

用年工业透水率衰减预测MBR膜寿命

——以西安思源学院超十年运转为例

张学梅¹, 李东¹, 马青华¹, 付波², 秦宝兰², 郝静远^{1,3}

¹西安思源学院能源及化工大数据应用教学研究中心, 陕西 西安

²西安思源学院再生水厂, 陕西 西安

³西安交通大学化工技术学院, 陕西 西安

收稿日期: 2022年6月8日; 录用日期: 2022年7月8日; 发布日期: 2022年7月19日

摘要

定义“工业透水率VMD”为1000 m²单位膜面积在1天单位时间和1 kPa单位膜压差下的m³透水体积。直接采用西安思源学院再生水厂3520天A²/O-MBR系统每日运转的日产水量和膜压差大数据依序计算VMD。剔除五类异常点后得到71%~78%有效VMD。人为地将每25个有效VMD划分为一个组单元, 计算组单元的VMD算术平均值。拟合组VMD算术平均值与组单元得直线型工业透水率衰减方程。因为表示VMD算术平均值与组单元比较发散, 所以按“年”为划分界限对组单元进行第二次降维得“年单元”, 并计算年单元的VMD算术平均值。拟合年VMD算术平均值与年单元得幂型工业透水率衰减方程。用前期的衰减方程预测后一年的工业透水率, 用当期的衰减方程实测后一年的工业透水率。定义误差比为预测值与实测值的相对大小。计算年工业透水率衰减是直接、简单且方便。所得结果既可以预测膜寿命, 又可以自我学习不断优化, 还得出预测时段不应小于三年, 最好选择四到五年为宜。

关键词

工业透水率, 有效工业透水率, 组单元, 年单元, 膜寿命预测

Prediction of MBR Membrane Lifetime by Annual Decay of Industrial Permeability

—Taking Xi'an Siyuan University's More than Ten Years Operation Data as an Example

Xuemei Zhang¹, Dong Li¹, Qinghua Ma¹, Bo Fu², Baolan Qin², Jingyuan Hao^{1,3}

¹Energy and Chemical Engineering Research Center, Xi'an Siyuan University, Xi'an Shaanxi

²Regenerative Water Plant, Xi'an Siyuan University, Xi'an Shaanxi

³School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 8th, 2022; accepted: Jul. 8th, 2022; published: Jul. 19th, 2022

文章引用: 张学梅, 李东, 马青华, 付波, 秦宝兰, 郝静远. 用年工业透水率衰减预测 MBR 膜寿命[J]. 水污染及处理, 2022, 10(3): 119-128. DOI: 10.12677/wpt.2022.103018

Abstract

Defining “industrial permeability *VMD*” as the m^3 permeable volume of 1000 m^2 membrane area at 1 day and 1 kPa cross-membrane pressure difference. The *VMD* is directly calculated by using the daily water yield and cross-membrane pressure difference of 3520 days of Xi’an Siyuan A^2/O -MBR system. After excluding five anomalies, 71% to 78% of effective industrial permeability was obtained. Each 25 effective industrial permeability was artificially divided into a group unit by the membrane pool, calculating the *VMD* arithmetic average of the unit. A linear regressive equation can be got through the *VMD* arithmetic mean and the group unit. Because it indicates that the arithmetic mean value of *VMD* is more divergent from the group unit, the group unit is reduced into the annual unit. A power equation is fitted the annual *VMD* arithmetic mean and the annual unit. The industrial permeability in the following year is predicted by the previous attenuation equation, and the industrial permeability in the following year is measured by the current decay equation. The error ratio is defined as the relative size of the predicted and measured values. Calculating the annual industrial permeability attenuation is straightforward, simple, and convenient. The results can not only predict the membrane life, but also continuously optimize self-learning. It also shows that the prediction period should not be less than three years, so it is best to choose four to five years.

Keywords

Industrial Permeability, Effective Industrial Permeability, Group Unit, Annual Unit, Membrane Life Prediction

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

MBR 膜的寿命预测和预防性维护是 A^2/O -MBR (Anaerobic-Anoxic-Aerobic Membrane Bio-Reactor) 系统设备全生命周期管理中的重要内容[1] [2] [3]。对于一种结合活性污泥法和一体化浸没式膜分离的污水深度处理技术来说,随着现代控制系统自动化程度的提高,其核心部件 MBR 膜(简称膜)的可靠性、安全性和经济性受到越来越多的关注。膜寿命的预测和预防性维护等智能诊断、决策已逐渐成为设备全生命周期管理和追求效益最重要的途径。 A^2/O -MBR 膜系统从运转一开始,经过了在确定的工作环境、选型设计、安装施工、运行管理和膜产品性能等现实条件下的调试磨合后就达到最佳水平。随着运转时间逐年增加,膜池的产水量会逐渐下降[4]-[10]。这种产水量的下降说明膜在运转过程中不可避免地发生有形无形磨损,直至更换新膜。膜与其它系统内的固定资产(如机械设备、建筑物)是不同。膜有资产原值,但却没有资产残值(residual value)。如果膜寿命到了,就必须花一大笔钱购买新膜后将旧膜更换下来。所以膜寿命预测涉及最佳更换时间、资金和系统所必须的污水处理量下限等几种关系的平衡,既是技术问题更是经济问题。同时,膜寿命预测和智能诊断及决策一样是以实际生产过程中产生的海量数据为基础的。当然目前已有几种膜寿命预测方法,但从这几种膜寿命预测方法的样品量、方法的合理性、和方法的实用性等方面存在一定不足,最为关键的是没有实际的例子证明这些膜寿命预测方法的有效性[11] [12] [13] [14] [15]。为此本文以西安思源学院(简称思源)超十年 A^2/O -MBR 膜系统安全运转为例,提出一种全新的

膜寿命预测方法，并与现存的其它几种膜寿命预测方法进行的合理性和实用性比较，为如何预测膜寿命的判定方法提供借鉴。

2. 思源 A²/O-MBR 工艺及变化

2.1. A²/O-MBR 现工艺和数据采集

思源采用日本旭化成公司的偏氟乙烯(PVDF)中空纤维柱式膜组件[16]。于 2011 年 9 月建成了 A²/O-MBR 膜再生水厂,包括日处理量为 4000 m³ 的土建基础设施,第一期安装了处理量为 2000 m³/d (1[#]、2[#]、和 3[#]膜池)的处理设备并投入恒通量模式运行。每个膜池中安放膜组件 72 支,膜面积为 1800 m²。通过调整抽吸泵的频率来保证恒通量运行。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。第一期从开始到现在一直运转没有更换膜。2019 年 11 月思源对预留的另外 2000 m³/d 第二期膜处理设施(4[#]、5[#]、和 6[#]膜池)进行设备安装、调试、使用。再生水厂每天早班的 8 点 30 分将控制面板上显示各膜池的数据(进水流量、跨膜压差、抽吸泵频率,产水浊度、pH 值、温度、累计产水量等)填入纸质日报表中。后将日报表中的数据输入再生水厂办公室的计算机[17] [18] [19] [20] [21]。图 1 为 A²/O-MBR 再生水厂现工艺流程。学院的生活污水通过管道输送到再生水厂,经过回旋式耙齿格栅去除大的悬浮物进入调节池,使污水均匀的进入气浮池,气浮池的主要作用是降低污水中的油含量,减少油污对膜池的污染。通过转鼓式格栅除掉一些大的杂质后进入到生化池(厌氧池、缺氧池、好氧池)中进行处理,生化池后再进入膜池再处理,膜池出来的水即为产水,随后再回用到学院进行再次利用。

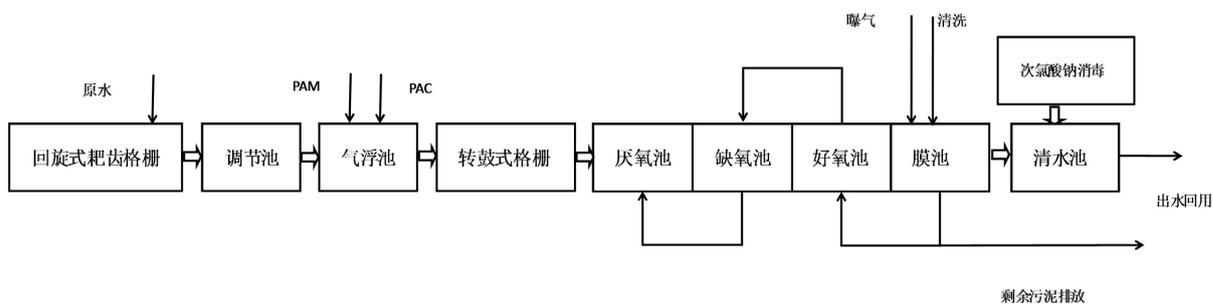


Figure 1. A²/O-MBR process flow of Siyuan reclaimed water plant

图 1. 思源再生水厂的 A²/O-MBR 现工艺流程

2.2. 膜寿命研究的时间

为了膜寿命研究,选择第一期膜池从 2011 年 10 月 1 日开始到 2021 年 10 月 31 日截止的共计 3651 天运转数据。扣除从 2020 年 1 月 8 日到 2020 年 5 月 19 日因为疫情停运 121 天,实际运转天数为 3520 天,9.644 年。

2.3. 运转中的优化历史

思源再生水厂第一期膜运转的 9.644 年中进行过一些设备改造或清洗工艺优化,其中有:

① 增加气浮池。2020 年 11 月,思源再生水厂在调节池和转鼓式格栅之间,加入两台气浮池。气浮池内加入 PAM 聚丙烯酰胺和 PAC 聚合氯化铝。现仍在使用。

② 优化维护性清洗(EFM)工艺。

③ 优化膜组件进行化学在线清洗(CIP)的顺序。

④ 人工物理维护清理毛发。

3. 膜寿命的预测

目前对膜寿命的进行定性描述较多,如膜寿命是“在正常的使用条件下,膜或膜元件维持预定性能的时间”[11],或“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”[12]。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。目前也有两个关于膜寿命的定量描述。一为“在设计运行条件下,膜元件使用寿命不低于3年”[13]。其二为Memcor公司就B30R膜组件给出“最大累积氯接触值为1百万ppm·h”。

3.1. 已有膜寿命预测方法

① 化学在线清洗前与后的透水率数据来预测膜寿命[4] [5] [7]; Fenu等人以及王晓爽和许颖都是应用该方法。该方法的不足是数据量少,且透水率的计算和温度校准与工厂的实际数据之间有复杂的换算。根据这种方法的要求,只有化学在线清洗前与后的透水率可以用于预测膜寿命,而化学在线清洗前与后之间所有透水率不可以用于预测膜寿命。

② 膜供应商通常会用膜的最大累积氯接触值来衡量在膜使用期限内膜能够承受的累积氯接触量。Memcor公司就B30R膜组件给出的最大累积氯接触值为1百万ppm·h。实际操作中,膜清洗只是影响膜寿命的一个重要因素,但却不是唯一的因素。用膜最大累积氯接触值来成功预测膜寿命的例子几乎没有。

③ 膜性能检测是对膜所处状态进行量化的手段,能够最直接表征膜的优劣,进而根据膜性能判断其是否能够继续使用。膜性能检测主要受到样品检测量(几根到几十根)和取样代表性的影响以及膜性能(纯水通量、机械强度、表面形态)并没有具体的标准规定其在应用中的限值,所以仅能作为评估膜寿命的一种辅助手段。这类方法的不足主要是取样的数量很少且是离线测量而非在线测量。

④ 国家标准也规定了中空纤维使用寿命评价办法[15]。该方法主要受到样品检测量和取样代表性的影响,加上温度校准、实验室操作等要求,特别是测试条件为恒压测量与膜系统是在恒通量操作属于两种不同的方式,所以仅能作为理论评估膜寿命的手段。

综上所述,运转数据的量、数据来源的合理性、以及实用性决定了膜寿命预测的成败。

3.2. 工业透水率

作者首先借鉴国家标准“比通量(specific flux)”[15]中产水量与跨膜压差有关连的常识,同时考虑常见的透水率(water permeability)不适合大工业计算的事实,定义“工业透水率(industrial water permeability)”为1000 m²单位膜面积在1天单位时间和1 kPa单位压差下的透水体积(立方米m³),用英文“VMD”表示。工业透水率的定义有三大好处:

① 适合大工业规模的计算;每个思源膜池里的膜面积是1800 m²。所以思源每个膜组的VMD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。VMD比透水率还有“无需温度校准”的巨大优势。

② 可以从控制室的计算机上直接获取全过程(9.644年)与实际操作有密切关联性的两个重要记录量(产水量、跨膜压差)的数据。

③ 实际操作的有密切关联性。在膜运行中,有两个外界的因素是在一年中因时因地会发生变化。第一个是室外温度,第二个是降雨量。如果年与年地比较膜运转状态,这两个外界的因素的影响会因为系统误差而抵消。

综上所述,采用VMD就为智能诊断与决策数据的量、合理性、和实用性提供了保证。

3.3. 有效工业透水率

因为各类系统运行维护操作、仪器的失灵、修理以及记录数据的时间固定等客观原因,所以全过程

工业透水率出现五类异常点：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工业透水率异常大；⑤ 因为产水量特别小造成工业透水率异常小。一一剔除所有的异常点后就产生了各膜池“有效工业透水率”。在剔除操作中，依序是强制性要求。第一期的三个膜池的有效 *VMD* 的个数列于表 1。根据思源再生水厂第一期 3 个膜池的实际数据看，有效 *VMD* 的总天数约占 *VMD* 的总天数的 71%~78%。

Table 1. Data of three membrane tanks in phase I

表 1. 第一期三个膜池的各项数据

项目	1 [#] 膜池	2 [#] 膜池	3 [#] 膜池
运转天数/天	3520	3520	3520
有效 <i>VMD</i> /天	2474	2725	2652
组单元数/个	98	109	106
年单元数/个	9.644	9.644	9.644

3.4. 计算单元划分与统计计算

现在进行大数据计算的分类降维，即“人为地”确定 25 个有效 *VMD* 划为一组，并称为“组单元”。第一期的三个膜池的组单元列于表 1。按统计数学的方法，计算每个组单元内的 *VMD* 算术平均值。

$$VMD\text{算术平均值} = \frac{\sum_{i=1}^{25} x_i}{25} \quad (1)$$

式中：小写英文字母 x_i ——第 i 个有效工业透水率。

3.5. 年单元划分与统计计算

显而易见，每个膜池的组单元数与运转年数有特定的比例关系。如表 1 的数据显示 1[#]膜池共有 98 个组单元，而 98 个组单元所代表的运转时间是 9.644 年。所以对 1[#]膜池而言， $98/9.644 = 10.16$ 个组单元等于 1 年。而对于 2[#]膜池， $109/9.644 = 11.30$ 个组单元等于 1 年。而对于 3[#]膜池， $106/9.644 = 10.99$ 个组单元等于 1 年。

第二次就将组单元按“年”降维至 10 个“年单元”，并计算年单元算术平均值。

$$VMD\text{年单元算术平均值} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2)$$

式中：小写英文字母 x_i ——为年单元中第 i 个组单元的算术平均值。在方程(2)中， n 代表组单元数。

1[#]膜池不同运转年数的 *VMD* 年算术平均值和组单元数列于表 2。

Table 2. Different operation years for annual arithmetic mean value of *VMD* and number of group units of 1[#] membrane tank

表 2. 1[#]膜池不同运转年数的 *VMD* 年算术平均值和组单元数

运转年数	年算术平均值	n/个	运转年数	年算术平均值	n/个
1	19.071	10	6	15.573	61
2	17.279	20	7	15.421	72
3	16.278	30	8	15.056	82
4	16.058	41	9	14.574	92
5	15.731	51	9.644	14.240	98

根据表 2 的数据可以得到 VMD 年算术平均值与运转全过程的关系, 如图 2 所示。

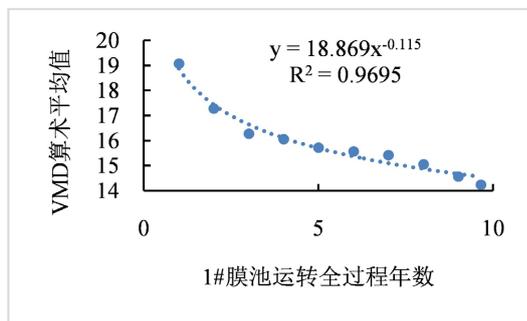


Figure 2. Relationship between VMD arithmetic mean and operating years

图 2. VMD 算术平均值与运转年数的关系

根据图 2 中 VMD 算术平均值与运转年数的拟合数学方程为:

$$VMD \text{ 算术平均值} = q * \text{运转年数}^r \quad (3)$$

式中:

q 为第一年 VMD 算术平均值;

r 为幂, 从图 1 中的拟合方程可以看出幂为负值, 也就是说, VMD 年算术平均值随着运转年数的增加而减少。所以可以定义为工业透水率年衰减方程。

方程(3)在数学上要求至少有 3 个点。换句话说, 要想预测在现实条件下 MBR 膜的寿命, 系统最少需要运转三年。

3.6. 预测与实测

现以 1#膜池为例对如何进行 MBR 膜寿命的预测和检验加以说明。图 3~5 分别显示 1#膜池三年到五年的实际运转 VMD 算术平均值与运转年数的衰减方程。

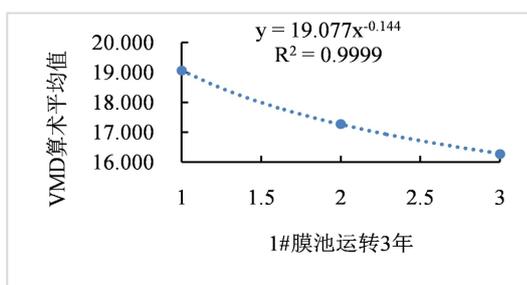


Figure 3. Relationship between VMD arithmetic mean and 3 years of operation

图 3. VMD 算术平均值与运转 3 年的关系

因为西安思源学院再生水厂的 MBR 系统已经安全有效地运转了 10 年, 它所积累的 10 年数据都是实际数据, 所以可以根据方程(3)利用前期运转数据预测后期运转数据, 也可以利用当期运转数据检验前期运转数据的预测。现以 1#膜池的数据为例, 采用问与答的方式, 说明如何计算预测值? 如何计算实测值? 和如何比较这些值的相对大小?

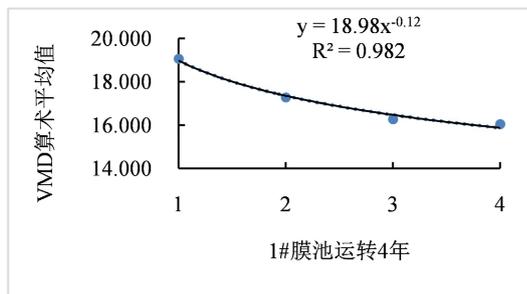


Figure 4. Relationship between VMD arithmetic mean and 4 years of operation

图 4. VMD 算术平均值与运转 4 年的关系

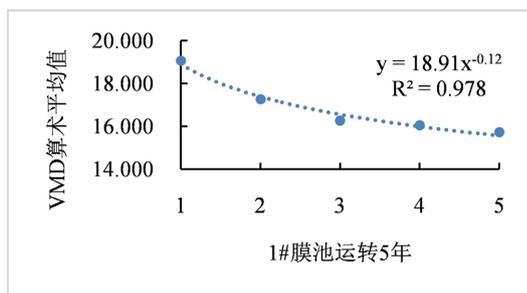


Figure 5. Relationship between VMD arithmetic mean and 5 years of operation

图 5. VMD 算术平均值与运转 5 年的关系

问题 1: 已经运转了 3 年, 如何预测第 4 年的运转情况?

答: 采用图 3 中已运转 3 年的衰减方程 $y = 19.077x^{-0.144}$, 将 $x = 4$ 代入即得 $y = 15.625$ 。这是第 4 年的预测值。

问题 2: 第 4 年的实际运转情况如何?

答: 采用图 4 中已运转 4 年的衰减方程 $y = 18.981x^{-0.129}$, 将 $x = 4$ 代入即得 $y = 15.873$ 。这是第 4 年的实测值。

问题 3: 第 4 年的实测值与预测值是否接近?

答: 现在定义一个比值, 误差比, 来衡量对于某个特定时间的预测值与实测值接近程度。

$$\text{误差比} = \left| \frac{\text{预测值} - \text{实测值}}{\text{实测值}} \right| \times 100\% \quad (4)$$

通过计算得第 4 年的实测值与预测值的误差比为 1.56%。误差比越小的时段, 就代表预测值越接近实测值。可以用误差比选择合适的预测时段。

问题 4: 已经运转了 4 年, 如何预测第 5 年的运转情况?

答: 采用图 4 中已运转 4 年的衰减方程 $y = 18.981x^{-0.129}$, 将 $x = 5$ 代入即得 $y = 15.422$ 。这是第 5 年的预测值。

问题 5: 第 5 年的实际运转情况如何?

答: 采用图 5 中已运转 5 年的衰减方程 $y = 18.911x^{-0.121}$, 将 $x = 5$ 代入即得 $y = 15.565$ 。这是第 5 年的实测值。

问题 6: 第 5 年的实测值与预测值是否接近?

答：通过计算得第 5 年的实测值与预测值的误差比为 0.92%。

但如果已经运转了 4 年，要预测第 4.5 年的 VMD ，则采用类似图 4 中运转 4 年的衰减方程，将 $x = 4.5$ 代入即可。表 3 列出根据表 2 数据计算出 VMD 算术平均值与运转年数的幂方程的相关数据。

Table 3. Power attenuation equation and related calculation for different operating years

表 3. 不同运转年数的幂衰减方程和相关计算

运转年数	q	r	年衰减率/%	预测下一年 VMD	实测下一年 VMD	误差比/%
3	19.077	-0.144	4.88	15.625	15.873	1.56
4	18.981	-0.129	4.09	15.422	15.565	0.92
5	18.911	-0.121	3.54	15.225	15.354	0.84
6	18.834	-0.114	3.08			

同样可以得出预测时段不应小于三年，应该选择四到五年为宜的结论。

3.7. 工业透水率与产水量的关系

在计划更换新膜前，经营者最为关心的问题通常有，在确定的工作环境、水源条件、运行管理和膜产品性能等现实条件下，① 膜组件开始时的产水量？② 衰减到某一产水量所需时间(年)？和③ 衰减到某一产水量时剩余膜池运行性能如何？等。因为这些问题涉及到经济层面的资金运作以及性价比决策，而所得到膜寿命预测是以 VMD 的方式出现。这两者之间的换算是需要解释清楚。

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过未达标的现象。满足质量要求是唯一前提，如果质量不达到回用水标准，就不能回用。

思源再生水厂膜池和别的厂一样，也采用恒通量运行模式。这种模式是通过自动调整抽吸泵的频率来保证恒通量运行。其中强制性控制是：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。所以当 $VMD = 15$ 和 $VMD = 19$ 时的区别就是膜压差的变化，而膜池的产水量的变化却不明显。换句话说，当 VMD 下降，导致跨膜压差上升，需要抽吸泵的频率上升，造成单位产水量的能耗上升，使得单位产水量的效益下降。

4. 结语

1) 因为膜寿命的预测和预防性维护等智能诊断、决策是再生水厂设备全生命周期管理和追求效益最重要的途径，直接采用 3520 天 A^2/O -MBR 系统每日运转的日产水量和膜压差大数据依序计算 VMD ，从而保证回归数据的量、数据来源的合理性以及实用性。

2) 剔除五类异常点后得到有效 VMD 天数，1[#]膜池 2474 天，2[#]膜池 2725 天，3[#]膜池 2652 天。有效 VMD 的总天数约占 VMD 的总天数 71%~78%。按膜池人为地将每 25 个有效 VMD 划分为一个组单元，计算单元的 VMD 算术平均值。回归 VMD 算术平均值与组单元得直线型工业透水率衰减方程。其截距表示刚刚开始启动时的 VMD ，负斜率意味着 VMD 是随着操作时间的延长而不断衰减。

3) 因为实测的 VMD 有近十年，所以可以用前期的衰减方程预测后一年的 VMD ，用当期的衰减方程实测后一年的 VMD 。定义误差比为预测值与实测值的相对大小，误差比越小的时段，就代表预测值越接近实测值，即选择预测时段越合适。并得出预测时段不应小于三年，应该选择四到五年为宜的结论。

4) 因为 VMD 算术平均值与组单元的散点图比较发散，所以按“年”为划分界限进行第二次降维得

10 个“年单元”，并计算年单元的 *VMD* 算术平均值。回归 *VMD* 算术平均值与年单元得幂型 *VMD* 衰减方程。同样可以用幂型 *VMD* 衰减方程计算预测值和实测值，如何预测值与实测值的相对大小以决定合适的预测时段。也得出与直线衰减方程相同的结论。

5) 计算年工业透水率衰减是直接、简单且方便。所得结果既可以预测膜寿命，又可以自我学习不断优化，还得出预测时段不应小于三年，最好选择四到五年为宜。

基金项目

陕西省水利厅科技计划项目(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] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Fenu, A., De Wilde, W., Gaertner, M., Weemaes, M., de Guedre, G. and Van De Steene, B. (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>
- [8] Cote, P., Alam, Z. and Penny, J. (2012) Hollow Fiber Membrane Life in Membrane Bioreactors (MBR). *Desalination*, **288**, 145-151. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.12.026>
- [9] Vera, L., González, E., Díaz, O., Sánchez, R., Bohorque, R. and Rodríguez-Sevilla, J. (2015) Fouling Analysis of a Tertiary Submerged Membrane Bioreactor Operated in Dead-End Mode at High-Fluxes. *Journal of Membrane Science*, **439**, 8-18. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.06.014>
- [10] Verrecht, B., Maere, T., Nopens, I., Brepols, C. and Judd, S. (2010) The Cost of a Large-Scale Hollow Fibre MBR. *Water Research*, **44**, 5274-5283. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.054>
- [11] 林斯清, 张维润, 孙志英, 魏健敏, 汪林德, 王从厚, 等. GB/T 20103-2006. 膜分离技术术语[S]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会, 2006.
- [12] 马世豪, 徐云, 文剑平, 黄霞, 何星海, 杨建洲, 等. CECS152: 2003. 一体式膜生物反应器污水处理应用技术规程[S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 2003.
- [13] 中国环境保护产业协会, 北京碧水源科技股份有限公司, 中国科学院生态环境研究中心. HJ 2528-2012. 中空纤维膜生物反应器组器[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [14] 刘建立, 王爱民, 环国兰, 乔宝文, 唐小珊, 王薇. GB/T 25279-2010. 中空纤维帘式膜组件[S]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会, 2010.
- [15] 胡晓宇, 王希, 郭庆贺, 等. 中空纤维使用寿命评价办法: GB/T 38511-2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [16] 胡晓宇, 王希, 郭庆贺, 梁恒, 洪煜斌, 李越彪, 等. GB/T 38511-2020. 中空纤维使用寿命评价办法[S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会, 2020.
- [17] 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, 53(S1): 163-166.
- [18] 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.
- [19] 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.

- [20] 周士恒, 付波, 李东, 秦宝兰, 王青华. MBR 膜组清洗工艺流程优化与维护方案研究[J]. 水污染及处理, 2022, 10(1): 13-25. <https://doi.org/10.12677/WPT.2022.101003>
- [21] 李东, 王青华, 付波, 秦宝兰, 张学梅, 马青华. 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. <https://doi.org/10.12677/WPT.2022.101004>