

DOI: 10.7652/xjtuxb201703022

污水处理过程的多目标优化

罗健旭, 彭培培, 徐颖, 余昭旭
(华东理工大学化工过程先进控制和优化技术教育部重点实验室, 200237, 上海)

摘要: 为了在保证污水处理厂出水质量达标、控制日常运营成本的同时尽量减少温室气体(GHG)的排放,将温室气体的排放纳入了污水处理的性能评价范畴,并与出水质量(EQI)、操作成本指数(OCI)等传统性能评价指标构成了污水处理过程的多目标优化问题。为研究此性能指标的多目标优化问题,构建了简化的污水处理仿真平台 BSM2-e,此平台包括初沉池、活性污泥反应器、二次澄清池和浓缩单元。针对多目标优化问题的求解,采用多目标进化算法 NSGA-II 对该算法的精英选择策略做了改进,算法在拥挤距离选择的基础上增加了筛选步骤,以改善算法的分布性,将该算法应用于 BSM2-e 多目标优化问题,取得了较好的仿真结果。优化结果表明,GHG 排放指标与 EQI 有冲突,提高出水质量可增加温室气体的排放,而 GHG 排放指标与 OCI 无冲突,在不增加操作成本的情况下可有效降低温室气体的排放。

关键词: 多目标优化;温室气体;污水处理过程;NSGA-II

中图分类号: X703;TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)03-0129-07

Multi-Objective Optimization of Wastewater Treatment Plant

LUO Jianxu, PENG Peipei, XU Ying, YU Zhaoxu
(Key Laboratory of Advanced Control and Optimization for Chemical Processes, Ministry of Education,
East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: In order to reduce the emission of green house gases (GHG) in a wastewater treatment process (WWTP) while guaranteeing the effluent quality index (EQI) and maintaining the operating cost index (OCI), this study takes GHGs as an evaluation indictor for WWTP. Combined with other two traditional evaluation indexes, OCI and EQI, a multi-objective optimization problem is formulated. To study the three-objective optimization problem, a simplified wastewater treatment simulation platform BSM2-e was built. BSM2-e includes a primary clarifier, five activated sludge reactors, a secondary clarifier and a dewatering unit. To solve the multi-objective optimization problem, an improved non-dominated sorting genetic algorithm was proposed, making the screen of populations based on crowding distance more accurate. The improved algorithm was used to solve the multi-objective optimization problem of WWTP, and satisfied simulation results were obtained. Optimization results showed that GHGs and EQI are conflicting objectives, while GHGs and OCI are not. This means that GHGs cannot be reduced without loss in effluent quality, but it may be reduced without increase in OCI.

Keywords: multi-objective optimization; green house gas; wastewater treatment process; NSGA-II

随着我国城镇化和工业化速度的加快,生活污水和工业废水越来越多。为了减少环境污染,生活污水和工业废水需经有效处理后再循环利用或者排放,而污水处理过程会产生 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 气体。联合国气候变化政府专家委员会(IPCC)在 1990 年用全球变暖潜能(GWP)来反映温室气体的相对强度,规定 CO_2 的增温潜势值为 1, CH_4 、 N_2O 的潜势值为 23、296。气体的增温潜势值即是其对应的温室气体排放因子^[1]。

传统污水处理厂的性能评价指标是控制操作成本和保证出水水质^[2-3],污水处理过程产生的温室气体对温室效应的影响应该引起足够的重视,温室气体减排成为评价污水处理厂新的性能指标。污水处理性能优化是一个多目标优化问题,用于求解多目标优化的算法多是遗传算法,遗传算法提出后相继衍生了大量的多目标进化算法。1985 年 Schaffer 提出了向量评估算法(VEGA)^[4],但该算法在搜索空间非凸时无法求得 Pareto 最优解。1999 年 Zitzler 等提出了 SPEA 算法^[5],该算法性能优越,但算法过程比较复杂。1995 年 Srinivas 等提出了非支配排序遗传算法 NSGA,2002 年 Deb 等提出了带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)^[6]。NSGA-II 因其求解的稳定性、解的收敛性和均匀分布性等优良性能而被国内外学者广泛引用。Luo 等利用改进的动态拥挤距离多样性保持策略来获得比较好的分布性^[7]。Fu 等提出了 INSGA-II 改进算法^[8],通过内部种群和外部种群筛选来防止陷入局部最优,同时增加种群多样性,但是算法在提高解的分布性时未考虑收敛性。

本文对 NSGA-II 的拥挤度排序策略进行了改进,改善了算法的收敛性和分布性,以污水处理过程温室气体(GHG)排放、出水水质和操作成本为优化目标,利用 NSGA-II 改进算法求解污水处理多目标优化问题。

1 模型介绍

1.1 污水处理过程

污水处理 1 号基准仿真模型(BSM1)是欧盟科学技术与合作组织、国际水协会等合作开发的独立仿真平台,包括污水处理的设备布局、仿真步骤和仿真结果的评价标准等。但 BSM1 仅考虑污水在活性污泥反应器和二沉池的处理,在性能评价时局部最优化很可能导致其他处理单元出现问题。Jepps-

son 等提出了 2 号基准仿真模型(BSM2)^[9],将整个污水处理厂视为整体,包含了污水处理厂中所有处理设备和处理过程,该平台能进一步改善出水水质,降低剩余污泥量,实现全流程、长周期的性能评价。BSM2 的设备布局主要包括初沉池、活性污泥反应器、二沉池、浓缩单元、脱水单元、厌氧消化单元。

Sweetapple 等针对 BSM2 污水流线的 GHG 排放和污泥流线的 GHG 排放对总 GHG 排放的影响,做了局部敏感性分析(OAT)和全局敏感性分析(GSA)^[10],结果显示,污泥流线仅污泥排放量 Q_w 的变化能够对操作成本指数(OCI)、出水质量(EQI)和 GHG 排放造成一定影响,并且厌氧消化部分只有因 Q_w 变化而产生的 GHG 排放变化的 0.7% 发生在污泥流线,所以降低操作成本、提高出水水质和减少 GHG 排放应着眼于污水流线而不是污泥流线。因此,本文构建了污水处理仿真模型 BSM2-e,这是除去厌氧消化部分的简化 BSM2 模型。

BSM2-e 模型构建如图 1 所示,包括一个初沉池、5 个活性污泥反应器、一个二沉池和一个污泥浓缩器。初沉池基于 Otterpohl 等提供的方法^[11]建模。活性污泥反应器包括 2 个缺氧池和 3 个好氧池,采用 1 号活性污泥模型^[12]模拟生化反应过程,二沉池采用 Takács 等开发的二次指数沉淀速率模型^[13]模拟沉淀过程。污泥浓缩单元中不发生生化反应,建模时将其视为一个理想和连续的处理过程。

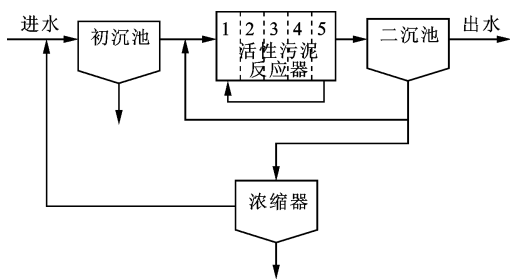


图 1 BSM2-e 模型构建图

1.2 污水处理过程 GHG 排放建模

BSM2-e 模型的 GHG 排放量化主要针对 CO_2 和 N_2O 排放。GHG 排放主要包括活性污泥反应器中生化反应产生的直接 GHG 排放、污水处理过程所需化学药品生产过程的 GHG 排放、污水处理过程所需能量产生过程的 GHG 排放以及出水流出物降解相关的 GHG 排放^[14]。按照 N_2O 的 GWP 将最终结果换算成 CO_2 当量,温室气体量化的具体数学模型参考 Bridle 模型^[15]。

2 NSGA-II 算法改进

NSGA-II 与 NSGA 相比提高了运行速度,引入精英策略使父代的优秀个体顺利保留下来,引入拥挤度算子使求出的最优解集分布更加均匀。本文对 NSGA-II 算法在精英保留选择过程中对拥挤距离的计算做了改进,并将改进运用到非支配排序和锦标赛选择过程中。

2.1 拥挤距离改进

在 NSGA-II 中,非支配排序后,对同一级的非支配解集中的非支配解进行拥挤距离计算。极端解(在目标空间各目标上取最大或最小值的解)的拥挤距离设为无穷大,对除极端解外的非支配解的各个目标排序,第 i 个非支配解的拥挤距离定义为

$$\epsilon_i = \frac{1}{N_{\text{obj}}} \sum_{m=1}^{N_{\text{obj}}} \frac{f_{i+1}^m - f_{i-1}^m}{f_{\max}^m - f_{\min}^m} \quad (1)$$

式中: N_{obj} 为目标个数; f_{i+1}^m 、 f_{i-1}^m 分别为第 $i+1$ 、 $i-1$ 个非支配个体对于第 m 个目标的适应度值; $f_{\max}^m$ 、 $f_{\min}^m$ 分别为同一级中第 m 个目标的最大、最小值。

NSGA-II 通过计算非支配解集中同一级非支配个体的拥挤距离,选取拥挤距离值大的个体优先进入下一代种群。该策略的优点是种群的分布均匀,多样性较好,但是不足之处是分布度好的某些个体可能被淘汰,分布度较差的某些个体有可能被保留。NSGA-II 种群拥挤距离筛选如图 2 所示。若采用基于拥挤距离的分布性保持策略,个体 C、D、E 的拥挤距离均较小,如果一次性去除所有聚集距离小的个体,则会出现个体 B 与个体 F 之间个体的严重缺失,影响解的分布性。

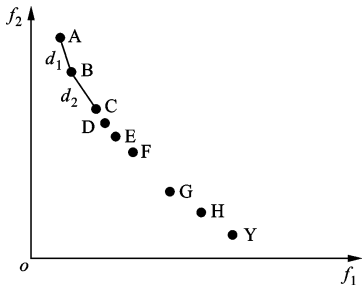


图2 NSGA-II 种群拥挤距离筛选示意图

本文对拥挤距离排序方法进行了改进。对于同一级的非支配解,在计算拥挤距离前先对非支配解进行筛选。极端解的拥挤距离仍设为无穷大,对除极端解外的非支配解的各个目标排序,计算每个非支配解与其前一个非支配解的欧氏距离。设定一个阈值,对每个非支配解与其前一个非支配解的欧氏距离进行筛选,小于阈值的非支配解被舍弃,同时被

舍弃非支配解后面解的欧氏距离相应改变,阈值公式为

$$\delta = \frac{\sum_{i=2}^{R_s} l_i}{2(R_s - 1)} \quad (2)$$

式中: l_i 为同一级中非支配解 i 与前一个非支配解 $i-1$ 之间的欧氏距离; R_s 为同一级的非支配个体数。若 D 与 C 的距离小于阈值,则舍弃 D,再比较 E 到 C 的欧氏距离与阈值的大小,若小于阈值, E 也被舍弃,以此类推,筛选结束后再求非支配解的拥挤距离。将此改进策略应用到非支配排序和锦标赛选择过程。

2.2 改进算法验证

选择 5 个不同的测试函数来验证算法,并与经典算法 NSGA-II 的计算结果进行比较。测试函数为 Zitzler 等提出的 ZTD 系列测试函数^[16],如表 1 所示。

多目标优化的性能评价可分为收敛性和分布性指标。本文采用世代距离(Generational Distance)估计算法的收敛性^[17],即解的最终边界与全局非劣最优区域的趋近程度,其定义为

$$G = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n v_i^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

式中: n 为非劣解集中非支配解的数目; v_i 为每个非支配解到全局非劣最优解的最小欧几里得距离。 G 的值越小就说明解集越靠近全局非劣最优区域。

分布性采用 Schott 提出的评价函数^[18],定义为

$$S = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{d} - d_i)^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

式中: $\bar{d}$ 为 d_i 的均值, $d_i = \min_j \left(\sum_{m=1}^{N_{\text{obj}}} |f_i^m - f_j^m| \right)$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$)。

为定量比较改进算法(Improved-NSGA-II)和 NSGA-II,仿真的种群规模为 100,运行代数为 200,交叉概率 p_c 为 0.9,变异概率 p_m 为 0.1。为了避免算法的随机性,所得近似解集均运行 10 次。表 2、3 的数据为两种算法运行 10 次统计得到的 S 和 G 的均值和标准差。

由表 2 可知,Improved-NSGA-II 对 ZDT1、ZDT2、ZDT3、ZDT4、ZDT6 的收敛性优于 NSGA-II。由表 3 可知,Improved-NSGA-II 得到的 S 均值都好于 NSGA-II,即 Improved-NSGA-II 能较好改进分布性。因此,新算法在改进算法分布性的同时也改善了算法的收敛性。

表 1 多目标优化测试函数集

测试函数	目标函数	变量数目及取值范围
ZTD1	$\left. \begin{aligned} \min f_1(x_1) &= x_1 \\ \min f_2(x) &= g(x)(1 - (x_1/g(x))^{1/2}) \\ \text{s. t. } g(x) &= 1 + 9 \sum_{i=2}^m x_i/(m-1) \end{aligned} \right\}$	$\left. \begin{aligned} x_i &\in [0, 1] \\ m &= 30 \end{aligned} \right\}$
ZTD2	$\left. \begin{aligned} \min f_1(x_1) &= x_1 \\ \min f_2(x) &= g(x)(1 - (f_1/g(x))^2) \\ \text{s. t. } g(x) &= 1 + 9 \sum_{i=2}^m x_i/(m-1) \end{aligned} \right\}$	$\left. \begin{aligned} x_i &\in [0, 1] \\ m &= 30 \end{aligned} \right\}$
ZTD3	$\left. \begin{aligned} \min f_1(x_1) &= x_1 \\ \min f_2(x) &= g(x)(1 - (x_1/g(x))^{1/2}) \\ \text{s. t. } g(x) &= 10m - 9 + \sum_{i=2}^m (x_i^2 - 10\cos(4\pi x_i)) \end{aligned} \right\}$	$\left. \begin{aligned} x_i &\in [0, 1] \\ m &= 30 \end{aligned} \right\}$
ZTD4	$\left. \begin{aligned} \min f_1(x_1) &= 1 - \exp(-4x_1)\sin^6(6\pi x_1) \\ \min f_2(x) &= g(x)(1 - (x_1/g(x))^2) \\ \text{s. t. } g(x) &= 10m - 9 + \sum_{i=2}^m (x_i^2 - 10\cos(4\pi x_i)) \end{aligned} \right\}$	$\left. \begin{aligned} x_1 &\in [0, 1] \\ x_i &\in [-5, +5] \\ i &= 2, \dots, m \\ m &= 10 \end{aligned} \right\}$
ZTD6	$\left. \begin{aligned} \min f_1(x_1) &= x_1 \\ \min f_2(x) &= g(x)(1 - (x_1/g(x))^{1/2} - (x_1/g(x)\sin(10\pi x_1))) \\ \text{s. t. } g(x) &= 1 + 9 \sum_{i=2}^m x_i/(m-1) \end{aligned} \right\}$	$\left. \begin{aligned} x_1 &\in [0, 1] \\ x_i &\in [0, 1] \\ i &= 2, \dots, m \\ m &= 10 \end{aligned} \right\}$

表 2 两种算法的收敛性比较

测试函数	Improved-NSGA-II		NSGA-II	
	均值	标准差	均值	标准差
ZDT1	0.000 224 6	0.000 034 42	0.000 242 4	0.000 032 88
ZDT2	0.000 092 2	0.000 059 05	0.000 094 2	0.000 059 72
ZDT3	0.000 583 2	0.000 031 82	0.000 615 9	0.000 034 53
ZDT4	0.000 487 1	0.000 059 05	0.000 492 9	0.000 072 54
ZDT6	0.000 269 5	0.000 048 93	0.000 294 2	0.000 050 21

表 3 两种算法的分布性比较

测试函数	Improved-NSGA-II		NSGA-II	
	均值	标准差	均值	标准差
ZDT1	0.004 595 7	0.000 321 96	0.004 689 5	0.000 283 74
ZDT2	0.004 399 1	0.000 293 49	0.004 708 2	0.000 497 63
ZDT3	0.001 627 4	0.000 201 32	0.001 812 2	0.000 260 53
ZDT4	0.004 540 2	0.000 306 84	0.004 548 9	0.000 284 91
ZDT6	0.003 847 5	0.000 173 28	0.003 924 3	0.000 170 29

3 污水处理过程多目标优化

本文的优化目标是操作成本、温室排放和出水水质。选取活性污泥反应器 3 个好氧池的溶解氧传

递系数 k_{la3} 、 k_{la4} 、 k_{la5} ，污泥排放量 Q_w 和内循环流量 Q_{intr} 作为决策变量，仿真时的其他操作条件按照 BSM2 平台的标准给定，BSM2 进水数据采用实际污水处理厂的数据。

3.1 污水处理多目标问题

污水处理厂的性能评价是根据 OCI、EQI、处理单位污水的平均 GHG 排放量来进行评估的。OCI 属于经济指标;EQI 是污水污染负荷的度量,是衡量主要污染物对受纳水体污染程度的一个指标。本文多目标优化问题为

$$\min(f_1(x), f_2(x), f_3(x)) \tag{5}$$

式中: $f_1(x)$ 为 OCI 的量化; $f_2(x)$ 为 EQI 的量化; $f_3(x)$ 为温室气体排放量。

操作成本指数 $I_{OC} = E_A + E_P$, E_A 为曝气耗能, E_P 为水泵耗能,计算式为

$$E_A = \frac{24}{7} \int_7^{14} \sum_{i=1}^{i=5} [0.403\ 2(k_{la})_i^2 + 7.840\ 8(k_{la})_i] dt \tag{6}$$

$$E_P = \frac{0.04}{7} \int_7^{14} [Q_{intr}(t) + Q_r(t) + Q_w(t)] dt \tag{7}$$

出水质量指数为

$$I_{EQ} = \frac{1}{7\ 000} \int_7^{14} [B_{TSS} T_e(t) + B_{COD} C_e(t) + B_{NKj} S_{NKj,e}(t) + B_{NO} S_{NO,e}(t) + B_{BOD5} B_e(t)] Q_r(t) dt \tag{8}$$

式中: i 为活性污泥反应器池序号; Q_r 为外循环回流活性污泥流量; T_e 为出水总固体浓度; $S_{NKj,e}$ 为出水总凯氏氮; B_e 为出水 5 天生化需氧量; $S_{NO,e}$ 为出水总氮; B_{TSS} 、 B_{COD} 、 B_{Nj} 、 B_{NO} 、 B_{BOD5} 为不同污染物对受纳水体的污染程度的权重系数。

3.2 污水处理多目标问题决策变量

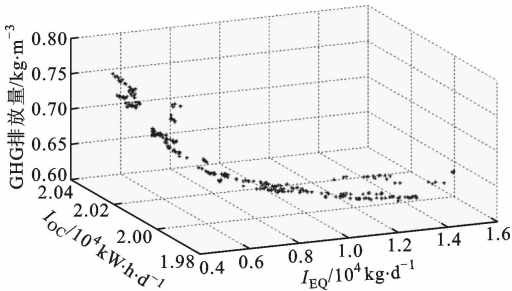
基于 OAT 和 GSA 敏感性分析^[8], 本文选取 k_{la3} 、 k_{la4} 、 k_{la5} 、 Q_w 和 Q_{intr} 这 5 个操作变量作为优化问题的决策变量, 其中参数 k_{la} 与溶解氧浓度相关, 决策变量取值范围如表 4 所示。

表 4 决策变量取值范围

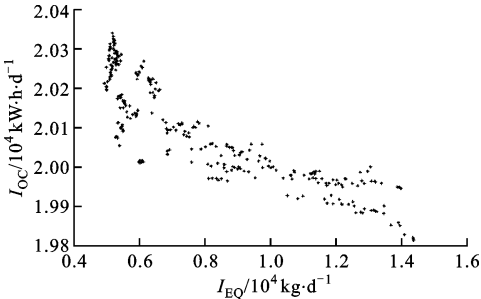
决策变量	优化下限	优化上限
$Q_{intr}/\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	49 000	61 000
$Q_w/\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	100	800
k_{la3}/d^{-1}	0	240
k_{la4}/d^{-1}	0	240
k_{la5}/d^{-1}	0	240

3.3 污水处理多目标问题求解

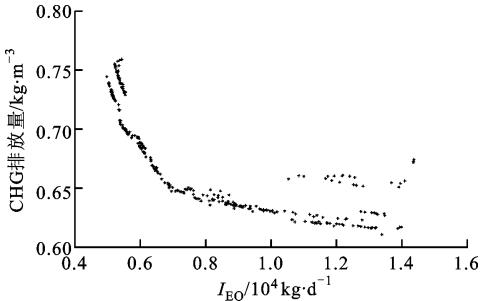
采用 Improved-NSGA-II 算法求解该多目标优化问题。种群规模设为 400, 进化代数 为 25, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.15, 算法重复运行 10 次。



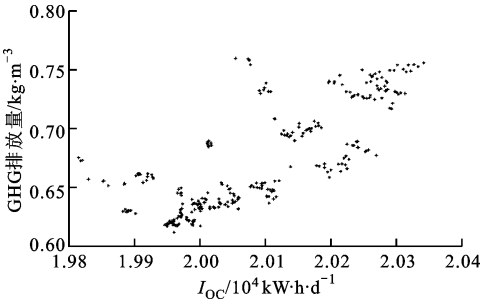
(a)出水水质、操作成本和 GHG 排放优化结果的三维关系



(b)出水水质和操作成本的关系



(c)温室气体排放与出水水质的关系



(d)温室气体排放与操作成本的关系

图 3 优化结果

图 3 是 Improved-NSGA-II 在求解污水处理性能指标运行 10 次较好结果的关系图。图 3a 显示的是 3 个优化目标的 pareto 前沿面。因多目标优化得到的是非劣最优解集, 所以沿着 3 个优化目标均减小的方向在 Pareto front 上选取了 3 组参考非劣最优解, 如表 5 所示, 表 5 解对应的决策变量值如表

6 所示。

表 5 由图 3a 选取的最优解

组	$I_{\text{Eq}}/\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$	$I_{\text{OC}}/\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{d}^{-1}$	GHG 排放量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
1	6 489	20 040	0.651 2
2	6 858	20 030	0.654 1
3	7 597	20 010	0.645 7

表 6 表 5 解对应的决策变量值

组	$k_{\text{la}3}/\text{d}^{-1}$	$k_{\text{la}4}/\text{d}^{-1}$	$k_{\text{la}5}/\text{d}^{-1}$	$Q_{\text{w}}/\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	$Q_{\text{intr}}/\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$
1	15	152	19	757	57 860
2	96	21	58	796	53 714
3	59	66	9	654	53 405

三维关系图分析起来较为复杂,并不能直观看出各目标之间的相互关系,可根据 2 个目标之间的关系进行分析。由图 3 可得,当 I_{Eq} 逐渐增大时, I_{OC} 逐渐减小;当 I_{Eq} 逐渐减小时, I_{OC} 逐渐增大。这二者不是矛盾关系,可以在不增加 OCI 的情况下减少 GHG 排放,或者说,减少 GHG 排放不会增加 OCI,但会使得出水质量指标下降。优化结果表明了多个优化目标之间的冲突关系,在操作变量值选取的时候可以根据优化目标的重要性进行权衡选择。

4 结 论

本文将污水处理过程温室气体排放作为污水处理厂性能指标之一,与传统的操作成本指数及出水水质指标构成污水处理过程的多目标问题,然后利用改进的非支配排序遗传算法对多目标优化问题进行求解。在所建 BSM2-e 平台上进行仿真,优化结果表明:污水处理过程的操作成本指数 OCI 和出水质量指标 EQI 相互冲突,减小 OCI 将带来出水质量的下降;GHG 排放与 EQI 是两个冲突指标,出水质量指标的提高必将产生更多的温室气体排放;GHG 排放与 OCI 这两个指标不冲突,在不增加操作成本的情况下,可以减少 GHG 排放,但是会带来出水质量的下降。这些结果对于污水处理厂权衡各个优化目标和确定操作变量具有较好的指导意义。

参考文献:

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [EB/OL]. [2016-08-10]. <http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.
[2] 徐恭贤, 韩雪. 非线性污水处理过程的多目标优化[J]. 化工学报, 2013, 64(10): 3665-3672.

XU Gongxian, HAN Xue. Multi-objective optimization of nonlinear wastewater treatment process [J]. CIESC Journal, 2013, 64(10): 3665-3672.
[3] 于腾, 曹萃文, 顾幸生, 等. 基于多目标文化差分进化算法的污水处理厂活性污泥单元多目标操作优化[J]. 计算机与应用化学, 2016, 33(1): 1-9.
YU Teng, CAO Cuiwen, GU Xingsheng, et al. Multi-objective optimizing operational parameters for an activated sludge unit of a wastewater treatment plant using multi-objective cultural differential evolution algorithm [J]. Computers and Applied Chemistry, 2016, 33(1): 1-9.
[4] SCHAFFER J D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms [C]// Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications. New York, USA: ACM, 1985: 93-100.
[5] ZITZLER E, THIELE L. Multi-objective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3(4): 257-271.
[6] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
[7] LUO B, ZHENG J H, XIE J L, et al. Dynamic crowding distance? a new diversity maintenance strategy for MOEAs [C]// Proceedings of the International Conference on Natural Computation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 580-585.
[8] FU Y P, HUANG M, WANG H F, et al. An improved NSGA-II to solve multi-objective optimization problem [C]// The 26th Chinese Control and Decision Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1037-1040.
[9] JEPPSSON U, ROSÉN C, ALEX J, et al. Towards a benchmark simulation model for plant-wide control strategy performance evaluation of WWTPs [J]. Water Science and Technology, 2006, 53(1): 287-295.
[10] SWEETAPPLE C, FU G, BUTLER D. Identifying sensitive sources and key control handles for the reduction of greenhouse gas emissions from wastewater treatment [J]. Water Research, 2014, 62(10): 249-259.
[11] OTTERPOHL R, FREUND M. Dynamic models for clarifiers of activated sludge plants with dry and wet weather flows [J]. Water Science and Technology, 1992, 26(5/6): 1391-1400.

- [12] HENZE M, GRADY JR C P L, GUJER W, et al. Activated sludge model: IAWPRC scientific and technical report No.1 [R]. London, UK: IAWPRC, 1987.
- [13] TAKÁCS I, PATRY G, NOLASCO D. A dynamic model of the clarification thickening process [J]. Water Research, 1991, 25(10): 1263-1271.
- [14] SWEETAPPLE C, FU G, BUTLER D. Identifying key sources of uncertainty in the modeling of greenhouse gas emissions from wastewater treatment [J]. Water Research, 2013, 47(13): 4652-4665.
- [15] BRIDLE T, SHAW A, COOPER S, et al. Estimation of greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants [C]// Proceedings IWA World Water Congress. London, UK: IWA Publishing, 2008: 7-12.
- [16] ZITZLER E, DEB K, THIELE L. Comparison of multi-objective evolutionary algorithms: empirical results [J]. Evolutionary Computation, 2000, 8(2): 173-195.
- [17] VELDHUIZEN D A V. Multiobjective evolutionary algorithms: classifications, analyses, and new innovations [J]. Evolutionary Computation, 1999, 8(2): 125-147.
- [18] SCHOTT J R. Fault tolerant design using single and multicriteria genetic algorithm optimization [J]. Cellular Immunology, 1995, 37(1): 1-13.

(编辑 赵炜 葛赵青)

(上接第91页)

- [4] 邱昕洋, 张光辉, 秦大同. 钢制平面蜗轮传动弹流润滑分析 [J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2010, 33(3): 24-29.
- QIU Xin-yang, ZHANG Guang-hui, QIN Da-dong, et al. Analysis of elastohydrodynamic lubrication of steel planar worm gear drive [J]. Journal of Chongqing University (Nature Science Edition), 2010, 33(3): 24-29.
- [5] 许立忠, 杨育林, 黄真. 超环面行星蜗杆传动弹流润滑状态研究 [J]. 机械工程学报, 2002, 38(9): 114-117.
- XU Lizhong, YANG Yulin, HUANG Zhen, et al. EHL condition for toroidal drive [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(9): 114-117.
- [6] 齐麟, 张亚雄, 胡松春. 蜗杆传动设计: 下册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 272-276.
- [7] 吴序堂. 齿轮啮合原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982: 145-152.
- [8] 温诗铸, 杨沛然. 弹性流体动力润滑 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990: 71-129.
- [9] 王进戈, 邓星桥. 两段式包络环面端面啮合蜗杆传动装置: 201310398100. X [P]. 2014-03-19.
- [10] 邱昕洋. 钢制变齿厚平面蜗轮包络环面蜗杆传动的关键技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010: 69-78.
- [11] 陈兵奎, 李朝阳, 曾强, 等. 新型空间凸轮活齿传动的弹性动力润滑分析 [J]. 润滑与密封, 2004(1): 35-36.
- CHEN Bingkui, LI Chaoyang, ZENG Qiang, et al. Elastohydrodynamic lubrication analysis on new spatial cam sliding tooth gearing transmission devices [J]. Lubrication Engineering, 2004(1): 35-36.
- [12] 张光辉, 王朝晋. 活动标架的应用及对 Baxter 诱导法曲率公式的改进 [J]. 重庆大学学报, 1983(2): 4-15.
- ZHANG Guanghui, WANG Chaojin. The application of the live-coordinates frame and improvement of the Baxter's formula of the inductive normal curvature [J]. Journal of Chongqing University, 1983(2): 4-15.
- [13] CHEN Yong-hong. A novel enveloping worm pair via employing the conjugating planar internal gear as counterpart [J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 67(4): 17-31.
- [14] 杨捷, 王进戈, 邓星桥, 等. 平面一次包络端面啮合环面蜗杆 3 维齿廓的理论研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(6): 179-184.
- YANG Jie, WANG Jing, DENG Xingqiao, et al. Theoretical research on the 3D-tooth-profile of the planar enveloping end face meshing engagement toroidal worm [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(6): 179-184.
- [15] 韩兴, 薛冉, 李昌. 等温点接触弹流润滑典型特征的数值分析 [J]. 机械传动, 2011, 35(2): 48-51.
- HAN Xing, XUE Ran, LI Chang, et al. Numerical analysis of EHL typical characteristic of isothermal point contact [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2011, 35(2): 48-51.
- [16] 成大先. 机械设计手册: 第三卷 [M]. 5 版. 北京: 化学工业出版社, 2008: 1250-1256.
- [17] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2002: 350-363.
- [18] 王进戈. 滚锥包络环面蜗杆传动 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2002: 165-188.

(编辑 葛赵青)