

# 制浆废水厌氧处理过程中 pH 的控制算法研究

康家玉, 高光荻, 刘先保

(陕西科技大学 电气与信息工程学院, 西安 710021)

**摘要:** 以山东某纸厂的制浆废水厌氧处理过程为背景, 建立了 pH 调节系统的数学模型, 组建了模糊 PID 控制系统, 并用 Matlab 仿真软件对其进行了仿真; 研究比较了 PID 控制、模糊控制和模糊 PID 控制的阶跃响应、抗干扰响应, 对比分析了模型参数波动时这 3 种控制算法的鲁棒性能; 从仿真结果看, 模糊 PID 的阶跃响应既具有模糊控制的快速性又具有 PID 控制的稳态无误差, 在受到干扰后可以很快恢复到稳态值, 达到比较好的控制效果; 模型参数发生波动后, 模糊 PID 控制超调量相对较少, 稳态误差为零, 但要在 200 s 时才基本稳定; 实验证明模糊 PID 控制算法的综合性能最好。

**关键词:** 制浆废水; 厌氧处理; pH 控制; 仿真

## Research on Control Strategy of pH for Pulp Wastewater Anaerobic Treatment Process

Kang Jiayu, Gao Guangdi, Liu Xianbao

(College of Electrical & Information Engineering, Shannxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** A pH control system is established with the actual pulp wastewater anaerobic treatment system in Shandong as the background. A mathematical model of pH regulation system is established and the formation of a pH adjusting with fuzzy PID control system is designed. Simulation using Matlab was carried out to compare the PID control, fuzzy control and fuzzy PID control of the step response and interference response. The results show that; the fuzzy PID control has better comprehensive effect in terms of response speed, stability and disturbance resistance. The test show is that the performance of fuzzy PID control is the best.

**Key words:** pulp wastewater; biological treatment; pH control; simulation

### 0 引言

制浆废水浓度高, 构成了造纸工业废水总污染量的绝大部分。对于那些可以用厌氧处理的制浆废水, 可以在与总体废水流汇合之前先将其进行厌氧处理。在厌氧消化过程中, “酸化”是最常见也是最严重的问题。“酸化”一旦发生, 出水水质明显下降, 而且厌氧处理器需要重新接种污泥, 很长时间才能恢复正常, 问题的关键在于 pH 的控制<sup>[1]</sup>。

### 1 厌氧处理过程中 pH 的最佳范围

厌氧菌适合于生长在中性或弱碱性的环境中, 过碱或过酸的环境对厌氧菌的生命活动均为不利<sup>[2]</sup>, 其中产甲烷菌对 pH 的敏感度最高。pH 在 6.8~7.2 之间时产甲烷菌的活性最高<sup>[3]</sup>。pH 高于 7.5 或低于 6.2, 产甲烷菌的生长被明显抑制, 而产酸菌的活性仍很旺盛, 这会使废水的 pH 进一步降至 4.5~5.0 而使废水处于酸化状态, 这种酸化状态对产甲烷菌是有毒害作用的。pH 偏离最佳范围越大, 持续时间越长, 将会有越多的产甲烷菌被抑制甚至被杀死<sup>[4]</sup>。产甲烷菌在整个的转化过程中担任

着重要的角色, 是把有机碳最终转化为  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  而从水中逸出的最后一个步骤的原因, 只有在最后一个步骤一甲烷产生, 污染物 (COD) 才算彻底从污水中被除去。

为使提高系统的可靠性, 根据废水的组成, 通常是将酸化阶段和产甲烷阶段分开设置, 在调制池中先对废水的 pH 进行控制, 之后再送到厌氧反应器。通过这种方式, 敏感的甲烷菌被保护起来, 以防止突然的环境变化。调制池废水的 pH 控制是厌氧处理过程的重点。

### 2 厌氧处理过程中 pH 建模

工程中常用强酸 (HCl)、强碱 (NaOH) 作为中和液来调节调制池废水的 pH。其中和过程的流程如图 1 所示。调制池入口和出口回流管上均安装有在线 pH 检测仪, 其中出口处的 pH 检测仪放在调制池回流管上是出于工艺上调制池与反应器之间紧临, 而且这段管道上已经安装了出水检测流量计, 回流管中的水质与出水管中的水质完全一致, 回流管道比较长的情況考虑。

图 1 中,  $F$  为废水的流量,  $u_1$  和  $u_2$  为碱和酸中和流的流量,  $a_1$  和  $a_2$  为碱和酸中和流的浓度,  $FT_1$  是调制池支线路废水流量,  $FT_2$  是送往反应器的废水流量。

对于如上所述的连续搅拌混合均匀的 pH 中和反应过程, 很多文献已经对其进行了建模, McAvoy 等根据物质守恒定律和化学平衡方程, 经过严格的数学推导得到了反应过程的数学

收稿日期: 2013-11-23; 修回日期: 2014-02-17。

基金项目: 陕西科技大学博士基金启动资助项目 (BJ11-14)。

作者简介: 康家玉 (1969-), 女, 江西泰和人, 副教授, 博士, 主要从事过程控制、电气传动等方面的教学与科研工作。

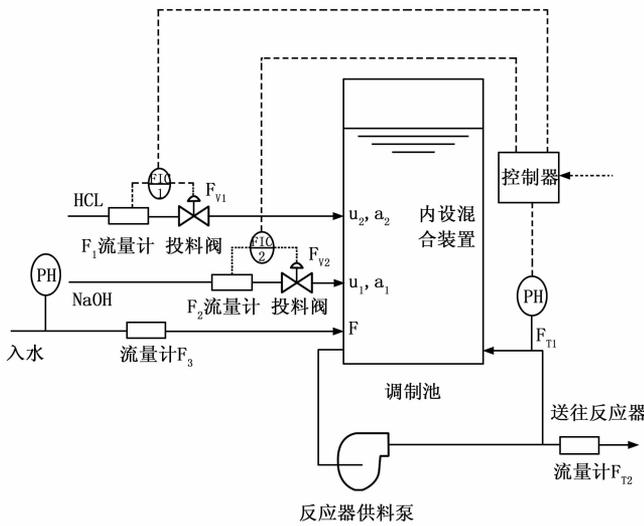


图 1 pH 中和控制系统流程图

模型<sup>[6]</sup>, Gustafsson 将模型推广至一般情况<sup>[7]</sup>. Wright 等推导出来一种一阶模型, 与上述 pH 模型具有同样的输入/输出特性<sup>[8]</sup>. 本文就是基于该模型对 pH 动态过程进行描述.

在图 1 所示的 pH 中和控制系统中, 调制池体积恒定且调制池内反应物充分混合, 则根据物料平衡关系, 可以得出其动态模型如下:

$$V \frac{dx_i}{dt} = F(c_i - x_i) + u(a_i - x_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i(\text{pH})x_i + A(\text{pH}) = 0 \quad (2)$$

其中:  $F$  为废水的流量,  $u$  为中和流的流量,  $V$  代表调制池容积,  $c_i$  为第  $i$  种过程流的离子浓度,  $a_i$  是中和流中第  $i$  种成分酸或碱的离子浓度,  $x_i$  为流出的第  $i$  种酸或碱的总离子浓度;  $A(\text{pH}) = 10^{-(\text{pH})} - 10^{(\text{pH}-14)}$ ;  $a_i(\text{pH})$  为酸碱加权因子, 对于一元强酸  $a_i(\text{pH})$  是  $-1$ , 对于一元强碱为  $+1$ . 因此, 当只有强酸强碱溶液存在时, 溶液的浓度可以直接组合, 当有弱酸弱碱存在时, 要乘以一个加权因子  $a_i(\text{pH})$ . 加权和  $\sum_{i=1}^n a_i(\text{pH})x_i$  决定了溶液要达到设定点所需中和液的体积. 此加权和称为强酸当量. 强酸当量直接反映了将 pH 滴定到设定点所需的中和剂的多少, 作为控制目标较之 pH 具有更大的实际意义.

在中和滴定过程中, 实测 pH 和设定值  $\text{pH}_{SV}$  之间的差值, 是一种非线性转换过程, 令:

$$Y = T(\text{pH}_{SV}) - T(\text{pH}) \quad (3)$$

其中:  $T(\text{pH})$  表示中和曲线, 则式 (3) 是一种 pH 的动态平衡的输出<sup>[9]</sup>, 只要 pH 和  $T(\text{pH})$  之间有一个一对一的关系, 则把 pH 控制为  $\text{pH}_{SV}$  就等价于控制  $Y$ , 让  $Y=0$ . 这样就把 pH 的控制问题转化成为一个线性问题, 这种转换实际上是把要给调制池里加多少酸或碱离子转换成为给调制池中加的酸或碱中和液的流量问题. 为了实现这种转换, 还要进行以下变换:

假设模型参数  $F, V, a_i, c_i$  不随时间变化, 则下式成立:

$$V \frac{d[(c_i - x_i)/(c_i - a_i)]}{dt} = u - (F + u)(c_i - x_i)/(c_i - a_i) \quad (4)$$

也就是说, 如果初始时刻系统处于稳态, 则:

$$\frac{c_1 - x_1(t)}{c_1 - a_1} = \frac{c_2 - x_2(t)}{c_2 - a_2} = \dots = \frac{c_n - x_n(t)}{c_n - a_n} \quad (5)$$

令

$$X(t) = \frac{c_i - x_i(t)}{c_i - a_i} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

则式 (4) 转换为:

$$V \frac{dX}{dt} = u - (F + u)X \quad (6)$$

再把式 (5) 分子分母分别相加, 则 pH 的式 (2) 转换成式 (7):

$$X(t) = \frac{A(\text{pH}) + \sum_{i=1}^n a_i(\text{pH})c_i}{\sum_{i=1}^n a_i(\text{pH})(c_i - a_i)} \quad (7)$$

而中和曲线:

$$T(\text{pH}) = - \frac{A(\text{pH}) + \sum_{i=1}^n a_i(\text{pH})c_i}{A(\text{pH}) + \sum_{i=1}^n a_i(\text{pH})a_i} \quad (8)$$

联立式 (7) 和式 (8) 可得:

$$\frac{T(\text{pH})}{T(\text{pH}) + 1} = X \quad (9)$$

中和曲线  $T(\text{pH})$  表示把 pH 由一个值调到另一个值所用的中和液与过程液的体积之比, 在制浆造纸废水厌氧处理过程的调制池中和过程中, 该值远小于 1, 并且中和流流量  $u$  和废水流量  $F$  之间有关系:  $u \ll F$ , 则可以对式 (6) 和式 (9) 分别简化得到如下输入输出关系:

$$V \frac{dX}{dt} = u - FX \quad (10)$$

$$T(\text{pH}) = X \quad (11)$$

下面对 pH 控制的研究就是基于以上得到的式 (10) 和 (11) 两式. 以 pH 偏高加酸过程为例, 通常入废水由调制池供料泵提供, 泵体完全启动后  $F$  基本为定值, 可将其看作常量. 将上式作拉氏变换得到传递函数:

$$G_p(S) = \frac{1}{V_s + F} \quad (12)$$

考虑到由于管道以及测量仪表检测过程带来的纯延迟, 应加上延迟因子, 传递函数变为:

$$G_p(S) = \frac{1}{V_s + F} e^{-s\tau} \quad (13)$$

式 (13) 是该 pH 中和过程的模型, 根据实际情况, 式中各参数如下:

$$V = 102 \text{ m}^3; F = 250 \text{ m}^3/\text{h} = 0.069 \text{ m}^3/\text{s}; \tau = 4 \text{ s}$$

将各参数带入式 (13), 并化简为标准形式得到:

$$G_p(S) = \frac{K_0}{T_s + 1} e^{-s\tau} = \frac{14.49}{1478.26s + 1} e^{-4s} \quad (14)$$

由 (14) 式得到: 比例增益  $K_0 = 14.49$ ; 过程等效容积滞后时间  $T = 1478.26 \text{ s}$ .

### 3 pH 控制系统仿真研究

#### 3.1 pH 的模糊 PID 控制系统结构

常规的模糊控制器是双人单出, 以误差和误差变化率作为输入变量, 相当于是个 PD 控制器, 因控制器中少了积分作用, 使模糊控制器无法消除系统稳态误差, 所以很难实现较高的控制精度。而传统 PID 调节器因为有积分调节作用, 理论上是可以使控制系统的稳态误差输出为零的, 可以很好地消除稳态误差。

如果将模糊控制器和 PID 控制相结合, 形成模糊 PID 双模控制器, 当误差大于某个阈值时, 采用模糊控制以获得很好的快速性能; 当误差小于这个阈值时, 采用 PID 控制以获得很好的稳态性能。模糊 PID 控制仿真结构如图 2 所示。这和谢仕宏提出的 Fuzzy-PID 控制<sup>[10]</sup>又不同, Fuzzy-PID 控制只是通过模糊运算来改变 PID 的参数, 原则上还是 PID 控制, 不能适应厌氧处理过程的快速性要求。厌氧处理过程中 pH 的控制是滞后大、难于精确建模、多变量、强干扰的系统, 用模糊 PID 对其进行控制, 应该可以很好地解决。

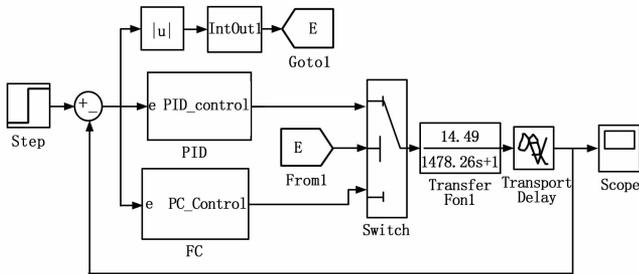


图 2 模糊 PID 控制仿真结构框图

#### 3.2 阶跃响应分析

下面将用 Matlab 仿真软件来比较 PID、模糊、模糊 PID 控制 3 种控制方法下, pH 的阶跃响应控制效果。图 3 为 pH 设定值为 7 时阶跃响应曲线放在一起的局部放大图。

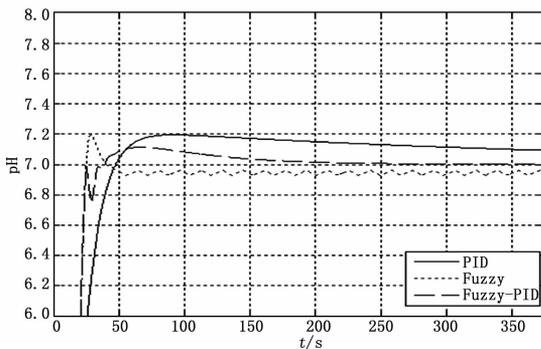


图 3 PID、模糊、模糊 PID 控制阶跃响应曲线

比较这 3 条响应曲线, PID 响应在有比较严重的超调下, 上升速度仍然比较慢, 到 500 s 处才基本稳定; 而模糊响应在在 100 s 处就已经平稳了, 但一定的稳态误差。模糊 PID 响应超调量比上面两种都小, 在 200 s 处达到平稳, 无稳态误差。

#### 3.3 pH 控制系统抗干扰响应仿真曲线

为了进一步研究 pH 在 PID、模糊、模糊 PID 3 种控制模式中, 稳态下系统的抗干扰情况, 在结构图的环内  $t=1000$  s

时, 加入阶跃干扰, 对应得到 3 种控制算法的响应曲线的局部放大图如图 4 所示。

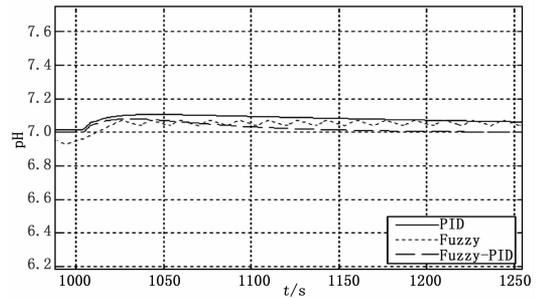


图 4 抗干扰响应曲线局部放大图

从图 4 抗干扰响应曲线可以看出, 3 种控制中模糊 PID 的效果是最好的, 在受到某些干扰时, 模糊控制算法的稳态值会发生变化, 即有稳态误差; 而 PID 和模糊 PID 则可以恢复到给定值, 而模糊 PID 的恢复时间要比 PID 小得多, 在受到干扰后模糊 PID 可以很快恢复到稳态值, 达到比较好的控制效果。

#### 3.4 pH 控制系统鲁棒性分析

所谓“鲁棒性”, 是指控制系统在一定 (结构, 大小) 的参数扰动下, 维持某些性能的特性。废水的温度、流量、污染特性等因素的变化都可能引起实际数学模型发生变化, 包括系统的结构和参数都有可能变化, 那么在参数变化了的情况下, 如果控制器的参数不变, 它们的响应效果将会怎样呢? 接下来对 pH 控制系统的鲁棒性进行分析。

图 5 为 PID 控制分别在原模型、加了一个小惯性环节和滞后时间变化时的响应曲线, 可看出模型参数发生扰动后, PID 控制响应有很大的超调, 而且要到 1000 s 以后才基本稳定。

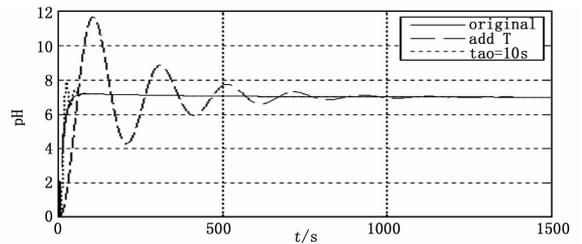


图 5 参数扰动时 PID 控制的鲁棒性

图 6 为模糊控制分别在原模型、加了一个小惯性环节和滞后时间变化时的响应曲线, 可看出模型参数发生扰动后, 模糊控制超调量比 PID 控制时的相对较少, 而且响应速度很快, 大概在 70 s 处就已经稳定了, 但缺点是有一定的稳态误差。

图 7 为模糊 PID 控制分别在原模型、加了一个小惯性环节和滞后时间变化时的响应曲线, 可看出模型参数发生扰动后, 模糊 PID 控制超调量相对较少, 可以避免超调量过大对厌氧菌特别是甲烷菌的不利影响。

### 4 结论

针对厌氧处理过程中易出现的“酸化”问题, 指出了厌氧处理过程中 pH 是关键被控量。以实例中 pH 调节过程为例, 研究了 pH 调节原理, 建立了 pH 调节的数学模型, 组建了 pH 的模糊 PID 控制系统。用 Matlab 仿真软件分别对 pH 的传统 PID 控制、模糊控制和模糊 PID 控制的阶跃响应、抗干扰

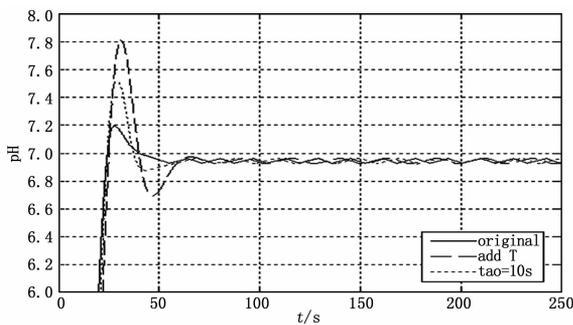


图 6 参数扰动时模糊控制的鲁棒性

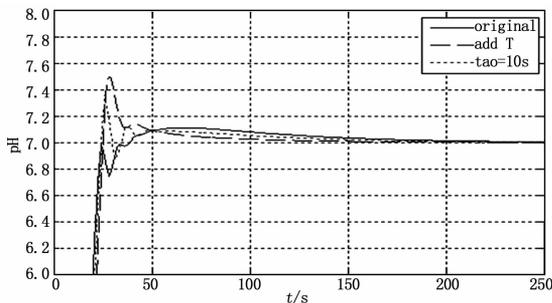
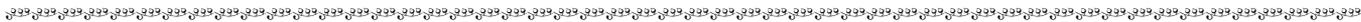


图 7 参数扰动时模糊 PID 控制的鲁棒性

响应和模型参数发生扰动时的鲁棒性进行了仿真研究，对比分析了这 3 种控制算法下的仿真结果，结论是 pH 模糊 PID 控制算法的综合性能最佳。



(上接第 1792 页)

的 PC 机作为监控终端，在校车上安装车载监控终端，使用两部三星智能手机分别作为儿童家长手机和老师手机。测试项目包括：司机身份的检测与报警功能、酒后驾车检测与报警功能、超载报警功能、到站预报功能、儿童遗忘报警功能、超速报警功能、防追尾警示功能、一键求助功能。测试时人为生成测试项目的事件，在车载终端、学校监控终端、教育局监控中心终端、儿童家长手机、老师手机上观察系统的响应并记录响应时间。各种检测与报警项目分别各做 10 次测试，其系统功能的测试成功率与响应时间如表 1 所示。

表 1 系统功能测试的成功率与响应时间

| 测试内容         | 成功率 | 响应时间 (s) |
|--------------|-----|----------|
| 司机身份的检测与报警功能 | 0.9 | <7       |
| 酒后驾车检测与报警功能  | 0.8 | <9       |
| 超载报警功能       | 1   | <5       |
| 到站预报功能       | 1   | <8       |
| 超速报警功能       | 1   | <5       |
| 儿童遗忘报警功能     | 1   | <8       |
| 防追尾警示功能      | 1   | <2       |
| 一键求助功能       | 1   | <5       |

## 5 结束语

本文针对校车安全问题，提出了一种全面、连续、实时监控一定区域内校车安全的解决方案，并应用传感网技术与云计算技术，设计和开发了校车安全监控系统。测试结果表明，系

## 参考文献:

- [1] Flores J, Arcay B, Arias J. An intelligent system for distributed control of an anaerobic wastewater treatment process [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2000, 13: 485-494.
- [2] 李刚, 杨立中, 欧阳峰. 厌氧消化过程控制因素及 pH 值和 Eh 的影响分析 [J]. 西南交通大学学报, 2001, 36 (5): 518-528.
- [3] 晏令军, 蒋立人. 水解酸化在制浆造纸废水处理中的应用 [J]. 中国造纸, 2011, 30 (3): 53-57.
- [4] 樊明霞. 污水处理过程中 pH 值专家控制系统的应用研究 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2007, 7.
- [5] Biothane System International. Enclosure F: Anaerobic Microbiology [M]. 2006.
- [6] McAvoy T J, Hsu E, Lowenthal E. Dynamics of pH a controlled stirred tank reactor [J]. Ind. Eng. Chem. Process Des., 1972, 11 (1): 68-70.
- [7] Gustafsson T K. Dynamic modeling and reaction invariant control of pH [J]. Chem. Eng. Sci., 1983, 38 (3): 389-394.
- [8] Wright R A, Soroush M, Kravaris C. Strong acid equivalent control of pH processes using the strong acid equivalent [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 1991, 30: 1561-1565.
- [9] Wright R A, Kravaris C. Dynamically equivalent output and their use in nonlinear controller synthesis [J]. Chem. Eng. Sci., 1993, 48: 3207-3223.
- [10] 谢仕宏. 酸碱中和过程 pH 值的 Fuzzy-PID 控制 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (9): 2088-2091.

统能够稳定地实现所设计的各项功能，并具有可扩展性强和维护性好的特点。应用该解决方案，学校、教育管理部门、学校和家长可以对校车安全进行远程实时监控，以减少校车安全事故的发生，更好地保障广大少年儿童的生命安全。该系统经商品化后将具有很好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 丁芝华. 我国校车安全管理的现状、问题与完善对策 [J]. 中国公共安全, 2010, (4): 93-96.
- [2] 李杰. 校车事故发生的原因解析 [J]. 安全, 2012, 33 (4): 33-35.
- [3] 陆军统, 杨舒杰, 金跃伟. 基于 GPS 和 GPRS 的智能校车安全监控系统研究 [J]. 科研应用, 2013, (3): 108-110.
- [4] 冯清, 林培杰, 赖云峰. 校车监控终端系统的设计与实现 [J]. 微型机与应用, 2012, 31 (22): 50-56.
- [5] 赵科. 校车安全监控系统的设计与实现 [J]. 科技创新, 2012, (29): 23-24.
- [6] 特罗尔森. C 与 .NET 4 高级程序设计 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [7] 梁东莺, 高潮. 云计算及其应用 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (8): 1958-1961.
- [8] 徐子岩. 实战 Windows Azure 微软云计算平台技术详解 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [9] 谢菲尔. IIS 7 开发与管理完全参考手册 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.