

## 单因子水处理混凝投药在线监控系统的设计原则与综合性能研究

曲久辉 李圭白 崔福义

(中科院生态环境研究中心, 北京 100085) (哈尔滨建筑大学, 哈尔滨 15006)

**文摘:** 根据电动特性的基本理论原则, 研究了水中荷电质点的流动电流在线检测技术、传感器特性、设计方法及其技术参数。探讨了以流动电流传感器为核心的高效混凝投药监控系统的整体配置, 控制技术和协作性能。实践证明, 此系统反馈及时, 控制精确, 是水处理投药在线监控的有效方法之一。

**关键词:** 流动电流 水处理 混凝投药 控制系统

有效的水处理混凝投药控制方法, 可以在实际最佳投药量的意义上控制混凝剂投加, 从而达到以最少的药剂消耗获得最理想的出水水质的效果。但以往的投药控制方法, 如数学模型法<sup>[1]</sup>、ζ电位法<sup>[2]</sup>等, 都因存在这样或那样的不可靠性, 而没有形成规模性的推广和应用。国际上八十年代发展起来的流动电流(SC)混凝投药控制技术<sup>[3]</sup>, 克服了以往方法的缺陷, 选择可以在最本质意义上表征混凝效果的电动特性参数SC值作为单一监控因子, 实现了对凝聚剂投加量的精确控制。本文从电动特性的理论原则出发, 根据流动电流检测器(SCD)的特征方程与相关数学模式<sup>[4,5]</sup>, 研究SC传感器(SCS)的基本设计参数, 并在此基础上探讨以SCD为核心的水处理混凝投药控制系统的配置与应用。

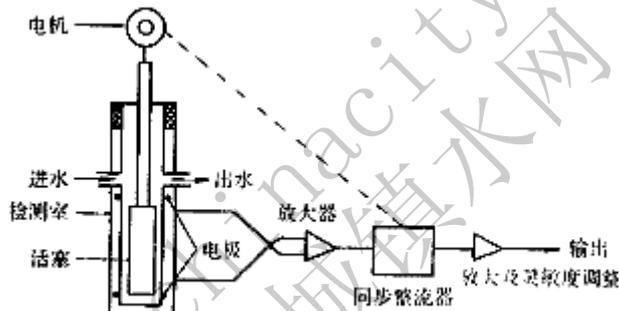


图1 SCD示意图

### 1. SCD 的基本结构及设计参数

#### 1.1 SCD 的构造原理

SCD 是系统的核心, 构造如图 1 所示。它是由传感器、整流放大电路、输出显示等部分组成。其中传感器探头乃 SCD 的检测中心, 主要由套筒、活塞和电极组成。活塞与套筒之间有很窄的狭缝, 相当于一个环形的毛细空间。活塞可以在电机驱动下作往复运动, 流经的水被活塞吸入—挤出, 在狭缝中快速流动。

SCS 各部分间的数学关系为:

$$I = \frac{\sigma C R_2^2}{(R_1^2 - R_2^2)} \left( \gamma \omega \sin \omega t + \frac{\gamma^2 \omega \sin 2 \omega t}{2 \sqrt{(L+R)^2 - \gamma^2 \sin 2 \omega t}} \right) \quad (1)$$

式中 I—瞬时流动电流值;

σ—电荷密度;

g—活塞位移参数;

t—时间;

C—活塞和套筒的周边之和;

R<sub>1</sub>—套筒内径;

$R_2$ —活塞内径;  
 $L$ —传动连杆的长度;  
 $w$ —电机转动角速度。

根据胶体及表面化学理论, 活塞及套筒表面可以瞬时吸附水中的特性离子或胶粒, 从而在固—液界面形成双电层结构。水在检测室内流动时, 发生了双电层中固定层离子和扩散层中反号离子的相对位移并产生流动电流, 然后由套筒两端的金属电极响应, 并经一系列信号处理过程而输出。

由SCD所检测的SC值与 $z$ 电位在理论和实际上<sup>[5]</sup>都具有良好的线性相关规律:

$$I = -\frac{4\omega\epsilon\gamma R_2^2 (R_1 + R_2)}{(R_1 - R_2)^2 \kappa} \zeta \quad (2)$$

式中  $\kappa$ —探头表面双电层厚度。

由于 $\zeta$ 电位是最基本的胶体电动特性参数, 所以流动电流也可以在本质上反映加入的凝聚剂对水中胶体颗粒的作用程度:

$$I = \frac{16\pi\omega\gamma R_2^2 (R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2) A} q \quad (3)$$

式中

$q$ —作用于 SCS 的水中胶体表面电荷总量;  
 $A$ —SCS 的有效表面积。

可见, 胶体表面电荷量越高, 则 SC 绝对值越大。当胶粒的负电荷被加入的混凝剂中和以后,  $q$  必然减少, 则 SC 绝对值降低。实验也证明, SC 值与胶体电荷量的这种对应关系十分明确。

## 1.2 SCD 的基本设计参数

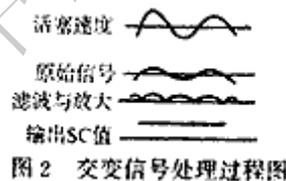


图2 交变信号处理过程图

式(1)明确表示了SCS各主要参数之间的定量关系, 它是SCS设计的基本量值依据。式中第一项是SC的理想值, 第二项则是由于高倍叠加而产生的失真信号, 在实际设计中应使其尽可能地小。一般取 $L$ 为十倍 $g$ , 故第二项可忽略。对SC检测具有影响的主要参数是套筒、活塞内径、活塞行程和电机转速, 这也是SCS设计时所重点考虑的四个参数。在此, SC与活塞和套筒的内径大小之差 $R_1-R_2$ 具有密切关系。由(1)式可知, 如 $R_1-R_2$ 太大, 造成套筒和活塞间的狭缝过宽, 使检测的SC值太弱, 而缝隙过小, 又将造成二者之间配合过紧, 产生传动障碍。所以,  $R_1$ 与 $R_2$ 的数值取决于实际检测对象的要求。SCD的传动是靠一微型减速电机, 它的转速大小与SC值有密切关系。按理论计算, 电机的转速 $w$ 越高、活塞行程参数 $g$ 越大, 则检测信号越强。但受机械传动性能的限制, 实际设计的 $w$ 和 $g$ 都不可能太大。一般取 $w$ 为 200-270 转/分,  $g$ 为 0.25mm。活塞连杆的设计长度, 则以既能保证使活塞运动的最低位置能复盖套筒的底端电极, 同时又不至于顶到底部堵塞为宜。

由SCS所检测的SC信号强度非常微弱(大约为  $10^9$  A), 为获得一个稳定的可读SC值, 在电路设计时采取

两级放大、整流和滤波(如图 2、3 所示)处理。因此,所检测到SC值实际上是一个相对或表观值。这一数值,无绝对量意义,从而可以将影响水处理混凝过程的各种因素综合为一个电动特性的表征参数,这便使以SC作为混凝剂投加的控制因子更具有实际上的可靠性。

### 1.3 SCD的性能评价

#### 1.3.1 检测灵敏度

SCD能有效发挥混凝投药控制系统的中枢机构作用,最基本的条件是它必须能对水的浑浊度、混凝剂以及二者相对量的变化具有灵敏响应。图 3 是上述SCD对水的浑浊度变化响应灵敏度的实验结果。浑浊水是用经水力筛选的 240 目松花江底泥配制。可见,SCD对浑浊度能比较灵敏地检测。如当水的浑浊度从 30 升至 750 度时,SC值由-2.70 变为-3.91。SCD对混凝剂具有更为灵敏的检测能力,如图 4 所示,如果使用含固体硫酸铝 2%的溶液(含 $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ 浓度)作为混凝剂,在 300 度的浑浊水中仅投加 10mg/L, SC值即发生了约 0.7mA的变化,继续增加药剂投量,SC值明显上升。而且,SCD还具有足够理想的分辨精度,它可以检测低至 0.2mg/L的药量变化。这完全满足混凝投药控制精度要求。

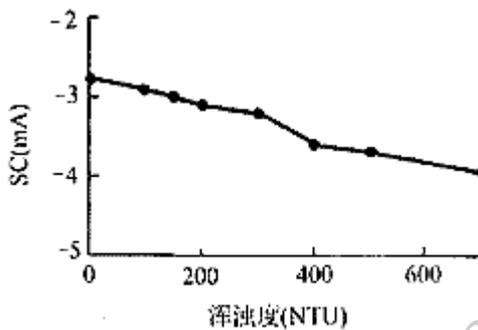


图 3 SCD 对浑浊度的检测灵敏度

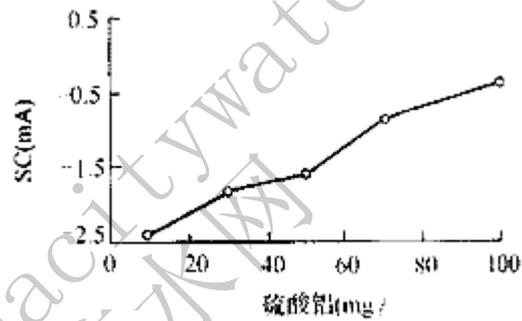


图 4 SCD 对混凝剂的检测灵敏度

#### 1.3.2 检测的稳定性

稳定性要求主要是指检测值的总体波动范围和单位时间内的波动幅度,不会影响控制精度。对上述 SCD 的稳定性的验证结果表明,它对变化的水质具有十分灵敏的响应,而对稳定的水质又表现出了良好的平稳检测性能,检测值在 5 分钟内波动幅度小于 0.05,平均值标准偏差小于 0.3%,其稳定性能适于在线监控。

## 2. 系统的总体设计与协作性能

混凝投药自动监控系统由 SCD 传感器(SCS)、控制器(SCC)和变频调速系统(FCS)组成。

### 2.1 SCD 特性

表 1 控制器参数

参数符号	名称	设置范围
S	设定值	根据需要设置
O	控制输出值	0—100%
P	比例带	0—200%
I	积分时间	1—3600s
D	微分时间	0—1200s

利用上述原理设计的 SCD，具有远程传递信号的功能，一般可以允许最长通过 300 米的双芯信号线传送给控制部分。检测水样从右侧进入检测室，从底部流出(也可以从左侧流出)，流量一般为 3-5L/min。检测室可以通过水样在其中的高速流动，对探头进行自动连续清洗。检测室外套上部有一溢流孔，当水样流量过高时，多余的水从孔中流出以保证正常检测。SCS 对水中胶体电荷变化的响应时间不超过 4s。

### 2.2 SCC 特性

常规控制器具有自动控制、手动键盘控制和人工变频控制三种工作方式，可对投药过程实施自动控制和半自动控制。在自动控制的工作状态下，系统可对投药工况进行测定、判断，并对投药量实施控制，以适应水质、水量等因素的变化，保证混凝效果。在控制器的“手动控制”状态下，利用控制器的增减功能，可手动改变投药量。控制仪显示所测水样的 SC 值，并在自动记录仪上记录，该值及其变化趋势可反映投药工况，并可作为人工调节投药量的依据。仪器设有检测值的上、下限报警提示功能，可作为自动控制和手动控制方式的补充手段。控制器上还设有灵敏度调节开关，可根据水质及控制精度要求随时改变灵敏度大小。同时，还可通过工作状态显示，监视传感器的工作状态。控制器的参数设置如表 1 所示。

表 2 变频调速控制系统参数

参数名称	规格	备注
电 源	3 相 380V	50Hz
调频范围	0—50HZ	可按用户要求选定
输入控制信号	直流 4-20mA	0—10V; 0—-10V
环境温度	-10—40℃	
环境湿度	90RH 以下	

### 2.3 FCS 特性

变频调速控制系统根据其所控制的投药泵和电机功率配置，可在变频和工频状态下工作。输出的电源频率(水泵电机的工作频率)可由输入的电控信号控制，也可由变频柜的“频率调节”人工控制。该系统设有过压、欠压、过流、过载、过热、输出端短路保护功能和故障指示功能。同时还设有故障声光报警、频率超限声光报警。其规格参数如表 2 所示。

### 2.4 监控系统的协作性能

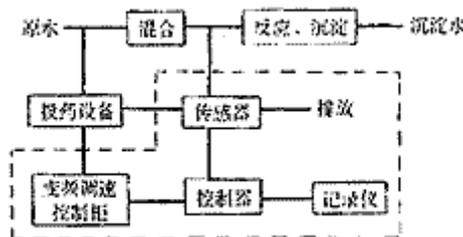


图 5 控制系统连接图

投药控制系统连接如图 5 所示。在原水中投加混凝剂并经充分混合以后，取少量水样进入 SCS。根据水的浑浊度相对于药剂量的变化，从 SCS 输出代表当前水中胶体电荷状况的 SC 值，并通过信号线传送给 SCC。SCC 在所设定的工况下，经与给定值对比、判断后，输出一个 4~20mA 的标准信号。FCS 在接到控制器的指令以后，立即进行频率调整，使投药计量泵处于对应的工作状态之下，从而可以向水中投加适量的混凝剂。然后，投加药剂的水样又流入 SCS，并进行投药量的再调节。如此循环往复，连续运作。因而 SCD 投药控制系统是有机结合、协同作用的部分与整体。

#### 4. 应用研究

以下是将上述系统在 MS 水厂安装运行的试验结果。

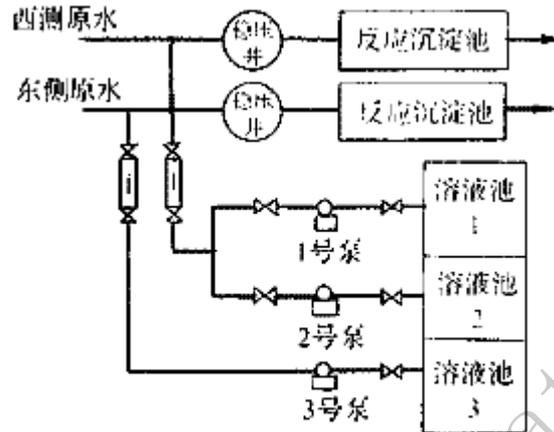


图 6 MS 水厂投药系统图

该水厂有东西两套供水系统。试验期间，两套系统分别投药，药剂使用液体硫酸铝，药液由离心式投药泵加压送入两条原水管内，经过 30 米长的管道混合后，经稳压井再次混合，然后分别进入两组反应池，投药系统示意如图 6 所示。1#和 2#泵供西测人工投药系统使用，而自动投药系统的东侧仅有一个溶液池和一台泵(3#)可以使用，两套系统均靠转子流量计计量药量。投药控制系统由SCS、SCC、FCS和自动记录仪、水样预处理器和离心泵(额定流量 7.2m<sup>3</sup>/h)组成。SCS设于稳压井附近，加药后的原水经管道混合后，在进稳压井前，一部分经取样管至水样处理器再进入传感器。

表 3 自动控制与人工控制运行结果对比

工况	自动控制	人工控制
用药量(Kg)	65464.75	91582.15
产水量(Km <sup>3</sup> )	1767.7	1767.7
混凝剂消耗(Kg/Km <sup>3</sup> )	37.20	51.81
节约率(%)	28.20	
沉淀水浊度合格率(%)	99.40	82.10

表 3 是连续一个月运行试验的药量消耗和出水水质对比。结果表明，使用该控制系统后，在水质变动较小时期，自控投药系统沉淀水浊度合格率较人工控制投药系统高出 7.3 个百分点；而在水质变动较大时期，则高出 22.1 个百分点。综合各种水质情况，自动投药系统的沉淀水浊度总合格率为 99.4%。比人工投药高出 17.3 个百分点。而且在自动投药的工况之下，水质不合格的主要原因也是由于在浑浊度过高时，净化系统超负荷所致。采用自动控制投药后，在保证水质的同时，使混凝剂的消耗量大大降低。自动投药系统在沉淀水浊度较稳定、合格率更高的前提下，在原水水质较稳定时节药 29.2%，在原水水质变动较大时期节约高达 43.1%，一年内平均节约 28.2%，沉淀水的合格率提高了 9.5 个百分点，月平均节约费用 1.66 万元。这说明，按本文所述方式设计的高效水处理混凝投药自动控制系统，具有良好的连续运行、在线监控性能，使用后有明显降低药耗、提高水质。

## 5. 结论

水中胶体电动特性的在线检测装置 SCD, 可以灵敏准确地通过 SC 变化, 表征水的浑浊度相对于混凝剂投加量的配比关系, 它作为系统的核心, 与微电脑控制器、变频调速器等工控设施适配, 构成高效水处理混凝投药的自动控制系统, 具有连续在线检测、及时精确控制混凝剂投加量的优异功能。适用于城镇自来水厂和工业用水的混凝投药控制。

## 参考文献

- [1] 钟淳昌, 朱方达等. 数学模型加矾自动化技术. 中国给水排水. 1989, 5(2): 20~23
- [2] 马戊环. 中国给水排水. 净水厂投加混凝剂自动控制. 1987, 3(6): 38~41.
- [3] Steven K. Dentel and Kingery. Theoretical principles of streaming current detection
- [4] 曲久辉等. SCD 中流动电流的数学模式. 哈尔滨建筑工程学院学报. 1993, 26(5): 61-65
- [5] 曲久辉等. 流动电流与 z 电位相关模式研究. 哈尔滨工业大学学报. 1994, 26(1): 63-67

## 曲久辉简历

曲久辉, 1957 年 10 月生。工学博士, 研究员, 博士生导师, 现任中国科学院生态环境研究中心副主任, 学术委员会副主任, 中国科学院水问题联合研究中心副秘书长, 北京市人民政府专家顾问, 中国环境学会理事, 国际水质学会会员, 日本水环境学会会员。主要从事水质净化与水污染控制的基本原理与应用技术研究, 在国内外学术刊物上发表论文 70 余篇, 发明专利 16 项, 制定国家行业标准 2 项, 获省部委科技进步一等奖 4 项, 三等奖 2 项, 其它科技进步奖 5 项。