

引用格式: 张晓东, 许志雄, 张聪, 等. 基于交流阻抗技术的海水管路腐蚀监测系统[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(4): 155-160.

Zhang X D, Xu Z X, Zhang C, et al. Seawater pipeline corrosion monitoring system based on AC impedance technology [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(4): 155-160.

# 基于交流阻抗技术的海水管路腐蚀 监测系统



扫码阅读全文

张晓东<sup>1</sup>, 许志雄<sup>\*2</sup>, 张聪<sup>2</sup>, 高新华<sup>2</sup>, 迟迎<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 海军工程大学 舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033

<sup>2</sup> 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

**摘要:** [目的] 加装绝缘垫片是预防海水异种金属管路间电化学腐蚀的重要措施, 绝缘垫片的电绝缘性能反映了海水管路间电化学腐蚀程度。[方法] 基于交流阻抗技术, 设计并开发一套海水异种金属管路间电绝缘性能监测系统, 主要包括电源模块、单片机模块、DDS信号发生器和通信模块、上位机等, 并通过高精度仪器验证其测量精度。[结果] 结果表明, 该电绝缘性能监测系统具有较高的精度, 对于10 MΩ以下绝缘电阻的测量误差小于5%。[结论] 电绝缘性能监测系统在干态和湿态下均可适用, 且精度满足实际使用需求。

**关键词:** 海水异种金属管路; 交流阻抗; 电绝缘性能; 直接数字式频率合成器

中图分类号: U664.84

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01320

## Seawater pipeline corrosion monitoring system based on AC impedance technology

Zhang Xiaodong<sup>1</sup>, Xu Zhixiong<sup>\*2</sup>, Zhang Cong<sup>2</sup>, Gao Xinhua<sup>2</sup>, Chi Ying<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

<sup>2</sup> China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

**Abstract:** [Objectives] The installation of an insulating spacer is an important measure to prevent electrochemical corrosion between seawater dissimilar metal pipelines. The electrical insulation performance of the insulating spacer reflects the degree of electrochemical corrosion between seawater pipelines. [Methods] On the basis of the AC impedance technology, this paper designs and develops a system for monitoring electrical insulation performance between seawater dissimilar metal pipelines. The system mainly includes power module, microcontroller module, Direct Digital Synthesizer (DDS) signal generator and communication module, and upper computer software, and the measurement accuracy is verified with high-precision instruments. [Results] The results show that the electrical insulation performance monitoring system has a high measurement accuracy, and the measurement error of the insulation resistance below 10 MΩ is within 5%. [Conclusions] The electrical insulation performance monitoring system suitable for both dry and wet states is realized, which meets the actual application requirements.

**Key words:** seawater dissimilar metal pipeline; AC impedance; electrical insulation performance; Direct Digital Synthesizer (DDS)

## 0 引言

船舶海水管路腐蚀破损95%发生在易蚀部

位<sup>[1-2]</sup>, 通常包括: 分流管件、汇流管件、分管、插管、焊缝及异种金属耦接部位。其中异种金属耦接部位之间的电化学腐蚀是海水管路腐蚀破损

收稿日期: 2018-06-16

网络首发时间: 2019-7-22 11:14

作者简介: 张晓东, 男, 1969年生, 硕士, 副教授。研究方向: 船舶动力装置保障。E-mail: zxd2013@vip.sina.com

许志雄, 男, 1991年生, 硕士, 工程师。

\*通信作者: 许志雄

的主要形式之一。为了防止此类腐蚀,通常采取加装绝缘垫片的措施隔离需要连接的不同金属件<sup>[3]</sup>。随着船舶服役时间延长,这些垫片可能发生绝缘性能下降甚至失效的情况。一旦绝缘垫片失效,将不可避免地导致耦接金属件中的金属件加速腐蚀,在较短时间内产生严重的电化学腐蚀现象,严重影响舰船的使用安全。因此,针对异种金属海水管路间的电绝缘性能监测技术越来越受到关注和重视。

张海丽等<sup>[4-6]</sup>通过在工业纯钛和铜镍合金之间串联不同阻值的电阻并进行电偶腐蚀试验的方法,证明了异种金属海水管路间的电绝缘性能与绝缘垫片的电阻值有着直接的关系。虽然可通过测量绝缘垫片的电阻来评判电绝缘性能的好坏,但对绝缘垫片阻值的测量缺乏相关研究。管路在干态下(即管内无海水),可直接在管路两端施加直流激励,通过测量回路电流,根据欧姆定律,计算绝缘电阻值。这种方法只适用在干态情况下测量,而对于湿态下(即管路存在海水),管路、绝缘垫片和海水构成了腐蚀体系,施加直流激励会对两端造成电荷积聚,影响腐蚀体系的正常腐蚀状态。本文将设计一种基于交流阻抗技术的海水异种金属管路间电绝缘性能监测系统,实现管路在干态和湿态下均适用的电绝缘性能监测。

## 1 监测系统总体实施方案

采用电化学阻抗谱法(EIS)测量管段间的绝缘垫片电阻需要在绝缘法兰中间插入一个薄金属片,如图1所示。图中,WE是工作电极,安装于绝缘垫片上,RE是辅助电极,安装于管路上,测量装置通过监测WE和RE之间的电位差和电流,用于计算交流阻抗。通过测量薄金属片与A,B管路之间的交流(1~10 kHz)阻抗,即可计算出法兰的绝缘电阻。测量过程中,将幅值100 mV左右的正弦波加载到金属片与管段之间,测量阻抗谱,从而得

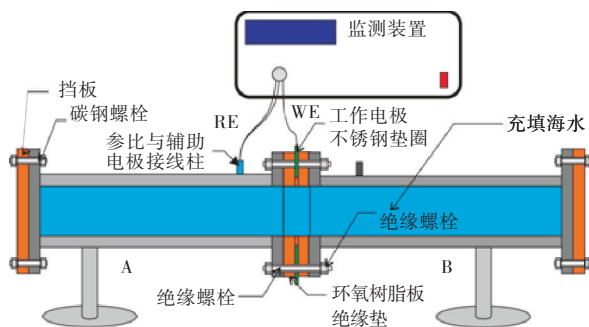


图1 海水管段间绝缘垫片电绝缘性能监测系统

Fig.1 Monitoring system of the electrical insulating performance for the spacer between seawater pipe sections

到两个管段间绝缘法兰的电阻。这种方法将湿态问题转变为干态问题进行处理,测量数据精确可靠,且不会对原腐蚀体系产生影响。

监测系统硬件主要包括电源模块、单片机模块(MCU)、DDS信号发生器和通信模块等,如图2所示。

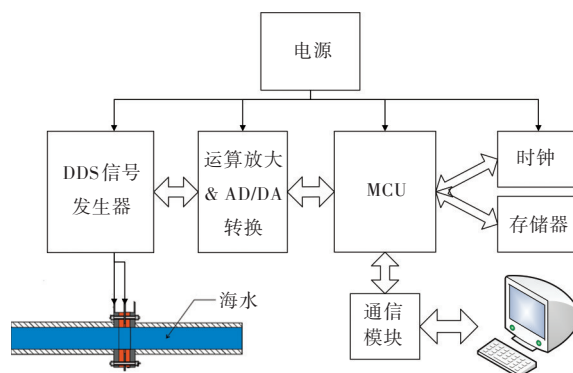


图2 海水管段间绝缘垫片电绝缘性能监测系统硬件组成

Fig.2 Hardware composition of electrical insulating performance monitoring system for the spacer between seawater pipe sections

## 2 交流阻抗技术基本原理

EIS是一种以小振幅正弦波电位(或电流)为扰动信号的电化学测量方法<sup>[7-10]</sup>。该方法对腐蚀体系扰动的电信号振幅小,既可避免对腐蚀体系产生大的影响,也可使扰动与腐蚀体系的响应之间近似呈线性关系,这就使测量结果的数学处理变得简单。交流阻抗法是在电极系统上施加一定频率的小幅值正弦波扰动信号,由电极系统的响应与扰动信号之间的关系得到电极阻抗。

EIS主要用于研究金属材料在各种环境中的耐蚀性能和腐蚀机理,可以同时测得绝缘电阻值和材料的极化电阻。EIS的主要优点是对被测体系干扰小、抗干扰能力强,可用于现场的绝缘电阻测量<sup>[11]</sup>。

测量系统的等效电路图如图3所示。图中: $R_p$ 为绝缘垫片阻值; $R_s$ 为体系溶液电阻; $C_{dl}$ 为界面电容。在测量时RE处接参比电极,WE处接仪器的工作电极。电路中RE和WE两端的等效阻抗 $Z$ 为

$$Z = R_s + R_p // \frac{1}{sC_{dl}} = R_s + \frac{R_p}{1 + sR_p C_{dl}} \quad (1)$$

将 $s$ 替换为 $j\omega$ ,有

$$Z = R_s + \frac{R_p}{1 + j\omega R_p C_{dl}} = R_s + \frac{R_p}{1 + \omega^2 R_p^2 C_{dl}^2} - j \frac{\omega R_p^2 C_{dl}^2}{1 + \omega^2 R_p^2 C_{dl}^2} \quad (2)$$

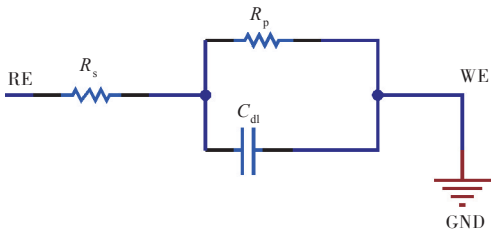


图3 海水管段间绝缘垫片电绝缘性能监测等效电路图  
Fig.3 Equivalent circuit diagram of monitoring electrical insulating performance for the spacer between seawater pipe sections

式中:  $\omega = 2\pi f$ , 为扫描信号的角频率;  $s$  为拉普拉斯算子。

对待测体系施加不同频率的信号,通过相关积分算法计算输出信号到输入信号的传递函数,使用频谱法计算得到等效电路中的3个参数  $R_s$ ,  $R_p$  和  $C_{dl}$ 。测量时,考虑到待测体系中的等效电容较大,首先对其施加高频交流信号进行测量,在高频信号下,根据电路理论,电容  $C_{dl}$  的阻抗较小,近似认为短路,则待测体系等效阻抗  $|Z|$  约等于  $R_s$ 。然后,再对待测体系施加低频信号,这时电

容  $C_{dl}$  近似为开路状态,则体系的等效阻抗  $|Z|$  为  $R_s$  加上  $R_p$  的值,通过高、低频阻抗相减可以得到绝缘垫片的阻值。

### 3 主要电路模块设计

#### 3.1 电源模块设计

图4所示为电源模块电路。其中信号调理电路使用 $\pm 5$  V电压供电,单片机系统采用3.3 V电压供电。

#### 3.2 单片机模块设计

采用C8051F060单片机作为主控制器,内含2个16位AD转换器和2个12位DA转换器(用于模拟DDS合成正弦波激励信号)。

#### 3.3 通信模块设计

测量系统与PC上位机之间采用RS-485总线进行双向通信,并对485通信电路进行光电隔离抗干扰处理。用户可通过PC机进行控制测量系统工作、读取测量数据等操作。图5为通信模块电路。

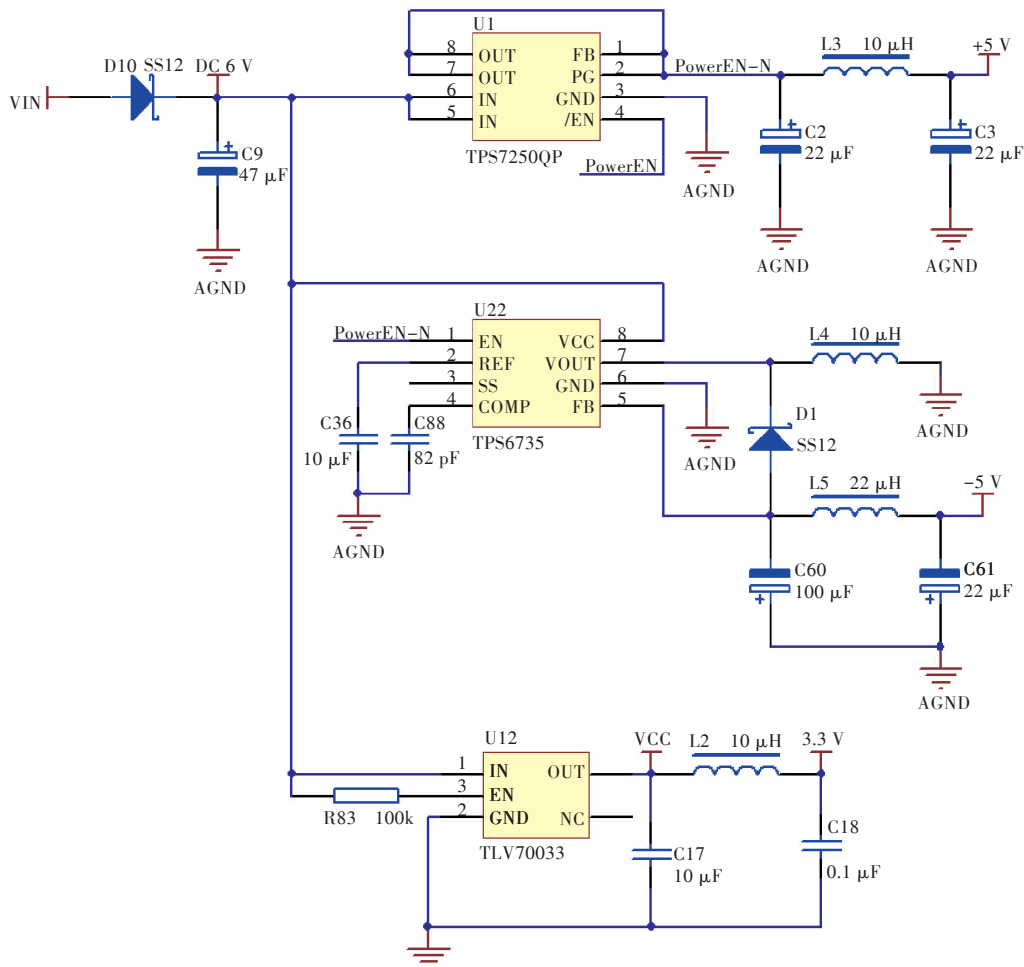


图4 电源模块电路  
Fig.4 Power supply module circuit

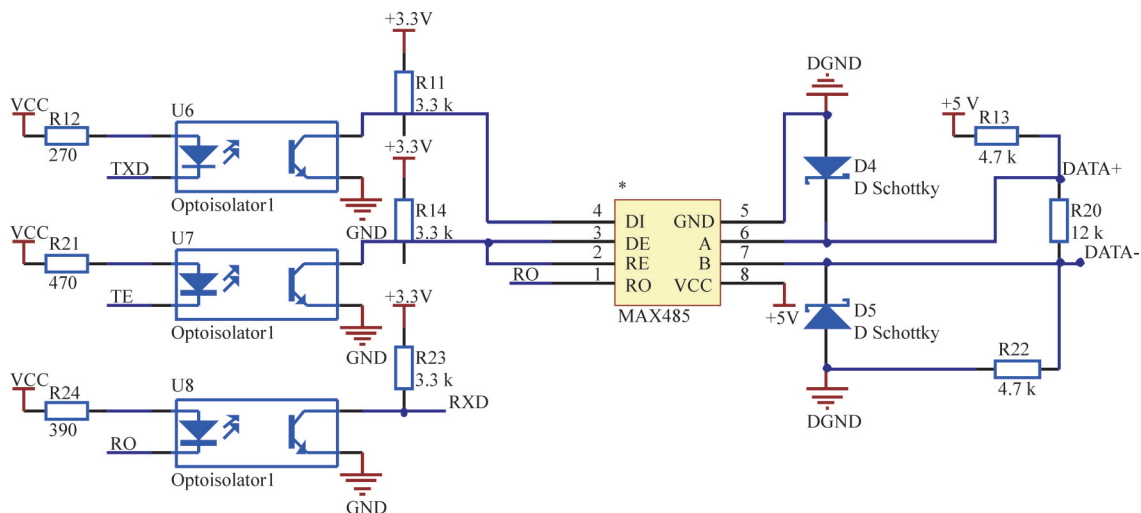


图5 通信模块电路

Fig.5 Communication module circuit

### 3.4 信号调理电路设计

由于输入信号存在幅值(幅值可能超过单片机的输入电压而对单片机造成损坏)和极性(存在正、负双极性)的不确定性,模拟信号在进入单片机进行AD转换前,需要经过信号调理电路,如图

6所示。将输入信号进行限幅和极性转换处理,转换为0~2.5 V的对单片机安全的单极性信号,进而输入单片机进行采集和转换处理。16位AD转换器的分辨率和信号的运算处理,可以令本系统对电位测量的分辨率达到0.1 mV,满足测量要求。

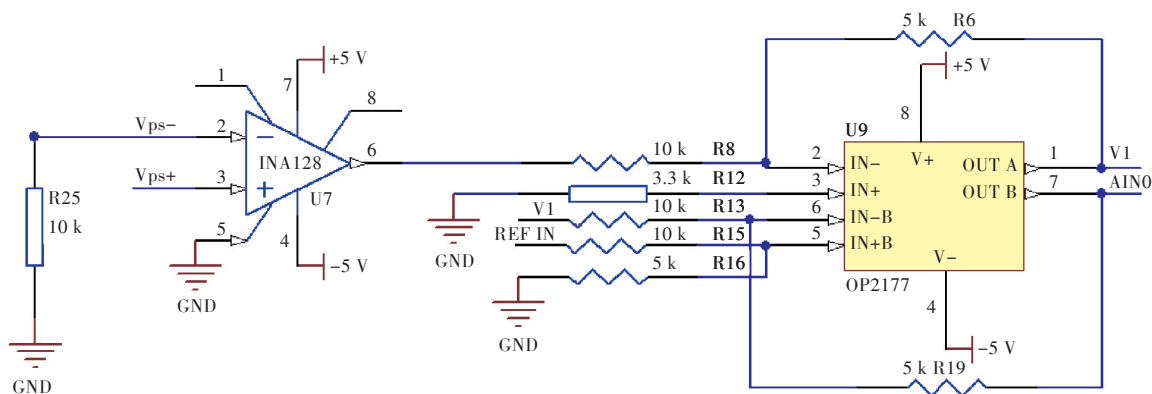


图6 信号调理电路

Fig.6 Signal conditioning circuit

## 4 系统程序设计

根据异种金属海水管路间电绝缘性能监测的具体要求,系统软件要实现对海水管路间绝缘垫片的实时电阻测量,并能对测量数据进行显示、储存和回调。系统软件主要分为上位机软件和下位机测量系统软件两个部分。为满足系统功能需求,系统上位机软件采用 Visual Basic 6.0 编程语言设计<sup>[12]</sup>,实现人机交互界面,控制下位机测量并显示测量结果信息。测量系统软件采用 C 语言设计,主要由主控制程序和量程自适应程序组成,如图7所示。其中,主控制程序部分主要实现系统测量参数的初始化,通过内部高精度定时器产

生定时中断,在中断服务中测量并存储绝缘垫片的电阻。当测量系统检测到上位机发送的指令后会产生串口接收中断,在串口中断服务中识别上位机指令,并针对不同指令分别执行不同子程序,例如接收到读取历史数据指令,则立即将测量的历史数据发送至上位机软件。

量程自适应程序首先选择中间量程进行测量,通过判断测量结果偏大还是偏小,然后单片机控制模拟开关选择相应的测量量程来达到自适应量程的目的。

## 5 系统精度测试

在 DN100 铜—钢管路中循环通入与海水盐度



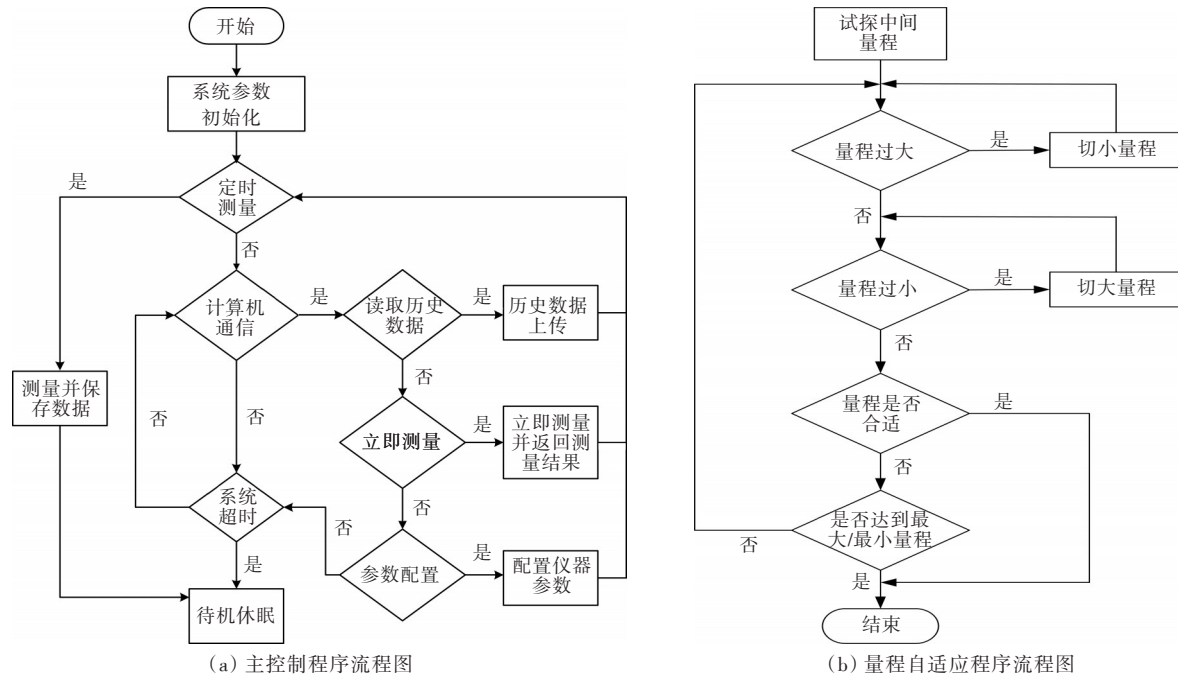


图7 测量系统软件流程图  
Fig.7 Flow chart of measurement system software

(3.5%)相当配比的盐水,以此在海水管路两端并联电阻箱,搭建模拟海水管路试验台架,分别测量7种精密电阻的阻抗值(100,1 000,10 000,100 000 Ω以及1,10,100 MΩ),并采用DMM4020泰克精密台式万用表对监测系统测量精度进行验证。

DMM4020泰克精密台式万用表具有5.5位分

辨率,百兆欧以内电阻测量分辨率高达1 mΩ。

测试结果如表1所示。通过比较监测系统的测量结果与高精度台式万用表的结果,可以看出本监测系统的阻抗测量范围在10 MΩ以内,测量误差均在5%以内,满足海水管路间电绝缘性能监测的要求。

表1 绝缘电阻测量仪对标准电阻的测量结果  
Table 1 Measurement results of insulation resistance meter to standard resistance

电阻标称值/kΩ	样机测量值原始数据/kΩ					平均值/kΩ	万用表测量值/kΩ	测量误差/%
1×10 <sup>5</sup>	97 970	98 390	97 030	97 080	97 130	97 520	87 350	11.64
1×10 <sup>4</sup>	10 440	10 520	10 330	10 470	10 460	10 450	9 990	4.56
1×10 <sup>3</sup>	1 023	1 035	1 018	1 031	1 029	1 027	990	3.81
100	103.96	105.00	103.00	104.35	104.10	104.08	100.3	3.77
10	10.336 56	10.431 75	10.236 14	10.374 23	10.345 46	10.344 83	9.978	3.68
1	1.037 92	1.047 90	1.027 94	1.041 91	1.039 96	1.039 13	1.003	3.60
0.1	0.101 92	0.105 00	0.103 00	0.104 40	0.104 10	0.103 68	0.100 3	3.37

## 6 结 语

本文主要针对目前异种金属海水管路间绝缘垫片缺乏专用的电绝缘性能监测仪器、设备的现状,基于交流阻抗技术,设计和研制了一套海水异种金属管路间电绝缘性能监测系统,实现了对绝缘垫片电阻的实时自动监测,通过绝缘垫片的电绝缘性能间接反应海水管路腐蚀状况,对发生电绝缘性能下降严重的水管路及时采取措施,消除隐患,减少和预防因绝缘垫片电绝缘性能下降带来的海水管路异种金属电化学腐蚀,确保海水

管路正常运行,对海水管路腐蚀状况监测具有指导意义,其经济效果显著。本文所设计和研制的海水管路腐蚀监测系统原理简单、测量精度高,达到了对异种金属海水管路间绝缘垫片电绝缘性能监测的使用要求,具有较高的实用价值,适合大范围推广使用。

### 参考文献:

[1] 曾荣辉,彭玉辉,张威. 船舶海水管路防腐蚀研究[J]. 中国舰船研究, 2009, 4(3): 74-76, 80.  
Zeng R H, Peng Y H, Zhang W. Protection measures

- against erosion of seawater pipeline of ships [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2009, 4(3): 74-76, 80 (in Chinese).
- [2] 杨光付, 裘达夫, 潘金杰, 等. 舰船海水管系腐蚀风险分析与综合评估方法 [J]. 中国舰船研究, 2017, 12(3): 142-148.  
Yang G F, Qiu D F, Pan J J, et al. Corrosion risk assessment and comprehensive evaluation of ship sea water pipe systems [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(3): 142-148 (in Chinese).
- [3] Zepon G, Nogueira R P, Kiminami C S, et al. Electrochemical corrosion behavior of spray-formed boron-modified supermartensitic stainless steel [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2017, 48(4): 2077-2089.
- [4] 张海丽, 李宁, 薛建军, 等. 工业纯钛与铜镍合金的电偶腐蚀及电绝缘控制 [J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(8): 615-618.  
Zhang H L, Li N, Xue J J, et al. Galvanic corrosion and insulation control between industrial pure titanium and alba [J]. Corrosion & Protection, 2010, 31(8): 615-618 (in Chinese).
- [5] Song G, Atrens A, Stjohn D, et al. The electrochemical corrosion of pure magnesium in 1 N NaCl [J]. Corrosion Science, 1997, 39(5): 855-875.
- [6] 王广夫, 董彩常, 吴恒, 等. 某型舰船淡化海水管路腐蚀失效原因及治理建议 [J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(1): 54-56, 64.  
Wang G F, Dong C C, Wu H, et al. Corrosion reason and management advice for desalination seawater piping in a certain ship [J]. Corrosion & Protection, 2017, 38(1): 54-56, 64 (in Chinese).
- [7] 陈凤琴, 付冬梅, 周珂, 等. 电阻探针腐蚀监测技术的发展与应用 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29(6): 669-674.  
Chen F Q, Fu D M, Zhou K, et al. Development and application of corrosion resistance probe monitoring technology [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2017, 29(6): 669-674 (in Chinese).
- [8] 王国利, 刘磊, 李斌, 等. 架空输电导线交流电阻的实测方法研究 [J]. 南方电网技术, 2017, 11(7): 78-83.  
Wang G L, Liu L, Li B, et al. Study on measurement method of AC resistance of overhead transmission line [J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(7): 78-83 (in Chinese).
- [9] 王学远, 魏学哲, 戴海峰. 车载电池阻抗测量用正弦电流源控制与设计 [J]. 电源技术, 2018, 42(1): 20-24.  
Wang X Y, Wei X Z, Dai H F. Control and design of sinusoidal current source for on-board battery impedance measurement [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(1): 20-24 (in Chinese).
- [10] 李永刚, 王海蛟, 武玉才, 等. 基于交流阻抗法的发电机励磁绕组短路故障诊断 [J]. 大电机技术, 2017(4): 10-14, 22.  
Li Y G, Wang H J, Wu Y C, et al. Field winding short circuit fault diagnosis on turbine generators based on the AC impedance test [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2017(4): 10-14, 22 (in Chinese).
- [11] 杨列太. 腐蚀监测技术 [M]. 路民旭, 辛庆生, 译. 北京: 化学工业出版社, 2012.  
Yang L T. Techniques for corrosion monitoring [M]. Lu M X, Xin Q S, Translator. Beijing: Chemical Industry Press, 2012 (in Chinese).
- [12] Plotkin E, Semenov A, Vavilov N. Visual basic representations [J]. International Journal of Algebra & Computation, 1998, 8(1): 61-95.