

基于控制模型的氨氮测量系统的 研究与设计

秦刚¹, 杨珊珊^{1*}, 刘永红², 陈中孝¹, 宋晓茹¹

(1. 西安工业大学 电子信息工程学院, 陕西 西安 710021;

2. 西安工程大学 环境与化学工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 系统辨识是现代控制领域的一个重要分支, 在航空航天以及工业控制领域拥有广泛应用。将该方法应用于污水处理领域, 介绍了一种基于控制模型的氨氮测量系统及测量方法。具体使用不同浓度的氨氮阶跃信号作用系统, 产生不同输出信号, 通过对系统测量机理深入研究得到系统的控制模型, 采用递推最小二乘法对系统的结构参数进行辨识。实验结果表明, 该方法测量过程简单, 误差较小, 可用于水体氨氮含量的在线检测。

关键词: 控制模型; 系统辨识; 递推最小二乘法; 氨气敏电极

中图分类号: TN9

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2015)12-0158-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2015.12.043

Research and design of ammonium measuring system based on the control model

QIN Gang¹, YANG Shan-shan^{1*}, LIU Yong-hong², CHEN Zhong-xiao¹, SONG Xiao-ru¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. School of Environmental and Chemical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: System identification is a very important branch of the modern control field. It has been widely used in the aviation, the aerospace and the industrial automatic control domain. In this paper, system identification method is applied in the sewage dispose field. An ammonium measuring system and method based on control model is introduced. The ammonium measuring system receives different concentrations of ammonia step signals and gives off different electric potential signals. Through the in-depth analysis of the system mechanism and the study of the recursion least square algorithm, the control model is built and identified. The experimental results show that this method is simple and the measurement error is relatively small. Therefore, ammonium measuring system mentioned above can be used for online ammonium measuring and has certain application value and practical extending significance.

Key words: control model; system identification; recursion least squares algorithm; ammonium sensitive electrode

近年来, 随着我国工业飞速发展和人们生活水平的提高, 大量的工业废水和生活污水未经处理就被直接排放到江、河、湖、海中, 造成水富营养化加剧, 赤潮频繁发生, 对整个生态系统造成了严重的威胁。因此, 开展水资源氨氮含量的监测对于保证生产、生活安全具有重要意义。

笔者将系统辨识方法应用于电化学分析领域, 具体介绍了基于控制模型氨氮测量系统的测量方法以及基于该模型的结构设计、硬件设计、软件设计和辨识算法。最后, 通过实验检验了该方法的有效性,

实现了水体氨氮含量的快速、准确测量。

1 基于控制模型的氨氮测量方法

根据电极感测原理, 通过机理分析建立了系统的动态控制模型, 如图1所示。使用不同浓度的 NH_4Cl 标准溶液 $[C_1, C_2, C_3 \cdots C_n]$ 和碱化屏蔽剂 $(\text{NaOH} + \text{EDTA})$ 充分反应产生 NH_3 作用系统, 得到不同输入信号下的标准输出信号 $[E_1, E_2, E_3 \cdots E_n]$ 。最后, 根据系统的标准输入、输出信号, 采用递推最小二乘法对系统的结构参数进行辨识, 得到系统

收稿日期: 2015-05-20

基金项目: 陕西省科学技术研究发展计划项目(2014K05-06); 陕西省科技厅工业攻关项目(2014K05-44)

作者简介: 秦刚(1968-), 男, 双学士, 教授, 主要研究方向为计算机控制系统, 156731749@qq.com; 杨珊珊(1986-), 男, 硕士生, 主要研究方向为计算机控制系统, 通讯联系人, 18702973224, 648451598@qq.com。

的控制模型。

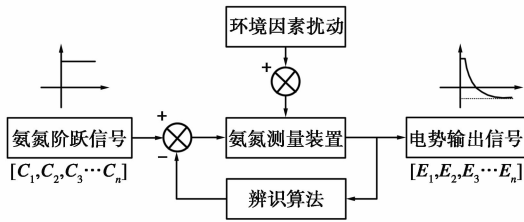
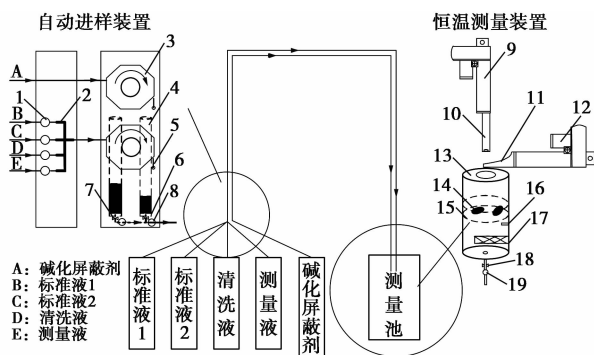


图1 系统辨识方法示意图

2 基于控制模型的氨氮测量系统设计

2.1 结构设计

基于控制模型的氨氮测量系统结构示意图如图2所示。



- 1—电磁阀;2—五通管;3—蠕动泵;4—PVC量液管;
5—聚四氟乙烯软管;6—压力传感器;7、18—加管阀;
8、19—隔膜泵;9、12—精密丝杠;10—氨气敏电极;
11—加盖小车;13—测量装置天窗;14—磁力搅拌子;
15—电磁线圈;16—温度传感器 Pt100;17—电子加热棒

图2 系统结构示意图

该系统主要由自动进样装置和恒温测量装置2部分组成。自动进样装置为测量装置抽取准确的测量液和碱化屏蔽剂,恒温测量装置为系统控制模型的辨识和氨氮含量的测量准备条件^[7]。标准液1和标准液2为已知浓度的 NH_4Cl 标准溶液,清洗液为去离子水和柠檬酸的混合溶液,碱化屏蔽剂($\text{NaOH} + \text{EDTA}$)为化学反应提供碱性环境,并且防止金属离子与碱反应生成沉淀堵塞导管,阻碍设备的正常运行。

整个系统的工作过程主要包括:系统控制模型的辨识和氨氮含量的测量2个部分。

系统控制模型的辨识主要通过不同电磁阀的切换,控制蠕动泵抽取不同浓度的 NH_4Cl 标准液和碱化屏蔽剂充分反应产生 NH_3 。测量装置通过恒温控制模块和磁力搅拌模块控制测量装置温度均匀恒

定。升降电机带动氨气敏电极进入测量装置,响应氨氮阶跃信号的冲击。最后,根据系统标准输入、输出信号,通过递推最小二乘算法对系统的控制模块进行辨识。

水体氨氮含量的测量主要通过自动进样装置抽取一定量的测量液和碱化屏蔽剂进入测量装置充分反应产生 NH_3 。测量装置温度稳定后,系统控制加盖电机打开测量装置顶盖,升降电机带动氨气敏电极进入测量装置采集氨氮信息。最后,系统根据测量温度和电势,经过算法模型计算得到待测液的氨氮浓度。

2.2 硬件设计

系统硬件原理框图如图3所示。

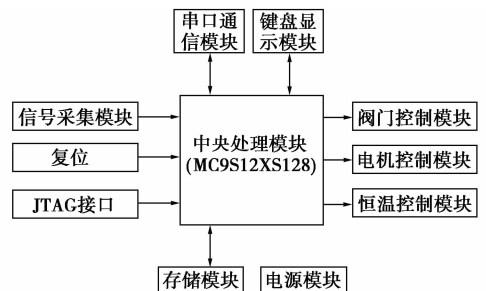


图3 系统硬件原理框图

系统硬件主要包括电源模块、中央处理模块、信号采集模块、阀门控制模块、恒温控制模块、电机控制模块、串口通信模块和键盘显示模块8个部分。电源模块为整个系统提供稳定可靠的能源保障,中央处理模块完成系统的控制任务,信号采集模块主要完成氨氮、温度和压力等信号的采集,电机控制模块主要完成测量装置顶盖的打开和关闭控制以及电极的升降控制,串口通信模块完成系统上位机和下位机信息的交互^[5]。其中电机控制模块和信号采集模块是完成系统模型辨识和氨氮测量的难点和重点。

2.2.1 电机控制模块的设计

电机控制模块主要完成丝杠(12 V)对加盖电机和升降电机的控制。其中,加盖电机推动小车完成测量装置顶盖的打开和关闭,防止氨气的逃逸。升降电机带动氨气敏电极进入和离开测量装置,响应氨氮阶跃信号。单片机IO口驱动能力有限,无法驱动丝杠正常工作。系统采用NPN和PNP半导体三极管(2N5551和2N5401)和N沟道增强型MOS管(75NF75)组成放大电路,将单片机输出电压信号抬高到12 V左右。电机控制模块的原理如图4所示,系统通过H桥控制丝杠电机正转和反转,从而

完成测量装置顶盖的打开和关闭以及氨气敏电极对氨氮阶跃信号的响应。

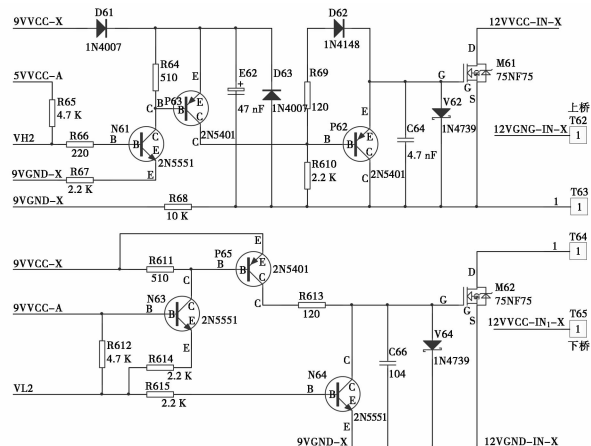


图 4 系统电机控制电路

2.2.2 信号采集模块的设计

氨气敏电极输出为皮安级电流信号,容易被现场其他干扰信号淹没。氨气敏电极内阻大于 1 MΩ,串入电路后会给系统带来较大的失调误差。因此,系统采用高输入阻抗,超低偏置电流的缓冲电路(AD8603)、24 位(Σ-Δ)ADC 采集电路(AD7793)和数字及电源隔离电路(ADUM5401)组成三级信号采集电路,使信号满足信号采集精度和采集速度的同时,免受现场噪声和瞬变电压的影响。

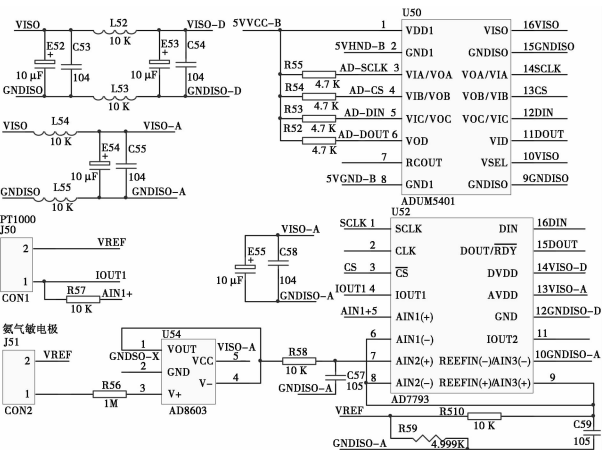


图 5 系统信号采集电路

2.3 软件设计

系统的软件采用模块化、结构化的编程思想,便于系统软件的修改、添加、删除和升级。系统的软件主要包括上位机软件和下位机软件。上位机软件主要完成系统参数的配置和氨氮相关参数的显示,下位机主要完成系统各种控制任务的执行。

下位机程序主要包括初始化程序、中断程序和

主程序 3 个部分。初始化程序主要完成系统定时资源和各模块状态的初始化。中断程序包括定时中断和通信中断,完成系统信息的维护更新。主程序包括信号的采集、控制信号和通信数据的收发等。系统下位机主程序的流程如图 6 所示。

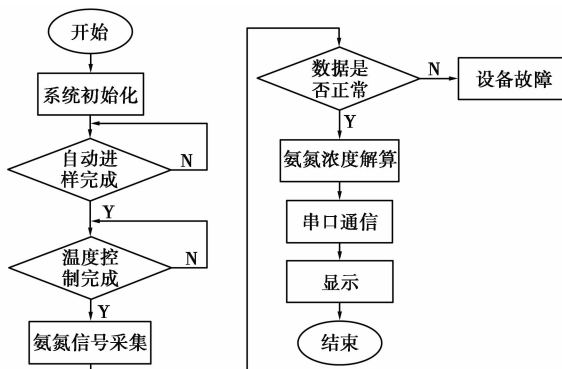


图 6 系统下位机主程序的流程

3 系统控制模型的辨识

系统控制模型的建立与氨气敏电极的动力学过程密切相关^[2],本系统中,采用国产复合式氨气敏电极。该电极主要由 Ag-AgCl 参比电极、玻璃指示电极和聚四氟乙烯微孔透气膜 3 部分组成。

在 pH > 11 的环境下,溶液中的 NH₄⁺ 充分转化为 NH₃,NH₃ 分子随着液体一起发生对流运动。由于选择性透气膜内外浓度差,氨气分子透过选择性透气膜,从高浓度向低浓度溶液发生扩散运动,进入氨气敏电极内腔。电极内电子由于液相电场的存在发生电子迁移,产生电流信号。整个电极的传质过程可以表示为:

$$J_i(x) = -D_i(\partial C_i/\partial x) - (nF/RT)C_i D_i(\partial E/\partial x) + C_i v(x) \quad (1)$$

其中: E 为 x 方向上的电场强度; $\partial E/\partial x$ 为电场梯度; D_i 为扩散系数; R 为理想气体常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度。

考虑电极处于强极化状态,电极输出电势与待测氨氮浓度的关系可以用能斯特方程描述:

$$E = E_0 + (2.303RT/nF) \lg[\text{NH}_3] \quad (2)$$

其中: R 为理想气体常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度; F 为法拉第常数, $F = 96487 \text{ C}/\text{mol}$ 。

实验研究发现,电极的初始电位 E_0 和电极“斜率” $2.303RT/nF$ 受各种复杂环境因素的影响,式(2)可变为:

$$E = E_0(s_1, s_2, s_3 \dots) + K(s_1, s_2, s_3 \dots) \lg c_{\text{NH}_3} \quad (3)$$

提取主要干扰因素,当温度发生变化时,式(3)

变为:

$$E = E_0(t) + K(t) \lg c_{\text{NH}_3} \quad (4)$$

式中: t 为测量装置的温度; c_{NH_3} 为待测液的氨氮浓度。那么:

$$c_{\text{NH}_3} = 10^{[E - E_0(t)]/K(t)} \quad (5)$$

对式(5)取对数得:

$$\lg c_{\text{NH}_3} = [E - E_0(t)]/K(t) \quad (6)$$

令 $\lg c_{\text{NH}_3} = D, E_0(t) = A(t), K(t) = B(t)$, 得到:

$$D = [E - A(t)]/B(t) \quad (7)$$

将式(7)用泰勒级数展开, 得到:

$$D = \{E - [a_0 + a_1 t + (1/2!) a_2 t^2 + \dots]\} / [b_0 + b_1 t + (1/2!) b_2 t^2 + \dots] \quad (8)$$

根据递推最小二乘法原理^[6], 计算系统的辨识参数矩阵:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}_i(k-1) + G(k)[y(k) - \varphi(k)^T \hat{\theta}(k-1)] \quad (9)$$

其中: $G(k)$ 为系统的增益矩阵; $y(k)$ 为系统的输出序列; $\varphi(k)$ 为系统的状态观测矩阵。根据递推最小二乘法停机准则:

$$\text{Max}_i |\hat{\theta}_i(k) - \hat{\theta}_i(k-1)| / |\hat{\theta}_i(k)| < \varepsilon \quad (10)$$

当参数相对变化满足停机准则时, 停止递推。否则修改协方差矩阵 P , 重新计算系统的参数矩阵, 直到参数满足停机准则为止。得到:

$$a_0 = -101.4745, a_1 = 1.2805, a_2 = -0.0686,$$

$$b_0 = -67.9553, b_1 = 0.4142$$

于是, 在 $0 \sim 40^\circ\text{C}$ 下系统对时间的控制模型为:

$$c_{\text{NH}_3} = 10^{(E + 101.4745 - 1.2805t + 0.0686t^2) / (-67.9553 + 0.4142t)}, \quad t \in [0, 40^\circ\text{C}] \quad (11)$$

4 系统控制模型的验证

4.1 系统控制模型的实验

为验证系统控制模型的有效性, 使用传统两点测量法和控制模型法对 $0.8 \sim 50 \text{ mg/L}$ 的 NH_4Cl 标准溶液进行测量, 测量结果如表 1 所示。由表 1 可以看出, 与两点实时标定方法相比, 基于控制模型的氨氮测量方法具有测量方法简单, 测量周期短, 测量误差小的优点。

表 1 不同测量方法测量结果对比

氨氮质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	电势/ mV	温度/ $^\circ\text{C}$	两点法/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	控制模型法/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	两点法误差/ %	控制模型法测量误差/ %
0.8	-119.72	29.87	—	0.81	—	1.25
1	-124.29	29.85	0.97	0.98	3.38	2.09
3	-152.29	29.96	2.83	3.12	5.74	4.21
5	-162.81	30.13	4.74	4.84	5.15	3.27

8	-174.45	30.06	7.67	7.84	4.13	2.04
10	-179.27	30.13	9.36	9.57	6.40	4.30
20	-196.14	30.14	18.79	19.26	6.07	3.68
30	-205.52	30.18	27.68	28.42	7.75	5.26
40	-212.96	30.17	37.63	38.69	5.92	3.27
50	-219.84	30.27	—	51.47	—	2.93

4.2 系统控制模型的仿真

在 $30 \sim 40^\circ\text{C}$ 范围内, 系统标准浓度和拟合浓度随温度变化的三维仿真曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出, 温度参数扰动下, 拟合浓度和标准浓度吻合较好, 基于控制模型的测量方法切实有效。

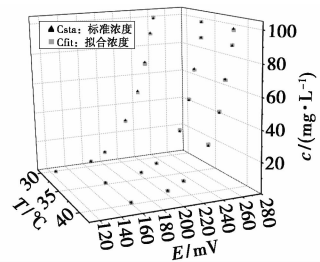


图 7 系统标准浓度和拟合浓度的三维仿真曲线

5 结束语

将系统辨识方法应用于电化学分析领域, 介绍了一种基于控制模型的氨氮测量系统及测量方法。实验结果表明, 该方法简化了氨氮测量步骤, 提高了测量效率和测量精度, 系统可用于水体氨氮含量的在线快速准确测量, 具有一定应用价值和推广意义。

参考文献

- [1] 国家环境保护总局. HJ/T 101—2003. 氨氮水质自动分析仪技术要求[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
- [2] 卡尔. H. 哈曼, 安德鲁. 哈姆内特, 沃尔夫. 菲尔施蒂希. 电化学[M]. 陈艳霞, 夏兴华, 蔡俊, 译. 第 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [3] 钟洪辉. 电化学分析法[M]. 2 版. 重庆: 重庆大学出版社, 1991.
- [4] 查全性等. 电极过程动力学导论[M]. 第 3 版. 北京: 科学出版社, 2002.
- [5] 秦刚, 陈中孝, 陈超波. 计算机控制系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [6] 侯媛彬, 周莉, 王丽琦, 等. 系统辨识[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.
- [7] 吴建忠, 殷传新, 马丽, 等. 新型氨气敏电极在线水质铵的测定中的研究[J]. 中国仪器仪表, 2009, 1(1): 56—58, 77.
- [8] 徐昊, 许国根, 周雅楠. 基于 LabVIEW 的虚拟水环境三参数在线监测系统研究[J]. 化工自动化及仪表, 2012, 5(9): 1166—1169. ■