

文章编号:0253-9861(1999)03-0295-06

一种基于流动电流检测的水厂自动投药系统

杨祥龙¹, 蒋继申², 邵 军¹, 许 阳²

(1. 浙江大学 仪器科学与工程学系, 浙江 杭州 310027;

2. 杭州自来水公司, 浙江 杭州 310016)

摘 要: 讨论了水厂自动投药控制系统的设计方法, 提出了基于流动电流的检测技术和 PID 控制算法及广泛适用的自动加矾系统总体控制方案, 并给出了该系统的建立和实际调试方法。

关键词: 流动电流; PID 控制算法; 数学模型; 系统仿真

中图分类号: TU991.62 **文献标识码:** A

0 引 言

80 年代在制水行业中, 国际上提出了流动电流(Streaming Current, SC)控制法, 解决了以往净水过程中由于检测参数多而造成的控制对象数学模型过于复杂、自动控制效果不理想的问题, 使得水厂自动控制技术真正发挥了效用。

本文提出的基于流动电流检测的水厂自动投药系统总体方案, 采用了先进的流动电流检测技术和工业过程广泛采用的 PID 控制算法, 具有适应性强, 可靠性高, 易于系统实现等特点。在对浙江省杭州自来水厂自动加矾系统的设计调试中, 我们对该方法进行了探索和总结。实践证明, 本系统具有普遍性、实用性和可靠性的特点, 可作为水厂自动化改造的基本方案而被广泛采用。

1 基于流动电流检测的水厂自动投药系统

1.1 自动投药系统总体方案

图 1 为基于流动电流(SC)检测的水厂自动投药系统示意图。该系统由 SC 检测仪、过程控制计算机、计量泵、变频柜、浊度仪等五部分构成。计量泵用于投加配制好的矾液, 矾液与原水充分反应后流经 SC 检测仪, 其流动电流值由 SC 检测仪检测并送至过程控制计算机。流动电流值反映了当前加矾量下的净水效果, 过程控制计算机采样到该值后与给定值进行比较, 并经过 PID 算法计算出计量泵投量, 送至变频柜, 对计量泵加矾量进行调整, 从而保证了出水水质。

过程控制计算机可采用一般的 PC 机, 也可采用专门为过程控制设计的可编程控制器(PLC)。PLC 作为过程控制器有很好的抗干扰能力和高可靠性, 可作为控制系统中的下位机直接安装在工业现场对过程进行控制, 同时用一 PC 机作为上位机进行控制过程总体监控、数据显示和报表打印。一般采用这种方式较好, 既保证了控制的可靠性, 又提供了良好的监控界面, 而且各控制参数的

收稿日期: 1996-12-12

作者简介: 杨祥龙(1952—), 男, 浙江海宁市人, 浙江大学副教授, 硕士, 从事检测控制研究。

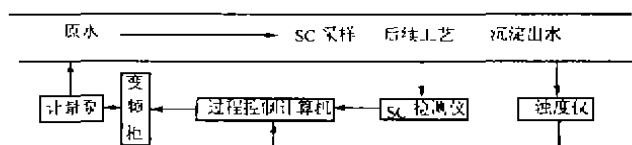


图1 自动投药系统示意图

修改可在上位机进行,大大方便了水厂生产控制和管理.浊度仪可对出水质量进行检测,并根据该检测值对给定值进行修正,以获得最佳控制效果.

1.2 控制对象数学模型的建立

系统控制性能的好坏,很大程度上取决于建立的控制系统的数学模型是否精确地反映了实际控制对象.然而控制对象往往是十分复杂的,要精确反应控制对象非常困难,而且出于实时控制等要求,也不可能建立过于复杂的数学模型来精确描述控制对象,因此必须对其进行简化.

整个加矾过程从矾液投加至检测到流动电流变化值,包含两个主要环节:

首先,矾液投加到原水中,混凝反应是逐步进行的,水流中的流动电流值从开始变化到稳定有一个过程.这一环节可简化为一惯性环节,其传递函数为:

$$G_1(s) = \frac{K}{TS + 1}, \quad (1)$$

式(1)中 K 为惯性环节的放大系数, T 为惯性环节的时间常数,具有时间量纲.

其次,混凝反应后的水流流经 SC 检测仪,水流中的流动电流值被检测到,这有一个滞后的过程.这一环节可简化为一滞后环节,其传递函数为:

$$G_2(s) = e^{-\tau s}, \quad (2)$$

式(2)中 τ 为滞后环节的滞后时间常数.

适当调整矾液投加点和 SC 采样点间隔,使水流流经 SC 采样点时混凝反应已基本完成,则其检测效果同仅存在滞后环节的控制对象基本一致,因而控制系统数学模型可简化为有一比例系数的滞后环节,传递函数如下:

$$G(s) = Ke^{-\tau s}, \quad (3)$$

式(3)中, K 为整个控制对象的放大系数.

1.3 控制算法的建立

分析了控制对象的数学模型,就可以根据控制要求建立控制算法,从而给出整个系统的数学模型.

控制算法采用过程控制中广泛应用的 PID 算法.该算法具有原理简单,易于实现,鲁棒性(Robustness)强和适用面广等优点.

在讨论 PID 控制算法时,可将控制系统方块图进一步简化,如图 2 所示.

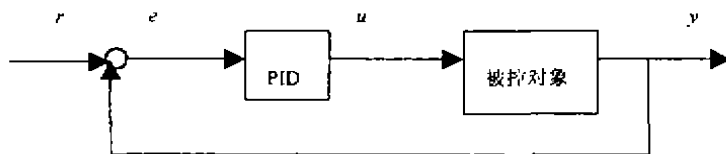


图2 控制系统方块图

其中 PID 控制算法的算式为:

$$u = K_p \left[e + \frac{1}{T_i} \int e dt - T_d \frac{de}{dt} \right], \quad (4)$$

其传递函数形式为:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right], \quad (5)$$

式(5)中, K_p 为比例增益; T_i 为积分时间; T_d 为微分时间; u 为控制量; e 为被控量 y 与给定值 r 的偏差。

为了便于计算机实现控制算式, 必须把微分方程改写成差分方程:

$$\int e dt \approx \sum_{j=0}^n T e(j), \quad \frac{de}{dt} \approx \frac{e(n) - e(n-1)}{T},$$

差分方程中, T 为采样周期(或控制周期); n 为采样序号, $n = 0, 1, 2, \dots$; $e(n-1)$ 和 $e(n)$ 分别为第 $(n-1)$ 和第 n 次采样所得的偏差信号。

由此将 PID 方程改写成差分方程如下:

$$u(n) = K_p \left\{ e(n) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^n e(j) + \frac{T_d}{T} [e(n) - e(n-1)] \right\}, \quad (6)$$

式(6)中, $u(n)$ 为第 n 时刻的控制量。如果采样周期 T 与被控对象的时间常数比, 相对较小, 那么这种近似是合理的, 并与连续控制十分接近。

为编程方便, 可将 $u(n)$ 的增量形式表示为:

$$\Delta u(n) = q_0 e(n) + q_1 e(n-1) + q_2 e(n-2), \quad (7)$$

式(7)中,

$$q_0 = K_p \left(1 - \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right); q_1 = -K_p \left(1 + \frac{2T_d}{T} \right); q_2 = K_p \frac{T_d}{T}.$$

因此, 第 n 时刻的控制量为: $u(n) = u(n-1) + \Delta u(n)$ 。

增量型算式的优点是编程序简单, 历史数据可以递推使用, 且占用存储单元少, 运算速度快。

上述 PID 控制算法是最通用的形式, 由于实际控制对象具有较大的滞后时间常数, 而且不要求很快的响应速度, 因而上述算法一般能满足控制要求。但由于我国水源水质复杂, 为满足更高的控制要求, 解决过程计算机控制中所遇到的一些实际问题, 以便提高控制性能, 有必要对数字控制算法作某些改进。

(1) 积分项的改进。

PID 算法中积分项的作用是消除控制系统的稳态误差, 可通过以下四条改进措施来提高控制性能。

积分分离 即偏差 $e(n)$ 较大时, 不计算积分项; 当偏差 $e(n)$ 较小时, 才计算积分值。即

当 $|e(n)| > \beta$ 时, 用 PD 控制;

当 $|e(n)| \leq \beta$ 时, 用 PID 控制。

积分分离可减少超调量, 并使系统尽快达到稳定。积分分离值 β 应根据具体对象及要求确定。

抗积分饱和 当计算出的控制量超出了执行机构的控制范围时, 应去掉积分项, 以避免超调量增加, 降低控制品质。

梯形积分 为了减少稳态误差, 提高控制精度, 可将矩形积分改为梯形积分。梯形积分的计算式为

$$\int_0^t e(t) dt = \sum_{j=0}^n \frac{e(j) + e(j-1)}{2} \cdot T. \quad (8)$$

消除积分不灵敏区 当计算积的运算字长较短, 采样周期也短而积分时间 T_i 又较长时, 容易出现 $\Delta u_i(n)$ 小于字长的精度而丢数, 此时也就无积分作用, 从而形成积分不灵敏区。

为了消除积分不灵敏区, 常采用以下措施: 当积分项 $\Delta u_i(n)$ 连续出现小于输出精度的情况时, 不把它们作为“零”舍掉, 而是把它们一次次累加起来, 直到累加值大于 ϵ 时, 才输出累加值, 同时把

累加单元清零。

(2) 微分项的改进

微分项的作用是针对快速变化的偏差信号产生一非常强的控制信号,从而尽快消除偏差,改善系统的瞬态响应特性。但微分项对数据误差和噪声比较敏感,有放大作用。为了消除这些不必要的扰动,可对偏差取平均值:

$$\bar{e}(n) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m e(j), \quad (9)$$

式(9)中平均项数 m 的选取,取决于被控对象的特性。

1.4 控制系统总体模型的建立与仿真

分析了控制对象和控制器算法,就可以对整个系统的数学模型进行描述。

自动加矾系统方块图如图3。

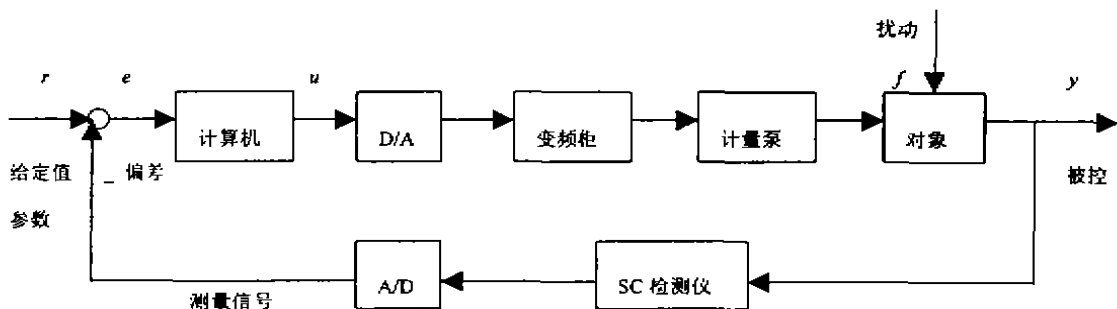


图3 自动投矾系统方块图

变频柜、计量泵、SC检测仪的时间常数与系统的时间常数相比可以忽略不计,可将其看作比例环节,比例系数均包含于 K 中。A/D 可近似为系数为 1 的比例环节。而 D/A 则为一零阶保持器,其传递函数为: $\frac{1-e^{-Ts}}{s}$, T 为采样周期。

根据前面推导的控制对象和控制器的数学模型,可将整个系统的差分方程式表示如下:

$$y(n) = y(n-1) + K\{q_0[r - y(n-N)] + q_1[r - y(n-N-1)] + q_2[r - y(n-N-2)]\}, \quad (10)$$

式(10)中, $N = \tau/T$; r 为给定值; q_0, q_1, q_2 与(7)式相同。

利用该方程,可对控制系统进行仿真,整定出最佳的 K_p, T_i, T_d 作为控制参数,并根据 PID 算法编制控制程序。

2 实际应用

2.1 系统动态技术指标

杭州自来水公司根据自身的水质条件和水处理工艺,要求自动加矾控制系统的动态指标为:

(1) 在供水最大突变情况下(从 $4 \times 10^5 \text{ kg/h}$ 突变到 $8 \times 10^5 \text{ kg/h}$),加矾控制响应时间 $\leq 20 \text{ min}$;最大超调量 $\leq 20\%$ 。(2) 动态控制精度 $\leq 6\%$ 。(3) 滤前水浊度 $\leq 6 \text{ NTU}$ 。

2.2 控制参数的整定

控制性能的好坏,很大程度上取决于 PID 算法中的参数选取是否适当。在确定了采样相对于投药的滞后时间后,可通过仿真来选取最佳控制参数。

利用前面推导的控制系统总体数学模型,可得到系统在不同 K_p, T_i, T_d 参数下的阶跃响应曲

线,调整参数值,使响应曲线最佳,就得到了系统最佳控制参数。

根据采样定理和对系统控制对象的分析,确定本系统的采样周期 $T=5\text{ s}$,滞后时间 $\tau=90\text{ s}$,控制对象增益常数 $K=1$ 。在输入幅值为1的跃信阶号情况下,经仿真得到本系统最佳控制输出响应如图4所示。

由该曲线可得,上升时间为3 min,过渡过程为15 min,超调量为20%,由此将PID算法的最佳控制参数设定为 $K_p=0.2$, $T_i=20\text{ s}$, $T_d=1\text{ s}$ 。在实际调试时,可以该值为基准作适当调整,最终可获得最佳控制性能。

2.3 系统运行结果

杭州自来水公司有四家水厂,每家水厂至少有2个以上加矾控制系统。在实际调试中,以仿真整定值为基准,根据现场实际情况,适当调整 K_p , T_i 和 T_d 值。图5为供水量从 4×10^5

kg/h 突变到 8×10^5 kg/h (水质不变) 情况下,控制系统输出量(即变频调速器的输出频率)的历史记录曲线。

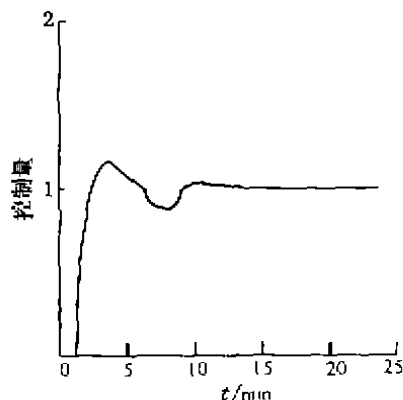


图4 系统阶跃仿真曲线

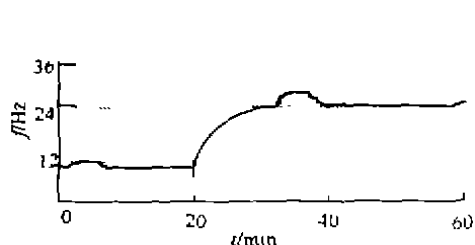


图5 控制系统输出量的历史记录曲线

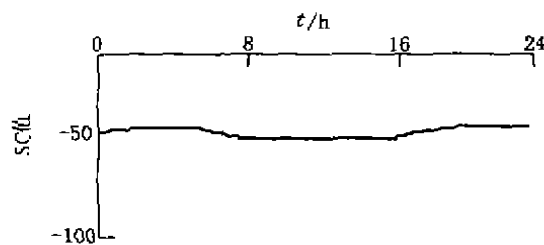


图6 SC检测仪的历史记录曲线

从图5中可看出,自动加矾系统的响应时间为19.5 min,超调量16.7%。图6为供水量无突变情况下SC值(设定值为-50)的历史曲线。根据曲线的记录数据,可算得系统的动态控制精度 $\leq 6\%$ 。系统运行以来,滤前浊度一直在4 NTU左右,即使在钱江咸潮期间,也控制在6 NTU以内。

3 结束语

本文提出的基于流动电流检测的自动加矾系统,在现场已经运行半年多,半年多的运行证明,本系统控制算法的设计方案和系统结构是切实可行的,控制效果是令人满意的。由于矾液投量适当,与人工控制相比,大大节省了矾液投量,从而节省了成本,减少了污泥量和出水中的铝离子浓度,提高了经济效益和社会效益。

参 考 文 献

- [1] 王锦标,方崇智. 过程计算机控制 [M]. 北京:清华大学出版社,1992.
- [2] 李光泉. 自动控制原理 [M]. 北京:机械工业出版社,1994.
- [3] 卢志恒. 控制论引论 [M]. 北京:北京师范大学出版社,1994.
- [4] 曲久辉,李圭白,崔福义. 流动电流检测器的检测机理及其数学模型 [J]. 哈尔滨建筑工程学院学报,1994,26(5):61~67.

- [5] Carl M Webb ,Mark A Waronker, Dcs installation gives plantwide process control [J]. Water Engineering & Management, 1993, 140(8): 27~29.

Automatic alum dosage system of waterwork based on streaming current detection

YANG Xiang-long¹, JIANG Ji-shen², SHAO Jun¹, XU Yang²

(1. Dept. of Instrumentation Science and Engineering, Zhejiang Univ. , Hangzhou 310027, China;

2. Hangzhou Water Supply Co. , Hangzhou 310016, China)

Abstract: A method for designing the automatic alum dosage system of waterworks based on the streaming current detecting and PID control algorithms is mentioned. By the specific and practical way ,The system can be set up and regulated. This scheme can be wildly accommodated.

Key words: streaming current; PID control algorithms; mathematic model; system simulation

(责任编辑:陈 波)

~~~~~  
下期发表论文摘要预登:

## 液压工程机械的结构动态特征值算法 及特点的研究

童 昕, 钱仲焱, 罗 宁, 冯培恩

(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 针对液压工程机械软稳定支撑结构的特点, 提出了一种特征值的高精度算法, 并分析了结构动态特征值的特点. 与其它算法及实验结果对比, 这一算法具有足够精度, 能满足工程中动态设计的需要.

**关键词:** 液压传动; 工程机械; 特征值