

SCD 加矾自控系统数学模型的建立

The Establishment of the Mathematical Model for SCD Automatic Alum Dosing Control System

杨祥龙

冯冬芹 陈东宇 (浙江大学, 浙江杭州 310027)

蒋继申 (杭州自来水公司, 浙江杭州 310016)

摘要 详细介绍水处理过程中应用流动电流检测仪(SCD)控制混凝加矾量的自控系统,通过实验得出其传递函数模型,还介绍了各控制参数对自控系统的影响和作用。

关键词: 水处理 自动控制 流动电流检测仪 数学模型

Abstract The automatic alum dosing control system in water treatment process by using Sweeping Current Detector (SCD) is introduced in detail. The model of its transfer function is derived from the experiment and the effects of the control parameters of the control system are also presented.

Key words: Water treatment Automatic control Sweeping current detector Mathematical model

1 问题的提出

近些年来,在水处理混凝投药过程中,SCD(Streaming Current Detector)自控系统已经推广使用。该系统的优点是单因子处理、数据量小、反应迅速、投药量少,具有良好的经济效益。以前人工投药时,水厂注重的是出水水质,有了自控系统后,出水质量得到了保证,水厂的注意点转移到节省投药量上,即要求自控系统响应快。为了满足生产实践的需要,实现系统的最优控制,因为了解系统的数学模型是十分重要的。目前国内国外尚未见到对该控制系统的数学模型的介绍,在实际中,该自控系统的安装和参数调试主要是凭经验确定取样点的位置、结构以及PID控制的参数,因此我们研究的目的是对这个系统的控制模型进行分析,用实验手段确定其传递函数,建立控制系统的数学模型。

2 系统的控制结构分析

2.1 控制过程

笔者以杭州市自来水公司清泰门水厂安装使用的二期SCD加矾自控系统为例来分析系统的控制结构。

这个系统使用的是AB公司的PLC-5和Milton Roy公司的SC4200检测仪。该流动电流(SC)加矾自控系统原理图如图1所示。SCD测出的SC值与水中胶体的ζ电位相关,从而反映了水的浊度。水质通过SC4200测出后输入PLC中进行PID控制,再通过变频器控制计量泵频率,达到控制投药量的目的。

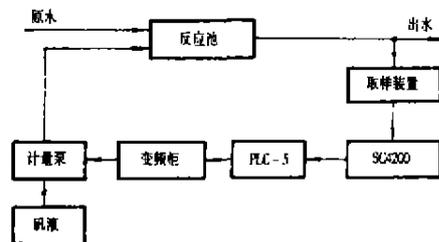


图1 流动电流投药控制系统原理图

2.2 控制框图分析

从受控系统看,这是一个水、机、电一体化的复杂系统,其输入的变量是水浊度、流量、药液浓度,SC设定值。控制目的是要达到出水浊度的稳定。如果以浊度作为系统控制环节的输入输出变量,则其控制框图如图2a所示。而水浊度是通过SC值反应的,因此实际受控参数是SC值,故可以以浊度作为输入变量,SC值作为输出变量,系统控制框图如图2b所示。在实际控制中,系统一旦达到稳定,如果输入参数和外界影响因素不发生变化,控制参数也就可以维持在当前水平上不变。在存在外界影响因素变化时,系统可以使输出维持在设定值,所以可把SC设定值作为系统的输入,则控制框图如图2c所示。

图2a中,由于系统的实际受控参数是SC值,而SC值并不仅与浊度有关,与pH值等也有关^[5],故将浊度作为输出变量是不太合适的;图2b,对于输入浊度的变化,在系统再次达到稳定后,输出的SC值不变,此时的SC值将稳定在SC设定值上,因此对于受控参数SC值,将浊度作为输入信号是不太适宜的;在图2c中,输

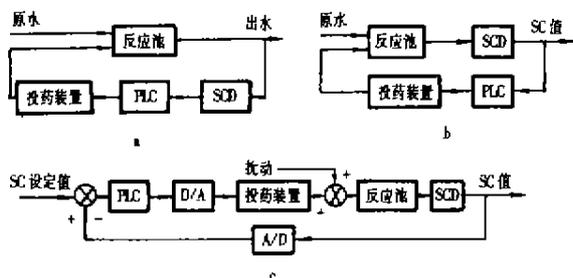


图 2 系统控制框图

出参量 SC 值受输入参量 SC 设定值控制,并在系统稳定后,唯一确定在 SC 设定值上。由此可见,图 2c 是比较符合控制系统的实际情况,容易分析和简化,故采用该框图作为分析对象,以下分析都基于该图进行。

2.3 系统数学模型的初步分析

系统中 PLC 进行 PID 计算, D/A 可视为一零阶保持器, A/D 简单的视为一个比例环节。比较复杂的是反应池的过程模型。在实际应用中,投药装置(变频器、计量泵)和检测元件 SCD 的动态特性相对于过程动态特性来说,影响时间短,是可以忽略的。在这种情况下,控制框图稍作简化如图 3 所示。

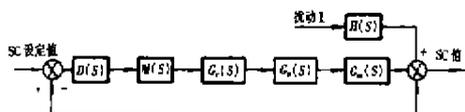


图 3 控制系统模型

在图 3 中, $D(S)$ 的物理构件是 PLC, $M(S)$ 为 D/A, $G_c(S)$ 为投药装置, $G_m(S)$ 包括 SCD 检测仪和取样装置。另外,并不存在一个独立的物理构件与 $H(S)$ 相对应,从图 2c 可知道, $H(S)$ 是包含在 $G_p(S)$, $G_m(S)$ 中的,它反映扰动输入,如流量、浊度、药液浓度等变化时对系统的影响。在系统模型中, $D(S)$ 和 $M(S)$ 的传递函数为

$$D(S) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \quad (1)$$

$$M(S) = \frac{1 + \exp(-TS)}{S} \quad (2)$$

对于 $G_c(S)$, $G_p(S)$ 和 $H(S)$ 的传递函数并不清楚,而且理想中的各环节是独立的,但在实际中各环节之间存在负载效应。为方便分析,将 $G_c(S)$, $G_p(S)$, $G_m(S)$ 合并为 $G(S)$,那么 $G(S)$ 中就包括了各环节之间的负载效应,也就更贴近实际了。

由于 $G(S)$, $H(S)$ 的具体传递函数与系统的结构(包括管道结构、取样点位置)等有关,因此要从理论上分析其模型是困难的,因此采用实地测试,采集并分析数据来建立其数学模型。

3 数学模型的建立

3.1 实测建模的设计思路

系统的实测控制框图如图 4 所示。

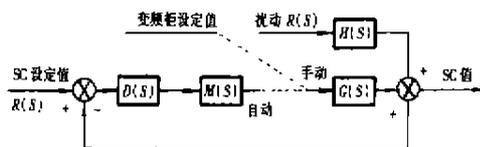


图 4 系统实测控制框图

a. 阶跃响应

实测数学模型时,要由输入信号所引起的输出信号变化来分析模型结构。如何选定输入信号类型不但要考虑到数据容易分析,而且还要考虑到实际操作的可能性。对于脉冲响应信号数据易于分析,响应信号可以较好反映系统特性,但在实际操作中要使水质、流量产生一个脉冲是不太现实的。因此采用输入信号为阶跃信号。在实际中,阶跃信号是经常出现的,如原水泵的开停引起流量的阶跃变化,洪水引起浊度的阶跃变化等。对于输入阶跃信号,输出的变化可能为图 5 所示。一般来说系统应该是高阶的,但高阶系统数据复杂,较难处理,因此采用低阶系统(一阶、二阶)来近似。

在图 4 中的控制模型中,变频器有两种控制方式,一是手动,即变频器输出值由其设定值所决定;二是自动,即变频器输出值由 PLC 的输出所决定,也就是闭环控制。这对于阶跃信号的分析是很有利的,因此在变频器手动时,相当于开环控制,系统的输出仅与输入和系统本身特性有关,表示不受反馈影响。

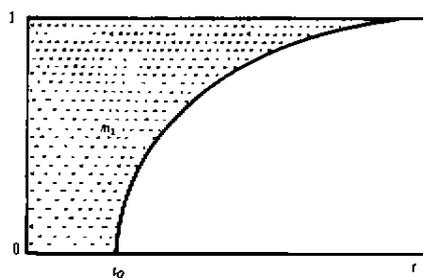


图 5 $Y(T)$ 的输出响应

b. 计算机分析

对于图 5 的输出反应,如果用一阶滞后来近似,分析过程如下。

① 滞后时间

为了区分正常扰动和系统响应,确定小于最大阶跃幅度的 5% 的值都计算在滞后时间 t_0 中。

② 最小二乘法逼近

设输入的采样数据 $b(n)$, 理论计算数据 $f(n)$, 则

$$s = \sum_{i=1}^n [f(n) - b(n)]^2 \quad (3)$$

当 s 为最小时所对应的 t_1 为最恰当的参数。计算机分析的最小步距为整个量程的 0.5%。其输出

$$g(t) = K[1 - \exp[-(t - t_0)/t_1]] \quad (4)$$

如果采用二阶滞后来近似,确保模型的方法很多,部分采用了 Sundaresan 的参数算法^[1],Sundaresan 方法认为过程反应曲线类似于一定的统计分布函数,因此可以用一阶矩来描述,即其响应函数 $C(t)$ 的一阶矩为

$$m_1 = \int [1 - C(t)] dt = \frac{dG(S)}{dS} \Big|_{s=0} = t_0 + t_1 + t_2 \quad (5)$$

在式(5)中,可以通过实测值计算得到 m_1, t_0 ,从而可求得 $t_2 = m_1 - t_0 - t_1$,由此可由循环求得最小 t_1, t_2 ,得到输出:

$$Y(t) = K \left[1 - \frac{t_1}{t_1 - t_2} e^{-(t-t_0)/t_1} + \frac{t_2}{t_1 - t_2} e^{-(t-t_0)/t_2} \right] \quad (6)$$

3.2 过程模型传递函数 $G(S)$ 的实测建模

a. 实测方法

在其它条件不变的情况下,将变频器拨至手动,断开反馈调节,在系统稳定后,将变频器设定值由 A 跳至 B ,产生阶跃信号,阶跃幅度要足够大以区别正常扰动。由此时开始记录 SCD 的输出值的变化,直至输出信号平稳。

b. 实测状态

原水浊度:27 度;原水流量:8 570kt/h;变频器手动幅度:由 20Hz 跳至 14Hz。

c. 实测结果

一阶近似的结果为: $t_1 = 2.31\text{min}, t_0 = 2\text{min}$, 则

$$G(S) = \frac{K \exp(-2S)}{2.31S + 1} \quad (7)$$

式中: K 为阶跃幅度。 $G(S)$ 的理论计算值与实际测试值的最大偏差为幅度的 9.6%。

二阶近似的结果为: $t_1 = 2.4\text{min}, t_2 = 0.17\text{min}, t_0 = 2\text{min}$, 则

$$G(S) = \frac{K \exp(-2S)}{(2.40S + 1)(0.17S + 1)} \quad (8)$$

式中: K 为阶跃幅度。 $G(S)$ 的理论计算值与实际测试值的最大偏差为阶跃幅度的 3.79%。

3.3 流量变动传递函数 $H(S)$ 的实测建模

a. 实测方法

在其它条件不变的情况下,将变频器拨至手动,断开反馈调节,待系统稳定后将水泵开停变化,产生阶跃信号,阶跃幅度要足够大以区别正常扰动。此时开始

记录 SCD 的输出值的变化,直到输出信号平稳。

b. 实测状态

原水浊度:81 度;原水流量:由 8 350kt/h 跳至 4 590kt/h(该流量分别由两个 SCD 处理)。

c. 实测结果

一阶近似的结果为: $t_1 = 4.57\text{min}, t_0 = 4\text{min}$, 则

$$H(S) = K \frac{\exp(-4S)}{4.75S + 1} \quad (9)$$

式中: K 为阶跃幅度, $G(S)$ 的理论计算值与实际测试值的最大偏差为阶跃幅度的 7.87%。

二阶近似的结果为 $t_1 = 4.20\text{min}, t_2 = 0.34\text{min}, t_0 = 4\text{min}$, 于是

$$H(S) = \frac{K \exp(-4S)}{(4.20S + 1)(0.34S + 1)} \quad (10)$$

式中: K 为阶跃幅度, $G(S)$ 的理论计算值与实际测试值的最大偏差为阶跃幅度的 7.3%。

由于浊度信号产生阶跃比较困难,可能会影响生产实际,因此目前没有对其模型进行实测,以后若有可能(洪峰、咸潮期间)再进行测试,以期建立比较完善的数学模型。

4 对建立数学模型的分析

由上述实验建模结果可知, $G(S)$ 近似为二阶滞后,但注意到 t_2 很小,可以用一阶滞后近似,那么可以得到如图 6 所示的框图。

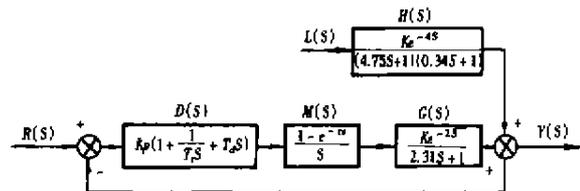


图 6 系统数学模型

4.1 参数分析

控制器 $D(S)$ 可以用 Z 变换来分析它,其中 T 为采样时间,则

$$D(Z) = \frac{\left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T}\right) - \left(1 + 2\frac{T_d}{T}\right)Z^{-1} + \frac{T_d}{T}Z^{-2}}{1 - Z^{-1}} \quad (11)$$

同样,可以得到 $MG(Z), H(Z)$, 那么,可得到下式:

$$Y(Z) = \frac{L(Z)H(Z) + R(Z)D(Z)MG(Z)}{1 + D(Z)MG(Z)} \quad (12)$$

对于不同的输入 $L(Z)$ 和 $R(Z)$ 以及不同的参数可以通过上式求得相应的 $Y(Z)$ 值,进而分析系统各

(下转第 44 页)

是测量体积流量,流过总表和流过诸分表的流体温度、压力不同会导致流体体积变化,所测体积流量当然也不一致。前述测饱和蒸汽时干度变化影响和测气体时压力与温度的影响,已被大家所重视,然而测量液体时常被忽视。

例如江苏某化工厂用两台 DN100 电磁流量计分别测量常温稀酸,配比混合后流经反应器,再由一台 DN200 电磁流量计测量,进入后续流程。该用户向仪表制造厂反映 DN200 仪表所测得流量要比两台 DN100 仪表所测流量总和多 20%~30%,认为仪表测量不准确。制造厂赴现场检查,发现流出反应器混合液温度约 170~180℃,若粗略地认为混合稀酸以水为主体,以水的体膨胀计算,水从 30℃ 升高到 180℃,体积增加了 11.8%;又悉该管道系统绝对压力为 0.6MPa,水已达沸腾汽化点,增加了部分汽化体积。这两种体积增加的

(上接第 29 页)

参数对输出的影响。在 $G(S)$ 中, $0.2 < t_0/T_1 = 0.866 < 1$, 因此适用于 PID 控制^[6]。由式(12)也可以通过分析得到最佳参数,这里就不再论述。

由系统的数学模型可以看出,信号由变频柜到投药至取样,最后被 SCD 测出这段时间的滞后占整个系统滞后时间的大部分,因此要提高系统的响应速度,需要合理的设置采样装置结构,并定期清洗 SCD,以提高响应速度。

4.2 SCD 使用中注意的问题

为了提高 SCD 的响应速度,在 SCD 使用中要注意如下问题:

① 减少取样通道的阻塞。可以重新设置采样点位置,取样管前后安装过滤器、沉淀装置等,以减少泥沙进入。

② 减少传感器表面损伤。除了进行预处理以外,还要通过物化上手段(如稀酸)清洗 SCD 表面,以消除化学混凝产生的不可溶附着物^[5]。

(上接第 39 页)

② 如果用示波器观察 IP_2 和 COM_2 之间的波形有噪声叠加(波形异常,有毛刺),则要分析是 50 或 60Hz 干扰,还是其它电磁干扰。此时,应进行必要的 NB 调整(噪声平衡调整)和 TLA 调整(触发电平调整)。其中,NB 调整只有在以下情况进行;当无流体流动时,表头有显示;当管道中有少量流体流动,而表头的读数相当大。

现象说明,电磁流量计真实地反映了体积流量的增大,仪表是正常的。

c. 检查和分析各仪表是否存在不良安装缺陷,尤其是总表的缺陷影响测量值之间差值最为显著。

d. 测量液体时是否存在前述夹杂气体,尤其在管道系统中多处进入容器再抽吸泵送等流程,最易混入气体。

e. 检查和分析各仪表之间的管道是否有泄漏或有分支流。检查明处泄漏比较容易,隐蔽的泄漏(如埋在地下的管道)就不易发现。

参考文献

- 1 Hayward A T J. Flowmeters—A guide and source book for users. The MacMillan Press Ltd., 1979:129
- 2 Miller R W, 著. 流量测量工程手册. 孙延祚, 译. 北京:机械工业出版社,1990:196~202

以上分析了 SCD 自动加矾控制系统的控制框图,并通过实测确定了传递函数。从而建立了系统的数学模型。在实际中,具体的系统其模型可能略有区别,但对优化供水系统的投药控制,具有实际指导作用。

参考文献

- 1 [美] Deshpande P B, Ash R H, 著. 计算机过程控制—先进控制策略的应用. 张新薇, 陈水, 译. 北京:中国科学技术出版社,1991
- 2 邵军. SCADA 系统及自动加矾控制系统的研究. [学位论文]. 杭州:浙江大学,1997
- 3 崔福义,李圭白. 流动电流混凝控制技术. 中国给水排水,1991,7(6):36~40
- 4 Steven K. Dentel, Kristine M. Kingery Using Streaming Current Detectors in Water Treatment. Journal AWWA, 1993
- 5 金以慧. 过程控制. 北京:清华大学出版社,1993
- 6 王锦标,方崇智. 过程计算机控制. 北京:清华大学出版社,1992

收稿日期:1998-03-01。

第一作者杨祥龙,男,47岁,1989年于浙江大学研究生毕业,硕士,副教授。

TLA 的调整必须考虑最小可测流速,其方法是,当流体停止流动时,调整 TLA 参数直到输出为 0%。

③ 对于外界干扰,必要时进行流量计独立接地。

总之,由于仪表使用情况千变万化,用好流量计需要有丰富的现场经验。

收稿日期:1998-08-28。

作者郝树斌,男,31岁,1992年毕业于甘肃工业大学,工程师。