

“全域地球物理探测与智能感知”专栏 编者按 地球物理在地质勘探、能源探测、环境监测、灾害防治和国防安全等方面都有着广泛的应用。2016 年,习近平总书记在全国科技创新大会上提出“向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题”。“三深一土”国家战略的实施,标志着国家对战略科技的支撑也在不断加强,这对地球物理探测提出了更高的要求,深海、深地和深空的全域地球物理探测已经逐渐成为发展趋势。2021 年 5 月,中国地球物理学会地球物理技术委员会第九届学术会议——全域地球物理探测与智能感知学术研讨会成功在武汉召开,600 多位国内外专家围绕深地、深海和深空地球物理技术、近地表地下空间地球物理精细探测技术、地球物理传感技术等 13 个专题展开了充分而热烈的学术交流。《物探与化探》非常关注我国地球物理方法及探测仪器的进步与发展,与中国地球物理学会地球物理技术委员会联合创办专辑,向业内广泛征文,并获得了踊跃的响应,共征集到相关文章 64 篇,本期专栏中,我们从征集的论文中优先选择出 7 篇文章,奉献给读者,共同探讨地球物理技术、方法、仪器研发、数据处理和解释等方面的新进展。

doi: 10.11720/wtyht.2022.1460

邓明,王猛,吴雯,等.海洋可控源电磁发射系统中的绝缘在线监测技术研究[J].物探与化探,2022,46(3):537-543.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1460

Deng M, Wang M, Wu W, et al. Online insulation monitoring technology for a marine controlled source electromagnetic transmitter system[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(3): 537-543. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1460

# 海洋可控源电磁发射系统中的绝缘在线监测技术研究

邓明<sup>1,2</sup>, 王猛<sup>1,2</sup>, 吴雯<sup>1,2</sup>, 马晓茜<sup>1,2</sup>, 罗贤虎<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 3. 广州海洋地质调查局 广东 广州 510075)

**摘要:** 海洋可控源电磁法广泛用于天然气水合物、海底油气资源勘探和地质构造勘查。在海上作业时, 船载甲板供电单元通过深拖缆向海底的海洋可控源电磁发射机提供电能。利用深拖缆传输高压大功率电能的过程中, 需要对高压供电回路的绝缘电阻进行自动实时测量和监测, 确保电能的安全传输和供电异常时的及时处理。本文基于高压宽频耦合器件、绝缘检测模块、远程数据传输部件和上位机监控软件, 通过收集高压端至外壳地之间的漏电流, 将其模拟放大, 通过测量电压值, 反算绝缘电阻, 实现了对高压回路对大地之间绝缘电阻的自动测量和监测。所形成的自动绝缘在线监测技术, 经过海上试验验证, 能够满足海洋可控源电磁发射系统的要求, 很好地在线评价了系统的绝缘性能, 为海洋仪器同类功能的研发提供了有益的参考。

**关键词:** 海洋可控源电磁法; 发射机; 绝缘电阻; 在线监测技术; 海上试验

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)03-0537-07

## 0 引言

海洋可控源电磁法(marine controlled source electromagnetic, MCSEM)自 1970 年提出至今, 通过

多年的不断发展, 已被国内外的地球物理勘探工作者广泛用于天然气水合物<sup>[1]</sup>和海底油气资源的勘查, 方法的有效性得到了充分的验证<sup>[2]</sup>。利用 MCSEM 发射机向海底供电过程中, 为了能够向海底传输大功率的电能, 一般在甲板端采取船载工业电升

收稿日期: 2021-08-20; 修回日期: 2022-01-03

基金项目: 国家重点研发计划项目“深水双船拖曳式海洋电磁勘探系统研发”(2016YFC0303100); 国家自然科学基金项目“基于自适应阻抗匹配技术的 CSAMT 电偶源高频大电流发射问题研究”、“海洋环境与目标的准静态电磁探测理论与方法”、“海洋发射电极的阻抗特性理论分析与实验研究”(41874142、61531001、41504138); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2-9-2018-268)

第一作者: 邓明(1956-), 男, 博士, 教授, 主要从事地球物理仪器研发与教学工作。Email: dengming@cugb.edu.cn

通讯作者: 王猛(1984-), 男, 博士, 副教授, 主要从事地球物理仪器研发与教学工作。Email: wangmeng@cugb.edu.cn

压至高压,然后利用光电复合深拖缆或同轴电缆将电能输送至海底,进而在海底将电能降压,最终实现电能的传输<sup>[3]</sup>。电能传输过程中,对电力设备的绝缘性能要求很高,因此,传输电压对地之间的绝缘性能监测和评价非常必要。由于发射系统水下部分工作环境的特殊性,海水的温度、盐度变化都会对系统的绝缘性造成破坏,一旦高压电缆稍有破损,对大地形成漏电回路,轻则损失部分仪器设备,重则对操作人员的人身安全造成伤害,后果不堪设想。因此,需对发射系统的绝缘安全性能进行监控。针对电力系统中绝缘安全性能的问题<sup>[4]</sup>,对矿用和变电器的低压电缆在线检测研究较多<sup>[5]</sup>,而对于在水下以及在海洋可控源电磁发射系统中高压电缆的在线检测研究较少<sup>[6]</sup>,这在以前的天然场源电磁场检测设备上也未出现过类似问题<sup>[7]</sup>。

本文介绍了海洋可控源电磁发射系统绝缘检测的前期工作和改进方案的内容,通过测量高压端与外壳地之间的绝缘电阻,实现在线连续监测,一旦超出预先设置的绝缘安全值,及时发出报警信息提示仪器操作人员,确保发射系统发射过程的安全可靠。

### 1 前期绝缘电阻检测的方式和方法

在前期对发射系统绝缘性能的检测中,采用了 UT513 绝缘检测表进行手动检测,其最高输出激励电压可达 2 500 V,测量的绝缘电阻范围为 100 kΩ~1 GΩ。每次发射机供电之前,均进行了绝缘电阻测试。在水面时,绝缘电阻约为 40 MΩ;水下 50 m 时,绝缘电阻为 55 MΩ;水下 200 m 时,绝缘电阻为 62 MΩ;水下 1 200 m 时,绝缘电阻为 70 MΩ;即随着水深的增加,系统的绝缘性能也在加强,如图 1 所示。上述测量方式虽然有效地测得了绝缘电阻值,但是利用绝缘表展开测试存在许多弊端。

1) 绝缘检测表不能实现自动测量,需依靠手动测量、人工读数。约每 200 m 进行一次测量,发射机下放速度约为 1 m/s,测量间隔为 3 min,由于仪器操作需要时间,间隔时间延长在 15~30 min。间隔时间过长,测量的结果滞后,数据量不足,不能及时发现电缆绝缘缺陷,无法实时监测系统的绝缘特性,故仍存在检测漏洞,亟待解决。

2) 绝缘检测表工作时输出激励高压,手动测量存在触电安全隐患。

3) 进行绝缘性能测量时,需关闭发射机,存在操作繁琐不便的问题。

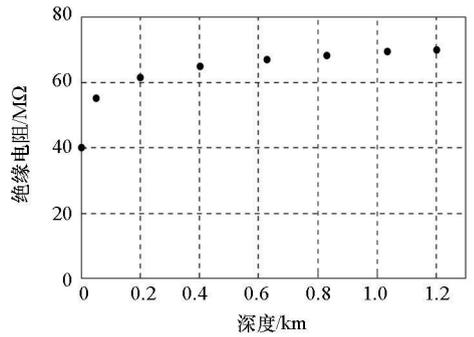


图 1 发射系统的绝缘电阻与水深特性对应关系

Fig.1 Diagram of insulation resistance and water depth characteristics of the system

### 2 新的自动绝缘在线监测方式

基于前期工作中存在的检测问题,通过技术攻关,实现了绝缘电阻的自动在线监测,有助于工作人员及时发现电力事故隐患问题,减少了因绝缘而导致电力系统的故障,使得电力设备可以时刻保持最佳的运行状态,提高了工作效率。发射系统由大功率发电机、甲板升压变压单元、甲板端监控系统、光电复合深拖缆、发射机水下拖体和发射天线等组成<sup>[8]</sup>,如图 2 所示。通过固定于甲板的升压变压器使发电机输出的电压提升至 2 800 VAC,利用深拖缆进行长距离电力传输,由于电力在深拖缆上有损耗,故将电能输送到海底降压单元时,其输入端为交流三相 2 650 V。绝缘在线监测单元与甲板升压单元的高压端、外壳地连接,测得的绝缘电阻值实时传输给监控软件,一旦发生绝缘电阻值过低的情况,则会立即在软件界面报错,通知仪器操作人员,需尽快找出故障。

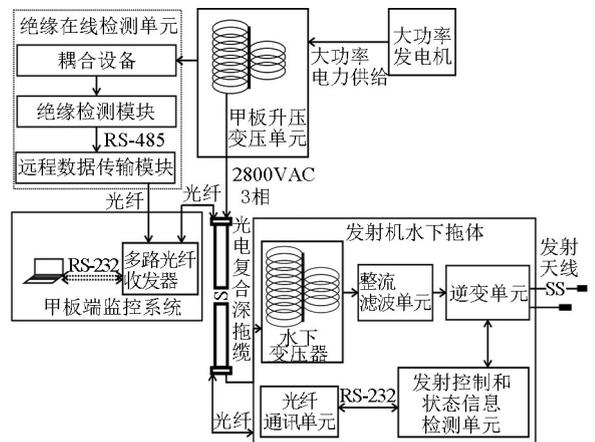


图 2 发射系统总体框

Fig.2 General block diagram of the transmitting system

甲板升压单元采用船舶用电的三相三线制,是 IT 供电系统,第一个字母 I 表示电源侧没有工作接地点,第二个字母 T 表示负载侧电气设备进行接地保护。即在电源中性点不接地,将所有设备的外露可导电部分均经各自的保护线 PE(protecting earthing)分别直接接地。

### 2.1 绝缘电阻检测原理

绝缘检测模块采用叠加自适应的脉冲电压信号测量原理(AMP),微处理器控制的自适应脉冲测量电压信号叠加在检测的甲板升压单元上进行测量,可有效地排除系统泄漏电容和直流成份对绝缘检测造成的干扰,提高绝缘测量的灵敏度和可靠性,可在具有较高对地泄漏电容的系统内应用。绝缘检测模块通过内部的耦合电阻  $R_A$  连接到被监视系统内。绝缘测量模块内部单片机控制信号源 G 输出幅值、频率可自调整的脉冲测量电压,测量电压信号通过耦合电阻  $R_A$ 、测量电阻  $R_m$  和低通滤波电路叠合在被监视系统的三相高压输出端和升压单元外壳(PE)之间,低通滤波电路可以有效地滤除系统交流的影响。该测量电压经过外部的 IT 系统对 PE 的总绝缘阻抗  $R_f$  构成测量回路,因此通过测量该回路内的测量电流  $I_m$ ,由欧姆定律可得出被监视系统对地的总绝缘阻值  $R_f$ 。由于脉冲信号有两个电平(值),一个正值和一个负值,所以有两个测量结果。直流分量引起的干扰电流叠加在两次测量中,因此两次测量结果如下:

$$I_1 = I_{\text{外部直流电流}} + I_m, \quad (1)$$

$$I_2 = I_{\text{外部直流电流}} - I_m. \quad (2)$$

将式(1)、式(2)相减来消除未知元素即干扰电流,即  $I_m = (I_1 - I_2)/2$ 。信号源生成测量电压信号  $\pm U_m$ ,通过计算  $U_m/I_m$ ,设  $R_0 = U_m/I_m$ ,得到绝缘阻抗  $R_f = R_0 - R_A - R_m$ 。

甲板升压单元和地之间存在分布电容,因此测

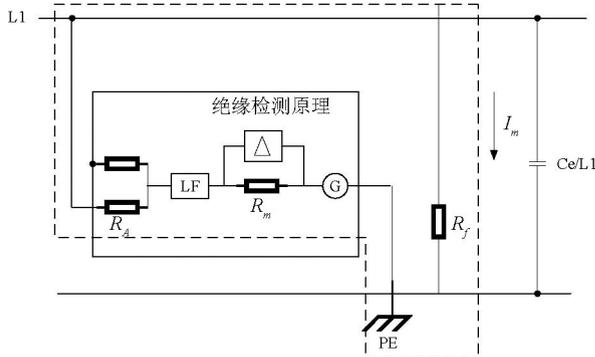


图3 绝缘电阻测量原理

Fig.3 Principle of insulation resistance measurement

量电路必须经过一个暂态的过程然后到达稳态。AMP 测量原理首先确定时间常数 RC,其大小由测量电路中的电阻值和分布电容决定,而后相应地调整脉冲持续时间,最后在电路稳态时求出绝缘电阻值。

### 2.2 极值设定分析

设甲板升压单元输出 2 800 VAC 高压,绝缘电阻值若达到 5 MΩ(最小极值 K1),则 IT 系统对外壳形成的回路中电流值为 2 800 V/5 MΩ,即 0.56 mA,远小于人体所能承受的安全电流为 10 mA<sup>[9]</sup>,有力地保障了操作人员的安全。由于升压单元要求环境湿度较低,集装箱通过空调降低温度和湿度。在潮湿的环境中一般要求电路的对地绝缘电阻不小于 0.5 MΩ。K1 值可保证升压单元工作在安全的环境中,且延长升压单元的工作寿命。最大极值 K2 设定为 50 MΩ,为绝缘检测模块最大量程,大于及等于 50 MΩ 的绝缘电阻值可认为绝缘状况良好。

### 2.3 绝缘异常分析

引起 IT 系统绝缘值异常的情况可以分为 3 个方面,甲板升压单元故障、深拖缆故障和海底降压单元故障。380 V 三相交流低压电经甲板升压单元 Y1 输出高达 2 800 VAC 电压,经由深拖缆传输至海底降压单元 Y2 完成低压输出,甲板升压单元和海底降压单元的内部变压器均采用星型绕组。三相电力示意如图 4 所示。

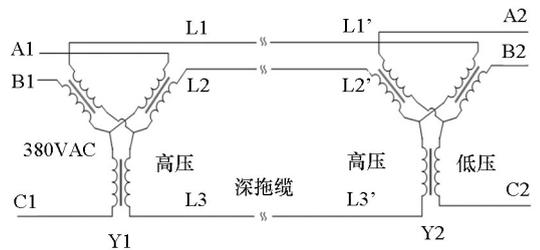


图4 电力传输示意

Fig.4 Power transmission diagram

接下来将就引起绝缘异常的 3 个故障情况进行示意图展示,分别分析说明。

#### 2.3.1 甲板升压单元故障

电力变压器是电力传输中最重要的组成部分之一,绝缘性能下降被认为是变压器损坏的主要原因之一<sup>[10]</sup>,而引发的绝缘故障中绕组相关因素占比居高<sup>[11]</sup>。假设甲板升压单元中的升压变压器出现绝缘问题,使甲板升压单元的变压器二次侧的 L1 相,在与绝缘检测模块构成的回路中发生交流接地故障,与保护导体短接。高压电路故障示意如图 5 中 a)部分所示。R1 等效为输出端 L1 相绕组的电阻

值,  $R_1$  的值经测量不超过  $10 \Omega$ 。故绝缘检测模块测得绝缘电阻远小于最小值警报值  $5 M\Omega$ , 故障情况可以被检测出。由于变压器的三相绕组值近似相等, 且两相或三相绕组间的电阻值不超过  $10 \Omega$ , 当没有与绝缘检测模块连接的高压输出端  $L_2$ 、 $L_3$  相交流接地, 测量的绝缘电阻同样远小于  $K_1$  值。故绝缘检测仪可通过测量三相高压输出中一相对 PE 端的绝缘电阻, 而测量整个海底降压单元对 PE 端的绝缘电阻。

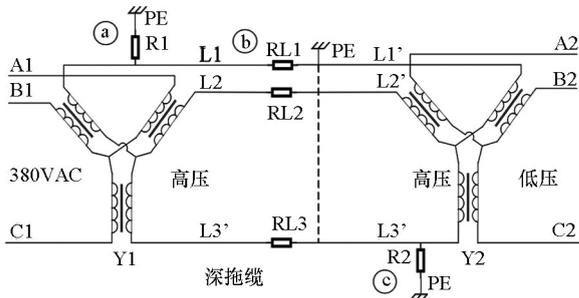


图 5 电力故障示意

Fig.5 Schematic diagram of power failure

### 2.3.2 深拖缆故障

深拖缆在海水中作业时可能会因为内部受潮、绝缘层被机械破坏或老化变质等原因, 产生电气故障。模拟深拖缆电力故障示意如图 5 中 ① 部分所示。深拖缆并不是理想的毫无损耗的向海底传输电能, 每根线上的电阻系数为  $4.9 \Omega/km$ 。设深拖缆总长  $7 km$ , 则深拖缆总等效电阻约为  $68.6 \Omega$ , 在系统正常工作时, 远小于 IT 系统对 PE 的总绝缘阻抗, 可忽略不计。深拖缆由 3 根完全相同的铜导体线芯, 3 根光纤线及外层保护材料绞合而成。当海水中的深拖缆绝缘损伤, 铜芯线对屏蔽层短接, 会引发接地短路故障, 最常出现的电气故障是单相接地短路故障, 其次为两相短路故障、三相短路故障。故障时在与绝缘检测模块组成的回路中, 对 PE 端的绝缘电阻值小于深拖缆总等效电阻  $68.6 \Omega$ , 小于异常最小值  $K_1$ , 引起警报。

### 2.3.3 海底降压单元故障

若海底降压单元中因为漏水、变压器局部放电等原因发生交流接地故障, 高压电路故障示意图如图 5 中 ③ 部分所示, 与甲板升压单元部分类似。  $R_2$  等效为海底降压单元变压器输入相  $L_3'$  绕组的电阻值,  $R_2$  的值经测量不超过  $10 \Omega$ 。故绝缘检测模块测得绝缘电阻远小于最小值警报值  $5 M\Omega$ , 发生短接故障时可以被检测出。由于变压器的三相绕组值近似相等, 且两相或三相绕组间的电阻值不超过  $10 \Omega$ , 当没有与绝缘检测模块连接的高压输入端  $L_2'$ 、

$L_3'$  相发生交流接地故障时, 测量的绝缘电阻同样远小于  $K_1$  值。故绝缘检测仪可通过测量三相高压输入中一相对 PE 端的绝缘电阻, 而测量整个海底降压单元对 PE 端的绝缘电阻。

## 3 硬件电路设计

绝缘在线监测单元硬件电路部分包含高压宽频耦合器件、绝缘检测模块和远程数据传输部件等。绝缘在线监测系统原理如图 6 所示。绝缘检测模块通过测量非接地系统中绝缘电阻进而检测系统中非接地的交流、直流或交直流, 可监测系统的工作电压范围为单相或三相交流、交直流电  $0 \sim 793 V$ , 直流  $0 \sim 650 V$ , 测量的绝缘电阻响应值调节范围为  $1 k\Omega \sim 50 M\Omega$ 。

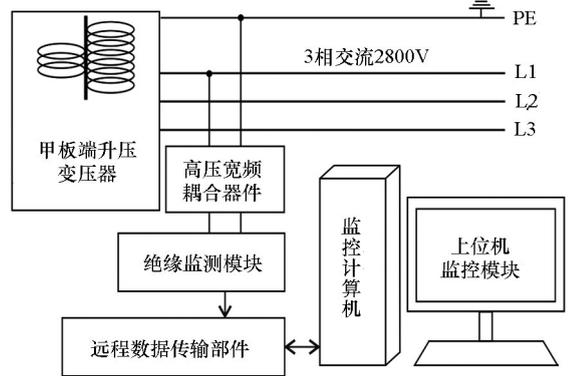


图 6 绝缘在线监测系统原理框

Fig.6 Block diagram of insulation on-line monitoring system

高压宽频耦合器件是连接在被监视线路和绝缘检测模块之间的装置。连接耦合器件以后, 可以扩大绝缘监视的 IT 系统 (不接地系统) 的电压范围, 连接在不接地系统 (IT 系统) 三相交流和 PE 之间。为增加传输距离以及增强远程数据传输部件抗干扰能力, 将 RS-485 通讯总线转化为光纤电缆传输。在硬件设计时, 为方便终端上位机无线操作且数据可多机访问, 通过串口服务器先将串口 RS-485 转为以太网接口, 后连接光纤收发器, 通过光纤发送端、长距离光纤电缆、光纤接收端, 将数据传输到仪器控制室的路由器, 上位机监控软件连接无线网络接收数据并绘图。如果导体与地面之间的绝缘电阻低于或高于设定的响应值, 报警继电器被切换, 报警灯点亮, 并将异常值发送上位机。远程传输部件的光纤收发器通过 SC 型的光纤接口将光信号在单模光纤上传输, 采用了波分复用技术。较双模光纤传播距离远、频带宽、传递数据的质量更高, 可支持  $20 km$

传输距离。

### 4 上位机监控软件

上位机监控软件在 Visual Studio 2012 窗体应用程序环境中开发,采用 C#编程语言。C#是.NET 平台的一种开发语言,是一种完全的面向对象的高级程序设计语言。使用 C#语言能够快速构建基于 Windows 和基于 web 的应用程序和组件。绝缘在线监测的上位机软件界面由串口设置、状态量显示、接收缓冲区以及测量值曲线图组成,如图 7 所示。图 8 为上位机监控软件程序流程,在该模块初始化时,

需要创建并配置串口,读取参数文件。程序通过打开串口创建数据处理、绘图函数的线程,读取绝缘检测模块上传的测量数据。

监控软件能够实时显示数据,如图 7 中红色框部分。软件将数据进行处理同时框 1 以文本形式显示通过无线通信接收到的测量值,包括绝缘电阻测量值、警报 1 响应值、警报 2 响应值、报警继电器开关 K1 和 K2 状态值、警报模式,框 2 为将绝缘电阻值实时绘图的区域。实时显示的数据能够使工作人员方便实时监控甲板升压单元运行状况,同时工作人员可以根据绝缘电阻值曲线的走向趋势提前判断运行正常与否。



图 7 上位机监控软件界面

Fig.7 Interface of monitoring software of upper computer

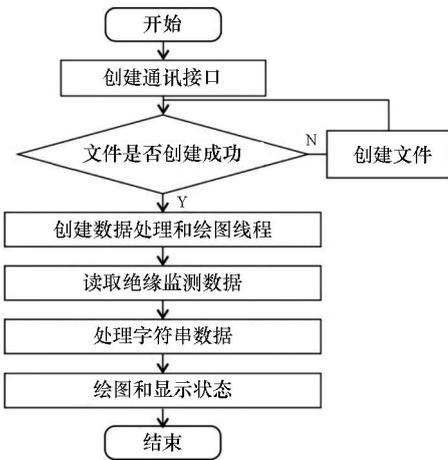


图 8 上位机监控软件程序流程

Fig.8 Flow chart of monitoring software program of upper computer

该软件还具有数据存储功能。在软件打开串口并成功连接绝缘检测模块后,创建文档,实时存储数据,为后期处理和分析提供数据。软件设计“隐藏配置”按钮可以使左边的按钮和说明隐藏,只显示状态、接收缓冲区和画图部分。打开软件时,若所用参数与上次使用时一样,不必重新配置参数,可直接使用。当软件关闭时,参数文件会自动保存,便于下次使用。

### 5 绝缘自动在线监测系统海洋试验

2016 年 8 月搭载广州海洋地质调查局的“海洋地质四号”科考船进行了一次拖曳式 MCSEM 试验<sup>[12]</sup>。图 9a 为船载集装箱,图 9b 为甲板升压单元,图 9c 为甲板升压单元内部结构,绝缘检测单元放置在甲板升压单元内,如 9c 所示。在海上作业时,甲板升压单元安装在船载集装箱中,固定在科考船的甲板上,由船载发电机为甲板升压单元供电。

绝缘电阻值随时间变化的曲线如图 10 所示。发射电压显示了发射机是否处于工作状态。在发射机供电期间,绘制的绝缘电阻值曲线连续,绝缘值在 30~35 MΩ之间变化,说明绝缘在线监测系统能够实时、连续地对系统进行检测,且抗电磁干扰能力强。同时监控软件可以存储绝缘检测模块发送的数据包,方便后期进行数据分析处理。

### 6 结论

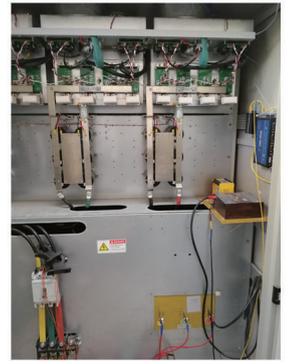
相比于之前的手动测量方案,自动绝缘在线监测系统通过收集高压端至外壳地之间的漏电电流,将其模拟放大,通过测量电压值,反算绝缘电阻值,



(a) 船载集装箱



(b) 甲板升压单元



(c) 甲板升压单元内部结构

图9 甲板升压单元实物

Fig.9 Physical picture of deck booster unit

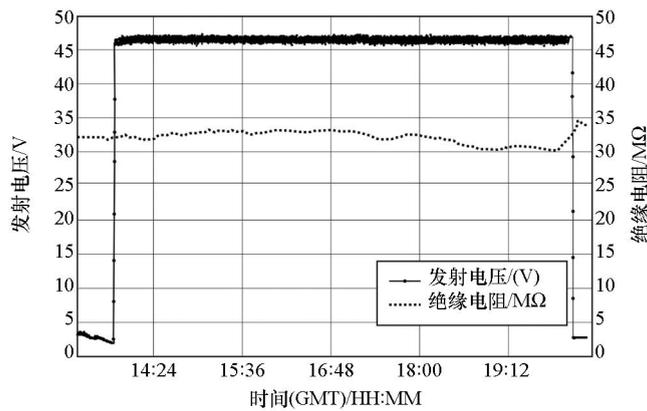


图10 绝缘电阻的海上实测结果曲线

Fig.10 Measured curve of insulation resistance at sea

实现发射系统绝缘特性的测量。通过上位机监控软件可以自动实时地监测甲板升压单元的绝缘性能,且当系统发生绝缘故障时软件能够自动报警,提示操作人员及时应对。同时,软件串口接收的数据能够实时存储,便于后续数据分析。通过海洋试验的验证,绝缘在线监测单元完成了对发射系统绝缘性能的自动检测、在线监测的功能,解决了自动绝缘在线监测问题,为发射过程的安全可控提供了有力的技术支撑,为海洋同类功能的仪器研发提供了有益的参考。

### 参考文献 (References):

[1] 景建恩,伍忠良,邓明,等.南海天然气水合物远景区海洋可控源电磁探测试验[J].地球物理学报,2016,59(7):2564-2572.  
Jing J E, Wu Z L, Deng M, et al. Experiment of marine controlled-source electromagnetic detection in a gas hydrate prospective region of the South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(7): 2564-2572.

[2] Constable S. Ten years of marine CSEM for hydrocarbon exploration [J]. Geophysics, 2010, 75(5): A67-A81.

[3] Wang M, Deng M, Wu Z, et al. The deep-tow marine controlled-source electromagnetic transmitter system for gas hydrate exploration [J]. Journal of Applied Geophysics, 2017, 137: 138-144.

[4] 吕冬.电气绝缘在线检测设备的技术发展和应用选择[J].西北电力技术,2005,33(6):34-37.  
Lyu D. Technical development & application selection of electric insulation on-line detection equipment [J]. Northwest China Electric Power, 2005, 33(6): 34-37.

[5] 尚勇,杨敏中,严璋,等.高压电力设备绝缘状态检测判据选择[J].中国电力,2001,34(4):53-55.  
Shang Y, Yang M Z, Yan Z, et al. Determination of criterion on condition monitoring of power equipment insulation [J]. Electric Power, 2001, 34(4): 53-55.

[6] 刘娟.光纤复合海底电缆电气故障有限元研究[D].北京:华北电力大学(北京),2018.  
Liu J. Finite element analysis of electrical fault of fiber optic composite submarine cable [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2018.

[7] 邓明,魏文博,谭捍东,等.海底大地电磁数据采集器[J].地球物理学报,2003,46(2):217-223.  
Deng M, Wei W B, Tan H D, et al. Collector for seafloor magnetotelluric data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(2):

217-223.

- [8] 王猛,张汉泉,伍忠良,等. 勘查天然气水合物资源的海洋可控源电磁发射系统[J]. 地球物理学报, 2013, 56(11): 3708-3717.  
Wang M, Zhang H Q, Wu Z L, et al. Marine controlled source electromagnetic launch system for natural gas hydrate resource exploration [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(11): 3708-3717.
- [9] 钱伟康,李鹏飞,张金燕. 医疗供电系统绝缘电阻交流脉冲变频测量[J]. 测控技术, 2016, 35(10): 10-12, 18.  
Qian W K, Li P F, Zhang J Y. Alternative pulses measurement with variable frequencies for insulation resistor in medical power supply system [J]. Measurement & Control Technology, 2016, 35(10): 10-12, 18.
- [10] Blennow J, Ekanayake C, Waleczak K, et al. Field experiences with measurements of dielectric response in frequency domain for power transformer diagnostics [J]. IEEE Transaction Power Deliver, 2006, 21(2): 681-8.
- [11] Akbari A, Werle P, Borsi H, et al. Transfer function-based partial discharge localization in power transformers: A feasibility study [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(5): 22-32.
- [12] 陈凯,景建恩,赵庆献,等. 海底可控源电磁接收机及其水合物勘查应用[J]. 地球物理学报, 2017, 60(11): 4262-4272.  
Chen K, Jing J E, Zhao Q X, et al. Ocean bottom EM receiver and application for gas-hydrate detection [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(11): 4262-4272.

## Online insulation monitoring technology for a marine controlled source electromagnetic transmitter system

DENG Ming<sup>1,2</sup>, WANG Meng<sup>1,2</sup>, WU Wen<sup>1,2</sup>, MA Xiao-Xi<sup>1,2</sup>, LUO Xian-Hu<sup>3</sup>

(1. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China)

**Abstract:** The marine controlled source electromagnetic (MCSEM) method is widely used in the exploration of natural gas hydrate, seabed oil and gas resources, and seabed geological structures. In the process of marine operation, the shipborne power supply unit transmits high-voltage and high-power electric power to a marine controlled source electromagnetic transmitter on the seabed through deep towing cables, during which it is necessary to carry out the automatic and real-time measurement and monitoring of the insulation resistance in the high-voltage power supply circuit to ensure the safe transmission of electric energy and timely deal with the abnormal power supply. This study collected the leakage current between the high-pressure end and the ground using high-voltage broadband couplers, insulation detection modules, remote data transmission units, and PC monitoring software. Meanwhile, this study amplified the leakage current using an analog amplifier and then calculated the insulation resistance by measuring voltage, thus achieving the automatic measurement and monitoring of the insulation resistance between the high voltage circuit and the ground. As verified by offshore tests, the automatic online insulation monitoring technology can meet the requirements of the MCSEM system and achieve the ideal online evaluation of the insulation performance of the system, thus providing a useful reference for the research and development of similar functions of marine instruments.

**Key words:** marine controlled source electromagnetic method; transmitter; insulation resistance; online monitoring technology; offshore tests

(本文编辑:王萌)