

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.17.005

基于数学模拟的污水厂运行分析——控制与优化

郝二成¹, 郭毅¹, 刘伟岩¹, 胡志荣², 丁文兵³, 吴宏周⁴, 吴建琴⁴,
张达成⁴

(1. 北控水务<中国>投资有限公司, 北京 100102; 2. 加拿大 GL 环境科技有限公司,
加拿大; 3. 广州中业污水处理有限公司, 广东 广州 510800; 4. 东莞市大岭山永溢水务
有限公司, 广东 东莞 523000)

摘要: 为了制定合理的曝气和除磷加药控制方案,以东莞大岭山连马污水处理厂作为示范,收集了该厂 3 年的历史监测数据及补充数据,利用污水处理厂模拟软件 GPS-X 建立并校正了污水处理工艺模型,利用动态模拟对比不同工艺控制方案,根据模拟结果建议按氨氮浓度变化设定 DO 值进行曝气控制;采用固定加药浓度投加除磷药剂,从而实现节能降耗。

关键词: 污水处理厂; 工艺模拟; 曝气; 控制; 优化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)17-0023-07

Operation Analysis of Wastewater Treatment Plant Based on Mathematical Simulation: Control and Optimization

HAO Er-cheng¹, GUO Yi¹, LIU Wei-yan¹, HU Zhi-rong², DING Wen-bing³,
WU Hong-zhou⁴, WU Jian-qin⁴, ZHANG Da-cheng⁴

(1. Beijing Enterprises Water Group <China> Investment Limited, Beijing 100102, China; 2. GL Environment Inc., Canada; 3. Guangzhou Zhongye Sewage Treatment Co. Ltd., Guangzhou 510800, China; 4. Dongguan Dalingshan Yongyi Water Co. Ltd., Dongguan 523000, China)

Abstract: In order to make a reasonable control programme of aeration and phosphorus removal, three years of historical monitoring data and supplementary test data were collected in the demonstration project of Dalingshan Lianma Wastewater Treatment Plant in Dongguan. Process model of the wastewater treatment plant was developed and calibrated by using GPS-X dynamic simulation software, and different process control scenarios were compared by dynamic simulation of the model. According to the simulation results, it was suggested that DO value should be set to control aeration in accordance with the change of ammonia nitrogen concentration, and phosphorus removal chemicals should be added at a fixed concentration to save energy and reduce consumption.

Key words: wastewater treatment plant; process simulation; aeration; control; optimization

经过 40 多年的开发应用,污水处理工艺模型已经可以有效地模拟和预测污水处理厂的工艺运行情

况。在北美、欧洲、南非、澳大利亚等国家和地区,从模型开发到商业模拟软件,从北美的 WERF、荷兰的 STOWA 等工艺模拟指南到国际水协的活性污泥模型指南和大量的实际工程应用案例^[1],都表明污水处理工艺模拟已经成为标准应用实践。经过校准和验证的模型可以应用于很多方面,取决于应用目标。常见的应用包括:①污水处理厂设计及提标改造工艺方案的选择,北美污水处理厂普遍应用模拟进行升级和提标改造,近年来国内已经开始探索这方面的实际应用^[2-3]。②污水处理厂工艺运行优化^[4-6]。

在国内,污水处理工艺模拟的应用起步较晚,正处于发展阶段。随着污水处理标准由一级 B 提升至一级 A,甚至是地表水准Ⅳ类标准,对工艺稳定运行和节能降耗提出了新要求。在污水处理厂运行成本中,曝气电耗占了工艺运行电耗的 40%~60%,而除磷加药成本在 0.02~0.1 元/m³ 之间。因此研究曝气节能和加药成本控制非常重要,而利用模型确定控制方案比进行中试或实际控制要简单、快速得多。

笔者以东莞大岭山连马污水处理厂作为示范,收集了该污水处理厂 3 年的历史监测数据以及补充数据,利用污水处理厂模拟软件 GPS-X 建立并校正了工艺模型^[7],同时应用该工艺模型初步探索了典型的运行控制措施(曝气和加药)对节能降耗的影响。

1 污水处理厂模型

污水处理厂设计处理能力为 8×10^4 m³/d,预处理单元包括粗细格栅、旋流沉砂池,污水经预处理后进入二级 UCT 处理工艺(污水依次流经厌氧池、缺氧池和好氧池),最后进入二沉池和紫外消毒渠。污水处理厂二级主体工艺由平行的两个系列组成,

为了简化模拟工作,模型建立一组池子进行全厂模拟。污水厂工艺流程见图 1,利用 GPS-X 软件建立的工艺流程见图 2。

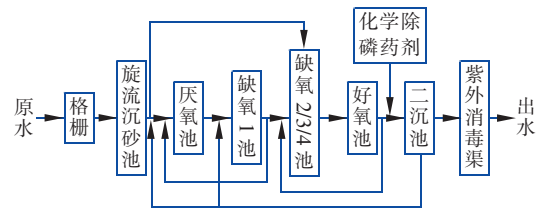


图 1 大岭山连马污水处理厂工艺流程

Fig. 1 Process flow of Dalingshan Lianma WWTW

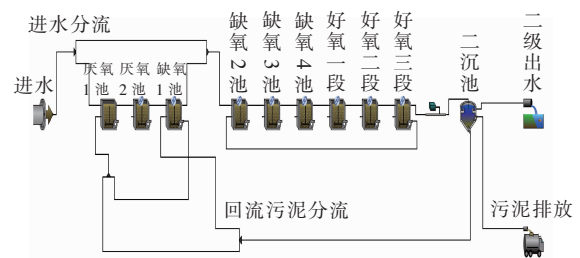


图 2 GPS-X 软件平台建立的模型结构

Fig. 2 Model layout set up by GPS-X modeling platform

实际工艺中好氧池分为 3 个廊道(好氧一段、好氧二段、好氧三段),在第一廊道中间和第三廊道中后段各有 1 台 DO 仪。在好氧池出水口投加化学除磷药剂聚合氯化铝铁(PAFC),保证出水总磷稳定达标。

2 污水处理厂模型应用

2.1 模型应用

选取 2017 年 12 月运行数据进行动态模拟研究,模拟输入的进水流量、水质和运行参数见表 1,用来校核模拟结果的出水水质及运行参数见表 2。应用校准的模型和该月进水水质等运行条件确定曝气控制和加药控制方案。

表 1 进水流量、水质和运行参数

Tab. 1 Characteristic of influent and operational parameters of UCT process

时间/d	进水流量与水质					运行参数		
	流量/ (m ³ ·d ⁻¹)	COD/ (mg·L ⁻¹)	氨氮/ (mg·L ⁻¹)	TKN/ (mg·L ⁻¹)	TP/ (mg·L ⁻¹)	排泥量/ (m ³ ·d ⁻¹)	外回流/ (m ³ ·d ⁻¹)	温度/ ℃
1	69 222	121	17.2	22.6	3.74	581	32 352	20.2
2	61 659	112	13.2	21.1	4.69	131	30 364	21.2
3	72 572	184	15.1	24.9	4.36	756	32 046	21.3
4	69 857	179	15.1	25.3	8.00	1 496	34 611	22.4
5	64 785	310	7.8	20.3	6.56	1 917	30 830	22.4
6	61 399	278	18.0	24.3	6.51	1 778	36 286	22.3

续表1 (Continued)

时间/d	进水流量与水质					运行参数		
	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氨氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TKN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	排泥量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	外回流/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$
7	66 281	456	14.7	20.1	4.94	1 368	34 929	22.2
8	63 113	246	15.5	26.4	6.71	2 003	32 393	22.5
9	68 374	203	13.9	18.8	7.01	1 562	30 700	22.6
10	67 090	218	13.6	22.3	4.99	109	33 141	23.0
11	71 913	245	7.6	18.7	4.65	1 832	31 557	23.3
12	82 938	222	12.5	22.8	8.07	1 847	34 187	24.0
13	82 600	209	14.0	23.2	5.13	1 756	33 545	23.3
14	85 973	212	15.2	22.8	5.52	2 183	35 957	21.2
15	85 160	178	13.7	20.0	4.97	1 485	41 469	22.1
16	76 388	208	13.4	19.8	5.68	1 157	41 300	22.0
17	93 648	192	13.4	18.8	4.85	1 626	42 987	20.1
18	82 943	230	13.0	20.4	3.93	1 310	42 580	21.0
19	78 546	249	13.8	22.2	3.84	1 625	38 194	21.0
20	59 227	175	12.7	21.8	4.53	653	46 824	20.3
21	52 367	155	9.7	15.3	3.59	651	41 472	20.0
22	46 031	99	9.7	14.3	5.24	92	39 273	20.0
23	49 600	158	13.9	18.6	5.08	676	26 184	19.3
24	48 458	161	12.4	18.0	5.47	732	23 016	19.5
25	51 674	135	12.8	18.3	5.66	738	24 800	19.1
26	50 524	157	13.5	19.3	6.07	302	24 229	19.2
27	64 788	119	6.4	18.1	7.44	646	25 837	18.3
28	59 029	138	14.4	19.0	6.12	428	25 262	19.3
29	58 789	146	17.9	23.3	5.24	309	27 677	19.6
30	57 653	129	17.6	24.1	6.07	281	32 394	20.2
31	55 245	150	22.5	26.9	6.00	563	29 515	21.5

表2 出水水质及运行参数

Tab.2 Effluent quality and operational parameters of UCT process

时间/ d	出水水质					运行参数		
	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氨氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	MLSS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	MLVSS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	回流 MLSS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
1	17	7	9.88	1.40	0.31	6 275	2 599	22 646
2	16	8	10.10	0.60	0.36	6 552	2 670	20 168
3	21	13	10.30	0.60	0.41	6 401	2 622	19 864
4	23	10	13.10	1.00	0.30	6 153	2 500	18 416
5	18	11	12.00	1.30	0.29	6 473	2 674	18 524
6	17	13	11.80	1.50	0.28	6 255	2 612	22 662
7	16	6	10.20	1.50	0.30	6 179	2 573	19 970
8	15	6	10.80	2.60	0.21	6 148	2 541	21 128
9	18	7	10.80	1.50	0.28	6 180	2 535	17 378
10	16	10	11.70	2.10	0.34	6 354	2 741	19 624
11	17	8	12.30	1.30	0.17	6 385	2 625	19 824
12	20	6	9.67	2.20	0.24	6 461	2 650	19 912
13	17	6	11.50	0.60	0.17	6 659	2 738	19 624
14	14	5	9.17	2.00	0.19	6 433	2 650	18 184
15	16	6	10.50	3.20	0.21	6 256	2 580	21 040
16	18	5	12.60	0.60	0.30	5 706	2 341	18 942

续表 2 (Continued)

时间/ d	出水水质					运行参数		
	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	SS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氨氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	MLSS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	MLVSS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	回流 MLSS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
17	20	5	13.10	0.90	0.30	5 608	2 323	19 470
18	21	6	12.00	1.40	0.28	5 183	2 154	25 342
19	26	7	13.70	4.70	0.27	4 931	2 069	24 404
20	20	6	11.20	1.10	0.24	4 620	1 930	20 158
21	22	3	9.55	1.90	0.12	4 246	1 824	23 632
22	27	13	10.20	3.10	0.37	4 280	1 843	25 468
23	21	6	8.80	0.60	0.43	4 672	2 021	20 328
24	9	6	11.10	0.80	0.30	4 927	2 075	19 208
25	18	5	9.90	0.20	0.41	5 118	2 180	22 160
26	18	5	10.40	0.30	0.38	5 559	2 397	19 004
27	15	5	9.95	0.40	0.39	5 702	2 480	19 294
28	19	3	10.70	0.40	0.43	5 589	2 300	20 104
29	14	6	12.10	0.20	0.46	5 838	2 419	19 200
30	13	7	11.80	0.40	0.42	5 753	2 391	20 104
31	15	3	11.20	0.70	0.43	5 642	2 363	19 034

2.2 曝气控制

实际污水处理厂在运行过程中一般根据在线 DO 值调整曝气量。建立的工艺模型按廊道将好氧池分成 3 段,分别控制每段的 DO 值。本研究分为两部分:一是设置固定 DO 值,曝气量根据进水水质和水量的变化而变化,以维持设定的 DO 值;二是根据氨氮浓度变化改变 DO 设定值,从而调整曝气量,保证出水氨氮达标。

2.2.1 固定 DO 值

在保证出水氨氮达标的前提下,分别对几种 DO 设定值组合进行了模拟,结果见表 3(表中各段电耗为好氧各段 30 d 的总电耗值)。可知,当 DO 分别设定为 0.5、1.0、1.0 mg/L 时,鼓风机总电耗比第一组节省了 12.1%;相对于好氧二、三段而言,好氧一段 DO 设定值低时,节省电耗相对较多。

表 3 不同 DO 设定值的模拟结果

Tab.3 Simulation results under different DO set values

模拟 DO/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	第一段电 耗/($\text{kW} \cdot \text{h}$)	第二段电 耗/($\text{kW} \cdot \text{h}$)	第三段电 耗/($\text{kW} \cdot \text{h}$)	总电耗/ ($\text{kW} \cdot \text{h}$)
1.0、1.5、1.8	68 260	54 480	29 470	152 210
0.8、1.2、1.5	64 320	52 140	28 650	145 110
0.8、1.2、1.0	63 860	52 570	24 640	141 070
0.5、1.0、1.0	55 140	52 620	26 040	133 800

最后一组 DO 设定值的模拟电耗及各段出水氨氮浓度变化如图 3 所示。

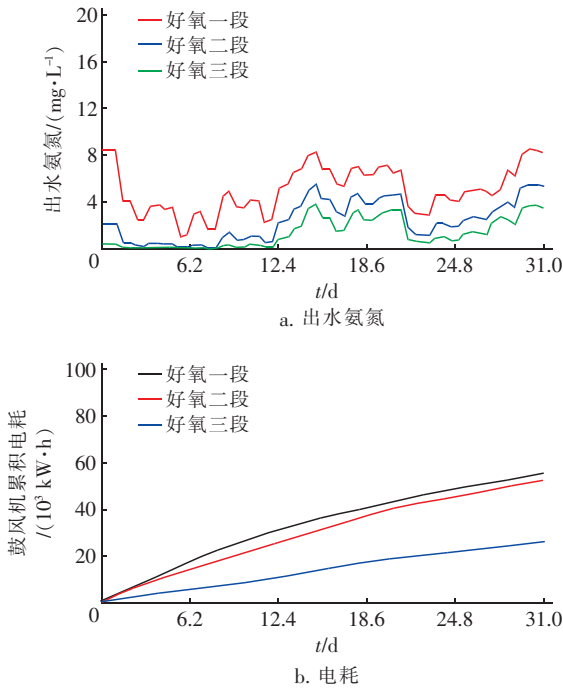


图 3 模拟的各段出水氨氮及电耗变化

Fig.3 Change of simulated ammonia nitrogen concentrations in effluent and energy consumption

2.2.2 基于氨氮浓度的变 DO 控制

在 GPS-X 模拟软件中,氨氮控制器是一个串级控制,如图 4 所示,可根据氨氮浓度来调整空气流量。内环控制回路是一个开关控制,根据上一个池子的氨氮浓度来调整当前曝气池的 DO 设定值,外

环控制回路是一个 PID 控制器,根据 DO 设定值来调整空气流量。

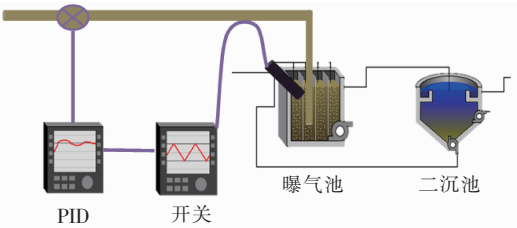


图 4 串级控制

Fig. 4 Cascade control loop

模拟时,设置了 3 个控制器,如好氧一段的开关控制器监控着缺氧 4 池的出水氨氮浓度,当该氨氮浓度高于上限时,开关控制器将 DO 值设置为 0.8 mg/L (见表 4);当氨氮浓度低于下限时,开关控制器将 DO 值设定为 0.5 mg/L,如图 5(a)所示(其中 ANO4 代表缺氧 4 池出水),另外 2 个控制器类似。模拟的 3 段 DO 设定值变化情况如图 5(b)所示。

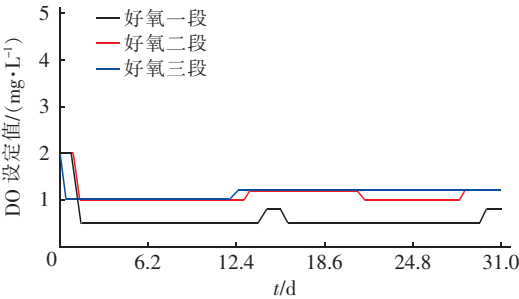
表 4 根据氨氮浓度变化设定 DO 值

Tab. 4 DO set values based on ammonia nitrogen concentrations

控制器	控制变量	上限	DO 设定值	下限	DO 设定值
Oxic 1	缺氧 4 池出水氨氮	7	0.8	6	0.5
Oxic 2	好氧一段出水氨氮	4	1.2	3	1.0
Oxic 3	好氧二段出水氨氮	2	1.2	1	1.0



a. DO 控制模拟设置



b. DO 设定值的变化

图 5 DO 控制模拟设置及模拟 DO 设定值的变化

Fig. 5 DO controller settings and simulated DO set values

模拟的各段出水氨氮和电耗变化如图 6 所示。可知,该控制模式下 3 段好氧的电耗分别为 51 470、52 470、28 770 kW·h,总共 132 710 kW·h。与固定 DO 值最后一组模拟结果相比,累积电耗基本一致,但该种模式可以更好地保证出水氨氮达标,建议采用该模式进行曝气控制。

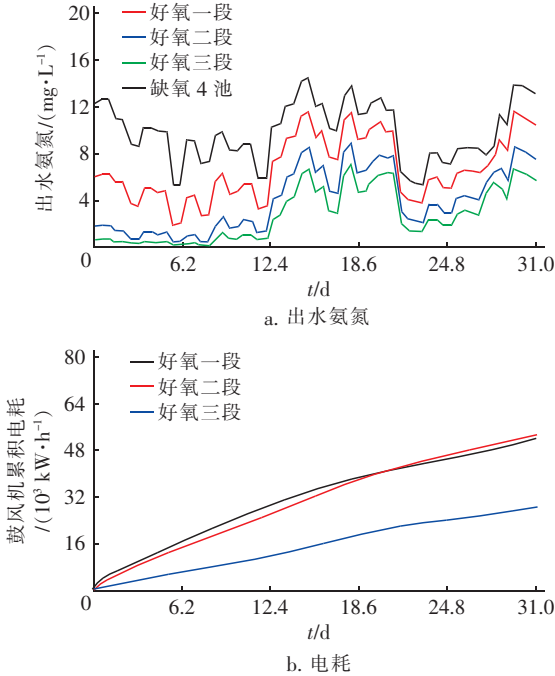


图 6 模拟的各段出水氨氮和电耗变化

Fig. 6 Change of simulated ammonia nitrogen concentrations in effluent and energy consumption

实际实施时,为了减少在线仪表的费用,可以在好氧池某一位置(根据沿程检测数据选取合适位置,且其后有在线 DO 仪表)安装 1 台在线氨氮仪表,根据氨氮的变化调整在线 DO 仪表设定值。

2.3 加药控制

污水处理工艺运行时,化学除磷加药一般采用固定加药量方式投加;近两年开始出现固定浓度加药的控制方式;最精确的加药方式是根据加药点正磷酸盐浓度改变投加量,该方式需要安装正磷酸盐仪表,考虑到仪表较贵,且需要维护运行和药剂费用,目前不建议采用该种加药控制方式。本研究针对前两种加药控制方式进行模拟分析。

2.3.1 固定加药量投加

固定加药量时,加药浓度随进水流量的变化而变化。采用表 1 数据,当加药量为 5 000 kg/d 时,出水 TP 浓度均达标,如图 7 所示。当加药量为 500

kg/d时,由于进水水质的变化,可能会导致出水总磷超标,如图8所示。根据出水TP情况,可判断前者加药过量,后者加药不足,易导致超标。

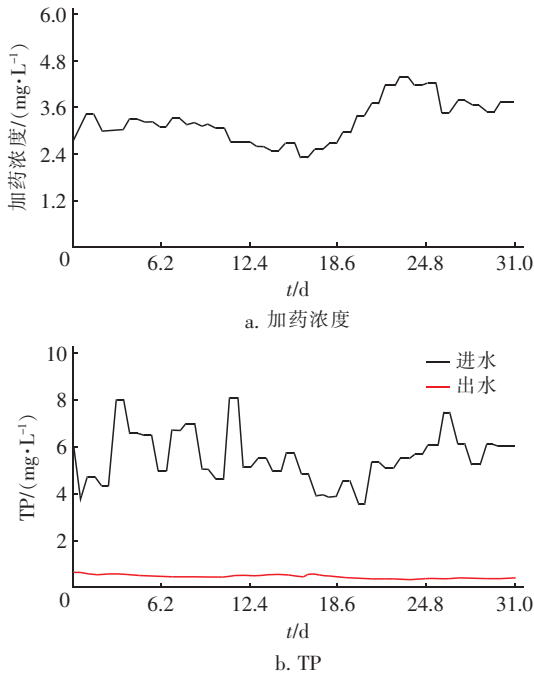


图7 加药浓度及模拟进出水TP的变化(固定加药量过量)

Fig. 7 Change of chemical dosage and TP concentrations of influent and effluent (overdosed)

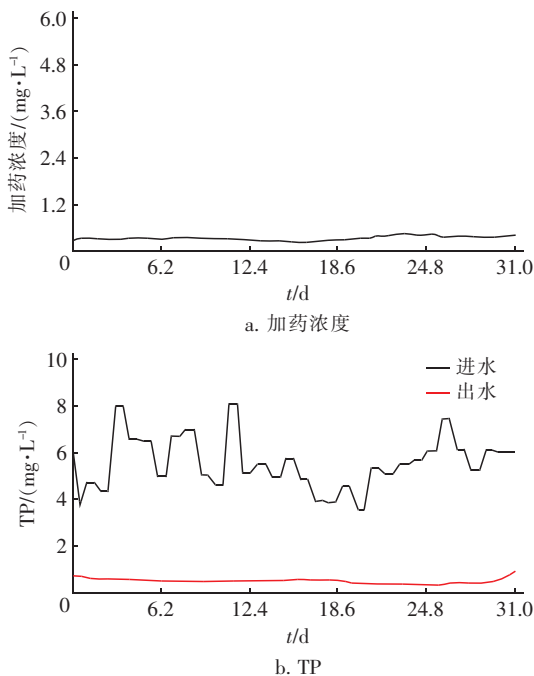


图8 加药浓度及模拟进出水TP的变化(固定加药量不过量)

Fig. 8 Change of chemical dosage and TP concentrations of influent and effluent (un-overdosed)

2.3.2 固定加药浓度投加

固定投加的药剂浓度,即加药量随进水流量的变化而变化,根据图7和图8的结果,选取中间浓度进行多次模拟,最终确定2.4 mg/L为较经济的加药浓度(针对该月进水水质)。图9为加药浓度为2.4 mg/L时的模拟结果,可知随着进水流量的变化加药量也相应改变,出水TP稳定达标。建议采用该种方式进行药剂投加,在保证出水总磷达标的前提下,节省药剂费用。

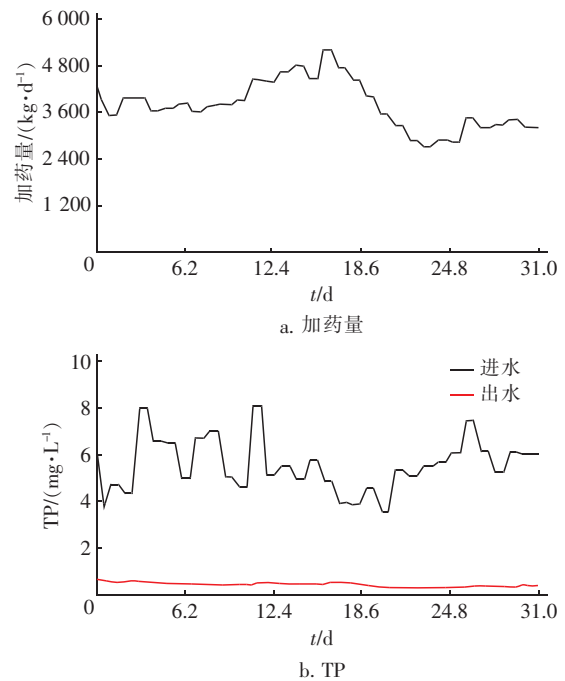


图9 加药量及进出水TP浓度的变化

Fig. 9 Change of chemical dosage and TP concentrations of influent and effluent

需要注意的一点是,对于进水水质变化较大的污水厂,采用该方式控制加药量时,需要考虑加药点正磷酸盐的变化,可在加药点前安装正磷酸盐在线仪表,根据在线数据相应调整加药浓度。

大岭山连马污水厂建厂时间较早,自动化程度不高,PAFC药剂的投加系统最初采用动力投加和人工现场调节流量阀门的方式投加,无法保证出水水质稳定达标。对加药系统进行自动化升级和改造并采用按浓度加药后,实现了在达标的基础上节省药剂的目的。采用按浓度投加后,出水TP稳定在0.5 mg/L以下,1 m³水的药耗平均下降11.4%。

3 结论

以东莞大岭山连马污水处理厂为示范,利用

GPS-X 模型软件,根据 2015 年—2017 年的历史监测数据及补充数据建立和校准了该厂二级处理 UCT 工艺的动态模拟模型。利用校正的模型进行了污水处理厂在节能降耗方面的控制和优化分析,可为污水厂曝气及除磷加药控制方案提供依据。

① 曝气控制:通过对比固定 DO 设定值和基于氨氮改变 DO 设定值两种方案的模拟结果,建议根据氨氮浓度变化设定 DO 值进行曝气控制,在保证出水氨氮达标的基础上实现节能。

② 加药控制:在进水水质变化不大的前提下,建议采用固定加药浓度投加除磷药剂,根据进水流量的变化改变加药量,在减少 TP 超标风险的同时可在一定程度上节省药耗。

参考文献:

- [1] Hulsbeek J J W, Kruit J, Roeleveld P J, *et al.* A practical protocol for dynamic modelling of activated sludge systems [J]. *Water Sci Technol*, 2002, 45(6): 127 - 136.
- [2] 郝晓地,李天宇,吴远远,等. A^2/O 工艺用于污水处理厂升级改造的适宜性探讨[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(21): 18 - 24.
Hao Xiaodi, Li Tianyu, Wu Yuanyuan, *et al.* Discussion on suitability of A^2/O process for upgrading of wastewater treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(21): 18 - 24 (in Chinese).
- [3] 刘伟岩,李佟,葛勇涛,等. 数学模拟技术在高碑店污水处理厂的应用[J]. *给水排水*, 2011, 37(10): 111 - 115.
Liu Weiyan, Li Tong, Ge Yongtao, *et al.* Application of numerical modeling technology in Gaobeidian Wastewater Treatment Plant[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2011, 37(10): 111 - 115 (in Chinese).
- [4] 孙培德,杨朋飞,楼菊青,等. 全耦合活性污泥模型 (FCASM3) 在 $A + A^2/O$ 工艺污水处理厂中的数值模拟应用[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(9): 3561 - 3572.
Sun Peide, Yang Pengfei, Lou Juqing, *et al.* The application of fully coupled activated sludge model No. 3 (FCASM3) in wastewater treatment plant [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(9): 3561 - 3572 (in Chinese).
- [5] 郝晓地,宋虹苇,胡沅胜,等. 数学模拟技术用于污水处理工艺的运行诊断与优化[J]. *中国给水排水*, 2007, 23(14): 94 - 99.
Hao Xiaodi, Song Hongwei, Hu Yuansheng, *et al.* Application of mathematic simulation technology to trouble-shooting and operational optimization of wastewater treatment process [J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(14): 94 - 99 (in Chinese).
- [6] 朱向东,郝二成,周军,等. ASM2d 模型在北京高碑店污水处理厂的应用[J]. *给水排水*, 2007, 33(4): 101 - 104.
Zhu Xiangdong, Hao Ercheng, Zhou Jun, *et al.* Application of ASM2d model in Gaobeidian Wastewater Treatment Plant in Beijing [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2007, 33(4): 101 - 104 (in Chinese).
- [7] 郝二成,郭毅,刘伟岩,等. 基于数学模拟的污水厂运行分析——建模与体检[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(15): 23 - 28.
Hao Ercheng, Guo Yi, Liu Weiyan, *et al.* Operation analysis of wastewater treatment plant based on mathematical simulation: modeling and examination [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(15): 23 - 28 (in Chinese).



作者简介:郝二成(1975 -),男,河北辛集人,硕士,高级工程师,从事污水处理工艺优化及模拟研究。

E-mail: haoercheng@bewg.net.cn

收稿日期:2019-08-08