

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.05.018

## 水源热泵用江水水质综合评价

白雪莲<sup>1</sup>, 柴峰<sup>2</sup>

(1. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045;  
2. 深圳市华阳国际工程设计有限公司广州分公司, 广州 510620)

**摘要:**江水水质是利用江水源热泵技术时必须考虑的重要条件之一,也是影响江水源热泵系统效率的关键因素。通过对江水源热泵换热器结垢的水质影响因素进行分析,确定了主要水质指标及其取值。采用模糊综合评价法,利用实际监测数据,分析了作为水源热泵源水的江水水质类别。针对实际工程应用中需要检测相关国家标准规定的多个指标并同时满足的难度,提出了水质结垢潜能值的概念。作为水源热泵水质综合评价指标,水质结垢潜能值既考虑了主要水质参数对水源热泵换热器结垢的综合作用,又能够简便快速地为工程应用中的水质判断和系统选择提供直接依据。

**关键词:**水源热泵;模糊综合评价;水质参数;污垢

**中图分类号:**X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)05-0106-06

## River Water Quality Comprehensive Evaluation for Water Source Heat Pump

Bai Xuelian<sup>1</sup>, Chai Feng<sup>2</sup>

(1. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;  
2. Guangzhou Company, Huayang International Design Group, Guangzhou 510620, P. R. China)

**Abstract:** River water quality is one of the important conditions must be considered when river water source heat pump is used. It is also the key factor of efficiency of river water source heat pump. Based on analysis of the water quality factors which influence the river water source heat pump heat exchanger fouling, the main quality indicators and value are conformed. Using fuzzy comprehensive evaluation method and the actual monitoring data, quality classification of river water which is the source of water source heat pump is analyzed. For the difficulty of multiple indicators which need to detect and meet the related national standard in practical engineering application, the definition of scaling potential value is put forward. As the water quality comprehensive evaluation index of water source heat pump, the scaling potential value not only can consider the influence of the main water quality parameters on water source heat pump heat exchanger fouling, but also can conveniently and quickly provide direct basis for water quality judgment and system selection in the engineering application.

**Key words:** water source heat pump; fuzzy comprehensive evaluation; water quality parameters; fouling

水源热泵作为一种可再生能源利用技术,具有高效、节能、环保等特点,因而日益受到关注。水质条件的的好坏对水源热泵机组换热器结垢起着决定性作用。江水水质是江水源热泵利用时必须考虑的重

收稿日期:2012-12-26

基金项目:中央高校基本科研业务费科研专项(106112012CDJZR210015);重庆市城乡建设委员会科技项目(城科字 2010 第 107 号)

作者简介:白雪莲(1973-),女,博士,副教授,主要从事建筑节能、可再生能源利用研究,(E-mail)xuelianbai@163.com。

要条件之一,也是影响江水源热泵系统效率的关键因素。因此在利用江水冷热资源时,需要明确作为热泵用水体的水质条件,为水体的可用性做出科学评判,并对其利用方式提出合理建议。对水质的评价方法即成为关键问题。目前,对水环境质量的综合评价方法主要有:专家评价法、指数评价法、效益评价法和模糊评价法<sup>[1-4]</sup>。由于对江河水质进行评价会涉及到很多指标,且各指标之间也存在内在的联系,因此,可以认为河流水质是由多因素控制的、复杂的、非线性的模糊系统,对这类系统进行评价具有一定的模糊性。模糊综合评价作为定性分析和定量分析综合集成的一种常用方法,已在环境领域有广泛的应用,在水质综合评价、大气环境综合评价等方面都已经有了长期和深入的研究<sup>[5-13]</sup>。笔者采用模糊综合评价法对江河水质进行分类,在引起江水源热泵换热器结垢方面对水质的优劣进行定性或定量描述,以准确反映目前的水体质量,并在此基础上从水源热泵换热器结垢潜能的角度,提出一种既能准确反映水质因素对结垢的影响,又能便于工程应用的综合评价指标。

表2 长江水质测试结果

测试时间	铁离子	含沙量	浊度	PH值	电导率	氯离子	钙离子	镁离子	COD	总碱度
2010-11-15	0.141	219	54	8.29	264	17.32	61.71	1.91	28.7	126.25
2011-05-23	0.312	311	21	8.03	423	39.40	69.53	2.01	10.5	137.63
2011-07-11	0.825	938	1320	8.07	294	17.40	57.52	1.46	13.5	142.02
2011-09-02	0.646	512	355	7.92	285	18.94	48.71	1.52	7.1	134.51

通过与现行标准中水源热泵允许水质(地源热泵系统工程技术规范 GB 50366,采暖通风与空气调节设计规范 GB 50019,工业循环冷却水处理设计规范 GB 50050)相比较发现,在利用长江水作为水源时,2010年11月至2011年9月的江水水质大部分都能满足要求,含沙量和浊度偏大是主要需要解决的问题。

## 1.2 水质状况分类

结合以上分析及江水水质实际情况,选取PH值、铁离子、含沙量、浊度、电导率这5个对江水源热泵换热器污垢特性影响较大的水质参数作为水质评价的依据。

### 1) PH值

PH值对水中诸多指标起着控制作用,影响了 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、游离 $\text{CO}_2$ 、总碱度等形成沉淀物质。文献<sup>[15]</sup>利用自制污垢热阻测定装置,配置模拟水,恒水温 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 下进行快速结垢实验。结果表

## 1 影响污垢生长的水质参数

### 1.1 水质参数分析

相关标准对机组换热器冷却水水质指标的要求很多。有研究结合换热器污垢热阻在线监测,并对污垢特性影响较大的水质参数做同周期离线监测,得到了不同水质参数与污垢热阻之间的关联度大小<sup>[14]</sup>,见表1。

表1 不同水质参数与污垢热阻的关联度比较

参数	$R^2$	参数	$R^2$	参数	$R^2$
电导率	0.981	铁离子	0.977	PH	0.907
硬度	0.661	溶解氧	0.906	碱度	0.850
$\text{Cl}^-$	0.716	COD	0.867	浊度	0.630

$R^2$ 是相关系数,越接近1表明参数与污垢生长的相关度越大。

为确定重庆地区江水水质特征,笔者于2010年11月至2011年9月对长江进行了水质测试。水质参数的测试分析结果见表2。

明:随着PH值增大,污垢热阻增大,污垢增多,究其原因PH值控制了碱度大小。

### 2) 铁离子

铁离子容易与水中 $\text{OH}^-$ 结合形成胶体物质 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ,若水中溶解氧含量充足,进一步被氧化形成红褐色 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,形成腐蚀污垢和颗粒污垢。文献<sup>[16]</sup>用通过考察铜、不锈钢和铸铁在不同条件下的腐蚀与结垢情况。结果表明:在不加缓蚀阻垢剂条件下,当水中铁离子含量大于 $0.5\text{ mg/L}$ 时,结垢率超过设计限定值。

### 3) 含沙量

江水中的细小泥沙颗粒沉降在换热器表面,逐渐形成污垢。因此在利用河水作为江水源热泵源水时,含沙量是一个需要重点控制的水质指标。由之前的测试结果可以看出,江水含沙量在大部分时间不满足规范要求。江水源热泵系统常采用除沙装置对江水进行水处理。目前常用的旋流除沙器的除

沙效率都在 90% 以上。根据除沙率的计算公式。考虑到机器的效率及其他综合因素,假设除沙效率为 80%,则当江水含沙量大于 100 mg/L、小于 500 mg/L 时,经过处理后可以满足规范要求。

#### 4) 浊度

水的浊度体现了水中悬浮物的含量。悬浮物越多,越容易引起换热器结垢。天然河流中含有较多的物质成分,尤其以泥沙为主,而浊度受泥沙影响较大。在江水源热泵系统中,除沙器在去除水中泥沙的同时,对江水的浊度也进行了一定程度的处理。根据目前市场上厂家发布的产品样本来,旋流除沙器除沙率一般在 80% 左右。综合考虑水处理装

置对江水浊度的降低率,假定除浊效率为 60%,则当江水浊度大于 100 NTU、小于 250 NTU 时,经过处理后,可以满足规范要求。

#### 5) 电导率

电导率的定义为传导电流密度与电场强度之比。有研究表明<sup>[17]</sup>:电导率小于 1 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  时,水质基本稳定;电导率小于 1 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  而大于 1 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  时,换热器轻微结垢;电导率大于 1 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  时,冷却水对换热器表面的腐蚀率就增大,造成严重结垢。

根据以上分析,并结合相关标准对水质的要求<sup>[18-19]</sup>,提出如表 3 所示指标分类等级。

表 3 各指标分类等级

分类	PH 值	铁离子/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	含沙量/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	浊度/NTU	电导率/( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )
一类	$6.5 \leq X_1 < 8.0$	$0 \leq X_2 < 0.5$	$0 \leq X_3 < 100$	$0 \leq X_4 < 100$	$0 \leq X_5 < 1\ 000$
二类	$8.0 \leq X_1 < 8.5$	$0.5 \leq X_2 < 1.0$	$100 \leq X_3 < 500$	$100 \leq X_4 < 250$	$1\ 000 \leq X_5 < 1\ 500$
三类	$8.5 \leq X_1 < 14$	$1.0 \leq X_2 < \infty$	$500 \leq X_3 < \infty$	$250 \leq X_4 < \infty$	$1\ 500 \leq X_5 < \infty$

## 2 模糊评价应用分析

### 2.1 评价集

模糊综合评价是以模糊数学为基础,应用模糊关系合成的原理,将一些边界不易定量的因素量化,进行综合评价的一种方法。模糊评判数学模型的建立可归纳为以下几个步骤:1)找出评价因素集;2)划分评价等级;3)建立隶属函数,计算模糊评判矩阵;4)确定指标权重;5)进行模糊评判,得出模糊评判结果。该应用中,评价因子集中共设置 5 个评价因子,则建立的评价因子集  $U$  为: $U = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5\} = \{\text{PH 值, 铁离子, 含沙量, 浊度, 电导率}\}$ 。根据江水引起水源热泵机组换热器结垢的程度,将江水水质分为 3 类。一类:水质优,不仅满足标准的规定,而且不易引起换热器结垢;二类:水质良,某些指标不满足标准的规定,容易导致换热器结垢,但通过基本水处理装置后水质指标可以达到标准的要求;三类:水质差,水质指标不满足规范要求,且某些指标经基本水处理后依然不能满足规范规定,不宜采用直接式系统。故评价集为: $B = \{\text{一, 二, 三}\}$ 。

### 2.2 模糊关系矩阵

根据隶属度的确定方法,结合各等级的标准值,确定模糊关系矩阵。模糊关系矩阵主要是求出隶属度  $r_{ij}$ ,采用降半梯形分布函数可求得隶属度,从而得到模糊关系矩阵。根据课题组不同时间对长江水

质的测试结果(表 2 所示),选取以上 5 个指标值对长江水质进行综合评价。隶属度  $r_{ij}$  的计算公式为:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 - r_{i(j-1)} & s_{(j-1)} < c_i \leq s_j \\ \frac{s_{(j+1)} - c_i}{s_{(j+1)} - s_j} & s_j < c_i < s_{(j+1)} \\ 0 & c_i \geq s_{(j+1)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $s_j$  为评价因子  $X_i$  的第  $j$  类水质标准值; $c_i$  为评价因子  $X_i$  的监测值。

以测试时间 2010-11-15 中指标为例,按照公式计算模糊关系矩阵,得:

$$r_{11} = 0; r_{12} = \frac{8.5 - 8.29}{8.5 - 8.0} = 0.42;$$

$$r_{13} = 1 - 0.42 = 0.58$$

以此类推,可得  $R_1$ :

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0.000 & 0.420 & 0.580 \\ 0.718 & 0.282 & 0.000 \\ 0.000 & 0.7025 & 0.2975 \\ 0.460 & 0.540 & 0.000 \\ 0.736 & 0.264 & 0.000 \end{pmatrix} \quad (2)$$

按照相同的计算方法,可得其它 3 组模糊关系矩阵。

### 2.3 权重的确定

权重是衡量评价因子集中某一因子对水质影响相对大小的量,权重系数大,则表明该因子对水质的影响程度大。可以用评价因子贡献率的方法确定权重向量。按照公式: $W_i = X_i/S_i$ 。其中  $X_i$  是  $i$  指标的

实测值;  $S_i$  是  $i$  指标的在各个级别(状态)标准值得均值。以测试时间 2010-11-15 中指标为例:

$$s_1 = \frac{s_{11} + s_{12} + s_{13}}{3} = \frac{8.5 + 8.0 + 6.5}{3} = 7.667$$

$$w_1 = \frac{c_1}{s_1} = \frac{8.29}{7.667} = 1.081$$

其他求解采用相同计算方法,可得:

$w_1^* = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5)^T = (1.081, 0.282, 1.095, 0.463, 0.317)^T$ , 这是从定量方面考虑权重,下面从定性方面考虑权重。根据前述 5 个指标对江水水源热泵换热器结垢的影响及指标之间的相关性,将评价因子分成  $S = 5$  个子集,记做  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$ 。

评价集  $U = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5\}$

$X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$  分别为 PH 值、铁离子、含沙量、浊度、电导率。

从定性方面求权值,即:

$$V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5) =$$

$$\left| \begin{array}{c} \frac{r_1}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5}, \frac{r_2}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5}, \\ \frac{r_3}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5}, \frac{r_4}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5}, \\ \frac{r_5}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5} \end{array} \right|$$

利用相对关系来确定上述因子集的权重,则  $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5$  表示 5 个评价指标与污垢的相关系数。根据文献[17,20]中污垢热阻与 PH 值、铁离子、含沙量、浊度、电导率的实验数据,采用 SPSS 软件分析得到污垢与 PH 值、铁离子、含沙量、浊度、电导率的相关系数。

$$r_1 = 0.923, r_2 = 0.919, r_3 = 0.674,$$

$$r_4 = 0.588, r_5 = 0.792。$$

$$\text{则 } V = (0.237, 0.236, 0.173, 0.151, 0.203)$$

$$W_1 = \begin{pmatrix} v_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & v_5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \\ w_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.237 \times 1.081 \\ 0.236 \times 0.282 \\ 0.173 \times 1.095 \\ 0.151 \times 0.463 \\ 0.203 \times 0.317 \end{pmatrix} = [0.256, 0.067, 0.189, 0.07, 0.064]^T$$

(3)

归一化后得综合权重系数:

$W_1^* = [0.396, 0.103, 0.293, 0.108, 0.1]$ , 按照相同的计算方法,可得其它 3 组综合权重系数。则 4 组数据的综合权重系数见表 4。

表 4 4 组数据的综合权重系数

时间	PH 值	铁离子	含沙量	浊度	电导率
2010-11-15	0.396	0.103	0.293	0.108	0.100
2011-05-23	0.312	0.185	0.338	0.035	0.130
2011-07-11	0.077	0.121	0.251	0.529	0.022
2011-09-02	0.161	0.200	0.291	0.302	0.046

## 2.4 模糊综合评价

确定了模糊综合矩阵  $R$  和综合权重集  $W^*$  后,可以得到模糊综合评价模型。采用公式:  $B = W^* \cdot R$  计算得到:

$$B_1 = [0.197, 0.486, 0.317],$$

$$B_2 = [0.172, 0.631, 0.197],$$

$$B_3 = [0.016, 0.115, 0.869],$$

$$B_4 = [0.041, 0.308, 0.651]。$$

因此在引起水源热泵结垢方面对长江的水质评价结果如表 5。

表 5 长江水质评价结果

时间	水质类别
2010-11-15	2 类
2011-05-23	2 类
2011-07-11	3 类
2011-09-02	3 类

因此,从水质方面来看,长江作为江水水源热泵的源水时,水质达不到标准的要求,需要经过水处理后方可进入机组。而在汛期时,由于含沙量和浊度特别大,不利于直接式系统,容易引起换热器结垢。

## 3 水质结垢潜能值

通过以上评价方法可以较为准确地得到江水水质的类别,判断其引起江水水源热泵换热器结垢的可能性,从而确定江水作为水源热泵源水的利用方式。然而在实际工程应用中,利用以上公式计算较为繁琐。而如果根据相关标准规定检测多个指标并同时满足,也是有难度的,因此提出一个既能够准确反映水质参数对水源热泵换热器结垢的作用,又能够在实际工程中简便应用的方法,对于水源热泵用源水的水质判断和系统选择非常重要。

### 3.1 定义

水质中各参数对换热器结垢有着直接的影响,但在目前的污垢研究方面,还没有一个准确的综合参数能够表达水质特性,反映水质对结垢的影响程度。在判断循环冷却水系统碳酸钙结垢时常用到 Langelier 指数和 Ryznar 指数,但这 2 个指数仅从

PH 值方面判断结垢情况,然而与普通循环冷却水不同,江水中引起换热器结垢的因素主要是水中的泥沙及其他金属离子,根据上述评价指标分析,定义江水水质综合参数时主要包括 PH 值、铁离子、含沙量、浊度和电导率。综合江水各水质参数对换热器结垢的影响程度及相关标准对各水质参数的限值规定,以及相关研究对各水质参数引起换热器结垢的临界值结果,将水质综合评价指标定义为水质结垢潜能值(Water Scaling Potential 简称 WSP),其定义式为:

$$WSP = \alpha_1 \frac{M_1}{P_1} + \alpha_2 \frac{M_2}{P_2} + \alpha_3 \frac{M_3}{P_3} + \alpha_4 \frac{M_4}{P_4} + \alpha_5 \frac{M_5}{P_5} \quad (4)$$

式中:  $\alpha_1 \sim \alpha_5$  为各水质参数的相关系数;  $M_1 \sim M_5$  为各水质参数的测量值;  $P_1 \sim P_5$  为各水质参数的标准值。

式(4)表示了各水质参数对污垢形成的影响程度,并以不易引起换热器结垢的指标临界值为基准,将测量值与标准值对比,预测水源热泵换热器结垢的潜能。 $\alpha_1 \sim \alpha_5$  分别代表各水质参数与换热器结垢的相关度经加权后的相关系数,且  $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 = 1$ 。因此关键目标是确定各水质参数的标准值以及各水质参数与结垢的相关度。

### 3.2 确定方法

#### 1) 水质指标标准值

各水质参数的标准值是指不易引起换热器结垢的指标临界值,依据上述评价指标中一类标准,将各标准值分别定为:PH 值为 8、铁离子浓度为 0.5 mg/L、含沙量为 100 mg/L、浊度为 100 NTU、电导率为 1 000  $\mu\text{s}/\text{cm}$

#### 2) 相关系数

根据 2.3 节定性分析权重系数时,利用 SPSS 软件计算得出污垢与 PH 值、铁离子、含沙量、浊度、电导率之间的相关系数分别为:

$$r_1 = 0.923, r_2 = 0.919, r_3 = 0.674, r_4 = 0.588, r_5 = 0.792.$$

$$\text{则加权计算后得 } V = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5) = (0.237, 0.236, 0.173, 0.151, 0.203)$$

因此可得水质结垢潜能值的计算式为:

$$WSP = 0.237 \frac{M_1}{8} + 0.236 \frac{M_2}{0.5} + 0.173 \frac{M_3}{100} + 0.151 \frac{M_4}{100} + 0.203 \frac{M_5}{1000} \quad (5)$$

当  $WSP \leq 1$  时,说明水质较好,不易引起换热器结垢,可采用直接式系统。WSP 值越大,水处理的要求则越高。

### 3.3 应用分析

将表 2 中长江水质测试结果代入式(5)中可得水质结垢潜能值,结果如表 6 所示。

表 6 长江水质结垢潜能值

时间	WSP
2010-11-15	0.83
2011-05-23	1.0
2011-07-11	4.3
2011-09-02	2.0

从表 6 可以看出,前 2 组数据所得  $WSP \leq 1$ ; 后 2 组  $WSP > 1$ 。与表 5 所得评价结果一致,表明该公式可以较为准确的判断在引起换热器结垢方面的水质特征。

## 4 结 论

1) 根据江水水质对水源热泵换热器结垢的影响,选取 PH 值、铁离子、含沙量、浊度、电导率作为水质综合评价的参数,并参考相关标准对水质参数的规定以及相关研究结果,确定了各个参数分级取值。

2) 采用模糊综合评价方法,利用重庆地区长江水质的实际检测数据,分析评价了水源热泵用江水的水质状况。结果表明,除长江汛期时段外,水质均为 2 类,经过基本水处理后采用直接式系统是可行的。

3) 基于模糊综合评价的结果,提出了水质结垢潜能值的概念。该综合评价指标既考虑了主要水质参数对水源热泵换热器结垢的综合作用,又能够简便快速地为工程应用中的水质判断和系统选择提供直接依据。

### 参考文献:

- [1] Liou S M, Lo S L, Hu C Y. Application of two-stage fuzzy set theory to river quality evaluation in Taiwan [J]. Water Research, 2003, 37(6): 1406-1416.
- [2] Liou Y T, Lo S L. A fuzzy index model for trophic status evaluation of reservoir waters [J]. Water Research, 2005, 39(7): 1415-1423.
- [3] Wang H Y. Assessment and prediction of overall environmental quality of Zhuzhou City [J]. Journal of Environmental Management, 2002, 66(3): 329-340.
- [4] Dahiya S, Singh B, Gaur S, et al. Analysis of ground water quality using fuzzy synthetic evaluation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 147(3): 938-946.

- [5] Li T, Cai S M, Yang H D, et al. Fuzzy comprehensive-quantifying assessment in analysis of water quality: A case study in Lake Honghu [J]. Environmental Engineering Science, 2009, 26(2):451-458.
- [6] Lee C S, Wen C G. River assimilative capacity analysis via fuzzy linear programming [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2006, 79(2): 191-199.
- [7] Onkal-Engin G, Demir I, Hiz H. Assessment of urban air quality in Istanbul using fuzzy synthetic evaluation [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(23): 3809-3815.
- [8] Purandara B K, Varadarajan N, Venkatesh B, et al. Surface water quality evaluation and modeling of Ghataprabha River, Karnataka, India [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 177: 39-50.
- [9] Guo J, Li Z. Artificial neural network modeling of water quality of the Yangtze River system: A case study in reaches crossing the city of Chongqing [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 8(1): 1-9.
- [10] Lermontova A, Yokoyama L, Lermontov M, et al. River quality analysis using fuzzy water quality index: Ribeirado Iguape river watershed, Brazil [J]. Ecological Indicators, 2009, 9(6): 1188-1197.
- [11] 何锦峰,刘艳艳,舒兰,等. 模糊综合评价模型在水质整体质量评价中的应用[J]. 重庆工商大学学报, 2009, 2(2): 190-193.  
He J F, Liu Y Y, Shu L, et al. Fuzzy comprehensive evaluation model in water quality evaluation [J]. Journal of Industrial and Commercial University of Chongqing, 2009, 2(2): 190-193.
- [12] 吴诗剑,韩中豪,胡雄星,等. 黄浦江水质的模糊数学综合评价研究[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(1): 92-94.  
Wu S J, Han Z H, Hu X X, et al. The fuzzy mathematics research for the water quality of the Huangpu River [J]. Environmental Pollution and Control, 2010, 32(1): 92-94.
- [13] 周振民,付艳平. 开封市地表水水质模糊综合评价研究[J]. 中国农村水利水电, 2009(1): 23-25.  
Zhou Z M, Fu Y P. Fuzzy comprehensive evaluation of surface water quality in Kaifeng [J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(1): 23-25.
- [14] 徐志明,郭进生,黄兴,等. 水质参数影响板式换热器污垢特性的神经网络分析[J]. 中国农村水利水电, 2010(12): 69-77  
Xu Z M, Guo J S, Huang X, et al. Neural network analysis of water quality parameters which influence plate heat exchanger fouling characteristics [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(12): 69-77.
- [15] 乔宁. 传热金属表面腐蚀结垢行为模拟及防腐阻垢技术研究[D]. 北京:北京化工大学, 2010.
- [16] 刘俊新,李伟光,王秀衡. 循环水中铁对腐蚀结垢的作用及缓蚀阻垢研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(1): 59-61.  
Liu J X, Li W G, Wang X H. Iron in circulating water on corrosion and scale effect and corrosion and scale inhibitors research [J]. Journal of Harbin Jianzhu University, 2001, 34(1): 59-61.
- [17] 郑娇丽. 偏最小二乘回归及其在污垢预测中的应用[D]. 长春:东北电力大学, 2011.
- [18] GB 50019—2003 采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2004.
- [19] GB 50366—2005 地源热泵系统工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.
- [20] 徐志明,黄兴,郭进生,等. 冷却水水质参数对板式换热器污垢特性的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(4): 645-647  
Xu Z M, Huang X, Guo J S, et al. The experimental study of cooling water quality parameters effect on heat exchanger fouling characteristics [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(4): 645-647.