$\begin{cases} \frac{dN(t)}{dt} = rN(t)\left(1 - \frac{N(t)}{K}\right), \\ N(0) = N_0. \end{cases} \quad (1)$$

其中, $N(t)$ 表示时间 t 时渔场中鱼类种群数量, N_0 表示渔场中鱼类的初始数量, $N_0 > 0$, r 表示渔场中鱼类的内禀增长率(出生率减去死亡率), K 表示鱼类种群的环境容纳量。渔场的环境会受到污染,在受到污染后,鱼类会将污染物质吸收入体,导致发生持续不断死亡的现象。

此时被污染后的渔业模型为:

$$\begin{cases} \frac{dN(t)}{dt} = rN(t) \left(1 - \frac{N(t)}{K} \right) - \phi N(t), \\ N(0) = N_0. \end{cases} \quad (2)$$

其中 ϕ 表示鱼群的受污染致死率。在现实生活中, 渔民会在某一时刻出海大量捕捞鱼类种群, 经过脉冲捕获后的模型为:

$$\begin{cases} \frac{dN(t)}{dt} = rN(t) \left(1 - \frac{N(t)}{K} \right) - \phi N(t), & t \neq \tau_k, \\ \Delta N(t) = -EN(t), & t = \tau_k, \\ N(0) = N_0. \end{cases} \quad (3)$$

其中, τ_k 表示脉冲捕获时刻, E 表示脉冲捕获系数。

渔民运营渔场的目的通常是为了捕捞贩卖鱼群, 以此获取经济收入。考虑渔民管理渔场需要持续付出养殖成本, 渔场环境受污染后, 渔民处理受污染的鱼类需要付出额外的成本, 则假设此时总经济利润(总收入 - 总支出)为:

$$W(T) = \mu(IEN(\tau_k) - CEN(\tau_k) - C_0) - \int_0^T RN(t)dt,$$

其中 R 表示管理鱼群的单位成本, $\mu \in [0, 1]$ 为脉冲变量, $\mu = 0$ 时表示无脉冲发生, $\mu = 1$ 时表示有脉冲发生。 I 表示鱼的售价, C 表示处理受污染鱼类额外成本, C_0 表示进行捕捞的固定成本。设性能指标 $V(N_0, s, N(\cdot)) = -W(T)$, 为了使渔民能获得最大经济收入, 即使性能指标 V 取得最小值。

此时可以得到一个环境受污染影响的渔业资源管理模型:

$$\begin{cases} \frac{dN(t)}{dt} = rN(t) \left(1 - \frac{N(t)}{K} \right) - \phi N(t), & t \neq \tau_k, \\ \Delta N(t) = -EN(t), & t = \tau_k, \\ N(0) = N_0, \\ V(N_0, s, N(\cdot)) = \int_0^T RN(t)dt - \mu(IEN(\tau_k) - CEN(\tau_k) - C_0). \end{cases} \quad (4)$$

在多次捕捞的情况下, 除了考虑管理者收益, 同时也要尽可能保持资源种群的可持续利用, 所以加入周期终端时刻时鱼群的数量为另一个优化目标。为此, 我们可以将问题分为两个部分: 一个是最大化总收益, 另一个是以最终鱼群数量为准的循环指标, 最终的鱼群捕捞模型如下:

$$\begin{cases} \frac{dN(t)}{dt} = rN(t) \left(1 - \frac{N(t)}{K} \right) - \phi N(t), & t \neq \tau_k, t \in (0, T], k \in N^+ \\ \Delta N(t) = -EN(t), & t = \tau_k, \\ V(N_0, s, N(\cdot)) = \int_0^T RN(t)dt - \mu(IEN(\tau_k) - CEN(\tau_k) - C_0), \\ N(0) = N_0, \\ N(T) > K_1. \end{cases}$$

其中 T 为捕捞周期的终端时刻, K_1 为循环指标, $N(T) > K_1$ 为逻辑判断语句, 当为真时, 输出为 1, 不为真时, 输出为 0, 其意义表明了在进行多次捕捞后, 在捕捞周期最后结束时, 实现生态循环目标的重要性。

图 1 展示了鱼群的自然增长图, 其中红色线代表最终的循环指标, 表明管理的种群数量要求, 蓝色曲线表示鱼群的增长曲线。

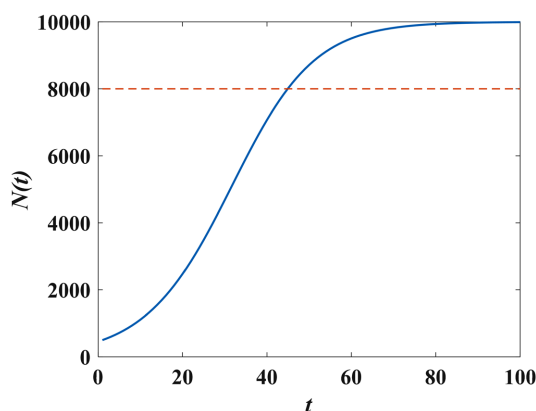


Figure 1. Optimal impulse control curve

图 1. 最优脉冲控制曲线

图 2 展示了脉冲捕获的模型曲线示意图。红色虚线表示在 $t = 40$ 时对鱼群进行脉冲捕获, 此时鱼群数量急剧减少, 然后随后逐渐恢复到自然增长的状态。

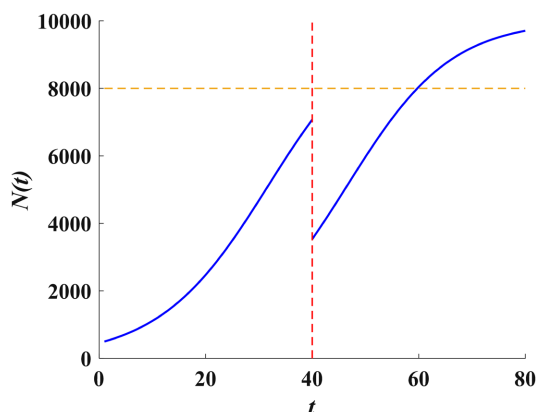


Figure 2. Fisheries management model diagram for impulse capture

图 2. 脉冲捕获的渔业管理模型图

一般渔业模型中的多目标优化问题可以表示为:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad y = (y_1, y_2, \dots, y_m),$$

$$\max f = w_1 y_1(x) + w_2 y_2(x) + \dots + w_m y_m(x), \quad \text{s.t. } x \in X.$$

其中 x 是决策向量, 代表渔业捕捞的策略, 如捕捞率和捕捞时间, $y(x)$ 为目标向量, 可用于表示管理者的收益以及生态循环指标, n 和 m 分别指代决策变量和目标变量的数量, 算法搜索空间 X 涵盖了待优化的捕捞决策参数的可能取值范围。对于该问题, 我们设定了一个预期的取值范畴, 以便在优化过程中引导算法的搜索方向。 $w_j \in [0, 1]$, $\sum_{j=1}^m w_j = 1$, $w_j (j=1, 2, \dots, m)$ 表示该目标向量的期望范围。

本文中需要考虑的收益指标一共有两个, 分别为资源管理者的收益以及最终鱼群数量循环指标, 因

此, 可以将模型的优化问题描述如下:

$$x = (x_1, x_2), \quad y = (y_1, y_2).$$

$$\max f = w_1 y_1(x) \cdot w_2 y_2(x), \quad \text{s.t. } x \in X.$$

3. 参数设置

设 $K=10000$ 为渔场的环境容纳量, $N_0=500$ 为初始的鱼群数目, 鱼群的自然增长率 $r=0.1$, 鱼群的养殖成本为 $R=0.02$ (后面这一参数为 0.1 , 因为单次捕捞的总收益相对较低, 如果养殖成本过高, 会导致总收益为负数, 失去了现实意义), 鱼群的污染致死率为 0 , 单次捕捞的固定成本 $D=100$, 鱼的售卖价格为 $p=20$ 价格单位, 需要注意的是, 售卖价格其实是鱼的本身售价减去污染处理后的价格, 即 $I-C$, 终端时刻 $T=80$ 。在本次实验中, 要求最终鱼群的种群数量 $K_1 > 8000$, 符合生态循环效益。

我们需要优化的目标为脉冲捕获率 E , 以及进行脉冲捕捞的时刻 τ_k 。

4. 基于单次脉冲捕捞的优化研究

采用粒子群优化(PSO) [15]和遗传算法(GA) [16]与海洋捕食者算法(MPA) [17]三种智能优化算法优化第 1 节中的脉冲捕获模型, 通过对比上述智能优化算法在单次捕捞下所得出的最优捕获策略的适应度得分, 寻求最佳算法以及对应的最优控制策略。

在粒子群算法中, 我们设定 NPSO (种群规模) 为 30, MPSO (动量因子) 为 0.8, k_1 (自学习因子) 为 0.5, k_2 (社会学习因子) 也为 0.5。

在遗传算法中, 我们设定 NGA (群体大小) 为 30, 每个个体的染色体长度 chr 为 15, 交叉率为 0.2, 变异率 pm 为 0.02。

MPA 算法的参数及其含义与文[17]中的描述保持一致。此外, 为了评估算法的性能, 我们将三种智能优化算法的迭代次数最大值统一设定为 30 次。

为了验证这三种算法的有效性, 我们分别对第 1 节中的渔业单次脉冲捕获模型进行了模拟优化。模拟结果如图 3 所示, 三种算法在优化过程中均出现了明显的跳跃变化点, 这表明在迭代演化过程陷入停滞时, 通过改变演化策略, 算法能够重新找到正确的搜索方向, 从而避免算法陷入局部最优解, 进一步提高了优化效果。

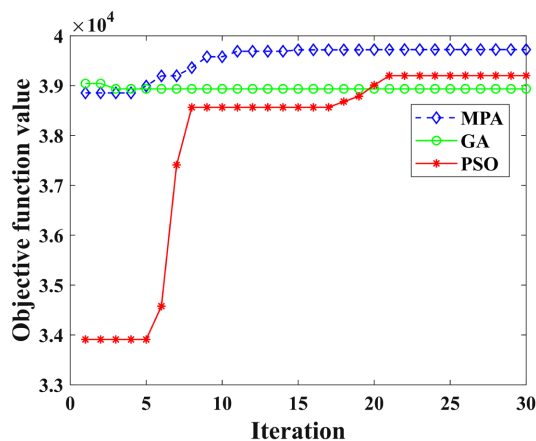


Figure 3. Optimization evolution diagram of three intelligent optimization algorithms for single impulse capture

图 3. 三种智能优化算法进行单次脉冲捕获的优化演化图

根据表 1 的结果，我们可以观察到，对于单次脉冲捕捞，MPA 在优化速度和准确性方面优于其他两种智能优化算法。能够以更快的速度找到最优解，准确性方面也具有显著的优势，得到了最高的适应度，鲁棒性优异，能够更精确地找到最佳优化方案。

Table 1. Evolution results of single impulse capture
表 1. 单次脉冲捕捞的演化结果

优化算法	最佳适应度	优化结果(E, τ_k)		时间/s
MPA	39722.971	0.4953	66	0.019
GA	39041.151	0.7464	41	0.031
PSO	39201.244	0.5066	62	0.026

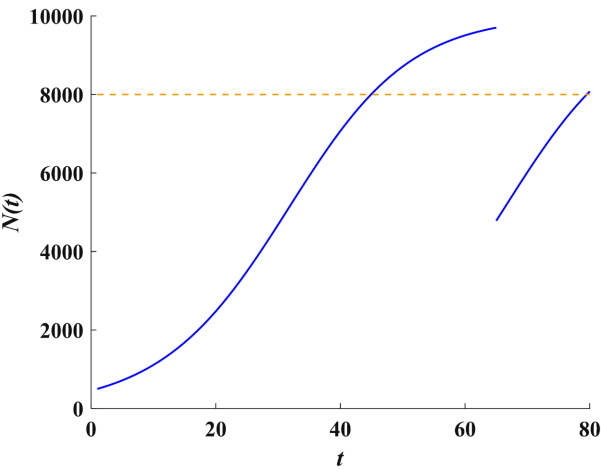


Figure 4. Optimal control curves for single impulse capture based on the marine predator algorithm

图 4. 基于海洋捕食者算法的单次脉冲捕获的优化控制曲线

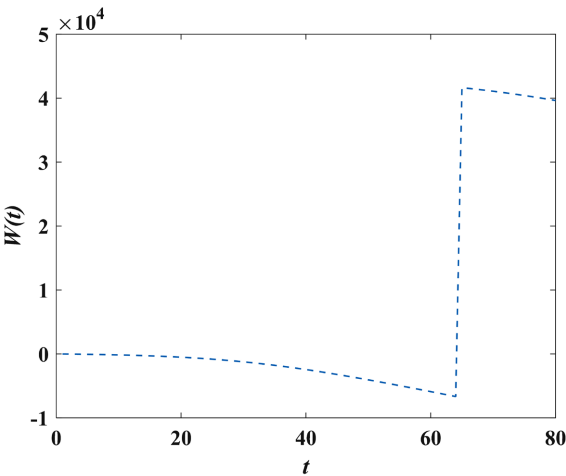


Figure 5. Optimal revenue curve of single impulse capture based on marine predator algorithm

图 5. 基于海洋捕食者算法的单次脉冲捕捞最优收益曲线

图 4 展示了基于海洋捕食者算法的单次脉冲捕获优化控制曲线。通过智能优化算法, 综合考虑渔民收益与鱼群最终的生态循环指标, 得出了最佳的优化决策。即控制脉冲捕获率为 $E = 0.4953$, 捕获时刻为 $\tau_1 = 66$, 可以使鱼群达到循环指标的同时管理者获得最大收益。优化后的种群数量曲线符合管理者对鱼群最终数量的期望。

图 5 展示了基于海洋捕食者算法的单次脉冲捕捞的最优收益曲线。控制脉冲捕获率为 $E = 0.4953$, 捕获时刻为 $\tau_1 = 66$, 此时可以使渔民获得最大经济收益, 同时使鱼群在捕捞后能够达到循环指标, 保证资源的可持续发展。通过智能优化算法进行脉冲捕获的优化, 这种方法能够在特定情况下获取最佳策略, 以实现多目标的优化控制, 可以极大地帮助管理者进行决策。

5. 基于两次脉冲捕捞的优化研究

继续采用粒子群优化(PSO)和遗传算法(GA)与海洋捕食者算法(MPA)三种智能优化算法优化第 1 节中的脉冲捕获模型, 通过对比上述智能优化算法所得出的最优捕获策略的适应度得分, 寻求最佳算法以及对应的最优控制策略。

首先, 为了保持研究的一致性, 本节中的 MPA、GA 和 PSO 算法参数设置均与第 3 节相同。随后, 我们采用这三种优化算法对渔业模型的两脉冲捕获过程进行迭代演化, 并对比它们之间的差异。

图 6 清晰地展示了三种智能优化算法在渔业模型两次脉冲捕获过程中的演化轨迹。在迭代结束后, MPA 的曲线表现出了最高的适应度, 展现了 MPA 算法在解决此类问题时的优越性能。

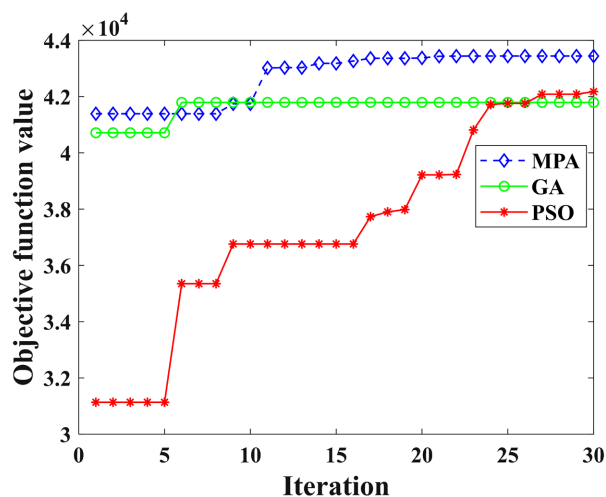


Figure 6. Optimization evolution diagram of multiple intelligent optimization algorithms in the case of two impulse capture

图 6. 多种智能优化算法在进行两次脉冲捕获时的优化演化图

根据表 2 的数据可以得知, 通过 MPA、GA 和 PSO 三种智能优化算法在两次脉冲捕捞的渔业管理模型上的演化比较, 发现 MPA 在短时间内能够获得最优解, 并且具备较高的计算效率和鲁棒性。这表明 MPA 在较为复杂的渔业管理问题中具有潜力, 可作为一种有效的优化算法。

图 7 展示了基于海洋捕食者算法对模型进行两次脉冲捕获的优化控制曲线。通过智能优化算法, 根据鱼群最终数量指标, 综合考虑渔民收益, 得出了最佳的优化决策。优化后的种群数量曲线符合管理者对鱼群最终数量的期望。

图 8 展示了基于海洋捕食者算法进行两次脉冲捕捞的最优收益曲线。此时控制脉冲捕获率为 $E =$

0.4563，两次捕获的时刻分别为 $\tau_1 = 48$ ， $\tau_2 = 64$ ，可以使渔民获得最大经济收益，同时使捕捞后的鱼群在周期结束时能够达到循环指标，保证资源的循环利用。

Table 2. Evolution results of two impulse capture
表 2. 两次脉冲捕捞的演化结果

优化算法	最佳适应度	优化结果(E, τ_k)		时间/s
MPA	43441.289	0.4563	[48, 64]	0.024
GA	41794.906	0.2804	[43, 66]	0.038
PSO	42175.632	0.4650	[42, 66]	0.031

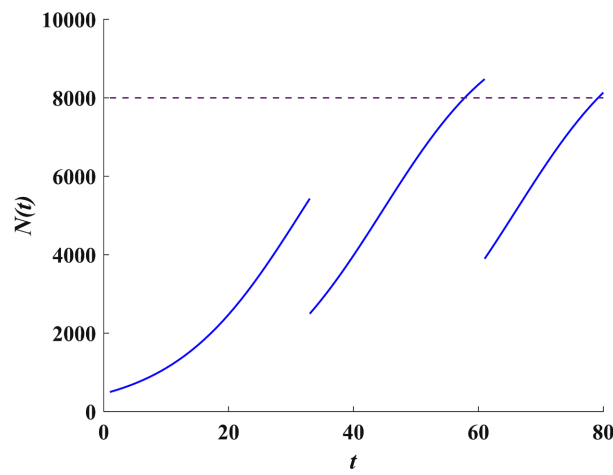


Figure 7. Optimal control curve of two impulse capture based on marine predator algorithm

图 7. 基于海洋捕食者算法的两次脉冲捕捞的优化控制曲线

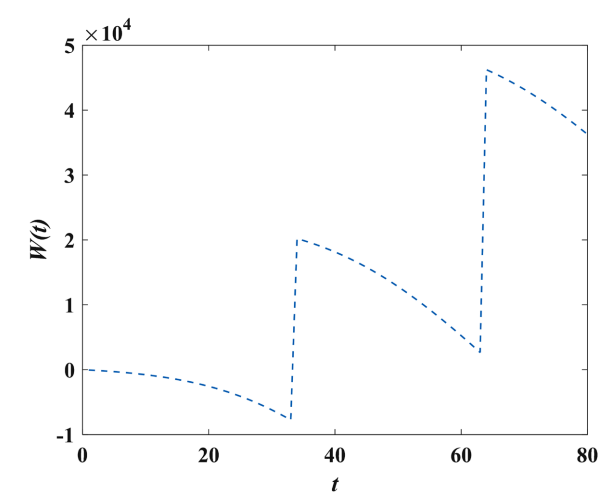


Figure 8. Optimal revenue curve of two impulse capture based on marine predator algorithm

图 8. 基于海洋捕食者算法的两次脉冲捕捞的最优收益曲线

由图 1 可知，模型(2)的初始解曲线为 $N(t)$ ，最优脉冲收获曲线为 MN ，两条曲线在区域 V_1 内相交于点 A ，即此时可以发生最优脉冲捕获，此时的时刻为 τ_c ，为渔民可获得最大经济收益的最优脉冲捕获时刻，此时的最优捕获水平为 $N(\tau_c)$ 。

6. 基于三次脉冲捕捞的优化研究

继续采用 PSO、GA、MPA 三种智能优化算法，优化第 1 节中的脉冲捕获模型，通过对比上述智能优化算法所得出的最优捕获策略的适应度得分，寻求最佳算法以及对应的最优控制策略。

首先，为了保持研究的一致性，本节中的 MPA、GA 和 PSO 算法参数设置均与 2 节保持一致。随后，我们采用这三种优化算法对渔业模型的三次脉冲捕获过程进行迭代演化，并对比它们之间的差异。

图 9 清晰地展示了三种智能优化算法在渔业模型三次脉冲捕获过程中的演化轨迹。在迭代结束后，MPA 的曲线同样表现出了最高的适应度。

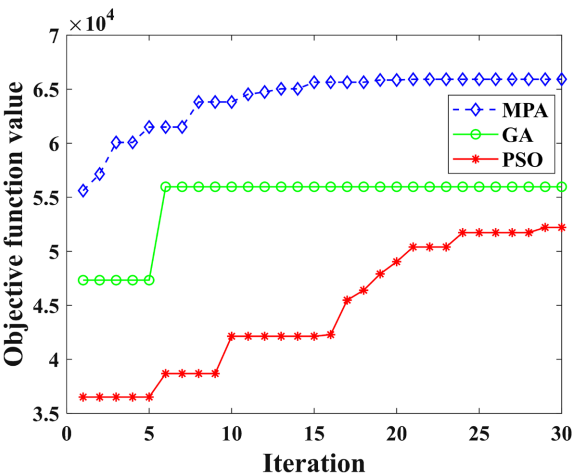


Figure 9. Optimization evolution diagram of multiple intelligent optimization algorithms for triple impulse capture

图 9. 多种智能优化算法在进行三次脉冲捕捞的优化演化图

根据表 3 的数据可以得知，通过 MPA、GA 和三种智能优化算法在二次脉冲捕捞的渔业管理模型上的演化比较，发现 MPA 在短时间内能够获得最优解，并且具备较高的计算效率和鲁棒性。这表明 MPA 在较为复杂的渔业管理问题中具有潜力，可作为一种有效的优化算法。

Table 3. Evolution results of three impulse capture

表 3. 三次脉冲捕捞的演化结果

优化算法	最佳适应度	优化结果(E, τ_k)		时间/s
MPA	65922.301	0.3820	[39, 53, 66]	0.010
GA	55970.340	0.4633	[30, 35, 53]	0.034
PSO	52208.664	0.4432	[30, 45, 56]	0.014

图 10 展示了基于海洋捕食者算法对模型进行三次脉冲捕获的优化控制曲线。通过智能优化算法，根据鱼群最终数量指标，综合考虑渔民收益，得出了最佳的优化决策。优化后的种群数量曲线符合管理者

对鱼群最终数量的期望。

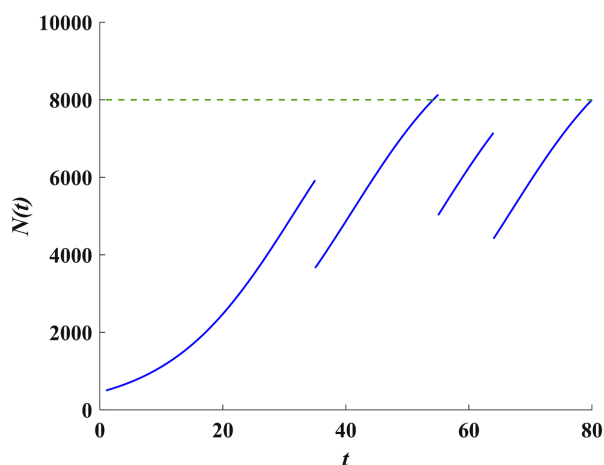


Figure 10. Optimal control curves for three impulse captures based on the marine predator algorithm

图 10. 基于海洋捕食者算法的三次脉冲捕获的优化控制曲线

图 11 展示了基于海洋捕食者算法进行三次脉冲捕捞的最优收益曲线。此时控制脉冲捕获率为 $E = 0.382$ ，三次捕捞的时刻分别为 $\tau_1 = 39$ ， $\tau_2 = 53$ ， $\tau_3 = 66$ ，可以使渔民获得最大经济收益，同时使鱼群在捕捞后能够达到循环指标，保证资源的循环利用。通过智能优化算法进行脉冲捕获优化，这种方法能够在多次脉冲等复杂情况下获取最佳策略，以实现多目标的优化控制，可以极大地帮助管理者进行决策选择。

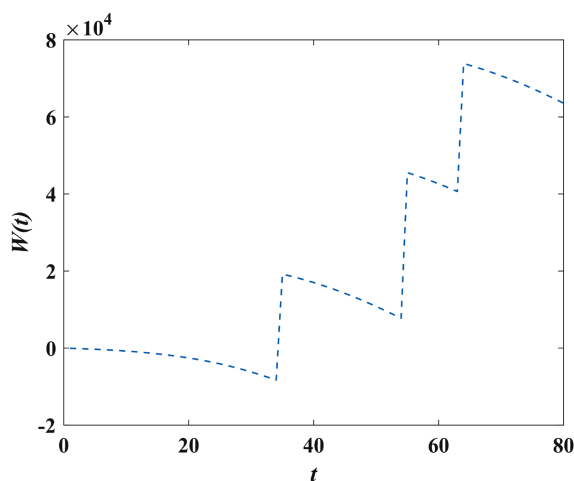


Figure 11. Optimal revenue curve of three impulse capture based on Marine predator algorithm

图 11. 基于海洋捕食者算法的三次脉冲捕获的最优收益曲线

7. 主要结论

本文通过测试三种智能优化算法，发现海洋捕食者算法在渔业捕捞模型的优化中表现最为出色。在相近的计算时间内，海洋捕食者算法的优化效果超越了遗传算法，并且与粒子群算法相比，能够取得更

佳的结果, 显示出卓越的优化性能和强大的搜索能力。研究结果显示, 在多次脉冲捕捞的渔业管理模型优化控制中, 海洋捕食者算法的稳定性和准确性都高于遗传算法和粒子群算法。因此, 本文采用海洋捕食者算法, 对引入循环指标作为控制目标的模型进行了多次迭代分析, 并针对不同脉冲捕获次数, 分别得出了相应的最优脉冲控制策略, 为渔民管理渔业资源提供了更符合实际情况的科学指导。

参考文献

- [1] 张凤琴. 生物数学发展概述[J]. 运城学院学报, 2005, 23(5): 1-3.
- [2] Milman, V.D. and Myshkis, A.D. (1960) On the Stability of Motion in the Presence of Impulses. *Sibirskii Matematicheskii Zhurnal*, **1**, 233-237.
- [3] 陈兰荪, 孟新柱, 焦建军. 生物动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [4] 陈兰荪, 王东达. 数学, 物理学与生态学的结合——种群动力学模型[J]. 物理, 1994, 23(7): 408-413.
- [5] 郭红建, 叶凯莉. 一类带有成比例收获和禁渔期的单种群渔业模型[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2013, 26(4): 485-488.
- [6] 赵立纯, 张庆灵, 杨启昌. Logistic 脉冲系统的最优脉冲控制[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(9): 41-47+55.
- [7] Blaquiere, A. (1977) Differential Games with Piecewise Continuous Trajectories. In: Hagedorn, P., Knobloch, H.W. and Olsder, G.J., Eds., *Differential Games and Applications. Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Vol. 3, Springer, 34-66. <https://doi.org/10.1007/BFb0009063>
- [8] 刘贤波, 窦家维. 脉冲微分系统的数值模拟与可视化[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(28): 6785-6790+6801.
- [9] 张晶晶. 基于改进粒子群算法求解常微分方程定解问题[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [10] 黄光球, 陆秋琴. 具脉冲出生和季节性捕杀的种群系统优化算法[J]. 计算机科学与探索, 2021, 15(10): 2002-2014.
- [11] 孙靖, 查明明. 关于在“最优化方法”中引入智能优化算法的思考[J]. 科教文汇(上旬刊), 2018(28): 47-48.
- [12] 侯祥林, 钱颖, 吴海涛. 非线性常微分方程边值问题的最优化算法[J]. 工程数学学报, 2010, 27(4): 663-668.
- [13] 王晓翠. 基于遗传算法的微分方程求解问题的研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2007.
- [14] Verma, S.K., Yadav, S. and Nagar, S.K. (2017) Optimization of Fractional Order PID Controller Using Grey Wolf Optimizer. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, **28**, 314-322. <https://doi.org/10.1007/s40313-017-0305-3>
- [15] 杨维, 李歧强. 粒子群优化算法综述[J]. 中国工程科学, 2004, 6(5): 87-94.
- [16] 席裕庚, 柴天佑, 恽为民. 遗传算法综述[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(6): 697-708.
- [17] Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Mirjalili, S., et al. (2020) Marine Predators Algorithm: A Nature-Inspired Metaheuristic. *Expert Systems with Applications*, **152**, Article 113377. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113377>