

基于人工免疫算法的污水处理最优控制

郑广勇, 罗飞, 许玉格

(华南理工大学自动化科学与工程学院, 广州 510640)

摘要: 根据多变量最优控制数学模型, 采用人工免疫算法进行污水处理过程的优化控制。该算法通过模拟免疫系统的学习、记忆功能实现模式识别和寻优搜索, 避免迭代初值猜测以提高计算效率。数值仿真结果表明, 该算法可满足污水处理系统多目标控制的要求, 且鲁棒性强、控制效果好。

关键词: 污水处理; 人工免疫算法; 最优控制

Optimal Control for Swage Treatment Based on Artificial Immune Algorithm

ZHENG Guang-yong, LUO Fei, XU Yu-ge

(College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

【Abstract】 Based on multivariate optimal control mathematical model, this paper uses artificial immune algorithm to optimal control for swage treatment process. This algorithm realizes mode identification and optimizing search by simulating learning and memory function in immune system, avoids speculate iteration initial value to enhance computational efficiency. Numerical value simulation results show that this algorithm can reach the requirement of multi-object control in swage treatment system, and it has strong robustness and good control effect.

【Key words】 swage treatment; artificial immune algorithm; optimal control

随着现代工业的飞速发展, 环境保护和污水处理越来越引起世界各国的重视。污水处理系统具有不稳定性 and 不确定性, 其处理过程的特点是多变量、非线性、时变性与随机性。污水处理系统的控制又属于多目标控制, 因此, 采用传统控制方法难以达到控制要求。针对上述问题, 本文将人工免疫算法引入污水处理的最优控制中。与传统的优化算法相比, 人工免疫算法具有易于并行处理、应用广泛等特点, 尤其适用于一些复杂的非线性问题^[1]。

1 污水处理过程中的多变量最优控制数学模型

1.1 基本状态方程建立

目前, 污水处理厂出水中的底物(有机物)浓度较高或波动大, 运行费用较高是普遍存在的 2 个问题。本文将这 2 个问题联系起来进行最优控制, 以污泥排放量(以下用 Q_w 表示)和曝气池中溶解氧浓度(以下用 DO 表示)作为控制变量, 以包括剩余污泥处理、污泥回流与供气这三者的运行费用(即能耗)之和作为性能指标, 以出水水质为约束条件^[2]。除了进水水质和水量之外, Q_w 和 DO 是活性污泥法运行中最重要的输入参数。

本文的性能指标包括活性污泥法的绝大部分运行费用, 在满足出水水质要求的前提下, 减少运行费用是最重要的目标。本文忽略二沉池中微生物的代谢作用与进水中溶解氧, 为了便于对排放污泥量进行定量控制, 规定从曝气池直接排泥, 活性污泥系统与控制示意图如图 1 所示^[3]。根据文献[3], 溶解氧浓度 DO 和污泥排放量 Q_w 为控制变量、曝气池中底物浓度 S 和微生物浓度 X 为状态变量的活性污泥法过程的基本状态方程为^[3]

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = X \left(\frac{YkS}{K_s + S} - K_d \right) \frac{DO}{K_o + DO} + \frac{Q_w X}{V} \\ \frac{dS}{dt} = \frac{Q(S_o - S)}{V} - \frac{XkS}{K_s + S} \frac{DO}{K_o + DO} \end{cases} \quad (1)$$

其中, 变量 X, S, Q_w, DO 都是时间 t 的函数; K_o 表示氧的开关常数, 单位为 mg/L ; K_s 表示氧的饱和常数, 单位为 mg/L ; K_d 表示微生物的衰减率, 单位为 d^{-1} ; k 表示底物最大比利用速率常数, 单位为 d^{-1} ; V 表示曝气池有效容积, 单位为 m^3 。

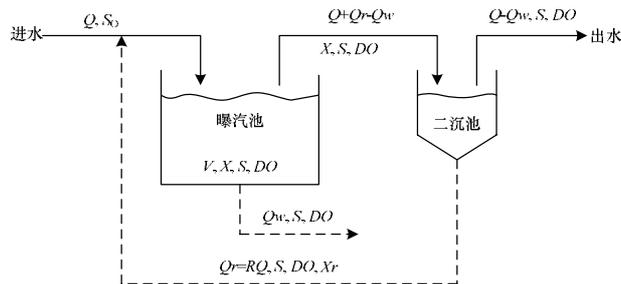


图1 活性污泥系统与控制示意图

1.2 基本性能指标建立

污水处理系统每日的运行费用 J_c 与控制变量 DO, Q_w 有

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60774032); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20070561006)

作者简介: 郑广勇(1984-), 男, 硕士研究生, 主研方向: 模式识别, 智能控制系统; 罗飞, 教授、博士生导师; 许玉格, 博士

收稿日期: 2009-10-15 **E-mail:** 68003773@qq.com

关,包括剩余污泥处理费、回流污泥费和曝气池的供氧费用等3个部分,用泛函表示为^[3]

$$J_c = \int_0^1 \left\{ A Q_w X + \frac{B \cdot X (Q - Q_w)}{X_r - X} + \frac{C_1 (D_s - DO_1)}{D_s - DO} \right. \\ \left. \left[\frac{V \cdot X \cdot DO}{K_o + DO} \left(\frac{akS}{K_s + S} + 1.42K_d \right) + Q \cdot DO \right] \right\} dt \quad (2)$$

其中, a 表示单位底物的需氧系数。

1.3 约束条件

为了满足有机物排放总量的限制条件,在状态方程中必须增加一个状态变量 $Z(t)$, $Z(t)$ 表示每日出水中的有机物总量随时间 t 的变化:

$$Z(t) = \int_0^t Q S dt \quad (3)$$

由于 $Z(t)$ 的初值 $Z(0)=0$, 因此其末值 $Z(1)$ 表示每日排放的有机物总量。

Z_S 为每日允许排放的有机物总量,取 $Z_S=150 \text{ kg(BOD)/d}$, 相当于平均出水 BOD 为 15 mg/L 。除了限制底物排放总量,使其符合国家规定的排放标准, DO 与 Q_w 也必须在合理范围内取值, DO 必须大于 0 而小于其饱和值, DO 不能为负值。因此,约束条件可表示为

$$\begin{cases} Z_S - Z(1) = 0 \\ 0 < DO < D_S \\ Q_w > 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, D_S 为饱和溶解氧浓度,单位为 $\text{kg(O}_2\text{)/m}^3$ 。

2 基于人工免疫算法的污水处理最优控制

2.1 人工免疫算法的特点

人工免疫算法是一种有效解决最优化问题的方法,其思想来源生物的免疫系统,它通过模拟免疫系统的学习、记忆等功能进行模式识别和寻优搜索。人工免疫算法对复杂的优化问题无须进行复杂计算,只要几种算子(选择、克隆、变异等)就能得到最优解,是一种全局寻优算法。

2.2 人工免疫算法的设计

人工免疫算法设计的具体步骤:

(1)问题定义。待优化的目标函数 J_c 及其约束条件视为抗原, DO 与 Q_w 在约束条件下的可行解视为抗体 B 细胞。

(2)初始抗体生成。产生初始 B 细胞矩阵 A_{b1} , 在问题的约束条件下,随机产生 N 个初始 B 细胞组成矩阵,即为待优化目标函数的 N 个可行解。

(3)抗体亲和度评价。每日排放的有机物总量约束条件采用惩罚策略处理,通过在适应度函数中增加惩罚项,惩罚不可行解,将约束问题转化为无约束问题,修正后的适应度函数可表示为

$$J_c' = J_c + \lambda Q S \Delta t \quad (5)$$

其中, λ 为惩罚系数; Δt 为 24 h 寻优的时间间隔,取 0.05 d。为求出每个个体的适应度函数,要先把 DO 、 Q_w 代入式(1)解出 X 、 S 。本文采用改进的 Euler 格式求解^[4],计算每一个 B 细胞与抗原的亲和度。在该优化算法中,待优化的目标函数值是亲和度,它表示可行解对问题的满足程度。

(4)抗体产生。选择亲和度高的 B 细胞进行克隆,产生 B 细胞矩阵 A_{b2} 。从 A_{b1} 中选择 n 个亲和度高的 B 细胞,克隆产生抗 B 细胞矩阵 A_{b2} 。在 B 细胞矩阵 A_{b2} 中进行变异操作,产生抗体细胞矩阵 A_{b3} 。模拟免疫响应中 B 细胞克隆过程中的超变异特点,变异率随 B 细胞亲和度的增大而逐渐减小。

(5)抗体促进和抑制。从 A_{b1} 中淘汰亲和度低的 B 细胞后形成 B 细胞矩阵 A_{b4} ,模拟免疫响应中约有 5% B 细胞的自然消亡及部分亲和度低的 B 细胞消亡。

(6)群体更新。从 A_{b3} 中选出高亲和度的 B 细胞组成 A_{b5} ,将 A_{b5} 加入到 A_{b4} 中组成新一代的 B 细胞群体,模拟免疫响应中记忆细胞的作用。 A_{b5} 中的记忆细胞每一代都必须更新,同时淘汰相似的 B 细胞^[5]。记忆细胞是超变异后产生的亲和度更高的 B 细胞。

(7)终止条件。经过选择克隆、变异和抑制等操作,得到一个新的 B 细胞群体准备进行下一代进化。当进化代数大于最大代数(maxGen)或本次进化最优个体的适应值与上次进化结果小于一定数值时,终止人工免疫算法。污水处理过程人工免疫算法流程如图 2 所示。

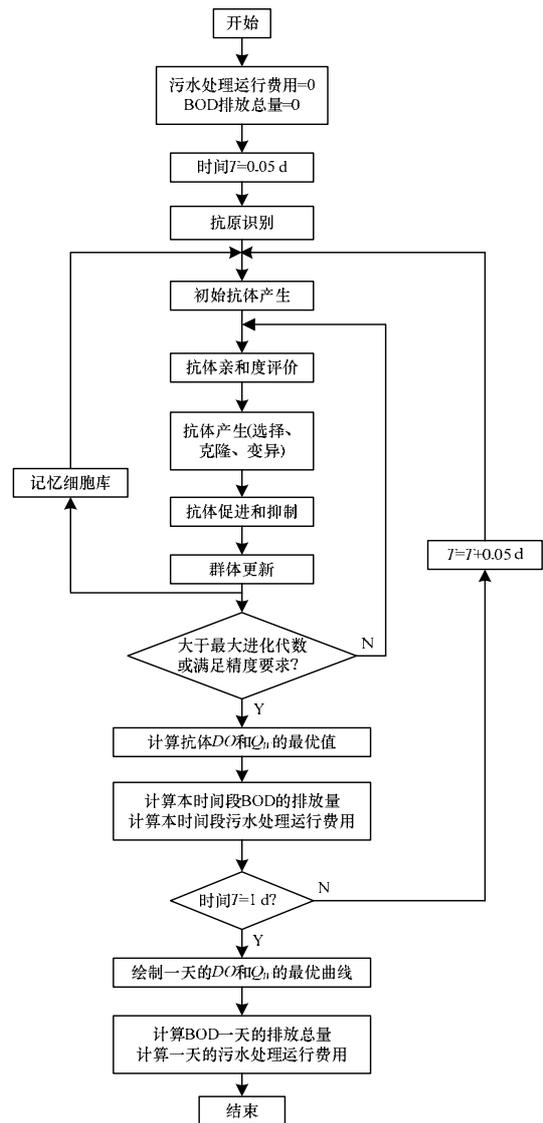


图 2 污水处理过程人工免疫算法流程

3 人工免疫算法与传统优化算法仿真比较

为便于分析和比较,本文选择文献[3]中的污水处理模型作为仿真实验,以人工免疫算法求出污泥排放流量和溶解氧浓度的最优值,采用 Matlab 进行仿真。

种群规模取为 $N=100$,克隆细胞规模为 $n=20$,变异概率 $P_m=0.05$,最大进化代数 $\text{maxGen}=40$, $X_0=2\ 000.0 \text{ mg/L}$, $S_0=9.96 \text{ mg/L}$ 。

(下转第 187 页)