

基于虚拟仪器的便携式腐蚀电化学测试装置^{*}

韩 磊¹, 宋诗哲^{1, 2}

(1 天津大学材料与科学工程学院 天津 300072;

2 金属腐蚀与防护国家重点实验室 沈阳 110016)

摘 要: 采用 NI 公司的 DAQ-6024E 数据采集卡和研制的反相放大式恒电位电路构建了便携式腐蚀电化学测试装置——Virtual CETS, 该装置以笔记本电脑为平台, 可用于实验室和现场的腐蚀检测。在图形化虚拟仪器开发环境 LabVIEW 6.1 下开发了 Virtual CETS 的应用软件。测试中激励波形的发生、数据采集的控制以及进行数据处理、给出评价参数都由软件完成。应用 Virtual CETS 进行了多项实际实验, 结果表明该系统能便捷可靠地进行腐蚀电化学检测。

关键词: 虚拟仪器; 腐蚀速率; 极化阻力; LabVIEW

中图分类号: TG174.3⁺7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 530.4140

Portable corrosion electrochemical test system based on virtual instrument

Han Lei¹, Song Shizhe^{1, 2}

(1 School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2 State Key Laboratory for Corrosion and Protection, Shenyang 110016, China)

Abstract: A portable computerized system for corrosion rate measurement was established, which consists of a potentiostat based on inverting amplification circuit and a laptop computer equipped with an NI DAQ-6024E multifunction card and suitable application software. This system is named Virtual CETS (short for corrosion electrochemical test system). The application software was developed in graphic programming environment LabVIEW 6.1, whose functions are to offer a virtual front panel, create the array of stimulation signals, control the measurement procedure and perform data display, storage and analysis. Some experiments were performed with Virtual CETS both in laboratory and in the field. Experiment results show that the system can be applied to general corrosion electrochemical test credibly and conveniently.

Key words: virtual instrument; corrosion rate; polarization resistance; LabVIEW

1 引 言

在腐蚀电化学测试领域,电子技术、计算机技术和网络技术的迅速发展促使新仪器不断出现^[1-2],也推动了研究方法的进步。与传统的独立式恒电位仪相比,目前的电化学测试仪器一般都配有微机和专门软件,通过软件控制仪器完成实验,自动化程度很高。然而这些商品化的电化学测试系统、电化学工作站也有其缺点,即成本昂

贵、测试项目固定。

针对这一问题,本文利用虚拟仪器技术建立了一套便携式腐蚀电化学测试系统——Virtual CETS (Corrosion electrochemical test system),通过装有数据采集卡和应用软件的笔记本电脑控制普通恒电位电路完成腐蚀电位监测、电位/电流阶跃、极化阻力测量、极化曲线测量、电化学频率调制(ERM)^[3]以及电化学噪声(EN)^[4]等多项腐蚀电化学测试及相应数学处理,快速直观地给出测量结果。虚拟仪器的引入使用户可以根据实际测试需要、以

收稿日期: 2007-01 Received Date: 2007-01

*基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50499335)资助

较短的时间和较低的成本开发测试项目。

2 Virtual CETS 构成

2.1 硬件部分

Virtual CETS 由笔记本电脑、普通恒电位仪、数据采集卡以及配套的应用软件组成,如图 1 所示。

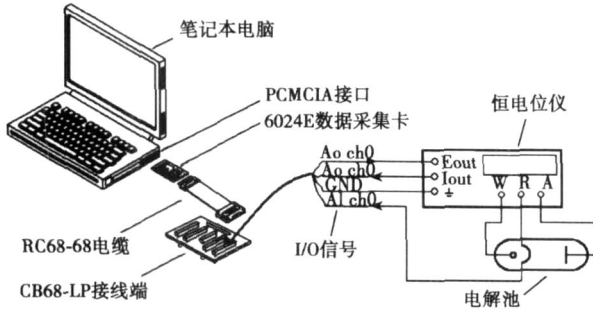


图 1 Virtual CETS 组成框图

Fig 1 Setup of Virtual CETS

数据采集卡采用美国 NI 公司的多功能 DAQ 6024E for PCMCIA, 它提供了 8 个差分或 16 个单端 12 位的模拟输入通道以及 2 个 12 位的模拟输出通道, 最高采样率为 200 kS/s。数据采集卡的功能是将软件产生的波形 D/A 转换后输出作为恒电位仪的激励; 同时采集参比电极电位和电流采样的信号, A/D 转换后输入计算机。6024E 采用的 PCMCIA II 接口是目前笔记本电脑的标准配置, 可以发挥笔记本电脑便携的优势, 便于现场测试。

恒电位仪根据反向放大式恒电位电路研制, 其原理电路以及与数据采集卡的信号连接如图 2 所示。该恒电位仪采用航空插头作为电解池接口, 具有数字面板表显示, 内部安装了与 6024E 配套的 CB-68LP 接线端, 所有信号的接线都在装置内部接好, 这样恒电位仪与外部的数据采集卡只需通过一条 RC68-68 电缆连接, 使系统简化 (见图 3)。此外也可以连接一台提供外加激励信号输入端和电流采样输出端的普通商品化恒电位仪, 以取代自制的恒电位电路, 比如上海正方公司生产的 ZF-3 型。

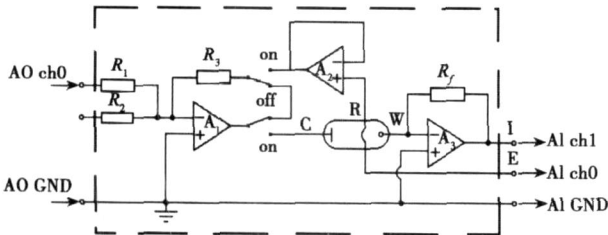


图 2 自制恒电位装置原理电路

Fig 2 Principle circuit of the potentiostat

2.2 应用软件设计

Virtual CETS 的应用软件采用 LabVIEW^[5] 6.1 开发。



图 3 Virtual CETS 系统实物照片

Fig 3 Photo of the Virtual CETS

程序总体组织上采用了树形结构。主程序 VCETS.vi 前面板上列出了测试软件所有的功能, 并对主要的 4 个子 V 进行调用: 配置数据采集卡、设置测试方法和参数、运行测试项目、以及调用数据处理程序组。图 4 为主程序的前面板, 图 5 显示了各模块间的调用关系。



图 4 主程序的前面板

Fig. 4 Front panel of the main program

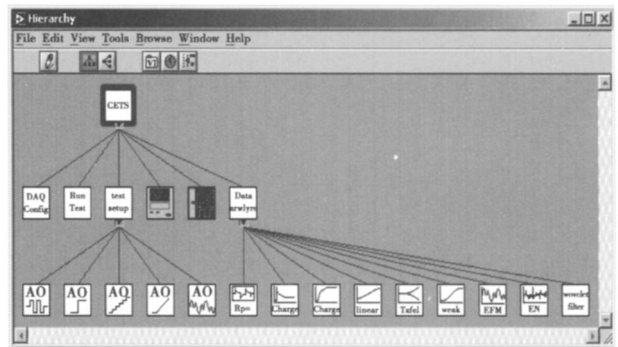


图 5 程序调用关系

Fig. 5 Hierarchy of the programs

进行测试时, 第 1 步配置数据采集卡 (DAQ config), 包括对输入输出通道号, 输入信号的量程和放大倍数等参数的设置, 程序将自动对上一次的设置进行保存, 若设置没有改变即可省去此步以方便实验者。

第 2 步进入测试参数设置 (Test parameter setup), 在这一子 VI 中选择测试方法并对相应的测试参数进行设

置,程序将根据设置生成激励波形数组,确定采样率、采样时间、电极面积等参数。目前实现的测试项目包括:方波法 (Square wave)、单阶跃 (Single step)、斜坡扫描 (Ramp sweep)、台阶扫描 (Stair sweep)、电化学频率调制 (EFM)、开路电位测量 (OCP)和零阻电流法 (ZRA)几种,基本涵盖了除电化学阻抗谱 (EIS)之外的常用腐蚀电化学测试方法。

第 3 步运行测试 (Run test),这一子 V I调用 DAQ 驱动函数,根据激励波形数组输出信号,在输出激励信号的同时进行电位、电流两路信号采集,数据和曲线实时显示于屏幕上,数据实时存储为文本文件。此外程序还可以实现腐蚀电位 E_{cor} 的自动补偿。

第 4 步进行数据处理,数据处理程序组包含了多个子程序,其中用到了最小二乘法、频谱分析以及小波分析等数学方法,可以对各种测试技术得到的数据进行相应处理,在测试结束后立即得到 Tafel常数、极化阻力或腐蚀电流等电化学动力学参数。

由于激励波形的产生、数据采集的控制以及数据处理都是由软件完成的,因此可以根据实验者的需要方便的修改或增加实验方法和数据处理方法。

2.3 Virtual CETS的性能校验

利用图 6 所示的电化学等效电路作为测试对象,对 Virtual CETS 测试系统进行校验和调试。其中 2 个电阻和 1 个电容分别模拟电解池中的溶液电阻、电化学反应电阻和双电层电容。W、R、A 分别代表工作电极、参比电极和辅助电极的位置。分别使用 Virtual CETS 测试系统及市售上海正方电子生产的 ZF 系列测试系统测定了体系的极化阻力 R_p 值 (对于该体系 $R_p = 1 \text{ k}$),测试方法为恒电位方波法,测试结果见表 1。

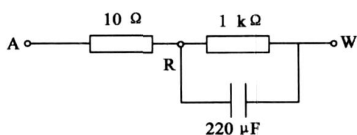


图 6 模拟电化学等效电路

Fig 6 Electrochemical equivalent circuit

表 1 ZF 系列测试系统与 Virtual CETS 测试结果比较

Table 1 Result comparison between ZF system and Virtual CETS

测试系统	R_p 值 /	SD /	SE /
ZF-4B 波形发生器 ZF-3 恒电位仪 ZF-10 数据记录器	1 030	63. 20	17. 53
Virtual CETS	1 037	41. 84	15. 82

通过模拟电化学等效电路的测试表明 Virtual CETS 系统工作状态良好,与传统的 ZF 系列测试结果十分接

近,且标准偏差略小。测量准确度和精确度均令人满意。

3 应用实例

应用 Virtual CETS 系统在实验室和现场进行了多项实验,限于篇幅,这里仅举出 3 项测试,实验涉及恒电位方波法、电化学频率调制法、极化曲线测量以及恒电流阶跃测试及相应的数据处理。

3.1 低碳钢 海水体系腐蚀速度测试

将 Virtual CETS 系统应用于 Q235 碳钢 /舟山海水体系腐蚀速度检测,测试采用恒电位方波法和电化学频率调制方法。图 7 和图 8 分别显示了恒电位方波法与电化学频率调制法数据处理程序的界面。表 2 列出了 Virtual CETS 电化学测试与传统失重法的比较。3 种方法的测量结果十分接近。

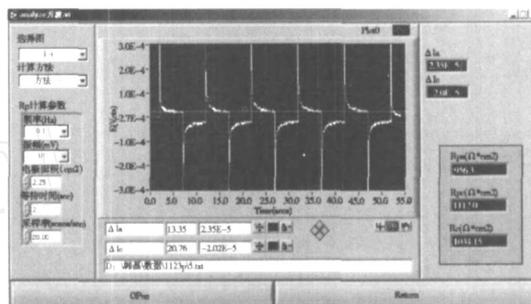


图 7 恒电位方波数据处理程序界面

Fig. 7 Front panel of data processing for potential square wave

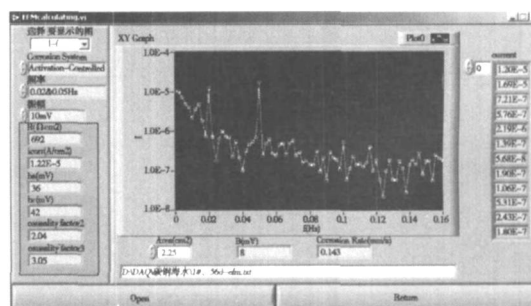


图 8 电化学频率调制数据处理程序界面

Fig. 8 Front panel of data processing for electrochemical frequency modulation

表 2 电化学测试结果与失重数据比较

Table 2 Comparison between electrochemical technique and weight loss method

测试方法	年腐蚀率 / (mm · a ⁻¹)
恒电位方波法	0. 15
电化学频率调制法	0. 17
失重法	0. 14

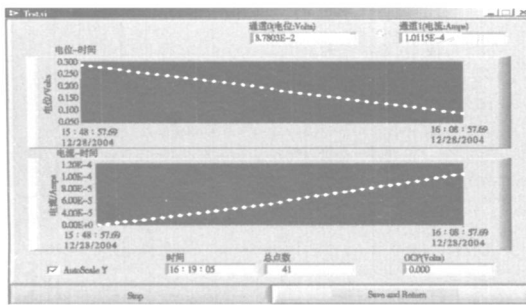
3.2 聚氨酯泡沫材料浸渍液对 Q235 钢的腐蚀性测试

聚氨酯泡沫材料是一种输油管道的保温材料,其浸渍液一般对钢管有较大腐蚀性。本实验分别以线性极化、弱极化解析和 Tafel 外推的方法对 Q235 钢在华北油田(任丘)现场使用的一种聚氨酯泡沫浸渍液中的腐蚀速度进行了测试,结果如表 3 所示。图 9(a)为采用电位台阶扫描方法得到的极化曲线, (b)、(c)、(d)分别为对极化曲线数据进行 Tafel 外推^[6], 线性拟合^[7]以及 Mansfeld 弱极化拟合处理^[8]时的界面。其中线性极化与弱极化拟合处理所得结果十分接近。

表 3 Q235 钢在某聚氨酯泡沫浸渍液中的腐蚀速度

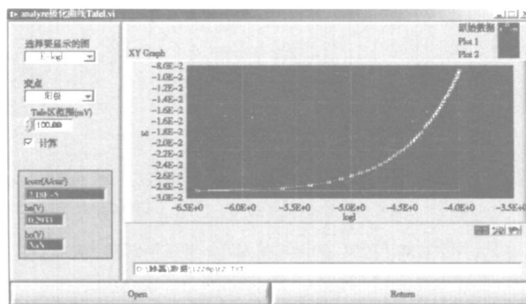
Table 3 Corrosion rate for Q235 steel in polyurethane foam soak

	$R_p / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$i_{\text{corr}} / (\mu\text{m} \cdot \text{cm}^{-2})$
线性极化	5 389	—
Mansfeld 弱极化拟合	5 013	5.69
Tafel 外推	—	9.69



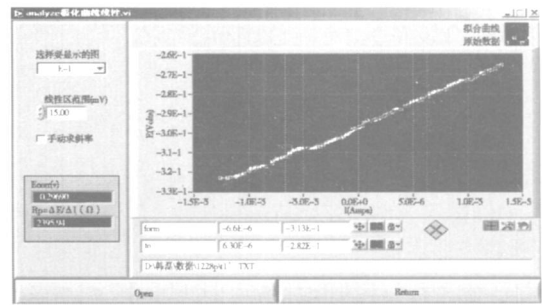
(a) 极化曲线测试界面

(a) Front panel of polarization curve measurement



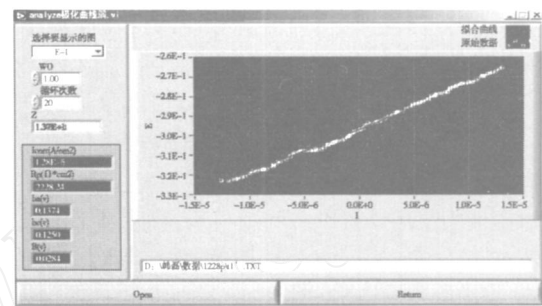
(b) Tafel 外推法处理极化曲线

(b) Front panel of Tafel extrapolation



(c) 线性极化阻力计算

(c) Front panel of calculation for linear polarization resistance



(d) 弱极化区拟合

(d) Front panel of fitting for polarization curve

图 9 极化曲线测试和解析程序界面

Fig. 9 Interfaces of the programs for polarization curve measurement and analysis

3.3 电厂/变电站接地网腐蚀状态测试

为了试验在不开挖条件下对电厂和变电站碳钢接地网的腐蚀状态进行检测的方法,采用 Virtual CETS 系统配合限流探头对高井热电厂变电站接地网进行现场极化阻力测量,测量采用恒电流阶跃方法。测试现场存在很大的电磁干扰,响应信号完全淹没在噪声中,必须经过滤波才能进行下一步的处理。图 10 为利用小波变换对电位响应信号进行滤波处理的结果。滤波后取得了较为理想的充电曲线。

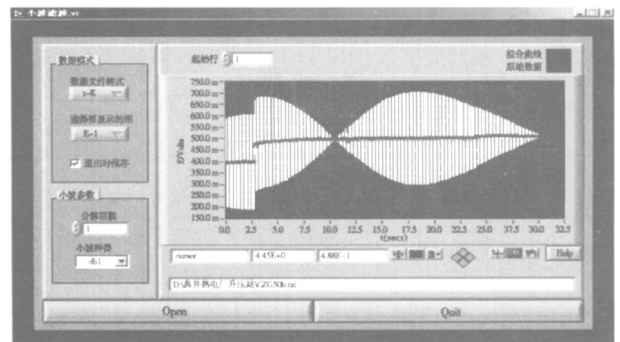


图 10 小波变换滤波程序界面

Fig 10 Front panel of wavelet denoising

4 结 论

利用计算机、数据采集卡和恒电位仪建立了基于虚拟仪器的便携式腐蚀电化学测试系统 Virtual CETS,应用 LabVIEW 开发了系统的应用程序,能够完成多项腐蚀电化学测试。

Virtual CETS工作准确可靠,成为研究金属在环境中腐蚀的有力工具。系统开发灵活,使用方便。将虚拟仪器技术应用于腐蚀电化学测试将是一个大有可为的领域。

参考文献

- [1] 赵瑾,申忠宇. 基于弱极化区恒电位测试原理的金属腐蚀速率分析仪 [J], 仪器仪表学报, 1998, 19(3): 320-324
ZHAO J, SHEN ZH Y. Metallic corrosion rate analyzer based on the theory of weak potentiostatic polarization test [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1998, 19(3): 320-324
- [2] 赵永韬. USB总线的腐蚀测量装置设计与实现 [J], 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 2419-2421.
ZHAO Y T. Design and implementation of corrosion measurement device based on universal serial bus [J], Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 2419-2421.
- [3] BOSCH R W, HUBRECHT J, BOGAERTS W F, et al Electrochemical frequency modulation: a new electrochemical technique for online corrosion monitoring [J], Corrosion, 2001, 57(1): 60-70.
- [4] 张鉴清,张昭,王建明,等. 电化学噪声的分析与应用——电化学噪声的分析原理 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2001, 21(5): 312-315.
ZHANG J Q, ZHANG ZH, WANG J M, et al Analysis and application of electrochemical noise I Theory of electrochemical noise analysis[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2001, 21(5): 312-315.
- [5] JOHNSON G W, JENNINGS R. LabVIEW 图形编程 [M]. 武嘉澍,陆劲昆,译. 北京:北京大学出版社, 2002
JOHNSON G W, JENNINGS R. LabVIEW graphical programming [M]. WU J SH, LU J K, trans Beijing: Peking University Press, 2002
- [6] ROCCHNIG The determination of tafel slopes by the successive approximation method [J]. Corrosion Science, 1995, 37(6): 987-1003.
- [7] ROCCHNIG Experimental verification of the validity of the linear polarization method [J]. Corrosion Science, 1997, 39(5): 877-891.
- [8] MANSFELD F. Tafel slopes and corrosion rates from polarization resistance measurements[J]. Corrosion, 1973, 29(10): 397-402.

作者简介



韩磊, 2002年于天津大学获得学士学位, 2005年于天津大学获得硕士学位, 现为天津大学博士研究生, 主要研究方向为腐蚀电化学。

E-mail: leihan1980@yahoo.com.cn

Han Lei achieved bachelor degree in 2002 and master degree in 2005 both from

Tianjin University, and is a PhD candidate now in Tianjin University. The main research direction is electrochemical corrosion
E-mail: leihan1980@yahoo.com.cn

宋诗哲, 现为天津大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为腐蚀电化学。

E-mail: szsong@tju.edu.cn

Song Shizhe is a professor and supervisor for PhD student in Tianjin University. The main research direction is electrochemical corrosion

E-mail: szsong@tju.edu.cn