

李文华,牛晓靖,张建卓. 污水处理中溶解氧的模糊 PID 控制[J]. 江苏农业科学,2015,43(1):362-364.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.01.119

# 污水处理中溶解氧的模糊 PID 控制

李文华,牛晓靖,张建卓

(辽宁工程技术大学机械工程学院,辽宁阜新 123000)

**摘要:**为了利用活性污泥的生物凝聚、吸附和氧化作用,使污水得到净化,需要使活性污泥得到足够的氧气。结合污水处理工艺中溶解氧控制系统的非线性、时变性和滞后性等特点,提出采用参数自整定模糊 PID 控制方法,设计了溶解氧模糊 PID 控制系统,并利用 Matlab 仿真软件将该方法与常规 PID 控制进行建模与仿真分析。结果表明,模糊 PID 控制具有更好的响应速度和稳态性能,该系统不仅实现溶解氧的稳定控制,保证出水达标,而且降低了运行成本,提高了生产效率。

**关键词:**污水处理;溶解氧;模糊 PID 控制;Matlab

**中图分类号:** X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)01-0362-03

我国淡水资源缺乏,工业和生活污水排放量又日益增加,使得污水处理成为环境保护的重要课题。污水处理实现出水达标排放将直接改善对地表水及地下水的水质污染,有效缓解水资源危机,对促进生态平衡具有重要意义<sup>[1]</sup>。活性污泥法是目前城市污水及大中型规模有机工业废水处理的主要工艺之一<sup>[2]</sup>,其处理效果在很大程度上取决于溶解氧(dissolved oxygen, DO)浓度,曝气耗费占运行费用的 60%~80%。目前大多数污水厂采用人工调整法,即操作人员根据经验和实验室化验或现场仪表的数据,每天或在更长的时间段内调整鼓风机风量,使曝气池正常运行。但是,由于进水水质具有很大不确定性,这种方法很难达到 DO 浓度的最佳控制和节能的目的。而采用参数自整定模糊 PID 控制可以很好地解决这一控制难题,它将模糊理论与 PID[比例(proportion)、积分(integral)、微分(derivative)]控制策略相结合,实现了 PID 参数在线自适应调节,对污水处理这种非线性、大延迟等复杂系统起到了良好控制效果,使污水处理系统既具有模糊控制的适应性强、灵活等优点,又具有 PID 控制精度高的特点<sup>[3]</sup>。

## 1 溶解氧特性分析

活性污泥法是以活性污泥为主体的污水生物处理的主要方法。污水反应池中溶解氧的含量将直接影响活性污泥的活性,为了保证出水达标,工艺运行过程中操作人员要对 DO 浓度加以控制,通常好氧区的 DO 浓度含量为 1~3 mg/L(好氧区上、中、下层 DO 含量一般误差不大于 0.5 mg/L),保证好氧微生物进行正常的新陈代谢活动。DO 浓度过低,会造成硝化效率下降,导致出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度升高等问题;DO 浓度过高,不仅增加能源的浪费,而且还会造成污泥的老化等现象<sup>[4-5]</sup>,因此需要严格控制好氧区溶解氧的浓度。但是由于污水中的 DO 浓度具有不确定性且没有什么规律可循,用常

规的 PID 控制方法很难实现自动控制,需要 PID 控制器随着进水水质的变化而不断调整控制参数,由此提出参数自整定模糊 PID 控制方法。该方法引入了逻辑推理,有较强的自适应能力,对非线性等复杂系统有良好的控制效果,并且有效地解决常规 PID 不能兼顾动态性能和静态性能之间、设定值和扰动值之间的矛盾。DO 控制系统如图 1 所示。

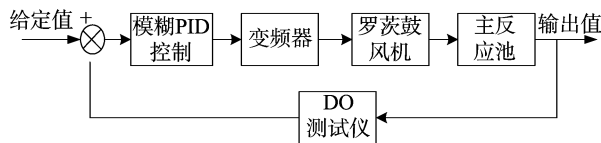


图1 DO控制系统

## 2 模糊 PID 控制器的设计

### 2.1 模糊 PID 控制系统的组成及其工作原理

模糊 PID 控制系统的组成如图 2 所示。本污水处理系统采用西门子 S7-300 PLC 进行控制,首先将量化因子置入 PLC,然后利用其 A/D 模块将 DO 测试仪检测到的数值和给定值进行比较得到偏差  $e$  和偏差的变化率  $e_c$  进行处理,作为输入量输入到 PLC 中,将其进行模糊化、模糊推理及解模糊集得到实际输出量,输出量经 D/A 模块输出进而调节变频器的频率,控制鼓风机曝气量<sup>[6-7]</sup>。

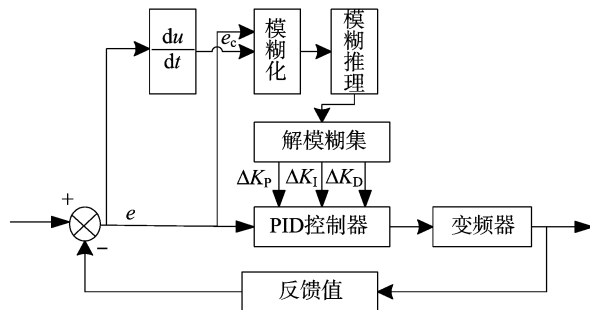


图2 模糊PID控制系统

### 2.2 精确量的模糊化

根据 DO 现场的调节经验,设输入量偏差  $e$  和偏差的变

收稿日期:2014-03-04

基金项目:霍州煤电高层专业人才培养工程(编号:HMGS201221)。

作者简介:李文华(1964—),男,辽宁阜新人,教授,主要从事流体工程 and 机电液一体化技术研究。E-mail:niuxiaojing0602@163.com。

化率  $e_c$  的连续论域均为  $[-2, 2]$ ; 输出量  $\Delta K_p$  的连续论域为  $[-0.06, 0.06]$ ,  $\Delta K_i$  的连续论域为  $[-0.06, 0.06]$ ,  $\Delta K_d$  的连续论域为  $[-3, 3]$ 。设上述 5 个变量  $e$ 、 $e_c$ 、 $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的模糊子集均为: {负大(NB), 负中(NM), 负小(NS), 零(ZO), 正小(PS), 正中(PM), 正大(PB)}, 偏差  $e$  和偏差的变化率  $e_c$  的论域均为  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ ;  $\Delta K_p$  的论域为  $\{-0.3, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3\}$ ,  $\Delta K_i$  的模糊论域为  $\{-0.06, -0.04, -0.02, 0, 0.02, 0.04, 0.06\}$ ,  $\Delta K_d$  的模糊论域为  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。可以看出, 偏差  $e$  和偏差的变化率  $e_c$  的量化因子均为 1.5;  $\Delta K_p$  的比例因子为 0.2;  $\Delta K_i$  的比例因子为 1;  $\Delta K_d$  的比例因子为 1。输入量与输出量模糊子集的隶属度函数均选择三角隶属函数<sup>[8-9]</sup>。偏差  $e$  和偏差的变化率  $e_c$  的隶属度函数如图 3 所示, 其中 X 轴表示各变量的模糊值, Y 轴表示各变量的隶属度。

### 2.3 模糊控制规则的建立

根据现场的 DO 手动控制经验, 得到以下参数调整规则: (1) 当偏差  $|e|$  较大时, 即实测值和给定值相差较大时, 为了提高系统响应速度、消除误差, 应增大  $K_p$  的取值, 同时为防止积分和微分过饱和,  $K_i$  应取值很小或 0,  $K_d$  取较小值。(2) 当  $e \cdot e_c < 0$  时, 即偏差的绝对值正在逐渐减小, 此时若偏差的绝

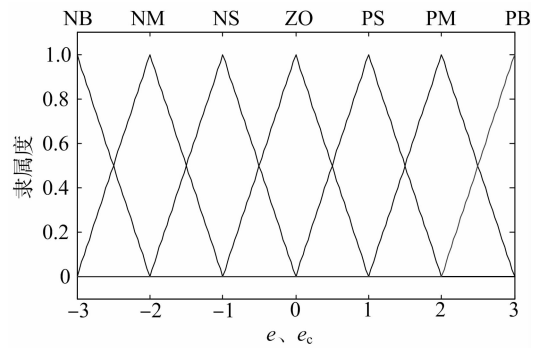


图3 偏差  $e$  和偏差的变化率  $e_c$  的隶属度函数

对值比较大, 为了提高系统的稳态性能和动态性能, 可取中等大小的  $K_p$ 、 $K_d$  值, 较小的  $K_i$  值; 若偏差的绝对值比较小, 为了提高系统的稳态性能, 防止系统振荡, 可取较小的  $K_p$ 、 $K_d$  值, 较大的  $K_i$  值。(3) 当  $e \cdot e_c > 0$  时, 即偏差的绝对值正在逐渐增大, 此时若偏差绝对值比较大, 为了提高系统的稳态性能和动态性能, 可取较大的  $K_p$  值, 较小的  $K_i$  值, 中等大小的  $K_d$  值; 若偏差绝对值比较小, 为了提高系统的稳态性能, 防止系统振荡, 可取中等大小的  $K_p$  值, 较大的  $K_i$  值, 较小的  $K_d$  值<sup>[10]</sup>。由以上参数调整规则建立模糊控制规则如表 1 所示。

表 1  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  模糊控制规则

	$e$						
$\Delta K_p/\Delta K_i/\Delta K_d$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e_c$							
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	ZO/ZO/PS
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/PS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	Z/OZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

根据模糊控制规则表, 在模糊规则编辑器里可以建立 49 条控制规则, 如 If  $e = \text{NB}$  and  $e_c = \text{NB}$  then  $\Delta K_p = \text{PB}$  and  $\Delta K_i = \text{NB}$  and  $K_d = \text{PS}$ <sup>[11]</sup>。  $\Delta K_p$  在论域上的输出曲面如图 4 所示, 其中  $x$ 、 $y$  轴分别表示  $e$ 、 $e_c$  的模糊值,  $z$  轴表示  $\Delta K_p$  的隶属度。

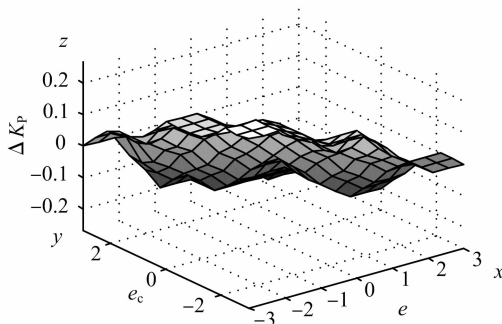


图4  $\Delta K_p$  输出曲面

### 2.4 模糊推理及解模糊集

由于变频器只能识别准确的控制量, 因此要对 PID 控制器输出的模糊子集进行去模糊化处理。采用常用的 Mamdani 模糊推理方法<sup>[8]</sup>, 以  $\Delta K_p$  为例, 由 If  $e = \text{NB}$  and  $e_c = \text{NB}$  then  $\Delta K_p = \text{PB}$  规则可得  $\Delta K_p$  的隶属度为:

$$\mu_{P1}(\Delta K_{P1}) = \mu_{NB}(e) \cdot \mu_{NB}(e_c)。$$

式中:  $\mu_{NB}(e)$  为系统偏差  $e$  在 NB 时的隶属度,  $\mu_{NB}(e_c)$  为系统偏差变化率  $e_c$  在 NB 时的隶属度, “ $\wedge$ ”表示取小。

据此推理可得到, 在所有模糊规则下的隶属度  $\Delta K_p$ , 由重心法得在某一采样时刻有:

$$\Delta K_p = \frac{\sum_{i=1}^{49} \mu_{P_i}(\Delta K_{P_i}) \cdot \Delta K_{P_i}}{\sum_{i=1}^{49} \mu_{P_i}(\Delta K_{P_i})}。$$

式中:  $\mu_{P_i}(\Delta K_{P_i})$  ( $i = 1, 2, \dots, 49$ ) 为  $\Delta K_p$  第  $i$  条模糊推理规则的隶属度,  $\Delta K_{P_i}$  为第  $i$  条模糊推理规则隶属度对应的模糊值。同理可得  $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的表达式, 由上面的计算式得到的参数为模糊值, 因此需要将得到的值乘以 1 个比例因子, 得到  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  的实际值, 所以有 PID 新的参数整定式:

$$\begin{cases} K_p = K_p^0 + \Delta K_p \\ K_i = K_i^0 + \Delta K_i \\ K_d = D_d^0 + \Delta K_d \end{cases}。$$

式中:  $K_p^0$ 、 $K_i^0$ 、 $D_d^0$  为 PID 控制器的初始值,  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  为模糊控制器的输出。

## 3 系统仿真分析

为了验证模糊 PID 控制的可行性, 本研究采用 Matlab 的

Fuzzy 模块和 Simulink 工具进行仿真分析。Simulink 提供了丰富的仿真模块,实现动态系统建模与分析,为该研究的可行性提供有力的证据。将此系统看作是 1 个比例环节、一阶惯性环节和滞后环节模型<sup>[12]</sup>,有下列关系:

$$G(S) = \frac{K_c}{T_0 S + 1} e^{-s\tau},$$

式中:  $K_C$  为被控对象的放大倍数,  $T_0$  为时间常数,  $\tau$  为延迟时间。在本系统中取  $K_C$  为 7.8126,  $T_0$  为 73 s,  $\tau$  为 2 s。在 Matlab 的 Simulink 工具中调用模糊控制器并建立 DO 控制系统仿真模型, 如图 5 所示<sup>[13-14]</sup>。

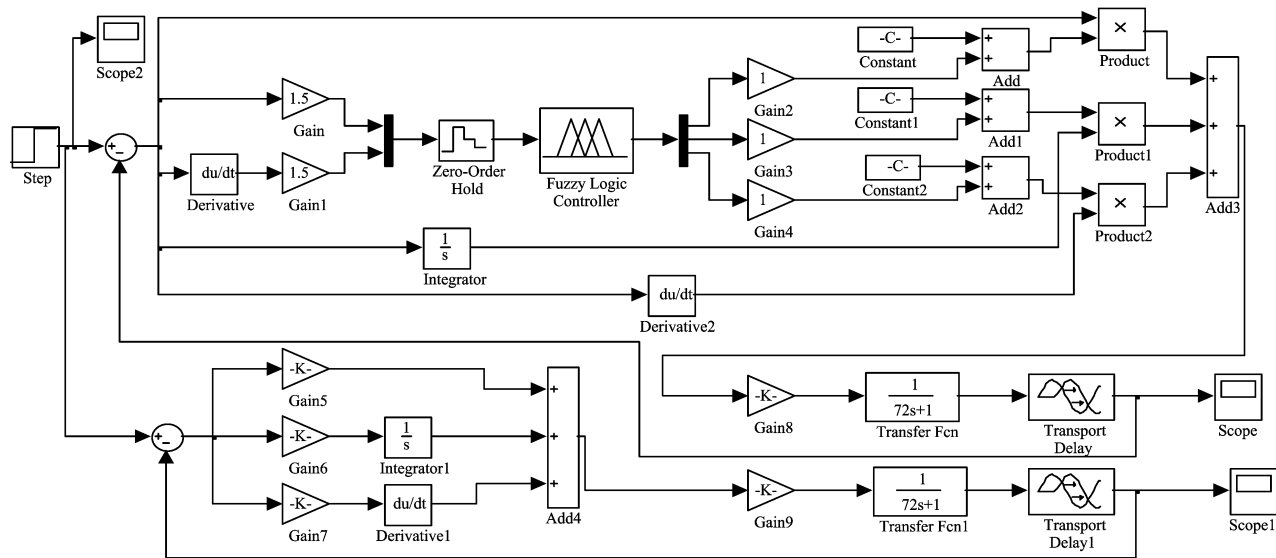


图5 DO 仿真模型

PID 控制器的初始参数为  $K_p^0 = 2.861\ 25, K_i^0 = 0.027\ 37, K_d^0 = 2.500\ 11$ 。

将建好的模型在 Simulink 中进行仿真,调试后得到 DO 的 PID 控制和模糊 PID 控制的仿真图形如图 6 所示,其中 X 轴表示时间,Y 轴表示系统输出值。

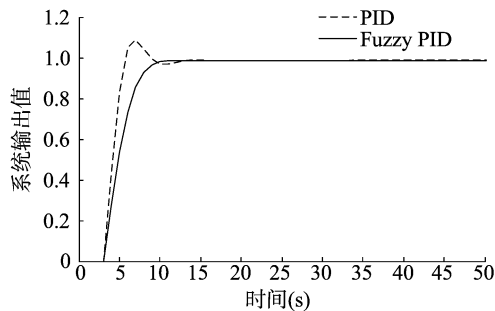


图6 DO 的 PID 控制和模糊 PID 控制的仿真图形

仿真结果表明,采用 PID 控制的控制效果较差,难以取得令人满意的效果;但是当 DO 的调节采用模糊 PID 控制时,相对于常规 PID 控制具有鲁棒性更好、响应速度更快、调节精度更高、稳态性能更好、可靠性更高等优点,达到了较好的控制效果。

## 4 结论

利用 Matlab 对溶解氧的常规 PID 控制和模糊 PID 控制进行仿真分析,结果表明,采用模糊 PID 控制时系统运行具有更高的稳定性和可靠性,更能满足污水处理工艺的要求。采用模糊 PID 控制溶解氧不仅使主反应区的溶解氧值保持稳定,保证了出水质量,而且减少了能源浪费,提高了生产效率,具有广阔的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 田丽丽,姜 博,付 义. 全国水污染现状分析[J]. 黑龙江科技信息,2012(25):61.
- [2] 李 盛,许小华. 浅析几种城市污水处理工艺[J]. 江西水利科技,2013,39(2):155-159.
- [3] 楚焱芳,张瑞华. 模糊控制理论综述[J]. 科技信息,2009(20):161-162.
- [4] 霍国友,花勇刚. 溶解氧对 CASS 工艺影响的研究[J]. 山西建筑,2009,35(10):188-189.
- [5] 赵 喆,程 佳,田丽丽. 循环活性污泥工艺在污水处理厂中的应用[J]. 黑龙江科技信息,2013(14):77.
- [6] 姚发闪,张 涛,潘海迪,等. 模糊 PID 和变频器在导热油温度控制中的应用[J]. 自动化与仪表,2013(5):36-39.
- [7] 刘晓川. PID 与模糊控制相结合的智能温度控制系统[J]. 电子质量,2012(2):19-21.
- [8] Zdenko K, Stjepan B. 模糊控制器设计理论与应用[M]. 胡玉玲,译. 北京:机械工业出版社,2010:7-35.
- [9] 张 岩. 集中供暖系统室温模糊 PID 控制及系统研究[D]. 阜阳:辽宁工程技术大学,2005.
- [10] Ogata K. 现代控制工程[M]. 卢伯英,佟明安,译. 5 版. 北京:电子工业出版社,2012:430-454.
- [11] 左 婷. 模糊 PID 控制中模糊控制规则的获取方法[D]. 长春:东北师范大学,2010.
- [12] 于广平,苑明哲,王 宏. 活性污泥法污水处理数学模型的发展和应用[J]. 信息与控制,2006,35(5):614-618,623.
- [13] 黄忠霖. 控制系统 MATLAB 计算及仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2001:105-399.
- [14] 张凤莉,李 泰. 自适应模糊 PID 控制系统及其 MATLAB 仿真[J]. 漯河职业技术学院学报,2011,10(5):34-35.