

大数据技术在高校污水MBR膜寿命预测的应用

——以西安思源学院为例

李东, 张学梅, 付波, 秦宝兰, 马青华

西安思源学院, 陕西 西安

收稿日期: 2021年12月26日; 录用日期: 2022年1月16日; 发布日期: 2022年1月29日

摘要

采用大数据均值聚类分析方法, 将西安思源学院再生水厂的A²/O-MBR系统3520天的运转数据进行处理。按照“日工业透水率”的定义, 计算每个膜池的日工业透水率, 剔除五类异常点, 得到1#、2#、3#膜池的有效日工业透水率天数分别为2474天、2725天和2652天。将每25个有效日工业透水率划分为一个计算单元, 计算单元的算术平均值和标准偏差。将每个膜池的计算单元的算术平均值按次序排列, 并回归得工业透水率衰减方程。该直线方程的截距表示开始时工业透水率。该直线方程的负斜率意味着工业透水率随着操作时间的延长而不断衰减。根据每个膜池的工业透水率衰减方程, 可以确定1#、2#、3#膜池的工业透水率年衰减率分别是4.36%/年、4.10%/年和4.54%/年。

关键词

大数据技术, 日工业透水率, 有效日工业透水率, 工业透水率年衰减率

The MBR Membrane Life Prediction in Universities' Waste Water Treatment through Big Data Technology

—Taking Xi'an Siyuan University as an Example

Dong Li, Xuemei Zhang, Bo Fu, Baolan Qin, Qinghua Ma

Xi'an Siyuan University, Xi'an Shaanxi

Received: Dec. 26th, 2021; accepted: Jan. 16th, 2022; published: Jan. 29th, 2022

Abstract

The 3520 days operation data of the A²/O-MBR system of Xi'an Siyuan University has been processed using big data mean clustering analysis. The daily industrial permeability of each membrane pool was calculated according to the definition. After eliminating the five kinds of anomaly points, the effective daily industrial water permeability days of membrane tank 1#, 2# and 3# were 2474 days, 2725 days and 2652 days, respectively. The industrial water permeability of every 25 effective days was divided into a calculation unit, and the arithmetic mean and standard deviation of the unit were calculated. The arithmetic mean of the computing units for each membrane pool was arranged in order and returned to the industrial permeability decay equation. The intercept of the linear equation indicates the industrial permeability at the beginning. The negative slope of the linear equation implies that the industrial permeability is declining with the operating time. Based on the industrial permeability decay equation of each membrane pool, it can be determined that the annual industrial permeability rates of the 1#, 2#, and 3# membrane pools are 4.36%/Y, 4.10%/Y, and 4.54%/Y, respectively.

Keywords

Big Data Technology, Daily Industrial Permeability, Effective Daily Industrial Permeability, Annual Attenuation Rate of Industrial Permeability

Copyright © 2022 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

到目前为止, MBR 膜生物反应器仍然是大规模污水深度处理, 确保再生水中各种排放浓度指标达到国家标准的首选技术[1] [2] [3]。从 2011 年 9 月开始, 西安思源学院再生水厂的 A²/O-MBR 系统配备了必须的检测仪器、仪表和传感器, 完整记录系统运转过程中三个膜池每日的生产数据(进水流量、各膜池跨膜压差、抽吸泵频率, 产水浊度、pH 值、累计产水量等), 产生了海量的数据。已有利用大数据技术研究炼油数值[4] [5] [6]、解决乙烯裂解炉故障诊断[7] [8]、提高原油电脱盐[9] [10]、改进炼钢工艺[11] [12]、优化冷轧绩效[13] [14]的成功范例。但至目前为止, 鲜见通过大数据技术(如数据挖掘、数据分类、降维简化等)应用于高校 MBR 污水处理系统膜行为的研究。为此本文准备在对生产工艺理解的基础上, 采用大数据思维, 充分合理利用系统运转过程中从 2011 年 10 月 1 日到 2021 年 10 月 31 日三个膜池的数据, 分析工艺规律, 为解决现场存在的质量控制和工艺控制问题提供指导意见, 最终对高校污水 MBR 工艺的膜寿命作出预测。

2. A²/O-MBR 工艺

西安思源学院再生水厂 A²/O-MBR 工艺采用 PLC 自动控制, 实现了间歇进水功能, 气浮池、生物池、曝气系统、清洗系统的自动化控制[15] [16] [17] [18]。图 1 为 A²/O-MBR 工艺流程。

采用 5 mm 回旋式耙齿粗格栅主要处理较为粗大的杂质。调节池主要用于调节校园污水水质的波动, 以便在一定程度上稳定原水的水质。而 1 mm 转鼓式细格栅则是处理比较细小的杂质。而后依次进入厌

氧池、缺氧池、好氧池，经膜分离后得到出水。厌氧池和缺氧池内设潜流搅拌器，好氧池内设微孔曝气装置，在膜组件下面设穿孔曝气管，通过曝气为活性污泥供氧并实现对膜面污染物的擦洗。生物池 A²/O 工艺内，BOD、SS 和以各种形式存在的氮和磷将一并被去除，为后续 MBR 膜过滤减少污染。采用恒通量运行模式，膜通量维持在 16 L/(m²·h)。通过调整抽吸泵的频率来保证恒膜产水量。但当膜池跨膜压差达到 50 kPa 时，抽吸泵停止，强制该膜池进行必要清洗。厌氧池、缺氧池、好氧池和膜池的水力停留时间合计为 13 h，污泥停留时间为 30~50 d。PLC 自动控制面板上显示各个测量点的实时数据。每天早班的 8 点 30 分就将控制面板上显示的需要数据(进水流量、各膜池跨膜压差、抽吸泵频率，产水浊度、pH 值、累计产水量等)填入日报表中。日报表上交时，统计员将表中的数据输入计算机。将数据按化学工程中数据的功能与作用分为可调参数(Adjustable Parameter)、必控参数(Controllable Parameter)和参考参数(Reference Parameter)。根据思源 A²/O-MBR 再生水厂与膜寿命有直接关系的数据实际情况看，没有可调参数，一个必控参数(跨膜压差)，其余均为参考参数。

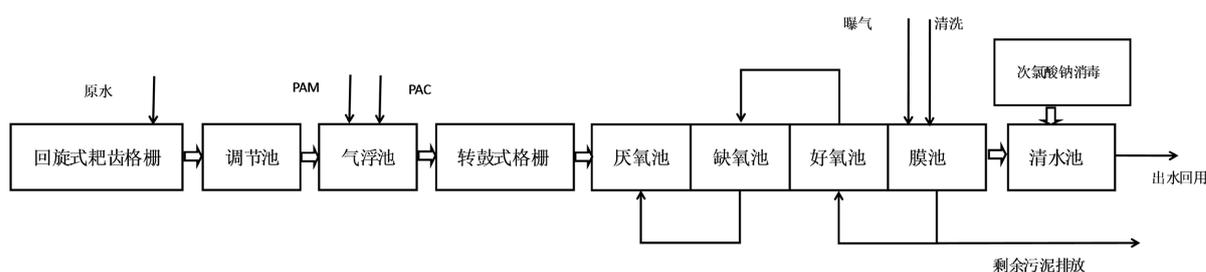


Figure 1. A²/O-MBR process flow

图 1. A²/O-MBR 工艺流程

3. 数据处理与计算

预测膜寿命的方法从资料上看共有四种[19] [20] [21] [22]，分别为① 以产水能力和水质判断、② 透水率衰减预测、③ 累积氯接触值法、和④ 膜性能检测法。而本文根据自己的数据采集方式、种类，创新性采取工业透水率年衰减法来预测高校污水 MBR 工艺的膜寿命。

3.1. 工业透水率

膜的水通量是单位时间内流经某单位膜面积的水量。常见实验室规模的透水率(Permeability)定义是单位面积(m²)单位时间(小时)单位压差(kPa)下的透水体积(L 升)，一般用英文“LMH”表示。而且还需要进行温度校准到标准的 20℃。因为透水率定义里的单位面积太小，单位时间太短，且温度校准计算复杂，使得这样的定义非常不适合西安思源学院再生水厂 A²/O-MBR 工艺的计算。新定义工业透水率(Industrial Permeability)来代替原先的透水率。工业透水率定义是单位面积(1000 m²)单位时间(d, 天)单位压差(kPa)下的产水体积(m³)，一般用英文“VMD”表示。思源 MBR 池里有 3 个膜组，每个膜组里的膜面积是 1800 m²。所以思源每个膜组的工业透水率就是将该膜组的每天产水量除以膜压差后再除以 1.8 可得。3 个膜组是分开计算。考虑到大工业化的 A²/O-MBR 实际运行寿命是在环境季节温度的影响下，而且是几年或近 10 年的数据处理，所以没有进行产水量的温度校准。每个膜组的每天产水量则是有当日的产水量减去前日的产水量。

3.2. 时间的计算

采用年为衰减时间的计量单位，是考虑到在包括系统运转成本的折旧计算中通常采用“年限平均法”。

即使在更为复杂的“工作量法”中所常见的按照行驶里程折旧和按照工作小时计算折旧,也需要计算为年折旧额。从2011年10月1日到2021年10月31日共计3651天。因为疫情,2020年1月8日到2020年5月19日停121天。有记录的天数为3520天,按一年有365天计算,相当于9.644年。

3.3. 日工业透水率的计算与异常点

首先计算每日工业透水率。如方程(1)所示,即将每日的产水量(m^3)除以当日的膜压差(kPa),再除以1.8。

$$\text{日工业透水率} = \frac{\text{产水量}(m^3)}{\text{膜压差}(kPa) * 1.8} \quad (1)$$

尽管3个膜池的数据量大,计算机的计算几秒钟就完成。因为系统运行维护操作(各类维护性清洗、化学在线清洗、物理人工维护清理),仪器的失灵、维护、修理以及记录数据的时间固定等客观原因,计算所得的MBR膜池日工业透水率一定会出现五种异常点:①产水量与膜压差都等于零;②产水量等于零;③膜压差等于零;④因为膜压差特别小造成日工业透水率异常大;⑤因为产水量特别小造成日工业透水率异常小。对于所有的异常点都一一剔除后就产生了各膜池“有效日工业透水率”。将各膜池“有效日工业透水率”的天数列于表1。

Table 1. Days of “effective daily industrial water permeability”

表 1. “有效日工业透水率”的天数

1#膜池	2#膜池	3#膜池
2474	2725	2652

很显然从每日工业透水率的天数剔除异常点后使得“有效日工业透水率”的天数降低。同时,不同的膜池会产生不同的“有效日工业透水率”的天数。同时这些天数完全是按膜池的运转天数的增加而排列的。也就是说,对于同一个膜池,数值小的一定比数值大的早。

4. 结果与讨论

4.1. 计算单元划分与统计计算

将每25个有效日工业透水率划分为一个计算单元。表2列出各膜池计算单元数。

Table 2. Number of calculation units of each membrane tank

表 2. 各膜池计算单元数

1#膜池	2#膜池	3#膜池
98	109	106

按统计学的定义,每个单元内计算算术平均值和标准偏差。

$$\text{算术平均值} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (2)$$

其中: x_i ——每天的数值; n ——记录的天数。

$$\text{标准偏差} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \text{算术平均值})^2}{n-1}} \quad (3)$$

标准偏差是度量数据分布的分散程度，即用于衡量数据值偏离算术平均值的程度。标准偏差越小，这些值偏离平均值就越少，反之亦然。

这样得到一系列的单元算术平均值和单元标准偏差。而且前后单元算术平均值之间的间隔都是 25 个有效日工业透水率，无一例外。

4.2. 单元依序线性回归与工业透水率年衰减法的换算

将一个膜池的一系列单元算术平均值依序放入一栏作为 y 值。将 $1, 2, 3, \dots, n$ 依序放入另一栏作为 x 值。作图，并添加线性趋势线，列出公式。得一直线方程，称之为“工业透水率衰减方程”。各膜池的工业透水率衰减方程列于表 3。

Table 3. Attenuation equation of industrial permeability of each membrane tank
表 3. 各膜池的工业透水率衰减方程

1#膜池	2#膜池	3#膜池
$y = -0.0771x + 17.988$	$y = -0.0643x + 17.733$	$y = -0.0759x + 18.38$

现以 1#膜池的工业透水率衰减方程为例，说明几个重要的参数的意义，以及如何计算工业透水率年衰减率。

当 $x = 0$ 时，意味着 1#MBR 膜池还未开始启动。或者说是 1#MBR 膜池刚刚开始启动时的工业透水率。负的斜率意味着工业透水率是随着操作时间的延长而不断衰减。负的值意味着衰减的大小。因为在表 2 中已经显示 1#膜池共有 98 个计算单元。这意味着当 $x = 98$ 时， $-0.0771 \times 98 = 7.558$ 是所产生的总衰减量。总衰减率为 $7.558/17.988 = 42.02\%$ 。而且是在 3520 天，9.644 年，产生的这个总衰减率，那么 1#MBR 膜池的工业透水率年衰减率为 $0.4202/9.644 = 4.36\%$ 。以此类推，可以算出 3 个膜池的工业透水率年衰减率。将三个膜池的工业透水率年衰减率列于表 4。

Table 4. Annual attenuation rate of industrial permeability of three membrane tanks
表 4. 三个膜池的工业透水率年衰减率

1#膜池	2#膜池	3#膜池
4.36%/年	4.10%/年	4.54%/年

4.3. 膜寿命预测

目前对 MBR 工艺膜寿命的定义比较宽泛。在《膜分离技术术语》(GB/T 20103-2006)中规定膜寿命是“在正常的使用条件下，膜或膜元件维持预定性能的时间”。《一体式膜生物反应器污水处理应用技术规程》(CECS152: 2003)写到膜寿命是“当膜的运行时间达到规定的使用寿命或在使用中造成损坏，化学清洗不能恢复其功能时”。各膜生产商对膜寿命的判断通常以膜系统的产水量或产水水质不能满足用户要求为准。以上三例均是定性文字的描述。目前也有两个关于膜寿命的定量定义。其一为《中空纤维膜生物反应器组器》(HJ2528-2012)规定“在设计运行条件下，膜元件使用寿命不低于 3 年”。其二为 Memcor 公司就 B30R 膜组件给出“最大累积氯接触值为 $1,000,000 \text{ ppm}\cdot\text{h}$ ”，用于限定在膜使用期限内膜能够承受的累积氯接触量从而限定膜寿命。从西安思源学院再生水厂的 A^2/O -MBR 系统安全运转 10 年以上的数据看，尽管系统的产水量的确会逐年降低，但出水的水质从未出现未达到设计要求。在质量满足

要求的前提下,膜寿命就转变成更换新膜要付一大笔钱的经济问题。所以只要运营商觉得再生水量仍可满足回用需求,且现时承担膜组件更换费用还无法实现,就仍然可以继续运行。

根据工业透水率衰减方程和工业透水率年衰减率可以进行两个重要的计算:设定衰减百分数的前提下,计算衰减年数;同时计算剩余工业透水率(Residue VMD, RVMD),见表 5。

Table 5. Attenuation years and remaining industrial permeability of three membrane tanks under different attenuation percentages

表 5. 不同衰减百分数下三个膜池的衰减年数及剩余工业透水率

衰减百分数	1#膜池		2#膜池		3#膜池	
	衰减年数	RVMD*	衰减年数	RVMD*	衰减年数	RVMD*
35%	8.03	11.692	8.54	11.526	7.71	11.947
40%	9.17	10.793	9.76	10.64	8.81	11.03
45%	10.32	9.893	10.98	9.753	9.91	10.11

RVMD*的量纲是每 1000 m² 每天每单位压差(kPa)下的产水体积(m³)。

5. 结语

采用大数据均值聚类分析方法,将西安思源学院再生水厂的 A²/O-MBR 系统从 2011 年 10 月 1 日到 2021 年 10 月 31 日,扣除疫情停运 121 天,3520 天的运转数据进行处理。

按照“日工业透水率”的定义,计算每个膜池的日工业透水率后,剔除五类异常点,得到按时间先后次序排列的有效日工业透水率天数。得到 1#膜池 2474 天,2#膜池 2725 天,3#膜池 2652 天。

将按时间先后次序排列的每 25 个有效日工业透水率划分为一个计算单元,计算单元的算术平均值和标准偏差。将每个膜池的计算单元的算术平均值按次序排列,并回归得工业透水率衰减方程。该直线方程的截距表示刚刚启动时的工业透水率。该直线方程的负斜率意味着工业透水率是随着操作时间的延长而不断衰减。负的值意味着衰减的大小。

根据每个膜池的工业透水率衰减方程,可以确定该膜池的工业透水率年衰减率,1#膜池 4.36%/年,2#膜池 4.10%/年,3#膜池 4.54%/年。

基金项目

陕西省水利厅科技计划项目。合同名称:高校中水回用系统技术标准体系研究。合同编号:2021slkj-14。

参考文献

- [1] 杨学贵,肖晓文,孙雁,张亚宁. 昆明第四水质净化厂 MBR 工艺 7 年运行实践分析[J]. 中国给水排水, 2017, 33(14): 121-127.
- [2] 曾木海. 污水处理厂污水深度处理工艺综述与案例分析[J]. 净水技术, 2021, 40(5): 75-80+102.
- [3] 聂新宇,罗敏,刘慰,陈坤,陈玲芳,苟克勇,等. 无锡梅村污水处理厂 MBR 工艺多年运行效果分析[J]. 给水排水, 2017, 43(1): 25-27.
- [4] 许友好. 我国催化裂化工艺技术进展[J]. 中国科学: 化学, 2014, 44(1): 13-24.
- [5] 闫平祥,刘植昌,高金森,徐春明,于春光,王殿芬. 重油催化裂化工艺的新进展[J]. 当代化工, 2004, 33(3): 136-140.
- [6] 蓝兴英,高金森,徐春明,张红梅. 乙烯管式裂解炉的数值模拟[J]. 过程工程学报, 2004, 4(3): 221-227.

- [7] 张晓丹. 基于免疫克隆算法的 LVQ 神经网络研究及其在化工工业故障诊断过程中的应用[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- [8] 何细藕. 乙烯裂解炉技术进展[J]. 现代化工, 2001, 21(9): 13-17.
- [9] 郭超. 决策树方法在提高电脱盐效果中的应用[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(10): 2372-2375.
- [10] 梁志勇, 孙甲, 刘政, 李江. 原油电脱盐脱水技术的研究现状及进展[J]. 石油和化工设备, 2012, 15(8): 26-29.
- [11] 宋辉. 聚类分析系统的设计与实现及在工业中的应用[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津科技大学, 2004.
- [12] 薛见新. 炼钢连铸过程温度流优化的设计与分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2010.
- [13] 曹剑钊, 姬亚锋, 彭文, 丁敬国, 胡显国, 张殿华. 轧制过程自动化实时数据采集与离线分析系统[J]. 中国冶金, 2014(2): 40-43.
- [14] 王彦辉, 高雷, 刘海超, 郭立伟, 刘维兆, 薛威. 20 辊单机架冷轧硅钢生产工艺动态数据分析系统[J]. 内蒙古科技大学学报, 2015, 34(4): 374-377+400.
- [15] Zhang, X., Hao, J., Ma, Q., Li, D., Fu, B., *et al.* (2020) Comprehensive Analysis of 9-Year Running Data of A²O-MBR in Xi'an Siyuan University. *Meteorological and Environmental Research*, **11**, 139-143.
- [16] 李东, 郝静远, 马青华, 张学梅, 付波, 秦宝兰. MBR 工艺的长期运行数据分析[J]. 净水技术, 2019, 38(6): 92-96+130.
- [17] 李东, 付波, 秦宝兰, 等. 西安思源学院污水处理再生水回用系统的决算和运行成本分析[J]. 水污染及处理, 2022, 10(1): 26-34.
- [18] 李东, 张洪生, 付波, 秦宝兰, 郝静远. 5 年 A²O/MBR 中水回用系统经济调查分析——以西安思源学院为例[J]. 给水排水, 2017, 43(S1): 163-166.
- [19] 王晓爽, 高金华, 艾冰, 付强, 常江, 甘一萍. 再生水厂 MBR 工艺的膜寿命评价[J]. 净水技术, 2014, 33(5): 24-27+37.
- [20] 许颖, 雷霆, 孙剑宇, 夏俊林, 薛涛, 俞开昌, 等. 城市污水膜生物反应器处理工程中膜寿命预测[J]. 中国给水排水, 2015, 31(5): 34-39.
- [21] 陈俊平, 杨昌柱, 葛守飞, 熊丽. 膜生物反应器在污水处理过程中的膜污染控制[J]. 净水技术, 2005, 24(3): 38-44.
- [22] Fenu, A., De Wilde, W., Gaertner, M., Weemaes, M., de Gueldre, G., *et al.* (2012) Elaborating the Membrane Life Concept in a Full Scale Hollow-Fibers MBR. *Journal of Membrane Science*, **421-422**, 349-354.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.08.001>