

# 基于鲸鱼优化算法的通用的总线式航电设备接口异步控制方法

宋 扬<sup>1</sup>, 曹 奇<sup>2</sup>

(1. 中国航空工业集团公司第一飞机设计研究院, 西安 710089;

2. 西安多飞电子科技有限公司, 西安 710068)

**摘要:** 针对航电设备接口在异步切换时可能因过于注重实时性而忽视数据溢出, 导致信号中断和通信安全问题, 提出基于鲸鱼优化算法的通用的总线式航电设备接口异步控制方法; 根据航电设备通信要求, 对接口通信时间和通信接口占比设置约束条件, 建立总线式接口自适应转换方案; 根据接口转换异步要求, 对接口异步转换控制框架进行设计; 以设备之间通信数据流传输可靠性最大化为目标, 构建设备接口异步控制优化数学模型, 引入鲸鱼优化算法对模型进行求解, 通过模拟鲸群变异包围猎物、交叉网气泡攻击、随机游走搜索猎物的过程, 获取最佳总线式航电设备接口异步控制方案, 实现接口异步控制; 实验结果表明: 应用该方法进行接口异步控制后, 端口转换效率在 80% 以上, 控制后的航电设备成功接入率最高可达到 0.99, 航电设备通信网络吞吐量达到 124 Mbps, 能够更好地满足航电系统通信要求。

**关键词:** 鲸鱼优化算法; 航电设备; 通信接口; 异步控制; 现场总线; 自适应转换

## Asynchronous Control Method for Universal Bus Interfaces in Avionics Equipment Based on Whale Optimization Algorithm

SONG Yang<sup>1</sup>, CAO Qi<sup>2</sup>

(1. The First Aircraft Institute, AVIC, Xi'an 710089, China;

2. Xi'an Duofei Electronic Technology Co., Ltd., Xi'an 710068, China)

**Abstract:** During the asynchronous switching of avionics equipment interfaces, the excessive emphasis on real-time performance perhaps leads to ignore data overflow, resulting in signal interruption and communication security. To address this issue, a general bus avionics equipment interface asynchronous control method based on whale optimization algorithm is proposed. According to the communication requirements of avionics equipment, set constraint conditions for interface communication time and communication proportion, and establish an adaptive conversion scheme for bus interfaces; According to the asynchronous requirements of the interface conversion, an interface asynchronous conversion control framework is designed; In order to maximize the reliability of communication data flow transmission between devices, an asynchronous control optimization mathematical model for device interfaces is constructed, which introduces the whale optimization algorithm to solve the model. By simulating the processes of whale population mutation surrounding prey, cross net bubble attack, and random walk searching prey, the optimal asynchronous control scheme of the bus avionics device interface is obtained, thus achieving the asynchronous control of the interface. Experimental results show that after the interface is asynchronously controlled by this method, the port conversion efficiency is more than 80%, with a maximum successful access rate of 0.99 and a communication network throughput of 124 mbps for avionics equipment, which can better meet the communication requirements of avionics systems.

**Keywords:** whale optimization algorithm; avionics equipment; communication interface; asynchronous control; field bus; adaptive conversion

---

收稿日期:2025-02-25; 修回日期:2025-02-27。

作者简介:宋 扬(1981-),男,硕士,高级工程师。

引用格式:宋 扬,曹 奇. 基于鲸鱼优化算法的通用的总线式航电设备接口异步控制方法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(12):145-153.

## 0 引言

为了满足航空电子技术发展需求, 航电系统变得越来越复杂, 各种航电设备之间的通信和控制需求也日益增长。通用的总线式接口作为航电系统的核心部分, 具有结构简单、易于扩展和维护等优点<sup>[1]</sup>, 可以方便地连接多个航电设备, 实现设备之间运行信息的交互, 但接口的灵活控制始终是一个难题。考虑到各个设备可能具有不同的工作频率和时钟信号, 异步通信方式逐渐受到关注, 其不需要严格的时钟同步, 各个设备可以根据自身的需求和状态进行通信<sup>[2]</sup>。这种情况下, 探索一种更加智能、自适应的接口异步控制方法, 成为航电领域的研究重点。

近年来有相关领域的研究人员针对接口控制方法展开了深入研究。向敏等人<sup>[3]</sup>提出基于半马尔科夫链的控制方法, 根据通信网络接口转换特点, 构建一个面向接口切换控制的半马尔科夫链模型, 以通信平均时延最小化为目标, 设置接口控制优化目标函数, 通过优化求解生成最终的控制策略。虽然该控制方法的应用极大提高了通信效率, 但其在切换接口时可能出现延迟, 导致数据传输中断, 进而影响网络吞吐量。Wang 等人<sup>[4]</sup>提出基于多粒度深度强化学习的方法, 结合移动边缘计算技术和深度强化学习算法, 建立通信接口切换控制方案, 以通信可靠性最大化为目标, 定义控制优化模型, 引入马尔可夫决策思想对优化模型进行求解, 获取最终的控制决策。虽然该控制方法具有较强的抗干扰能力, 但特定场景下该方法可能无法准确预测和应对网络中的动态变化, 存在早熟收敛情况, 导致分配控制结果不合理, 网络吞吐量发生大幅降低。龚万炜等人<sup>[5]</sup>提出基于模糊逻辑控制器的控制方法, 获取通信网络链路的拥堵情况后, 应用模糊逻辑控制器, 对拥堵反馈情况和待接入设备通信数据量进行统一分析, 生成一系列控制规则, 确保网络流量畅通。虽然该控制方法的适应性很强, 但由于控制规则的模糊性和不确定性, 降低了控制精度, 影响的通信网络的吞吐量。戚昱提出一种自动化接口控制技术<sup>[6]</sup>, 适用于综合性的电子信息系统, 分析现场总线技术接口分布情况, 充分考虑每个接口的通信状态, 实现设备接口的异步控制。尽管该方法具有良好的兼容性, 但使用的通信协议可能存在一定的限制和缺陷, 严重影响网络的吞吐量。

鲸鱼优化算法通过模拟鲸鱼群的自组织和自适应性来寻找最优解。在总线式航电设备接口异步控制中, 可能存在多个局部最优解。鲸鱼优化算法的全局搜索能力有助于找到全局最优解, 提高系统的整体性能。为此, 本文将这一算法应用于总线式航电设备接口的异步控制中, 提出基于鲸鱼优化算法的新型控制方法。给定一个

自适应接口转换控制策略, 并建立合理的数学优化模型, 将异步控制问题转化为鲸鱼优化算法可以求解的优化问题。最后, 通过模拟鲸鱼的捕食行为, 在解空间中搜索最优的控制策略或参数, 使得航电设备之间的通信和控制更加高效、灵活和可靠。

## 1 通用总线式航电设备接口异步控制方法设计

### 1.1 建立总线式航电设备接口自适应转换方案

为了确保数据流动的灵活性与合理性, 在借助通用的总线式航电设备接口实现不同航电设备之间通信时, 需要考虑特定的规则和约束条件<sup>[7]</sup>, 因此需要建立一个自适应转换模型, 根据航电设备通信要求随时切换接口。

以编号为 1 的航电设备接口为例, 明确该接口的线速、数据传输时间、硬件和软件接收缓冲区大小, 再找到其余可切换的接口<sup>[8]</sup>, 若当前接口与可切换端口之间的关系满足公式(1), 即可实现接口自适应转换:

$$A_1 C_1 \leqslant \alpha_1 + \sum_{i=1}^I (\hat{\alpha}_{1i} + \alpha'_{i1} + A_i C_i) \quad (1)$$

式中,  $A$  为接口线速,  $C$  为接口数据传输时间,  $\alpha$  为接口硬件接收缓冲区大小,  $\hat{\alpha}$  为接口软件接收缓冲区大小,  $\alpha'$  为接口硬件发送缓冲区大小,  $I$  为通用总线上航电设备接口总数,  $i$  为接口编号。

在总线式航电设备接口自适应转换过程中, 通信数据从接口 1 流向其余接口的截止条件进行计算, 如公式(2)所示:

$$A_1 C_1 > \alpha'_{11} + \sum_{i=1}^I (\hat{\alpha}'_{1i} + \alpha_i + A_i C_i) \quad (2)$$

式中,  $\hat{\alpha}'$  为接口软件发送缓冲区大小。

总线式航电设备接口的缓冲区容量对其在高速通信环境下的表现起着至关重要的作用。尤其在接口线速为固定值时, 缓冲区的增大可以显著提升通信接口模块在维持高速数据传输时的稳定性与持久性<sup>[9]</sup>。以一个典型的通信场景为例, 当接口 1 持续向另外一个接口发送通信数据, 而数据接收接口负责实时转发这些数据, 随着通信时间的延长, 通信数据的生成速率逐渐超过接口的转发能力, 那么第二个接口的缓冲区会表现出数据溢出问题<sup>[10]</sup>。具体的数据溢出情况, 可以通过公式(3)计算出来:

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=1}^I (\hat{\alpha}_{1i} + \alpha'_{i1})}{A_1 - \sum_{i=1}^I A_i} \quad (3)$$

式中,  $\epsilon$  为接口通信溢出数据量。

为了应对接口数据溢出情况, 设置所有总线式航电设备接口以间断通信的方式完成数据传输, 当接口通信状态超过给定标准则需要重新切换其余接口。以满足公

式(1)给出的条件为基础, 定义自适应转换接口数据溢出处理方程为:

$$\begin{cases} b = \frac{t}{t+t'} \\ \chi' < S + \chi'(t+t') \\ S = \varepsilon + \sum_{i=1}^l (\hat{\alpha}_{1i} + \alpha'_i) \\ \chi' = \sum_{i=1}^l A_i + \frac{t'+1}{t} \\ 0 \leq b \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $b$  为航电设备接口占比,  $t, t'$  分别为停歇时间与通信时间,  $\chi$  为数据链接,  $\chi'$  为接口转换,  $S$  为通信接口参数。

自适应转换接口数据溢出处理方程会受到接口通信时间和通信接口占比两方面的约束, 因此对接口通信时间和通信接口占比设置约束条件, 以满足自适应转换接口数据溢出处理需求。约束条件如下:

$$\begin{cases} t' < \frac{S}{\chi - \chi'} \\ b > (\chi - \chi' - \frac{S}{t'}) \end{cases} \quad (5)$$

通过上述处理, 确定接口自动切换条件, 并解决切换后接口数据溢出问题, 生成完整的总线式航电设备接口自适应转换方案。

## 1.2 设计接口异步转换控制框架

航电设备接口在处理数据时往往需要与多个设备和系统进行交互, 这些交互过程可能涉及大量的数据传输和等待时间。通过设计异步转换控制框架, 可以将耗时较长的任务放到后台异步执行, 从而避免主线程被阻塞, 提高系统的响应速度。因此在明确接口自适应转换策略后, 考虑航电设备接口切换的异步要求, 对接口异步转换控制框架进行设计。该框架包含串口收发模块、时钟模块等主要模块<sup>[11]</sup>, 具体如图 1 所示。

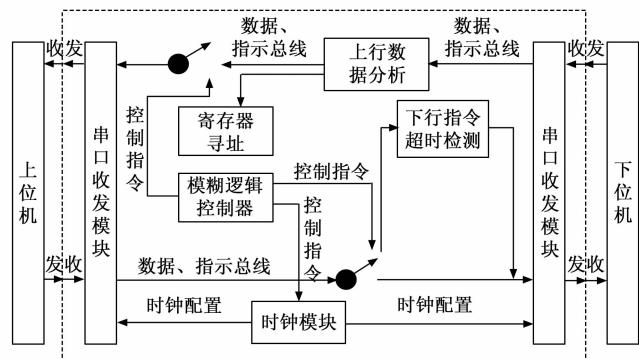


图 1 接口异步转换控制框架

如图 1 所示, 航电设备接口自适应转换方案执行过程中, 将航电设备异步通信要求输入到控制框架中, 在

处理多个并发的数据传输请求时, 可以在多个控制模块的协同工作下, 实现了数据的异步传输与控制。其中, 串口收发模块是航电设备数据通信的重要模块, 接收端得到下位机传来的指令或数据后, 将其传递给上行数据分析模块进行解析<sup>[12]</sup>, 并借助寄存器寻址模块将包含数据传输波特率等参数的控制指令下发到对应地址。上位机根据控制指令决定是否打开开关, 允许航电设备接入总线式接口。

接口异步转换控制框架中, 模糊逻辑控制器是核心组成部件, 其主要由模糊化接口、规则库及推理机等组成<sup>[13]</sup>, 如图 2 所示。

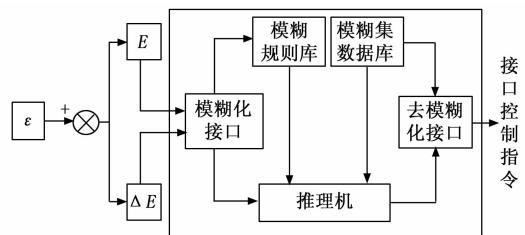


图 2 模糊逻辑控制器

图 2 中,  $E, \Delta E$  分别为误差和误差变化率。

将航电设备接口溢出数据导入模糊逻辑控制器中, 观察切换不同接口后, 溢出数据处理误差和误差变化率, 通过模糊化接口接收这些语言变量并完成模糊化处理, 形成一个模糊集。由模糊集数据库和模糊规则库, 描述模糊集与实体、属性、关系之间的关联<sup>[14]</sup>, 再将所有模糊规则和变量输入推理机中, 生成接口转换模糊控制决策。

模糊逻辑控制器的规则库包含一系列模糊规则, 这些规则定义了在不同误差和误差变化率条件下, 应采取的接口转换控制策略。规则库的建立, 使得模糊逻辑控制器能够根据当前的误差和误差变化率, 智能地选择最合适的控制动作。推理机是模糊逻辑控制器的决策核心, 接收来自模糊化接口的模糊集, 以及规则库中的模糊规则, 通过逻辑推理, 生成接口转换的模糊控制决策。推理机采用先进的模糊推理算法, 确保决策过程的准确性和高效性。利用模糊化接口, 将控制决策表述为清晰的控制指令<sup>[15]</sup>, 辅助航电设备接口实现异步控制。

## 1.3 设备接口异步控制优化模型构建

异步控制方式允许设备之间通过单独的控制信号来实现通信控制, 具有控制灵活、速度快和对硬件要求低等优点。然而, 由于异步通信是通过控制信号实现的, 因此在信号传输过程中容易出现干扰和噪声, 从而影响数据传输的可靠性<sup>[16]</sup>。由于航电系统的复杂性和对安全性的高要求, 任何数据传输的错误或中断都可能对飞行安全构成严重威胁。因此, 依托于异步转换模糊控制框架, 实现通用的总线式航电设备接口控制时, 将航电

设备接口通信数据传输可靠性最大化作为优化模型的目标函数，构建设备接口异步控制优化数学模型。

在多个航电设备接口控制优化过程中，先给出公式(6)所示的约束条件，确保参与自适应转换的接口数量小于总线上接口总数量：

$$\sum_{j=1}^J N_{oj} + \sum_{q=1}^Q N_{oq} + \sum_{p=1}^P N_{op} + \leq I_o \quad (6)$$

式中， $o$  为航电设备编号， $N$  为接口分配数量， $J, j$  为直接传输出口链路总数和编号， $Q, q$  为直接传输入口链路总数和编号， $P, p$  分别为协作传输链路总数和编号。

其中：

$$N_{oj} = \begin{cases} 1 & \text{航电设备与总线之间存在一条数据流} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$N_{op} = \begin{cases} 1 & \text{航电设备作为数据流传输的协作节点} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

依托于公式(7)给出的变量，对异步控制后多接口直接传输链路通信成功概率进行计算，公式为：

$$G_{(o,j)} = 1 - \eta_{(o,j)} N_{oj} (b) \quad (9)$$

式中， $G$  为多接口直接传输链路成功概率， $\eta$  为链路直接传输丢包率。

按照相仿的方式，结合公式(8)给出变量，求出异步控制后多接口协作传输链路通信成功概率<sup>[17]</sup>：

$$\hat{G}_{(o,j)} = 1 - \eta_{(o,j)} N_{op} (b) \quad (10)$$

式中， $\hat{G}$  为多接口协作传输链路成功概率。

将公式(9)和(10)计算结果代入公式(11)中，确定异步控制后航电设备接口通信可靠性综合评价值。计算公式如下：

$$\vartheta_{(o,j)} = \begin{cases} 1 - [1 - \hat{G}_{(o,j)}][1 - G_{(o,j)}] & N_{op} = 1 \\ G_{(o,j)} & N_{op} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中， $\vartheta$  为航电设备接口通信可靠性综合评价值。

以航电设备接口通信可靠性最大化为目标<sup>[18]</sup>，构建设备接口异步控制优化数学模型如公式(12)所示：

$$F = \max \vartheta = \max \prod_{(o,j) \in m} \vartheta_{(o,j)} I_o \quad (12)$$

式中， $F$  为总线式航电设备接口异步控制目标函数， $\max$  为最大值取值函数， $m$  为接口异步控制处理后形成的通信链路总数。

#### 1.4 总线式航电设备接口异步控制

为了求解设备接口异步控制优化数学模型，可以将最大化接口通信可靠性问题，描述为一个整数非线性规划问题<sup>[19]</sup>。引入鲸鱼优化算法<sup>[20]</sup>，模拟鲸鱼群体捕猎的过程，实现对全局最优解的搜索，得到最佳异步控制方案。

鲸鱼优化算法求解最佳控制方案时，采用十进制编码方式，将每个可行的接口异步控制方案描述为一个由元素排列组成的鲸鱼个体，一个元素对应着一个通用的总线式航电设备接口，索引值表示接口切换控制顺序<sup>[21]</sup>。假设当前有 9 个航电设备接口，则鲸鱼个体元素序列可以表示为 {5, 4, 6, 9, 2, 1, 7, 8, 3}，接口 5 首先切换，然后是接口 4，以此类推，最终形成图 3(a) 所示的原始个体，每个鲸鱼个体代表一个可行的接口异步控制方案。

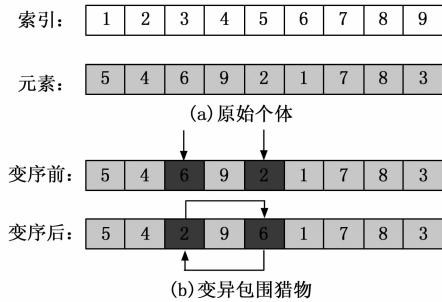


图 3 变异包围猎物

在鲸鱼优化算法包围猎物阶段，应用遗传变异思想，将变异猎物包围过程表示为图 3(b)。选择 6、2 两个接口为目标，将二者在接口切换控制方案中的顺序对调，即可实现鲸鱼个体元素排列的更新<sup>[22]</sup>。该阶段鲸鱼移动的主要方向是种群内最优个体所在的位置，具体的更新位置表达式为：

$$\begin{cases} \tau_r = |h_r x'(k) - x_r(k)| \\ x_r(k+1) = x'(k) - \lambda_r \tau_r \end{cases} \quad (13)$$

式中， $r$  为鲸鱼个体编号也是接口异步控制方案编号， $\tau$  为个体移动速度， $x'$  为种群内最优个体位置， $x$  为当前个体位置， $\lambda, h$  表示用于控制鲸鱼游走方式的参考系数， $k$  为迭代次数。

其中，两个参考系数的取值结果为：

$$\begin{cases} \lambda = 2R - \omega \\ h = 2R \\ \omega = 2 - \frac{2k}{K} \end{cases} \quad (14)$$

式中， $R$  为随机数， $K$  为最大迭代次数， $\omega$  为递减向量。

当解足够接近潜在的最优解时，鲸鱼优化算法模拟鲸鱼使用气泡网捕食的策略，创建一个虚拟的“气泡网”，逐渐缩小搜索范围并集中在最有希望的区域内，实现最佳控制方案的精准捕捉。这个过程旨在细化和完善解，通过减少随机性和增加确定性的移动来接近最终的最优解。以任意两个鲸鱼个体为例，从中随机选择几个航电设备接口，通过交换元素实现这些接口切换控制顺序的调整，再展开冲突检测和映射匹配<sup>[23]</sup>，形成两个新的个体，如图 4 所示。



图4 交叉网气泡攻击过程

交叉网气泡攻击,主要包括包围圈水平缩小、包围圈螺旋上升两个主要环节。包围圈水平缩小是指鲸鱼(在算法中代表搜索代理)在迭代过程中逐渐缩小对潜在最优解的搜索范围,包围圈水平缩小有助于算法快速定位到最有希望的解空间区域。通过不断缩小搜索范围,算法能够减少不必要的计算量,提高求解速度。而包围圈螺旋上升是指鲸鱼在缩小包围圈的同时,沿着螺旋轨迹向上游动(在算法中表现为搜索代理的位置更新)。在设备接口异步控制优化中,包围圈螺旋上升有助于算法在缩小搜索范围的同时,保持对最优解的持续追踪。该操作阶段个体位置更新数学公式为:

$$\begin{cases} \tau'_r = |x'(k) - x_r(k)| \\ x_r(k+1) = \tau' e^{uw} (\cos 2v) + x'(k) \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $\tau'$  为气泡网攻击场景下个体移动速度,  $e$  为底数,  $u$  为螺旋形状的常数,  $v$  为随机数,  $\cos$  为余弦函数。

考虑到鲸鱼种群捕猎过程中,有50%的概率执行包围猎物,也有50%的概率执行气泡网攻击<sup>[24]</sup>。因此,设定判断阈值为0.5,将接口异步控制方案鲸鱼优化求解所应用的个体位置更新机制整体表示为:

$$x_r(k+1) = \begin{cases} x'(k) - \lambda \tau_r, & \rho < 0.5 \\ \tau' e^{uw} (\cos 2v) + x'(k), & \rho \geq 0.5 \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $\rho$  为判断阈值。

在算法的执行过程中,鲸鱼(即搜索代理)会随机游走搜索猎物,以扩大搜索范围并发现潜在的更优解。这一环节通过引入随机性,使得算法能够跳出局部最优解,探索解空间的不同区域<sup>[25]</sup>。在求解接口异步控制优化问题时,解的多样性意味着算法能够考虑更多的控制策略组合,从而找到更优的解。该环节个体位置更新过程,如公式(17)所示:

$$\begin{cases} \tau_r = |h_r''(k) - x_r(k)| \\ x_r(k+1) = x''(k) - \lambda \tau_r \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $x''$  为随机选择鲸鱼个体的位置。

不断重复变异包围猎物、交叉网气泡攻击、随机游走搜索猎物操作,直到迭代结果满足截止条件,即可根

据当前求出的最优个体,确定最佳总线式航电设备接口异步控制方案,将其反馈给异步转换模糊控制框架,满足航电设备通信要求。通过上述内容,完成基于鲸鱼优化算法的通用的总线式航电设备接口异步控制方法的整体设计,具体实现过程如下:

#### 步骤1: 初始化鲸鱼种群

1) 确定鲸鱼种群大小,假设为50个鲸鱼个体(50个不同的航电设备接口)。

2) 对每个鲸鱼个体进行十进制编码,每个鲸鱼个体代表一个可行的接口异步控制方案,即一个由9个元素(对应9个航电设备接口)排列组成的序列。

3) 随机生成50个这样的序列,每个序列代表一个初始化的航电设备接口异步控制方案。

#### 步骤2: 评价鲸鱼个体

1) 根据接口异步控制方案的评价指标(如通信可靠性、切换时间等),计算每个鲸鱼个体的适应度值,从而反映不同接口切换顺序对航电设备通信性能的影响。

2) 在种群中找到适应度值最高的鲸鱼个体,即当前已知的最佳航电设备接口异步控制方案。

#### 步骤3: 迭代更新鲸鱼个体位置

1) 包围猎物阶段:以50%的概率选择鲸鱼个体进行包围猎物操作。在这个操作中,随机选择两个航电设备接口在切换控制方案中的顺序进行对调,然后计算鲸鱼个体的新位置(即新的接口切换顺序)。

2) 交叉网气泡攻击阶段:以50%的概率选择鲸鱼个体进行交叉网气泡攻击操作。随机选择两个鲸鱼个体(即两个接口切换顺序),并随机选择几个航电设备接口进行交换。交换后进行冲突检测和映射匹配,以确保新的接口切换顺序是有效的。

3) 随机游走搜索猎物阶段:在每次迭代中,以一定概率选择鲸鱼个体进行随机游走操作。在这个操作中,随机改变鲸鱼个体的某些元素(即航电设备接口的切换顺序),然后计算鲸鱼个体的新位置。

#### 步骤4: 检查迭代终止条件

1) 判断当前迭代次数是否达到最大迭代次数。

2) 若达到最大迭代次数,则停止迭代;否则,返回步骤2继续迭代。

#### 步骤5: 确定最佳异步控制方案

1) 在迭代结束后,选择适应度值最高的鲸鱼个体作为最优解。这个最优解代表最佳的航电设备接口异步控制方案。

2) 将最佳异步控制方案反馈给异步转换模糊控制框架,以满足航电设备通信要求。

## 2 实验分析

为全面验证所提基于鲸鱼优化算法的通用总线式航

电设备接口异步控制方法的应用性能。为确保实验结果的准确性和可靠性，通过模拟真实的航电设备接口工作环境，利用专业的硬件设备和仿真软件，构建一个高效、准确的实验平台。在此基础上，设置多个通信节点，模拟不同的通信场景，以全面评估接口异步控制方法在不同条件下的性能表现。

## 2.1 实验环境搭建

参考通用的总线式航电设备接口工作环境，采用CAV-T1708型号便携式1553B总线测试仪与RTB2000数字示波器进行必行模拟。

在LabWindows/CVI 7.0中创建并配置新项目，选择目标处理器并设置编译选项；利用丰富的库函数开发底层IO接口，实现与仿真数据库的交互，包括数据读写及仿真相关的IO操作；使用GUI设计工具创建直观仿真界面，接收用户激励数据并显示仿真结果；集成包含设备参数、模型数据的仿真数据库，利用LabWindows/CVI的多格式支持实现数据的便捷读写；在C语言环境中编写数据处理算法，分析激励数据并计算响应；通过底层IO接口将响应数据返回仿真界面展示；利用LabWindows/CVI的调试工具进行代码调试与优化，确保仿真功能的准确性与稳定性。随后，与接口卡、处理器等硬件资源相结合，并添加了一个用于存储被仿真设备接口的行为和属性等信息的仿真数据库。该数据库基于Visual FoxPro建立，包含硬件资源表、激励响应表等七类表格，这些表格具有易于修改的特点，可以有效还原总线式航电设备接口的动态变化，满足航电设备设计多变的要求。实验环境的逻辑如图5所示。

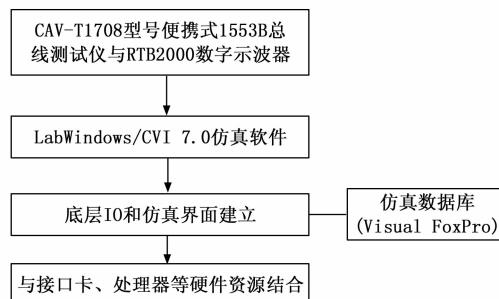


图 5 实验环境的逻辑图

考虑航电系统仿真对实时性的高要求，在部署实验环境时引入了多项优化措施。在软件初始化阶段，将仿真信息预加载至内存，以减少仿真过程中的数据库检索时间；利用多线程技术，使底层IO处理、用户事件响应和接口卡激励数据接收等任务分配至不同线程，并提升线程优先级；添加一个异步定时器，精确控制被仿真设备的周期行为；最后，通过VC编译器对代码进行优化，确保程序的高质量和高效运行。这些措施共同提升

了仿真的实时性和准确性。

## 2.2 实验数据

设置多个通信节点，每个节点代表一个航电设备。这些节点通过虚拟网络进行连接，模拟了实际的通信环境。其中，场景大小、一跳通信距离、接口数等参数设置结果如表1所示，以模拟不同的通信场景。

表 1 场景模拟参数

参数类型	参数值
场景大小	30 m×30 m×3 m
一跳通信距离	5 m
节点初始部署	随机
信道数	20
单个信道帧时隙数	80
接口数	10
时间设置	100
单位时频资源传输能力	5 kB

实验场景中，串口的发送模块和接收模块所执行的操作是相反的，前者负责保存8位并行数据，并实现数据并串转换和特定格式输出，后者则负责将串行数据重新变为并行的8位数据，二者收发数据仿真结果如图6所示。



(a) 串口发射数据仿真图



(b) 串口接收数据仿真图

图 6 串口收发数据示波图

## 2.3 接口异步控制结果

运用新设计方法实现接口异步控制时，首先需要对模糊逻辑控制器的关键参数进行设置，得到表2所示的取值结果，确保接口自适应转换异步控制框架能够顺利实施。

表 2 模糊逻辑控制器参数设置

参数名称	描述	取值
量化因子1	误差映射到模糊论域因子	1
量化因子2	误差变化率映射到模糊论域因子	0.5
比例因子	模糊控制量映射到控制信号的因子	0.2

随后，以航电设备接口通信可靠性最大化为目标，定义异步控制优化数学模型，并设置鲸鱼优化算法参数如表3所示，利用参数调整后的鲸鱼优化算法对模型进行求解。

表 3 鲸鱼优化算法参数设置

参数名称	取值
种群大小	50
最大迭代次数	1 000
鲸鱼位置更新策略	动态选择
收缩包围机制参数	2
气泡攻击机制参数	0.5
随机搜索范围	10
鲸鱼个体位置更新步长	1

依托于鲸鱼优化算法, 求解最佳接口异步控制方案时, 通过观察自适应步长这个参数的变化, 来验证算法收敛情况, 最终得到变化曲线如图 7 所示。

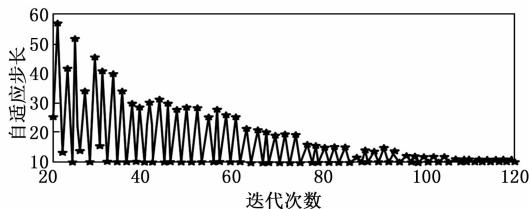


图 7 自适应步长参数迭代变化曲线

自适应步长是由大步长和小步长共同组成的, 大步长负责增强算法全局搜索能力, 小步长则是有力减少局部最优现象。从图 7 可以看出, 随着迭代次数的增多, 鲸鱼优化算法自适应步长参数取值不断减小, 且大步长和小步长之间的差异也逐渐缩小。尤其在迭代次数达到 110 次后, 自适应步长收敛效果最佳, 证明此时鲸鱼优化算法求解结果可以称之为最优解。

最优接口异步控制方案实施后, 最终形成的控制结果如图 8 所示。

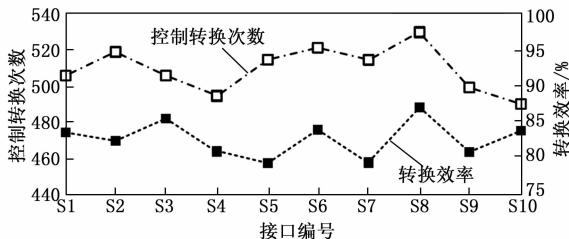


图 8 设备接口异步控制结果

如图 8 所示, S1~S10 这 10 个接口的控制转换次数在 500~530 之间, 实现了多个总线式航电设备接口的充分利用, 而端口转换效率在 80% 以上, 满足了基本通信要求, 初步证明了该控制方法的可行性。

## 2.4 控制效果对比

为进一步验证本文所提方法的控制效果, 将文献 [3] 提出的基于半马尔科夫链的控制方法、文献 [5] 提出的基于模糊逻辑控制器的控制方法作为对比方法, 共同对通用总线式航电接口进行异步控制, 对不同方法

控制结果进行对比。两种对比方法的参数设置如下所示。

表 4 基于半马尔科夫链的控制方法的参数设置

参数名称	取值
状态空间大小	15
状态转移概率矩阵	$[0.7, 0.2, 0.1; 0.3, 0.5, 0.2; 0.1, 0.3, 0.6]$
观测概率矩阵	$[0.8, 0.1, 0.1; 0.2, 0.7, 0.1; 0.1, 0.2, 0.7]$
初始状态分布	$[0.5, 0.3, 0.2]$
半马尔科夫链长度	200
仿真实验次数	100

表 5 基于模糊逻辑控制器的控制方法的参数设置

参数名称	取值
输出变量模糊集	控制信号
隶属度函数	三角函数
模糊规则库	共 49 条规则
模糊推理机制	Mamdani 推理方法
去模糊化方法	重心法
仿真实验次数	100

### 2.4.1 设备成功接入率对比

在不同接口控制方法实施后, 对比航电设备成功接入率, 根据实际应用需求, 要求航电设备成功接入率不得低于 0.8。得到的统计结果如图 9 所示。

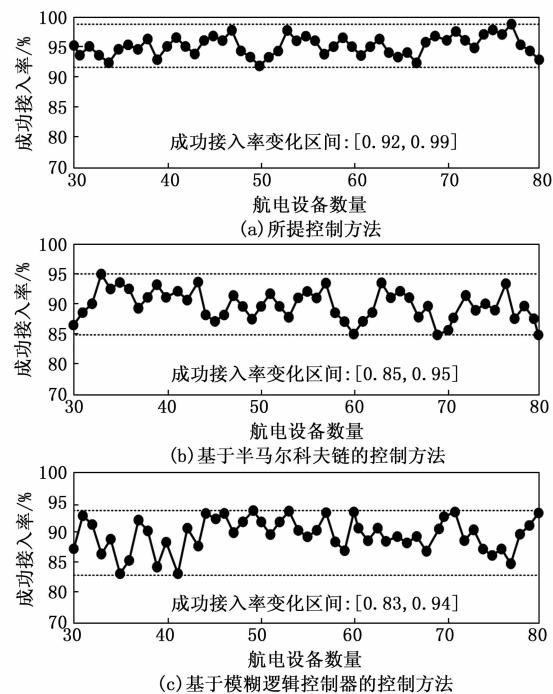


图 9 不同方法控制后设备成功接入率对比

从图 9 可以看出, 应用所提控制方法、基于半马尔科夫链的控制方法、基于模糊逻辑控制器的控制方法,

对通用的总线式航电设备接口进行异步控制后，航电设备成功接入率变化区间分别为  $[0.92, 0.99]$ 、 $[0.85, 0.85]$ ，均可以满足航电设备成功接入率的实际应用需求，达到 0.8 以上。相比之下，应用本文所提基于鲸鱼优化算法控制后的航电设备成功接入率始终保持在 0.9 以上，最高可达到 0.99，远高于对比方法，说明本文方法能够对接口控制策略进行灵活调整，使其能够根据不同工况和需求进行智能异步切换，增加了设备接入的成功率，显著提高了系统的稳定性。

#### 2.4.2 通信传输吞吐量对比

选定网络吞吐量作为评价指标，观察各接口控制方法应用后航电设备通信数据传输的效率和速度，以此来体现各方法的控制性能。将网络吞吐量变化数据绘制为对比图像，最终得到结果如图 10 所示。

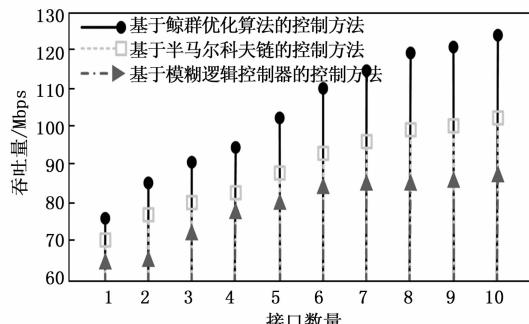


图 10 各方法控制后网络吞吐量对比

通过图 10 可以看出，在接口数量不变的情况下，不同控制方法的使用会导致网络吞吐量出现极大差异。尤其在总线式接口数量为 10 时，基于半马尔科夫链方法控制后网络吞吐量为 102 Mbps，基于模糊逻辑控制器方法控制后网络吞吐量为 89 Mbps，而所提方法控制后网络吞吐量达到了 124 Mbps，远高于对比的另两种方法，说明本文方法应用后航电设备通信数据传输的效率和速度得到有效提高。这是由于鲸鱼优化算法能够在复杂的网络环境中找到最优的接口控制方案，在保证航电设备之间通信可靠性的同时，合理分配接口资源，确保每个接口都能得到充分利用，从而进一步提高网络吞吐量。

### 3 结束语

在探索通用的总线式航电设备接口异步控制方法时，面临着复杂多样的挑战，鲸鱼优化算法以其独特的搜索机制和全局优化能力，为接口异步控制提供了新的视角和解决方案。通过引入自适应转换控制机制，实现了接口控制策略的灵活调整，使其能够根据不同工况和需求进行智能异步切换，显著提高了系统的稳定性。通过模拟鲸鱼觅食过程中的气泡网攻击行为，鲸鱼优化算法能够在复杂的解空间中寻找最优解，接口控制结果兼

顾了系统的可靠性和可扩展性，为航电设备的异步通信提供了强有力的支持。在未来的研究中，将会持续优化算法的实用性，以期在提高航电设备性能、提升航电系统运行可靠性方面发挥越来越重要的作用。

#### 参考文献：

- [1] 李克文，李国庆，崔雪丽，等. 基于概率精英差分和自适应黄金正弦的鲸鱼优化算法 [J]. 计算机工程与设计, 2024, 45 (10): 2944–2952.
- [2] 戴春雨，马廉洁，蒋涵存，等. 基于多种策略改进的鲸鱼优化算法 [J]. 计算机工程与科学, 2024, 46 (9): 1635–1647.
- [3] 向敏，周星旺，蒋炳林，等. 基于半马尔科夫链的双模单待终端通信控制方法 [J]. 仪器仪表学报, 2024, 45 (7): 301–312.
- [4] WANG Y, SHANG F, LEI J. Reliability optimization for channel resource allocation in multihop wireless network: A multigranularity deep reinforcement learning approach [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9 (20): 19971–19987.
- [5] 龚万炜，邢军. 基于模糊逻辑控制器的通信端口流量控制仿真 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (4): 176–179.
- [6] 戚昱. 船舶电子信息系统的接口控制和状态监测技术 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44 (6): 145–148.
- [7] 陶志勇，张鑫诺，王诗，等. 基于排队论的一种高吞吐量信道分配协议设计 [J]. 计算机应用研究, 2024, 41 (9): 2815–2822.
- [8] 闫晶晶，张梦宇，马运亮. 具有带宽约束和不可靠通信信道的 Markov 跳变系统的混合事件/时间驱动  $H_\infty$  控制 [J]. 控制与决策, 2024, 39 (11): 3681–3689.
- [9] 张姣，曹阔，王海军，等. 基于分层虚拟簇的多信道组网算法 [J]. 电子与信息学报, 2023, 45 (11): 4041–4049.
- [10] 廖俊东，刘丹. 基于云计算平台的光通信网络信道均衡分配方法 [J]. 激光杂志, 2023, 44 (9): 161–165.
- [11] 李姣军，杨川，杨凡，等. 面向 M2M 通信的网络分层与窗口控制接入策略 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37 (8): 245–254.
- [12] 徐会彬. 联合功率控制和信道分配的蜂窝网络能效优化算法 [J]. 电信科学, 2024, 40 (2): 38–46.
- [13] 武光耀，张明，韩翔，等. 基于长循环前缀搜索的 5G 上行控制信道同步算法 [J]. 国外电子测量技术, 2023, 42 (6): 43–48.
- [14] 龚万炜，邢军. 基于模糊逻辑控制器的通信端口流量控制仿真 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (4): 176–179.
- [15] 赵莎莎. 基于 PSO 的 D2D 蜂窝网络联合信道分配和功率控制 [J]. 无线电工程, 2023, 53 (7): 1660.
- [16] 方海涛，卞鑫，李明齐. 采用残差变化控制的自适应稀疏信道估计 [J]. 电讯技术, 2022, 62 (9): 1309.

- [17] 魏丽英, 杨立华. 智能化无线通信信道安全容量控制仿真 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (9): 230–233.
- [18] 赵 樱, 谭锦豪, 李国强. 基于基本并行进程的异步通信程序的验证方法 [J]. 软件学报, 2022, 33 (8): 2782–2796.
- [19] 王冬霞, 雷咏梅, 张泽宇. 面向通用一致性优化的通信高效的异步 ADMM 算法 [J]. 计算机科学, 2022, 49 (11): 309–315.
- [20] 赵志勇, 胡德雄, 毛忠阳, 等. 基于信道状态判决的随机接入协议退避算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45 (6): 1866–1871.

- [21] 顾兆伟, 江凌云. 基于 NOMA 异构云无线接入网的联合  
(上接第 117 页)

来的研究中将聚焦于进一步提高喘振控制系统的实时性和准确性, 优化控制算法, 降低系统能耗, 并探索将人工智能技术应用于喘振预测与控制中, 以实现对航空发动机喘振现象的更加精准和高效的管理。

#### 参考文献:

- [1] RAJU S A G, CORNELIUS A, KWEON K C B M. Rate-limited and energy-efficient feedforward control for multi-fuel unmanned aircraft systems engine [J]. ASME Letters in Dynamic Systems and Control, 2023, 3 (2): 021003.1–021003.6.
- [2] 刘 策, 白 杰. 基于深度强化学习的航空发动机 MPC 控制研究 [J]. 计算机仿真, 2024, 41 (7): 21–25.
- [3] YAN Z, FENG W, WANG H. Adaptive surge control of variable-mass unmanned surface vehicle based on sliding mode observation [J]. Ocean Engineering, 2023, 269: 113576.
- [4] 闫思齐, 张 赞, 李本威, 等. 基于声压信号的某型涡轴发动机喘振识别 [J]. 航空动力学报, 2024, 39 (4): 132–139.
- [5] 岑 鹏, 郑德生, 陆 超. 基于差分隐私的航空发动机喘振故障检测 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2022, 35 (1): 48–51.
- [6] 马 晓, 郑 岚, 柴艳娜. 基于传感信号采集的电控发动机振动故障监测方法 [J]. 传感技术学报, 2024, 37 (4): 675–681.
- [7] PANG S, JAFARI S, NIKOLAIDIS T, et al. A novel model-based multivariable framework for aircraft gas turbine engine limit protection control [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34 (12): 57–72.
- [8] 易浩然, 娄 鹏, 贾亚萍. 基于绝对节点坐标法的航空发动机轴承腔管路振动分析与验证 [J]. 固体力学学报, 2023, 44 (4): 526–536.
- [9] 曹 洋, 王泽坤, 刘鹏举, 等. 基于流固耦合的航空导叶作动筒振动特性分析 [J]. 燕山大学学报, 2023, 47
- 子信道和功率分配算法 [J]. 计算机应用研究, 2022, 39 (9): 2804–2811.
- [22] 杨伟帅. 城市轨道交通设备系统接口规划与管理 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25 (4): 91–94.
- [23] 秦鑫彤, 宋政育, 侯天为, 等. 基于自适应 p 持续的移动自组网信道接入和资源分配算法 [J]. 计算机应用, 2024, 44 (3): 863–868.
- [24] 姚 莉, 顾煜新. 异步串行通信接口位置特征自动匹配优化方法 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (3): 215–219.
- [25] 宋宇杰, 曹 越, 陈 谷, 等. 基于信道建模的多层次星地融合数据分配策略 [J]. 通信学报, 2024, 45 (7): 70–83.
- [4]: 289–297.
- [10] A Y W, A Y S, A M C, et al. Predictive control of air-fuel ratio in aircraft engine on fuel-powered unmanned aerial vehicle using fuzzy-RBF neural network [J]. Journal of the Franklin Institute, 2020, 357 (13): 8342–8363.
- [11] 盛汉霖, 顾至诚, 陈 英, 等. 嵌入式分布式架构下航空发动机模型预测控制方法研究 [J]. 推进技术, 2023, 44 (11): 203–218.
- [12] 汪松柏, 郝玉扬, 吴亚东, 等. 航空发动机压气机旋转不稳定现象研究进展 [J]. 航空学报, 2024, 45 (16): 6–26.
- [13] ZHANG X, ZHU J, TANG W, et al. Data-driven nonlinear MIMO modeling for turbofan aeroengine control system of autonomous aircraft [J]. Control Engineering Practice, 2023, 138: 105568.
- [14] 高亚辉, 倪烨斌, 姜成平, 等. 航空发动机控制系统及关键技术现状与展望 [J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56 (4): 577–596.
- [15] 金崇文, 郑前钢, 张海波, 等. 基于复合推进系统动态模型-状态变量模型的航空发动机直接推力预测控制 [J]. 推进技术, 2022, 43 (1): 354–363.
- [16] 田杨涛, 袁 杰, 徐洋洋, 等. 航空发动机反推作动系统的AMESim-Simulink 控制仿真 [J]. 液压与气动, 2023, 47 (10): 182–188.
- [17] PAN M, WANG H, ZHANG C, et al. Fuzzy control for aircraft engine: dynamics clustering modeling, compensation and hardware-in-loop experimental verification [J]. Aerospace, 2024, 11 (8): 610.
- [18] 李概念, 马东阳, 李 杜, 等. 新研民用涡轴发动机起飞状态喘振试验 [J]. 航空学报, 2023, 44 (14): 42–53.
- [19] 梁帅帅, 代子阳, 冯海浩, 等. 国六涡轮增压柴油机喘振机理与喘振控制研究 [J]. 车用发动机, 2023 (3): 46–51.
- [20] 曾翰轩, 范腾博, 温孟阳, 等. 基于三维体积力模型的离心压气机喘振预测方法 [J]. 航空动力学报, 2024, 39 (2): 187–197.