

设计经验

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.02.008

# 基于日本下水道事业团的多级AO工艺计算与探讨

刘 臣<sup>1</sup>, 樊雪红<sup>1</sup>, 徐耀鹏<sup>2</sup>

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 中国江苏国际经济技术合作集团有限公司, 江苏 南京 210003)

**摘 要:** 多级AO工艺具有脱氮效率高、可减少回流电耗等优点,已在国内污水处理厂逐步推广应用。最新的《膜生物反应器城镇污水处理工艺设计规程》(T/CECS 152—2017)在工艺选择时,为提升脱氮效果,也推荐采用两级或多级AO-MBR工艺,但国内规范对多级AO工艺计算方法尚不明确,而日本下水道事业团的计算方法对其工艺原理、设计参数取值都给出了比较明确的说明,并有较多的实例验证,具有较强的可实施性。结合深圳市福田区污水处理厂工艺设计实例,介绍了基于日本下水道事业团的多级AO工艺计算方法,并对比其他计算方法进行探讨,认为采用等比例进水方式下,其工艺计算方法简洁且后期运行管理方便。

**关键词:** 生物脱氮; 多级AO工艺; 工艺计算

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)02-0049-05

## Calculation and Discussion of Multi-stage AO Process Based on Japanese Sewage Works Agency

LIU Chen<sup>1</sup>, FAN Xue-hong<sup>1</sup>, XU Yao-peng<sup>2</sup>

(1. Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430010, China; 2. China Jiangsu International Economic and Technical Cooperation Group Co. Ltd., Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The multi-stage AO process has the advantages of high nitrogen removal efficiency and low return power consumption, and has been gradually applied in domestic wastewater treatment plants. The latest *Technical Specification for Design of Membrane Bioreactor Process for Municipal Wastewater Treatment* (T/CECS 152-2017) recommends two-stage or multi-stage AO-MBR process to be selected in process selection to improve denitrification performance. However, the calculation method of the multi-stage AO process is not clear in domestic standards. By contrast, the calculation method proposed by Japanese Sewage Works Agency gives a clear description of the process principle and values of the design parameter, and has been verified by many examples, which has strong practicability. Combined with the process design example of Futian wastewater treatment plant in Shenzhen, the calculation method of the multi-stage AO process based on Japanese Sewage Works Agency was introduced and compared with other calculation methods. It is considered that the process calculation method is simple and the future operation management is convenient under the equal proportion inflow.

**Key words:** biological nitrogen removal; multi-stage AO process; process calculation

TN的去除是污水处理中的一个重点和难点,目前大部分城市污水处理厂出水水质需执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准( $TN \leq 15 \text{ mg/L}$ ),国内已有一些城市污水处理厂出水水质达到准Ⅲ类水质标准(除 $TN \leq 5 \text{ mg/L}$ 外),因此总氮的去除是城市污水处理厂工艺设计的关键。而生物脱氮是目前最经济的脱氮工艺,一般认为,TN的去除应该由二级活性污泥段发挥主要功效,如果转移到三级生物膜反硝化,那么代价太大。

多级AO工艺具有脱氮效率高等优点,国内相关工程设计案例逐渐增多,最新的《膜生物反应器城镇污水处理工艺设计规程》(T/CECS 152—2017)在工艺选择时,提到为提升脱氮效果,可采用两级或多级AO-MBR工艺,但其对多级AO工艺的计算方法介绍不多。而日本对此工艺的研究和应用较早,且有着大量的实际应用<sup>[1-2]</sup>,深圳市福田污水处理厂在工艺设计初期参考了日方算法,目前已稳定运行多年。

笔者介绍基于日本下水道事业团的分段流入式多级AO工艺计算方法,并将其计算方法与其他算法进行对比探讨。

## 1 问题的提出

《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)给出了常规AO工艺理论最大脱氮率是总回流比(混合液内回流加上回流污泥量与进水流量之比)的函数<sup>[3]</sup>,最大脱氮率由下式确定:

$$\eta_{\max} = \frac{r + R}{1 + r + R} \quad (1)$$

式中: $\eta_{\max}$ 为理论最大脱氮率; $r$ 为混合液回流比(内回流); $R$ 为污泥回流比(外回流)。

由式(1)可知,增大回流比可提高脱氮效果。但外回流比过大,会增加电耗,把生物反应池、二沉池和回流污泥泵房作为一个整体考虑,为使造价和运行费用总价最低,污泥最大回流比一般限制在150%以内,通常采用低于100%。当内回流比为3时,再增加内回流比,一方面电耗加大,另一方面对脱氮效果的提高意义不大,因为所增加 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除量很低,而很多的溶解氧却从曝气区回流入缺氧区,导致反硝化速率下降,同时过高的内回流比会使系统由推流式趋于完全混合式,导致污泥性状变差。

深圳市福田污水处理厂设计规模为 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,出水水质按一级A标准执行,主要设计进、出水水质见表1。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项 目	BOD <sub>5</sub>	COD	SS	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP
进水/(mg·L <sup>-1</sup> )	205	540	282	63.5	50	6.5
出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	10	50	10	15	5(8)	0.5
去除率/%	95.1	90.7	96.4	76.4	90.0(84.0)	92.3

由表1可见,本工程进水BOD<sub>5</sub>/TN为3.2,可采用生物脱氮工艺。但要求总氮去除率达到76.4%。若采用常规AO工艺,在确定外回流比不大于1的情况下,采用内回流比需大于3,如此内回流导致电耗过高,且很难实现TN出水水质稳定达标。

多级AO工艺的脱氮原理和普通生物脱氮原理相同,但总氮的去除率随着段数的增加有较大的提高,日本下水道事业团在分段流入式多级AO工艺技术评价报告中给出了TN的理论最大去除率,可由下式确定:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{1}{N} \times \frac{1}{1 + r + R} \quad (2)$$

式中: $N$ 为段数。

根据式(2),污泥回流比为75%(无内回流)的三段AO工艺最大脱氮率为81%,初步估算可满足该工程TN需要去除率,因此深圳市福田污水处理厂选用了三级AO工艺。

## 2 工艺计算

### 2.1 流量分配

在确定工艺分级数后,需要确定每级进水比例。鞠兴华等<sup>[4]</sup>采用遗传算法,在给定的工艺参数和水质条件下得到四级分段进水流量最佳分配比分别为37.2%、27.4%、23.2%和12.2%;王姣等<sup>[5]</sup>、王舜和等<sup>[6]</sup>基于ATV标准,认为对于低C/N值的进水,分段进水多级AO工艺宜采用流量逐级增大的分配方式,对于高C/N值的进水,采用等流量进水方式时生物池总池容最小。

日本下水道事业团推荐的工艺基于在各段对等量的生物量(MLSS量)给予等量的营养源(流入水量)这一原则进行设计,各段的污泥负荷基本相同。设计中各段采用等流量的进水方式,并因此可以对各段在相同的运行条件下进行管理。比如,在理论上各硝化段需氧量相同,在采用相同的曝气设

备的情况下,全部硝化段可以用相同的DO浓度进行管理,从而大大减轻了管理强度。

## 2.2 回流比和各段污泥浓度

回流污泥量的大小会影响分段进水系统的工作情况,当分段进水采用低回流比时,由于活性污泥含固量高,使前面几段的MLSS浓度较高。

污泥回流比一般在50%~100%之间,设计采用 $R=75\%$ 。仅从脱氮来看,三段AO工艺在污泥外回流75%时,无需内回流即可实现TN的去除率达到81%,但从日本下水道事业团的研究结果看,设置内回流可使污水厂进水水质变化时增加工艺调控的灵活性(比如在进水TN浓度超过设计值时,增加内回流比,可确保TN出水水质达标;而在满足出水TN达标条件下,减少内回流可以进一步强化生物除磷,以降低化学除磷所需药耗)。本次设置三段内回流设备备用(每段内回流比50%),计算时不考虑内回流。

最终段MLSS浓度采用3 500 mg/L。其他各段MLSS浓度根据物料衡算,由下式算出:

$$X_k = \frac{R+1}{R+\frac{k}{N}} \times X_N \quad (3)$$

式中: $X_k$ 为第 $k$ 段MLSS浓度,mg/L; $X_N$ 为第 $N$ 段(最终段)MLSS浓度,mg/L。

## 2.3 生物反应池容积计算

该厂设计四组生物反应池,每组处理水量为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (根据前期测试数据,进水水样经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后,测得水样溶解性BOD和溶解性TP均为过滤前的 $2/3$ ),日本下水道事业团多级AO技术评价报告推荐的最后段硝化段容积的计算见下式:

$$V_{0,N} = \frac{Q_{in} \cdot \theta_{C,A}}{N \cdot X_N} \cdot \frac{a \cdot C_{s-BOD,in} + b \cdot C_{SS,in} + \gamma \cdot C_{Me}}{1 + c \cdot \theta_{C,A}} \quad (4)$$

式中: $V_{0,N}$ 为最后段硝化区容积, $\text{m}^3$ ; $Q_{in}$ 为单组处理水量, $\text{m}^3/\text{d}$ ; $\theta_{C,A}$ 为硝化段污泥龄ASRT,d; $C_{s-BOD,in}$ 为进水溶解性BOD浓度,mg/L; $C_{SS,in}$ 为进水SS浓度,mg/L; $C_{Me}$ 为混凝剂投加浓度,mg/L; $a$ 为溶解性BOD的污泥转化率(0.4~0.6); $b$ 为SS的污泥转化率(0.9~1.0); $c$ 为活性污泥微生物的内源衰减系数(0.05); $\gamma$ 为混凝剂投加产生污泥的产率(以铝盐计),取值5。

$\theta_{C,A}$ 由下式算出:

$$\theta_{C,A} = 29.7 \exp(-0.102 \cdot T) \cdot \alpha \quad (5)$$

式中: $T$ 为设计水温,取 $15^\circ\text{C}$ ; $\alpha$ 为安全系数,取1。

$C_{Me}$ 由下式算出:

$$C_{Me} = C_{sp,in} \times \frac{27}{31} \quad (6)$$

式中: $C_{sp,in}$ 为进水溶解性总磷浓度,mg/L;27为Al的相对分子质量;31为P的相对分子质量。

根据式(4)可以算出最后段(第三段)硝化区容积 $V_{0,N}=15\ 284 \text{ m}^3$ ,基于在各段对等量的生物量(MLSS量)给予等量的营养源(流入水量)这一原则,其他段的硝化区容积由下式算出:

$$V_{0,k} = \frac{X_N}{X_k} \cdot V_{0,N} = \frac{r+R+\frac{k}{N}}{r+R+1} \cdot V_{0,N} \quad (7)$$

为确保脱氮效果,日本下水道事业团多级AO技术评价报告书取反硝化区与硝化区容积相等。

## 2.4 工艺计算结果校核及实际运行效果

鉴于式(2)是假定某些条件估算的理论脱氮率,而生物脱氮中氮的去除率系对硝酸盐氮的反硝化程度,因此校核去除率时应扣除剩余污泥和出水中的凯氏氮。

由下式对上述设计生物反应池容积进行脱氮率校核:

$$\eta = 1 - \frac{\text{TN}_{\text{ef}} - \text{TKN}_{\text{ef}}}{\text{TN}_{\text{in}} - \text{TN}_{\text{ex}} - \text{TKN}_{\text{ef}}} \quad (8)$$

式中: $\eta$ 为脱氮率; $\text{TN}_{\text{in}}$ 为进水总氮含量; $\text{TN}_{\text{ef}}$ 为出水总氮含量; $\text{TN}_{\text{ex}}$ 为剩余污泥总氮含量; $\text{TKN}_{\text{ef}}$ 为出水凯氏氮含量。

其中进水TN浓度已知,针对一级A标准出水,出水凯氏氮浓度可假定为 $1 \text{ mg/L}$ ,剩余污泥TN含量由下式算出:

$$\text{TN}_{\text{ex}} = \frac{X_{\text{ex}} \cdot Q_{\text{ex}}}{Q_{\text{in}}} \cdot f_{N,\text{ex}} \quad (9)$$

式中: $X_{\text{ex}}$ 为剩余污泥浓度,mg/L; $Q_{\text{ex}}$ 为剩余污泥排放量, $\text{m}^3/\text{d}$ ; $f_{N,\text{ex}}$ 为污泥氮含有率,取 $0.07 \text{ gN/gSS}$ 。

其中 $X_{\text{ex}} \cdot Q_{\text{ex}}$ 由下式算出:

$$X_{\text{ex}} \cdot Q_{\text{ex}} = (a \cdot C_{s-BOD,in} + b \cdot C_{SS,in} + \gamma \cdot C_{Me}) \cdot Q_{in} - N \cdot c \cdot V_{0,N} \cdot X_N \quad (10)$$

将上述数据分别代入式(10)、(9)、(8),可求得



硝化脱氮需要的去除率为68%,而本工程在污泥回流比为75%、无内回流的工况下由式(8)可算出其最大脱氮率为81%,说明设计工艺能保证出水总氮稳定达标。

按照上述程序设计,经计算 $BOD_5$ 负荷为 $0.064 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ ,总氮负荷为 $0.02 \text{ kgTN}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ ,污泥龄 $12.8 \text{ d}$ ,脱氮速率 $0.028 \text{ kgNO}_3^--\text{N}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ ,主要参数亦满足《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)取值要求。

深圳市福田污水处理厂参照日方资料设计,自投产以来水质达标率为100%,特别是在特殊的几次进水TN值异常偏大时,也保证了出水TN稳定达标,TN去除率接近81%<sup>[7]</sup>,与按式(8)预测的最高理论脱氮率基本吻合,说明多级AO工艺对TN的去除率高且具有稳定的处理效果。

### 3 探讨

日方算法采用泥龄法,根据处理程度确定是否需要硝化,由式(5)求出硝化泥龄,这与ATV标准中确定泥龄的方法相似。《室外排水设计规范》亦指出,在需要硝化的场合,以泥龄作为设计参数是十分有利的。日方算法和ATV标准算法一样,都是在理论指导下,对实验研究结果以及实践经验的总结。

在水质参数选择上,日方算法采用溶解性BOD进行计算。通过对水样采用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤,可以方便地测出进水的溶解性BOD和溶解性总磷,以用于后续公式的计算。这与Metcalf & Eddy<sup>[8]</sup>采用溶解性BOD等参数进行工艺计算的思想一致,但相比Metcalf & Eddy采用的数学模型法需要较多的水质参数,日方算法参数选择简单易行,具有更好的可操作性。

我国一级A排放标准要求的SS限值为 $10 \text{ mg/L}$ ,其含氮量按10%计,日方算法取出水有机氮浓度 $1 \text{ mg/L}$ 也是合适的。

对国内多数污水处理厂来说,出水TP要执行 $0.5 \text{ mg/L}$ 的标准,仅依靠生物除磷难以稳定达标,常需要增加化学除磷来满足除磷要求。国内很多算法在计算生物反应池容积时未考虑化学除磷产生的污泥量,而日方算法中考虑了化学除磷产生的污泥量。但从式(6)可以看出,日方算法在计算时为了体现多级AO工艺高效脱氮的特点,对磷的去除

全部采用化学除磷,这就使得计算结果趋于保守,这可能是考虑脱氮和除磷过程相互影响[为便于后期运行时减少为除磷而投加的化学药剂,深圳市福田区污水处理厂在三级AO工艺前段增设了一段厌氧池( $\text{HRT}=1.0 \text{ h}$ ),以强化生物除磷]。

另外,在多级AO工艺的每段进水量分配上,除日方算法采用等比例进水外,ATV标准也建议分段进水应使所有硝化池达到相同的污泥负荷,这也方便后期的运行管理。Metcalf & Eddy认为对于新建生物池的设计,用对每条通道同样 $F/M$ 比的方法,采用非对称多级进水设计,池体容积利用更有效;而对于已有分段进水的现状构筑物改造,可以将其改造为阶段进水AO工艺,此时每个通道的容积都已确定,池体的布置一般是对称的且容积相等。

最后在脱氮原理上,日方算法不像Metcalf & Eddy有较多的动力学公式推导,而是经过合理的假设,简单的物料守恒推导,揭示了多级脱氮工艺的先进性。但日方算法的经验参数是在日本国内大量实践后得出的,其参数选择是否可以结合国内情况再优化,还需要深入研究。另外从日方资料来看,实际运行中可以根据不同时期进水水质特点,通过对脱氮或除磷的侧重进而调整运行方式,以实现药耗、电耗的下降。

### 4 结语

多级AO工艺近年来日益受到重视,尤其在面对TN去除率要求较高而普通的单级AO工艺难以实现时,该工艺体现出池容较小、去除效率高且稳定的优势。但对于该工艺的设计计算缺乏详细深入、具有工程应用级别的案例分析,笔者参考日本下水道事业团的多级AO工艺计算方法,结合在深圳市福田区污水处理厂工程设计中的应用进行了探讨,并同国内《室外排水设计规范》、ATV标准、Metcalf & Eddy的算法进行了对比分析,认为日方算法原理简洁、设计思路清晰且选择参数可实施性强,等比例流量分配加上灵活的内回流工况设定可以降低后期运行中的电耗和药耗,值得吸收借鉴。此外,国内对膜生物反应器的应用日益增多,强化脱氮时,提出采用多级AO-MBR工艺,但由于膜池具有较高的溶解氧浓度,还需对其工艺进行深入研究,以使该项技术在我国水环境治理中发挥更好的作用。

## 参考文献:

- [1] 日本下水道事业团. 分段流入式多级硝化脱氮法的技术评价报告[R]. 日本:下水道业务管理中心, 2002.
- Japan Sewage Works Agency. Report on the Technical Evaluation of the Step-inflow Type Multi-Stage Nitrification Denitrification Method [R]. Japan: Sewerage Management Center, 2002(in Chinese).
- [2] 邱慎初, 丁堂堂. 分段进水的生物除磷脱氮工艺[J]. 中国给水排水, 2003, 19(4): 32-36.
- QIU Shenchu, DING Tangtang. Step feed biological phosphorus and nitrogen removal process [J]. China Water & Wastewater, 2003, 19 (4) : 32-36 (in Chinese).
- [3] 周雹. 活性污泥工艺简明原理及设计计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- ZHOU Bao. The Simple Principle and Design Calculation of Activated Sludge Process [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005 (in Chinese).
- [4] 鞠兴华, 王社平, 王怡, 等. 遗传算法优化分段进水生物脱氮工艺的流量分配[J]. 中国给水排水, 2006, 22(21): 89-92.
- JU Xinghua, WANG Sheping, WANG Yi, *et al.* Application of genetic algorithms for influent flow distribution in step-feed biological nitrogen removal system [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22 (21): 89-92 (in Chinese).
- [5] 王姣, 鞠凤, 李国斌. 基于ATV标准的分段进水多级A/O工艺设计优化[J]. 中国给水排水, 2012, 28(20): 39-42.
- WANG Jiao, JU Feng, LI Guobin. Optimization design of step-feed multistage A/O process based on ATV standard [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28 (20): 39-42 (in Chinese).
- [6] 王舜和, 郭淑琴, 魏新庆. 分段进水多级A/O工艺计算与探讨[J]. 中国给水排水, 2014, 30(18): 81-85.
- WANG Shunhe, GUO Shuqin, WEI Xinqing. Discussion on step-feed multi-stage A/O process calculation [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30 (18): 81-85 (in Chinese).
- [7] 范翊. 多段式AO工艺在污水处理中的探讨与应用[J]. 给水排水, 2019, 45(增刊): 28-30.
- FAN Yi. Discussion and application on step-feed multi-stage A/O process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(S1): 28-30 (in Chinese).
- [8] 梅特卡夫和埃迪公司. 废水工程: 处理及回用[M]. 4版. 秦裕珩, 译. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- Metcalf & Eddy, Inc. Wastewater Engineering Treatment and Reuse [M]. 4th ed. QIN Yuheng, translated. Beijing: Chemical Industry Press, 2004 (in Chinese).

作者简介: 刘臣(1981- ), 男, 河南南阳人, 硕士, 高级工程师, 主要从事给水排水工程设计及研究工作。

E-mail: diyu8164@126.com

收稿日期: 2021-04-23

修回日期: 2021-05-08

(编辑: 孔红春)

像保护眼睛一样保护生态环境,  
像对待生命一样对待生态环境