

大型净水厂自动投药系统的建模与研究

余亚冰¹, 罗磊¹, 于波¹, 强明辉¹, 张斌²

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州供电公司, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 水厂混凝投药过程控制在给水处理中占有重要地位, 直接关系到出水水质; 而这一过程具有非线性、大时滞、多变量等特点, 很难建立准确的数学模型. 通过对某水厂实际运行数据进行收集和整理, 运用最小二乘法, 研究了影响水质的主要因素(原水水质与混凝剂投加量)的定量数学关系式, 建立了针对特定水厂自动投药的数学模型, 工程实例证明: 该数学模型在生产过程控制中效果良好, 实际投药值和计算值误差处于 $[-0.7, 0.98]$ 之间.

关键词: 水处理; 数学模型; 加药控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0366(2012)02-0120-04

Modeling and Studying of the Automatic Coagulant Dosage System of the Large-scale Water Works

YU Ya-bing¹, LUO Lei¹, YU Bo¹, QIANG Ming-hui¹, ZHANG Bin²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Science and Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Lanzhou Power Supply Company, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The coagulant dosing process of water works plays an important role in water treatment. It connects with water quality directly. But it has the characteristics of non-linearity, long lag in time, much variance in amount, etc. So it is difficult to establish an accurate model. By collecting and sorting waterworks data, and using the least square method, we have found the main factors influencing the turbidity of water and its coagulant dosing, and established the mathematical model for automatic coagulant dosage system in particular waterworks. The model works well in practical production.

Key words: water treatment; mathematical model; dosage control

混凝工艺是传统水质净化工艺中非常重要的环节, 其用量的准确与否将直接影响供水水质效果, 混凝剂投加不足则出水水质达不到安全标准; 相反混凝剂投加过量不仅增加制水成本, 还会导致出水水质中铝离子过高, 影响人体健康^[1]. 我们结合模糊控制理论探讨了数学建模在混凝投药控制中的作用, 实现了大型水厂投药控制的一般情况与特殊情况的合理控制方法. 为水厂投药实现完全自动化探索了一条新的途径, 最终达到降低药耗、稳定水质、降低

劳动强度、提高管理水平的目的.

混凝剂投加量的确定目前主要有经验目测法、烧杯实验法、模拟滤池法和数学模型法等^[2]. 其中烧杯实验法和数学模型法是运用较多的两种方法, 王艳等^[1]用线性回归辨识建立了投药量的指数数学模型, 邹振裕等^[2]采用烧杯实验法确定了投加量与原水浊度之间的关系. 赵英等^[3]采用神经网络技术建立了投药量的数学模型.

目前, 某市大型水厂投药量的控制是采用半自

收稿日期: 2011-11-25

基金项目: 甘肃省省长基金(GS0152A522012)

作者简介: 余亚冰(1976-), 女, 讲师, 主要研究方向为工业生产过程自动化、智能控制系统. E-mail: yuboauto@163.com

动控制方式.具体方法是操作工人通过去现场采集原水和出水浊度,在化验室做混凝剂投药量实验,根据原水浊度和待滤水浊度与投药量之间的关系得出冲程改变多少以及投药量为多少.因此,生产过程中实际投药量与当班操作工人的经验密切相关,随机性较大,很难保证出水水质的稳定.为了更加准确地控制混凝剂投加,减少工人劳动强度与稳定出水水质,在深入分析投药过程基础上,通过对来自生产实际的大量数据进行处理和分析,结合操作工人的投药经验,提出了一种混凝剂投加量数学模型,最后实现了混凝剂投药量的自动控制,并稳定了出水水质.

1 基于最小二乘法系统辨识

1.1 最小二乘法

最小二乘法一般的表达式为^[4]

$$S = \sum_{i=1}^n r_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (1)$$

其中 S 为估计误差平方和; n 为拟合范围内的数据点个数; r_i 为第 i 个数据点的残差; y_i 为观测点; \hat{y}_i 为拟合值.

该方法以矩阵表示的系数解形式为

$$\hat{y} = Xb, \quad (2)$$

其中

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y. \quad (3)$$

1.2 局部权重最小二乘法

每一次拟合过程只考虑所有拟合点数的一部分,每一个被拟合点的取值都由与之邻近的局部拟合范围的散步点所决定,邻近点的点数与所选取的拟合范围有关.在每一个拟合点处都给予不同的权重系数 W_i ,其权重系数在拟合点处为 1,局部拟合范围内拟合点的两边各点的权重系数依次以一定的规则递减至 0.超出拟合范围的数据点处的权重均为 0^[5].其代数表达式为

$$S = \sum_{i=1}^n W_i (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (4)$$

矩阵解的表达式为

$$\hat{y} = Xb, \quad (5)$$

其中

$$b = (X^T W X)^{-1} X^T W y. \quad (6)$$

局部权重最小二乘法与最小二乘法的主要区别是,按照数据点的不同位置取不同的权重系数来计算拟合点处的值,而最小二乘法在计算范围内所有数据点的权重均为 1.这样局部权重最小二乘法在一定程度上就可以减小离异点对拟合结果的影响.

1.3 矩阵最小二乘法

设:理想的投药量与原水浊度的关系为

$$Q = b_2 Z_d^2 + b_1 Z_d + b_0, \quad (7)$$

其中 Q 为投药量, Z_d 为原水浊度, b_0, b_1, b_2 为待确定的系数.

设有 N 组观测值 $(Z_{d_i}, Q_i), i = 1, 2, \dots, n$. 由于观测的不完善,因此每次观测都会有一定的误差 V_i . 可以写出以下 n 个方程:

$$\begin{cases} Q_1 = b_2 Z_{d_1}^2 + b_1 Z_{d_1} + b_0 + v_1, \\ Q_2 = b_2 Z_{d_2}^2 + b_1 Z_{d_2} + b_0 + v_2, \\ Q_3 = b_2 Z_{d_3}^2 + b_1 Z_{d_3} + b_0 + v_3, \\ \dots\dots \\ Q_n = b_2 Z_{d_n}^2 + b_1 Z_{d_n} + b_0 + v_n. \end{cases} \quad (8)$$

令矩阵

$$A = \begin{bmatrix} Z_{d_1}^2 & Z_{d_1} & 1 \\ Z_{d_2}^2 & Z_{d_2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{d_n}^2 & Z_{d_n} & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_2 \\ b_1 \\ b_0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}. \quad (10)$$

则方程组(8)可用矩阵表示为

$$Q = AB + V. \quad (11)$$

矩阵方程(11)的最小二乘法解为

$$B = (A^T A)^{-1} (A^T Q), \quad (12)$$

其中 A^T 为 A 的转置矩阵,即矩阵元素的行标号和列标号交换后的矩阵, $(A^T A)^{-1}$ 为矩阵 $A^T A$ 的逆矩阵.通过对偏差的计算来验证我们所建立模型的正确性.标准偏差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-3}}. \quad (13)$$

2 建模仿真研究

2.1 建模数据采集

以某市水厂历史运行数据为例,我们收集了该水厂 1 年的原始记录数据,原始数据里记录了 2010 年 1~12 月每个月生产过程中符合条件的数据,约有 400 余组.在许多组中有相同的原水浊度,只是混凝剂的耗量不同,pH 值或碱度之间也相差不大.

为减少后续数据处理的工作量,确保获取数据的有效性,我们有必要对数据收集工作做如下的规定:

(1) 按两个温度区间收集数据, 即 $5\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $15\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; (2) 原水碱度 $> 80\text{ mg/L}$ 、pH 值在 $7\sim 8$ 之间且当沉淀池出水浊度符合规定的水质要求情况下, 收集数据; (3) 收集数据的误差区间为 $-0.5\sim 0.5\text{ NTU}$. 部分实际运行数据见表 1.

表 1 水厂实际运行数据

原水浊度 /NTU	出水浊度 /NTU	pH 值	碱度 /mg · L ⁻¹	混凝药量 /g · m ⁻³
5.1	1.8	7.6	116	11.10
5.2	2.0	7.7	118	11.70
5.3	1.9	7.5	109	12.00
5.4	2.1	7.7	109	12.90
5.5	1.9	7.6	112	12.05
5.6	2.5	7.2	112	12.10
5.8	2.2	7.1	109	12.25
5.9	1.9	7.5	125	11.90
6.0	2.1	7.3	118	12.30
6.2	1.8	7.4	119	11.70
6.4	2.2	7.2	123	11.90
6.5	2.4	7.7	117	12.40
6.6	2.6	7.3	112	12.50
6.7	2.5	7.8	125	11.90
6.8	2.1	7.6	116	12.35
6.9	2.2	7.4	125	12.40
7.2	2.5	7.5	124	13.00
7.4	2.8	7.3	126	12.30
7.6	2.3	7.4	122	12.50

2.2 数据建模与仿真

为了确定投药量 Q 与原水浊度 Z_d 的函数关系, 它们之间的关系是非线性的, 我们可以分别根据表 1 的数据, 用最小二乘法求解出两个二次多项式来拟合图 1 的折线, 即实际观测值与数学关系计算出

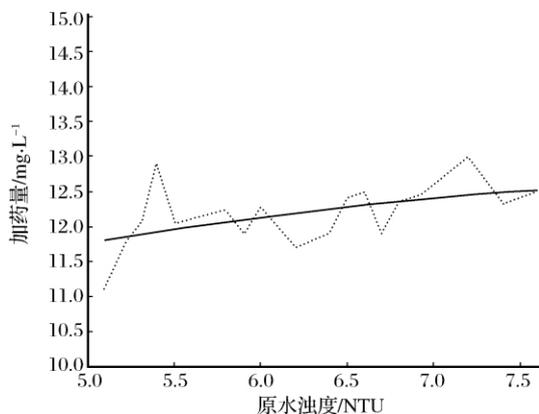


图 1 模型计算与实际加药比较图
—— 实际加药量 ····· 模型计算加药量

的差(即残差)的平方和为最小, 这就可以求得最佳解. 这就是最小二乘法原理^[6].

以原水温度区间 $5\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为例, 对表 1 所收集的数据使用最小二乘法求解投药量与原水浊度的关系, 计算过程中的主要数据如下:

原水浊度矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 5.1^2 & 5.1 & 1 \\ 5.2^2 & 5.2 & 1 \\ 5.3^2 & 5.3 & 1 \\ 5.4^2 & 5.4 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 7.6^2 & 7.6 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A^T A = \begin{bmatrix} 30\ 865 & 4\ 762 & 745 \\ 4\ 762 & 745 & 118 \\ 745 & 118 & 19 \end{bmatrix},$$

$$(A^T A)^{-1} = \begin{bmatrix} 0.196\ 5 & -2.471\ 2 & 7.658\ 5 \\ -2.471\ 2 & 31.170\ 5 & -96.897\ 0 \\ 7.658\ 5 & -96.897\ 0 & 302.182\ 3 \end{bmatrix}.$$

实际投药量矩阵

$$Q = \begin{bmatrix} 11.1 \\ 11.7 \\ 12 \\ 12.9 \\ \vdots \\ 12.5 \end{bmatrix}, \quad (A^T Q) = \begin{bmatrix} 9\ 102.1 \\ 1\ 440.5 \\ 231.3 \end{bmatrix}.$$

系数矩阵

$$B = (A^T A)^{-1} (A^T Q) = \begin{bmatrix} -0.047\ 7 \\ 0.892\ 5 \\ 8.494\ 1 \end{bmatrix}.$$

矩阵 B 的元素即为所求二阶多项式的 3 个系数. 对 b_0 、 b_1 计算值取到 3 位有效数字, 即得二阶多项式的 3 个系数:

$$b_2 = -0.047\ 7, b_1 = 0.893, b_0 = 8.49,$$

二阶多项式为

$$Q = -0.047\ 7 Z_d^2 + 0.893 Z_d + 8.49,$$

标准偏差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{19} v_i^2}{19-1}} = \sqrt{\frac{2.547\ 1}{18}} = 0.376,$$

$$\sigma^2 = 0.14.$$

3 投药量数学模型验证

将模型计算值和原始数据做比较, 并计算它们的误差^[7,8], 计算结果见表 2.

表 2 标准偏差计算结果

水浊度 /NTU	投药量 /g·m ⁻³	计算值 /g·m ⁻³	残差	残差平方
5.1	11.10	11.80	-0.70	0.490 0
5.2	11.70	11.84	-0.14	0.019 6
5.3	12.00	11.88	0.12	0.014 4
5.4	12.90	11.92	0.98	0.960 4
5.5	12.05	11.96	0.09	0.008 1
5.6	12.10	11.99	0.11	0.012 1
5.8	12.25	12.06	0.19	0.036 1
6.0	12.30	12.13	0.17	0.028 9
6.2	11.70	12.19	-0.49	0.240 1
6.4	11.90	12.25	-0.35	0.122 5
6.5	12.40	12.28	0.12	0.014 4
6.6	12.50	12.31	0.19	0.036 1
6.7	11.90	12.33	-0.43	0.184 9
6.8	12.35	12.36	-0.01	0.000 1
6.9	12.40	12.38	0.02	0.000 4
7.2	13.00	12.45	0.55	0.302 5
7.4	12.30	12.49	-0.19	0.036 1
7.6	12.50	12.52	-0.02	0.000 4

综上,可以清楚看到实际投药值和计算值误差处于[-0.7, 0.98]之间,相对误差在工业领域处于比较小的范围.由图 1 也可以看出模型计算数据与实际加药量的比较,模型计算加药量值基本与实际加药量相吻合,故此模型具有实际应用价值.

4 结语

通过对某水厂实际运行数据进行收集和整理,找出了主要影响水质因素(原水浊度与混凝剂投加量)的定量数学关系式,并对定量数学关系式进行了理论验证,从而建立起了水厂的投药自动化数学模型.在该模型的基础上,实现了投药过程的自动控制.经过某水厂近一年的实际运行证明,应用该模型可以有效控制出水水质,参数修改灵活,误差小,适应于不同季节对投药量的自动控制,取得了良好的控制效果.

参考文献:

- [1] 王艳,吴学伟.西洲水厂混凝剂投量数学模型的建立[J].山西建筑,2007,33(3):167-168.
- [2] 邹振裕,罗永恒,李展峰,等.沙口水厂混凝剂优化投加的研究及实践[J].中国给水排水,2009,25(17):51-53
- [3] 赵英,南军,崔福义,等.神经网络技术在水处理工艺建模中的应用[J].给水排水,2007,33(10):110-113.
- [4] 丁克良,欧吉坤,赵春梅.正交最小二乘曲线拟合法[J].测绘科学,2007,32(3):18-19
- [5] 刘兴坡,刘遂庆,周玉文.滑动加权最小二乘法识别污水流量变化模式[J].同济大学学报:自然科学版,2006,34(8):1 071-1 074.
- [6] 李晓斌,刘丁,郭军献,等.真空退火炉的建模与优化[J].控制与决策,2005,20(2):218-221.
- [7] 杨杰,陈思忠,刘昭度,等.油气弹簧台架试验中的数据处理[J].科学技术与工程,2008,8(3):709-710.
- [8] 王凌.智能优化算法及其应用[M].北京:清华大学出版社,2001.

· 简讯 ·

我院与中科院成都分院进行科技合作对接座谈

A Symposium with the Chengdu Branch of Chinese Academy of Sciences

为全面落实甘肃省与中国科学院共同支持甘肃省科学院发展协议,进一步加强我院与中科院的技术交流与合作,2012年3月29日,高世铭院长一行10人赶赴成都,分别与中科院成都生物研究所和成都山地灾害环境研究所开展了技术对接座谈会,就双方开展全面而广泛地合作进行深入交流。

在我院生物所与中科院成都生物所的交流座谈会上,双方科技人员对生物农药、微生物制剂、农业生物技术研发等合作领域及研发方向进行了深入探讨和交流,并参观了成都生物所的应用与环境微生物研究中心、农业生物技术研究中心、天然产物研究中心、生态学研究中心和两栖爬行动物研究室等。

在我院地质灾害防治所与中科院、水利部成都山地灾害环境所对接座谈会上,双方紧密围绕甘肃省科学院的科技需求,依托中科院成都山地所的科技优势、人才优势和先进设备优势,重点就省科院地质灾害防治所的体制创新、人才培养、学术交流、平台与基地建设、项目合作、资源共享等方面进行了交流。

(葛文 供稿)