

基于 FCS 的海水痕量元素的通用测定平台

徐翠锋, 许金, 郭庆

(桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了对海水痕量营养盐与重金属进行测定, 基于 FCS 的设计思想, 采用流动注射分光光度法研制了具有自适应外界设备、快速组建多种仪器及全数字化通信等特点的软硬件一体化的通用测定平台; 平台以 ARM (S3C2416) 处理器为核心, Linux 为操作系统, LCD 作为人机交互显示, 触摸屏或者 USB 鼠标完成输入控制, 构成完整的嵌入式工控机系统; 采用 CAN 总线并制定 CAN 应用层协议管理设备, 提高了系统的可靠性及抗干扰能力; 实际测试和应用证明, 该平台自动化程度高, 通用性、重用性及可扩展性均较强, 可组建成亚硝氮、硝氮、氨氮、活性磷、铁等多种痕量元素的实验室、船载和原位分析系统, 检测限为 nmol/L 级别; 平台对样品的测试准确度与商品专用仪器无显著性差异。

关键词: 痕量元素; 通用平台; FCS; Linux; CAN

Design of a Common Platform for Determination of Trace Element in Seawater Based on FCS

Xu Cuifeng, Xu Jin, Guo Qing

(College of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Flow injection analysis was adopted for the determination of trace element in seawater samples, and the relative instrument was developed. Based on the FCS design ideas, a software-hardware integration measurement platform with automated adaptive external devices, rapid formation of a variety of instruments and all-digital communications had been established. The platform was embedded with ARM (S3C2416) processor and Linux operating system, which had a human-computer interaction by LCD and an input-controller by touch screen or USB mouse. It used a CAN bus and developed a CAN Application Layer (CAL) protocol for device management. It showed characteristics of automation, versatility, reusability and scalability to achieve analysis of trace nitrite, nitrate, ammonia, phosphorus, iron and other elements in seawater, in laboratory, shipboard and in-situ applications. In the practical test, the measurement results of the platform had no significant differences with that of a commercial special spectrophotometer.

Keywords: trace elements; common platform; FCS; Linux; CAN

0 引言

氮、磷是海洋生物生长所必需的营养元素, 其含量高直接影响着海洋生物生产力和生态系统。而铁、锰等痕量金属亦在碳、氮等的海洋生物地球化学循环中起着重要作用^[1]。这些痕量元素在海洋中的分布, 是了解海洋生态系统结构和功能的重要依据。但是, 开阔海洋表层海水中的痕量元素浓度极低, 通常仅为 nmol/L 级别甚至更低, 对分析方法和检测仪器的要求极高。

目前, 国际上尚无商品化的海水痕量元素测定仪, 海洋学家们需要自行研发测定方法和仪器, 以获取研究数据。这些试验性仪器的兼容性、稳定性和自动化程度往往较差, 极大地制约着相关研究的发展。因此, 开发通用性强、稳定性和灵敏度高的海水痕量元素分析平台, 成为深入开展海洋研究的迫切任务。

本文基于 FCS (现场总线控制系统), 建立了海水痕量元素分析测定通用平台; 针对测定所使用的化学方法流程, 设计

了一系列具有通用性和重用性的可扩展性组件, 并对系统所设计的关键技术进行了阐述。

1 系统设计

系统结构图如图 1 所示, 主要由上位机、智能接口模块、通信媒体和执行设备等组成, 采用了 FCS 结构, 使用现场总线网络, 将现场各执行器、传感器与总控工控机互连, 构成全分布式的控制系统。

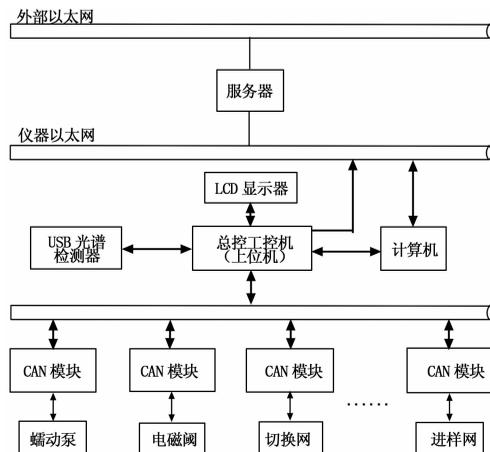


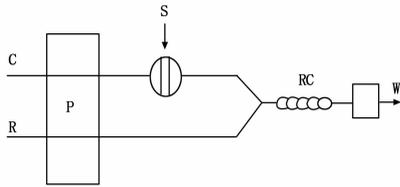
图 1 系统结构示意图

收稿日期: 2014-05-05; 修回日期: 2014-07-08。

基金项目: 广西教育厅重大项目(201201ZD010); 广西桂林市科技攻关课题(20120101-6)。

作者简介: 徐翠锋(1977-), 女, 黑龙江省鸡东县人, 讲师, 主要从事嵌入式测控技术方向的研究。

上位机采用 Samsung 公司的低功耗、高性能的 S3C2416 处理器, 配合 Linux 操作系统组成自主研发工控机, 完成上层监控及数据库管理, 并与各智能接口模块进行数据通信。通信媒体为双绞线, 通信协议符合德国 BOSCH 公司的 CAN 2.0 标准。系统通过现场总线, 将控制功能下放到现场, 经数字通讯控制相应的执行器, 以图 2 中流动注射分析测定痕量元素的基本流路为基础, 完成海水中痕量营养盐或重金属的测定。系统依据人机交互界面的实验步骤信息, 控制蠕动泵 (P) 及进样阀等执行器, 把海水样品 (S) 注入到载流 (C) 中, 其中的待测元素与试剂溶液 (R) 混合, 在反应盘管 (RC) 中反应, 形成可供检测的化合物, 由分光光度检测器 (D) 检测, 实现在线处理与浓度测定的全自动化。



S: 海水样品; C: 载流; R: 试剂溶液; RC: 反应盘管;
D: 分光光度检测器; W: 废液。

图 2 痕量元素测定的流动注射分析流程图

本系统具有自适应外设的功能, 增加新控制对象时, 只须把新执行器与智能接口模块相连, 再将模块接入现场总线, 总控工控机能智能感知新执行器, 并产生相应的软件形态, 重新生成人机交互界面, 自动实现系统的重组。通过以太网, 实现远程控制, 完成无人值守、自动化的连续测定分析。

2 硬件设计

本系统的硬件设计包括两大部分: 总控工控机及智能接口模块的硬件电路和 CAN 总线网络的构建。

2.1 总控工控机

由于控制功能被下放到各智能接口模块中, 核心处理工控机则主要收集各从处理器的数据, 必要时为从处理器提供数据服务, 进行数据处理并形成仪器过程显示及进行人机交互等。核心处理工控机结构图如图 3。系统需要利用 USB 存储设备保存测定数据, USB 鼠标进行操作控制, USB 微型光谱仪 (Ocean Optics USB 2000+) (分光光度检测器) 完成数据采集; 因此设计了 USB HUB 电路进行 USB 接口扩展, 以满足系统对 USB 通信的需求。系统采用双 CPU 结构, S3C2416 完成对系统总体的管理和数据的处理及人机交互; 内嵌 CAN 总线控制器的微处理器 STM32 (STM32F103C8T6) 完成 CAN 驱动, 组建 CAN 总线网络, 并辅助 S3C2416 完成部分数据的运算及处理。

2.2 CAN 总线终端的 EMC 设计

EMC (电磁兼容性) 在现场总线系统中非常重要, 其指标已成为产品能否走向市场的关键^[2]。因本平台最终将应用于海上船载, 受到的电磁干扰更加强, 因此系统采用削弱传输线电磁干扰及改善接收电路来提高 EMC。

传输线的电压或电流的分布是不均匀的^[3]。传输线的物理模型如图 4 所示。

根据克希霍夫定律, 从传输线的 x 到 $x+\Delta x$ 段, 应有:

$$U(t, x) = U(t, x + Vx) \frac{\partial i(t, x)}{\partial t} + RVxgI(t, x) \quad (1)$$

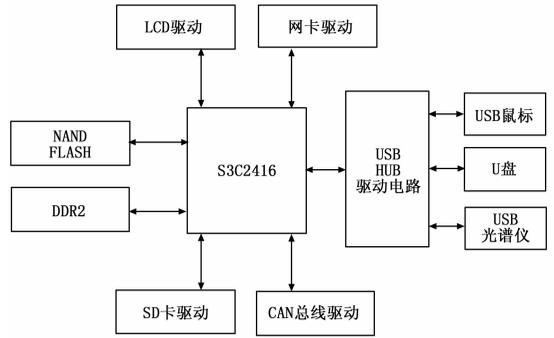


图 3 总控工控机结构图

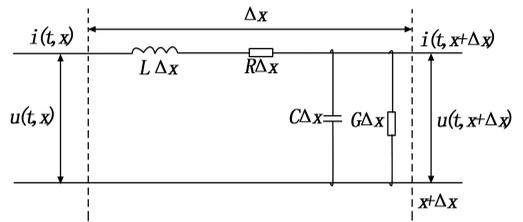


图 4 均匀传输线等效电路

$$I(t, x) = I(t, x + Vx) + GgVxU(t, x + Vx) + CVx \frac{\partial U(t, x + t\Delta x)}{\partial t} \quad (2)$$

对上两式进行拉式变换后, 令 $r(s) = \sqrt{(R+Ls)(G+Cs)}$, $Z_c(s) = \sqrt{(R+Ls)(G+Cs)}$ 及 $x = 0$, $U_1(s) = U(0, s)$, $I_1(s) = I(0, s)$, 可得到

$$V(x, s) = \frac{U_1(s) + I_1(s)Z_c(s)}{2} e^{-rx} + \frac{U_1(s) - I_1(s)Z_c(s)}{2} e^{rx} \quad (3)$$

$$I(x, s) = \frac{U_1(s) + I_1(s)Z_c(s)}{2Z_c(s)} e^{-rx} + \frac{U_1(s) - I_1(s)Z_c(s)}{2Z_c(s)} e^{rx} \quad (4)$$

从式 (3) 和式 (4) 可以看出, 若终端负载阻抗和特性阻抗不匹配, 则会产生波的反射现象。系统中 CAN 总线网络波特率设置为 500 kbps, 选取合适参数的电缆 ($R=20 \Omega/\text{km}$, $L=0.8 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$, $C=56 \times 10^{-9} \text{ F}/\text{km}$, $G=10^{-4} \text{ S}/\text{km}$), 据 $Z_c(s)$ 表达式, 可知传输特性阻抗幅值 $|Z_c| = 119.83 \Omega$ 。CAN 总线限定匹配电阻最小值 108Ω , 最大值 132Ω ^[3], 系统选取终端匹配电阻 $R_T = 120 \Omega$, 最大程度匹配系统特性阻抗, 抑制反射波。

改进后的 CAN 收发硬件电路^[4]构成图如图 5 所示。电路以 TJA1050 为 CAN 总线收发器, 采用改良的终端概念——分裂终端^[2], 普通模式信号可以在终端中间分接点出得到。图中 C_G 的作用是从中间分接点得到普通模式信号, 并连接到地。CANH 和 CANL 信号线上分别连接匹配电容 C_H 和 C_L , 使噪声源的阻抗 R_F 和 CANH、CANL 对地电容组成一个 RC 低通滤波器。电路加入普通模式扼流圈, 以高阻抗抑制普通模式信号, 而对差动信号表现为低阻抗。磁耦隔离器 ADUM1201 使 CAN 总线网络中各通信节点得到电气隔离保护^[5], 防止工作环境中存在的超过 CAN 驱动器极限电压的共模电压串入损坏其他电路。

表 1 报文帧格式

帧标识符					帧数据			
目的节点地址编号	源节点地址编号	功能码	资源节点编号	ACK	其他标识符	段编号	长度编号、错误编号、数据	数据
D28	D20	D12	D8	D0	RTR	Byte0	Byte1	Byte2
D27	D19	D11	D7		DLC			Byte3
D26	D18	D10	D6					Byte4
D25	D17	D9	D5					Byte5
D24	D16		D4					Byte6
D23	D15		D3					Byte7
D22	D14		D2					
D21	D13		D1					

注: D* 为标识符位; Byte* 为数据字节

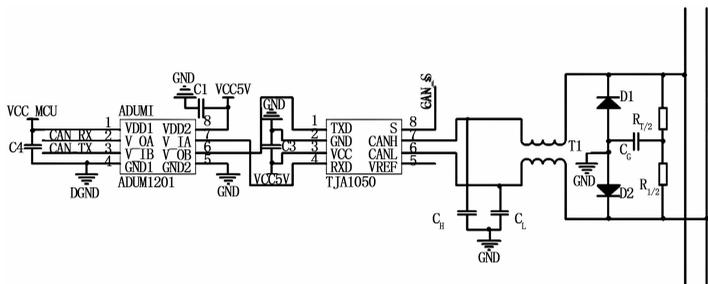


图 5 CAN 收发终端电路图

USB 及网络通讯等硬件电路也采取相似的 EMC 设计,从根本上削弱电磁干扰;PCB 布线中采用磁通量最小化、镜像平面、分区法^[6]等方法来提高电磁兼容性。

3 CAN 应用层软件设计

系统软件设计据分层及构件设计思想,采用驱动程序构件化、应用程序模块化等设计模式,基于 Qt 图形平台和自制定 CAN-bus 应用层协议,配合开源的 Linux 操作系统完成软件的通用性和可扩展性设计。

以 ISO/OSI 7 层的网络结构为参考,根据现场总线的特性,其通信模型简化为物理层、数据链路层及应用层等三层网络结构。CAN2.0A/CAN2.0B 协议规范只定义数据链路层和部分物理层,系统参考 iCAN^[7]制定了 CAN-bus 应用层协议,保证 CAN 总线网络可靠运行。协议核心之一是 CAN 报文帧的分配,包括标识符分配和报文数据分配,本报文帧格式如表 1 所示。

协议将 CAN 报文扩展帧的 29 位标识符分为目的节点 ID、源节点 ID、功能码、资源节点 ID 和 ACK 位等 5 个部分。报文数据部分以功能进行划分,根据功能码和报文中数据完成大于 8 字节长度的数据传输、错误诊断和报文监控等功能。系统定义的面向节点的协议,每个报文中都包含源节点和目的节点地址,每个帧都是从一个源节点发往指定的一个节点或者一组节点。节点地址是 CAN 节点在网络中的唯一标识,由用户根据需要对智能 CAN 接口模块的拨码开关的设置决定。节点地址是设备在网络中唯一的标识,网络中不能有相同 ID 的节点存在,因此每个节点上电以后首先都要进行 ID 自检。ID 检测通过发送 ID 检测报文到总线中,根据总线响应来完成 ID 冲突检测,具体见图 6 所示。节点发送完 ID 检测报文后开启一个监测定时器,如果在定时器运行超时,没有接收到其他节点的响应报文则设备进入可操作状态,根据实际情况与目的节点建立连

接,进行数据通信;如果在超时等待期间接收到其他节点的响应,则说明总线上有相同 ID 的节点,本节点则进入错误状态,利用节点硬件报错后离线 CAN 总线网络,提醒使用者采取手动复位,排除节点 ID 冲突的问题。

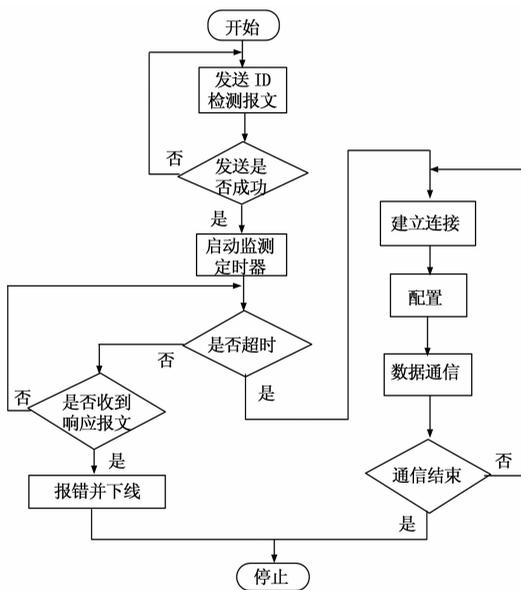


图 6 CAN 节点运行流程

软件采用改进的双硬件 FIFO 结构接收 CAN 总线数据,各 FIFO 软连接不同的 CAN 标识符滤波器,不同的消息经过滤波器后送入对应的 FIFO 中处理。主站通过不同的滤波机制,把从站回复的响应帧和数据帧分别关联到不同的 FIFO 中,在不同的任务中完成响应确认与数据处理;从站将广播帧和命令帧与数据帧分别关联不同的 FIFO。其次,系统使用片上独立看门狗监测程序的运行,在恶劣环境中工作不正常时,CAN 节点会自动掉线并重新上线,恢复通信并上报错误。

4 数据处理及系统测试

系统采用 FCS 结构,简单重组设备可用于多种元素的浓度测定。以亚硝酸盐为例,在温度为 25 °C 条件下,分别选取 0~500 nmol/L 浓度范围内的 6 个样品,采用带 PC 机的商品分光光度计和本平台分别进行分析,测定结果见表 2。根据表 2 数据,绘制如图 7 所示的标准工作曲线。从表中数据和拟合曲线可以看出,两款仪器的实验数据基本一致。拟合方程的斜率代

(下转第 15 页)

```

linux@ubuntu:~/project
1      d(um)      f(d) (%)
2      150.008030  4.588514
3      143.121017  8.275151
4      136.557503  13.026772
5      130.294992  15.961800
6      124.231578  15.638992
7      118.618392  16.540658
8      113.178566  13.988872
9      107.988210  13.813278
10     103.035802  18.524986
11     98.318669   9.952992
12     93.802152  6.874836
13     89.500396  5.622682
14     85.395918  4.217958
15     81.479571  3.633189
16     77.743023  3.327885
17     74.177736  3.668449
18     70.775954  3.954046
19     67.530177  4.352485
20     64.433256  5.549953
21     61.478349  6.994861
22     58.658959  6.648666
23     55.968865  7.524077
24     53.402140  7.085201
25     50.953124  7.156481
26     48.616419  5.555542
27     46.386876  5.503175
28     44.259579  4.630128
29     42.229839  4.934161
30     40.293184  3.877655
31     38.445343  3.410881
32     36.682244  2.571270

```

图 9 系统测试结果

法可较准确的求出粒度分布值, 有效地提高了测量系统准确度和可靠性。设计的测量系统成本低, 设计方案合理有效, 大大减少了实验系统搭建的困难, 成功实现了粒度测量。该系统的设计方案对粒度测量仪器的设计生产具有借鉴和参考价值。

.....

(上接第 10 页)

表 2 两套仪器测定数据结果对比 (n=3)

浓度/(nmol/L)	商品分光光度计测试结果			本平台测试结果		
	A	SD	RSD/%	A	SD	RSD/%
0.0	0.03306	0.00004	0.13	0.02146	0.00039	1.80
25.0	0.05686	0.00072	1.27	0.04437	0.00059	1.33
50.0	0.07800	0.00098	1.26	0.06743	0.00140	2.07
100	0.12287	0.00121	0.99	0.11141	0.00114	1.02
250	0.25635	0.00202	0.79	0.25672	0.00360	1.40
500	0.49579	0.00488	0.98	0.47788	0.00274	0.57

注: A 为吸光度; SD 为标准偏差; RSD 为相对标准偏差

表方法的灵敏度, 即单位浓度所引起的吸光值 A 的变化。本平台的灵敏度和商品分光光度计的相差甚小, 说明两款仪器没有显著差异。本平台测定数据的线性相关系数 $R^2 = 0.99996$, 线性很好。3 次平行测定的结果表明, 本平台对同一样品测定的相对标准差 (RSD) 均小于 3%, 满足实际测定的要求。

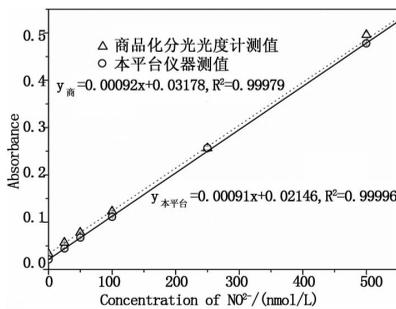


图 7 本平台和商品化分光光度计测定结果的拟合工作曲线

5 结论

本研究研制了一款基于 FCS 结构和 Linux 操作系统的软硬件一体化的通用平台。采用流动注射分光光度法, 提高了分析速度; 仪器设计上, 基于 FCS 结构, 针对通用性与专用性的不同, 采用模块化设计; 硬件方面, 从通用性及可重复性考虑, 借鉴分布式系统技术设计; 软件方面, 引入 Linux 操作系

参考文献:

[1] 吴克钗, 胡子平, 等. 电阻法检测注射液微粒的测试条件探讨 [J]. 医疗卫生装备, 1991 (3): 43-44.

[2] Carter Robert M, Yan Yong. On-line non-intrusive particle size measurement of pulverized fuel through digital imaging [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007.

[3] Micheal I. Mishchenko. Gustav Mie and the Fundamental Concept of Electromagnetic Scattering by Particles; A Perspective [J]. England: Elsevier Science, 2009, 110: 1210-1222.

[4] Carter Robert M, Yan Yong. On-line non-intrusive particle size measurement of pulverized fuel through digital imaging [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007.

[5] Wang Yanmin, Lang Guobiao etc. Inversion of Particle Size Distribution from Light-Scattering Data Using a Modied Regularization Algorithm [J]. Elsevier Science, 2009.

[6] 李秀斌, 等. 激光粒度仪测控系统的设计与开发 [D]. 沈阳: 东北大学, 2009.

[7] 未庆超, 等. 基于 ARM 的 PLC 编译系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (4): 1225-1229.

[8] 王清华. 散射法颗粒大小与形状分析 [D]. 南京: 南京工业大学, 2003.

统, 所有应用软件均基于 Linux 下开放式 Qt 平台实现, 解决了软件可扩展性及易用性。通过以上设计, 该通用测定平台满足通用仪器的标准化、模块化、通用化、系列化等规范要求, 为实现海水中痕量营养盐与重金属等痕量元素的测定, 提供了一套完整的软硬件一体化解决方案。

参考文献:

[1] 苏海涛, 郭庆, 胡鸿志. 基于 ARM 的双光束超痕量活性磷船载分析仪 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (10): 2854-2856.

[2] Morel F MM, Price N M. The biogeochemical cycles of trace metals in the oceans [J]. Science (New York, N. Y.), 2003, 300 (5621): 944-947.

[3] 王黎明, 夏立, 邵英, 等. CAN 现场总线系统的设计与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.

[4] 张培仁. CAN 总线设计及分布式控制 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.

[5] 刘敬东, 周文博. 基于 CAN 总线的智能断路器控制器设计 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2006, 45 (6): 783-788.

[6] 李英, 徐钊. 采用 ADuM1201 的 CAN 总线隔离方法 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2006 (4): 45-47.

[7] 何宏. 电磁兼容与印制电路板 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

[8] 周立功. iCAN 现场总线原理与应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学, 2007.