

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105780

# 海洋地震拖缆采集装备水下供电建模及分析

黄龙君 胡勇 马晓伟 于强 赵凯迪 刘延旭

(中海油田服务股份有限公司 天津 300540)

**摘要:** 针对海洋地震拖缆采集装备水下拖缆长距离供电问题,设计了一种用于分析该供电系统的方法。基于水下拖缆工作特点,通过分析其供电结构系统,建立电路模型及递推方程组,结合设备功耗、拖缆长度、电源线电阻等实际参数,构建数值模型并形成分析方法。基于本方法成功完成海洋地震拖缆采集装备供电系统研发设计并实际应用于海洋油气地震勘探生产作业,通过作业过程中对水下拖缆供电单元的电压、电流等实际数据测试,结果表明实际数据与模型分析结果总体一致,验证了本方法的有效性。

**关键词:** 海洋物探;拖缆采集装备;供电系统;建模;数值计算

中图分类号: TP274+.2 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.99

## Modeling and analysis of underwater powering system for marine seismic towed cable acquisition equipment

Huang Longjun Hu Yong Ma Xiaowei Yu Qiang Zhao Kaidi Liu Yanxu

(China Oilfield Services Limited, Tianjin 300540, China)

**Abstract:** This paper propose a power supply modeling method to solve the long-distance power supply of marine seismic towed streamer acquisition equipment. Based on the characteristics of power supply structure, the paper establishes circuit model and recursive equation system, and constructs numerical model and forms analysis method combining with the actual parameters such as equipment power consumption, streamer length and power line resistance. Based on this method, a power supply system for marine seismic streamer acquisition equipment is successfully completed, which is also applied to the production of marine oil and gas seismic exploration. And through the actual data of streamer power supply unit, such as voltage and current, the results show that the actual data is consistent with the model analysis results, which verifies the effectiveness of this method.

**Keywords:** marine geophysical exploration; towed cable acquisition equipment; powering system; modeling; numerical computing

## 0 引言

地震勘探是寻找油气资源最重要的方法<sup>[1-2]</sup>,海洋地震采集作业是海洋油气资源勘探的第一步。海洋地震采集装备逐渐发展成为大型、分布式的系统架构<sup>[3-5]</sup>,并具备高精度数据采集能力,这能够有效提高地震勘探深度和分辨率<sup>[6-7]</sup>。地震拖缆采集系统是海上油气勘探装备的核心组成部分,其通道规模数可超过万道量级,单缆长度可超过10 km<sup>[8]</sup>。

拖缆装备在工作的时候,需要车载电源设备为其水下系统供电,如此长度的水下拖缆系统供电一直都是海洋物探装备研制的重要课题,为了保证足够的供电距离,通常采用高压供电方式。然而,当前随着拖缆长度越来越长,设备

功耗、拖缆长度、电源线的电阻等关系到整个水下供电系统是否能够正常运行的参数选择,成为在研制此类设备之前首先需要研究的问题。

目前,虽有方法进行此类电源系统的设计<sup>[9-12]</sup>,但并没有给出解析的理论模型。本文在系统分析的基础上,提出一种能够用于海洋物探水下拖缆系统供电分析的模型,并通过实际参数的计算,给出各个参数之间的关系,从而为海洋地震拖缆采集装备水下系统的研制提供理论指导。

## 1 供电系统结构分析

海洋地震拖缆的基本结构是由多级工作段串联而成,车载系统中的高压电源设备通过甲板电缆给水下拖缆整体供电,系统的具体供电方式如图1所示。高压电源依次经

收稿日期:2021-02-02

过内置光中继器的光纤前导段、弹性段、多级带有数字包和内部电路的电缆工作段、尾靶。很明显,电缆中的工作段数量越多、每个电子设备的功耗越大,则系统的电源负载也越

大。由于大型物探拖缆长度通常在数公里量级,有的甚至达到十几公里。为了减少电源线上的损耗,通常电源设备提供高压电源,以减小电源线上的损耗。

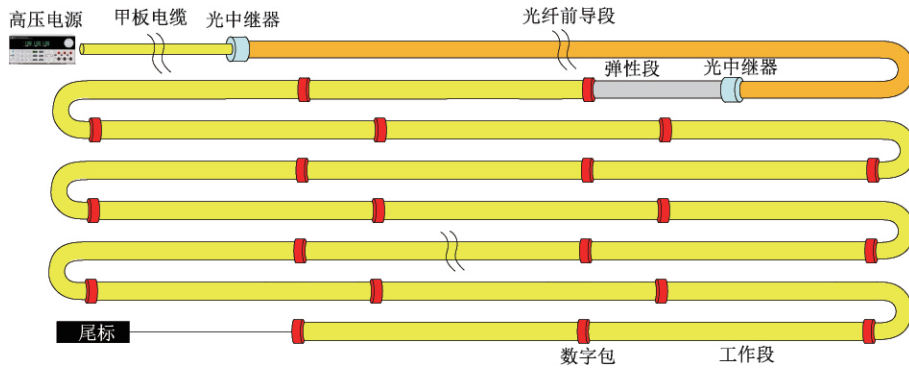


图 1 海洋地震水下拖缆供电系统结构

为分析高压电源的供电电压、电缆上的电流分布、供电距离以及电子设备的功耗等参数直接的关系,首先需要

对供电系统进行建模分析。假设甲板电缆长度为  $L_0 \cdot 10^2$  m、前导段长度为  $L_1 \cdot 10^2$  m、弹性段长度为  $L_2 \cdot 10^2$  m、工作段间距为  $L_3 \cdot 10^2$  m,并且假设电源线的直流电阻为  $r \Omega/10^2$  m,则该供电系统的电路参数模型如图 2 所示。

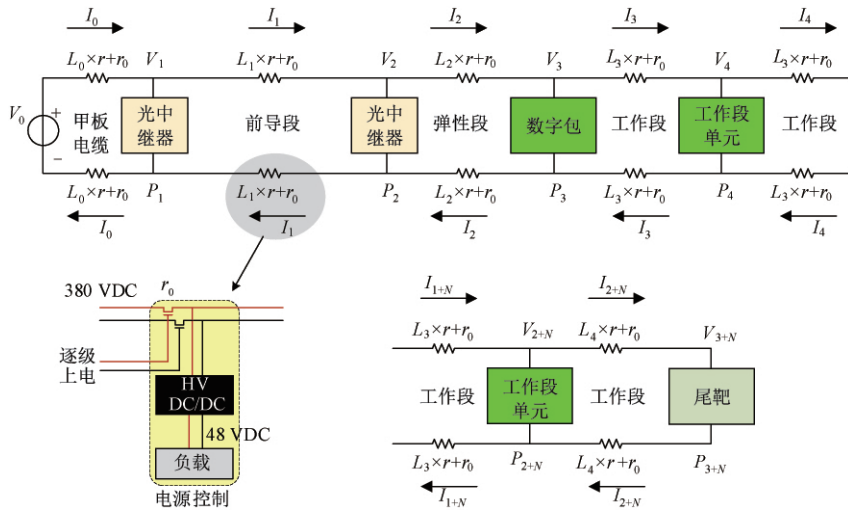


图 2 拖缆供电系统的电路模型

为便于分析,假设高压电源输出电压为  $V_0$ ,输出电流为  $I_0$ ;干端光中继器两端输入电压为  $V_1$ ,功率为  $P_1$ ;湿端光中继器两端输入电压为  $V_2$ ,功率为  $P_2$ ;第 1 级工作段单元(含数字包和采集传输单元电路)两端输入电压为  $V_3$ ,功率为  $P_3$ (包含其首端的数字包以及工作段内部封装的电子单元);第  $i$  级工作段单元两端输入电压为  $V_{2+i}$ ,功率为  $P_{2+i}$ 。再假设前导段上电流为  $I_1$ 、弹性段上电流为  $I_2$ 、第 1 级工作段电流为  $I_3$ 、第  $i$  级工作段电流为  $I_{2+i}$ ;尾靶电压为  $V_T = V_{N+3}$ ,功率为  $P_T = P_{N+3}$ 。于是,从高压电源端向右看,电压电流符合如下关系:

$$\frac{V_0 - V_1}{2 \times (L_0 \times r + r_0)} = I_0, P_0 = I_0 \times V_0,$$

$$\text{即 } \frac{V_0 - V_1}{2 \times (L_0 \times r + r_0)} = \frac{P_0}{V_0}$$

从干端光中继器侧向右看,有:

$$\frac{V_1 - V_2}{2 \times (L_1 \times r + r_0)} = I_1, P_1 = (I_0 - I_1) \times V_1,$$

$$\text{即 } \frac{V_1 - V_2}{2 \times (L_1 \times r + r_0)} + \frac{P_1}{V_1} = \frac{V_0 - V_1}{2 \times (L_1 \times r + r_0)}$$

从湿端光中继器侧向右看,有:

$$\frac{V_2 - V_3}{2 \times (L_2 \times r + r_0)} = I_2, P_2 = (I_1 - I_2) \times V_2,$$

$$\text{即 } \frac{V_2 - V_3}{2 \times (L_2 \times r + r_0)} + \frac{P_2}{V_2} = \frac{V_1 - V_2}{2 \times (L_2 \times r + r_0)}$$

以此类推,从第  $i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, N$ ) 级工作段侧向右看,有:

$$\frac{V_{2+i} - V_{3+i}}{2 \times (L_{2+i} \times r + r_0)} = I_{2+i}, P_{2+i} = (I_{1+i} - I_{2+i}) \times V_{2+i},$$

$$\text{即 } \frac{V_{2+i} - V_{3+i}}{2 \times (L_{2+i} \times r + r_0)} + \frac{P_{2+i}}{V_{2+i}} = \frac{V_{1+i} - V_{2+i}}{2 \times (L_{2+i} \times r + r_0)}$$

对于最后一级工作段( $i=N$ )向右看,有:

$$\frac{V_{2+N} - V_{3+N}}{2 \times (L_{2+N} \times r + r_0)} = I_{2+N}, P_{2+N} = (I_{1+N} - I_{2+N}) \times V_{2+N},$$

$$\text{即 } \frac{V_{2+N} - V_{3+N}}{2 \times (L_{2+N} \times r + r_0)} + \frac{P_{2+N}}{V_{2+N}} = \frac{V_{1+N} - V_{2+N}}{2 \times (L_{2+N} \times r + r_0)}$$

对尾靶而言,则有:

$$\frac{V_{2+N} - V_{3+N}}{2 \times (L_{2+N} \times r + r_0)} = I_{2+N}, P_{3+N} = I_{2+N} \times V_{3+N},$$

$$\text{即 } \frac{V_{2+N} - V_{3+N}}{2 \times (L_{2+N} \times r + r_0)} = \frac{P_{3+N}}{V_{3+N}}$$

因此,可以得到关于电压序列  $V_0, V_1, V_2, V_{i+2}, V_{N+3}$  ( $V_T$ ) 的方程组,其中  $i=1, 2, 3, \dots, N, N$  为数字包(即工作段)的个数:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{V_0 - V_1}{2 \times (L_0 \times r + r_0)} = \frac{P_0}{V_0} \\ & \frac{V_1 - V_2}{2 \times (L_1 \times r + r_0)} + \frac{P_1}{V_1} = \frac{V_0 - V_1}{2 \times (L_0 \times r + r_0)} \\ & \frac{V_2 - V_3}{2 \times (L_2 \times r + r_0)} + \frac{P_2}{V_2} = \frac{V_1 - V_2}{2 \times (L_1 \times r + r_0)} \\ & \dots \\ & \frac{V_{2+i} - V_{3+i}}{2 \times (L_{2+i} \times r + r_0)} + \frac{P_{2+i}}{V_{2+i}} = \frac{V_{1+i} - V_{2+i}}{2 \times (L_{1+i} \times r + r_0)} \\ & \frac{V_{2+N} - V_{3+N}}{2 \times (L_{2+N} \times r + r_0)} = \frac{P_{3+N}}{V_{3+N}} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

拖缆上每个负载都是在高压电源转换成低压后供电工作的,对于开关电源而言,其存在转换效率的问题,假设一个电源输出有效的功率为  $P_E$ ,自身因转换效率存在而损失的功率为  $P_L$ ,转换效率  $\eta$  可表示为:

$$\eta = \eta(I_{out}, V_{in}) = \frac{P_E}{P_E + P_L}$$

于是总功率  $P$  可以表示为:

$$P = P_E + P_L = \frac{P_E}{\eta(I_{out}, V_{in})}$$

在推导式(1)的时候,所有负载功率的计算均为总功率。假设光中继器的额定功率为  $P_{OE}$ ,工作段中所有负载的额定功率为  $P_{DE}$ ,尾靶的额定功率为  $P_{TE}$ ,则代入式(1)可得:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{V_0 - V_1}{R_0} - \frac{P_0}{V_0} = 0 \\ & \frac{V_1 - V_2}{R_1} + \frac{P_{OE}}{\eta_{ORU}(V_1) \times V_1} - \frac{V_0 - V_1}{R_0} = 0 \\ & \frac{V_2 - V_3}{R_2} + \frac{P_{OE}}{\eta_{ORU}(V_2) \times V_2} - \frac{V_1 - V_2}{R_1} = 0 \\ & \dots \\ & \frac{V_{2+i} - V_{3+i}}{R_{2+i}} + \frac{P_{DE}}{\eta_{DIG}(V_{2+i}) \times V_{2+i}} - \frac{V_{1+i} - V_{2+i}}{R_{1+i}} = 0 \\ & \frac{V_{2+N} - V_{3+N}}{R_{2+N}} - \frac{P_{TE}}{\eta_{TAL}(V_{3+N}) \times V_{3+N}} = 0 \end{aligned} \right. \quad (2)$$

其中,  $R_j = 2 \times (L_j \times r + r_0)$ ;  $\eta_{ORU}$  为光中继器的电源转换效率、 $\eta_{DIG}$  为工作段的电源转换效率、 $\eta_{TAL}$  为尾靶电源转换效率,其均为输入电压和输出电流的函数。假设每个负载的额定功率固定,因此转换效率仅是输入电压的函数。

## 2 数值模型

式(2)是一个非线性方程组,显然方程数目与未知数个数相同,其系数的行列式也不等于0,必然存在唯一的非零解。但由于方程数太多,很难直接解出结果,采用牛顿数值解法,整理式(2)如下:

$$\left\{ \begin{aligned} & V_0 - V_1 - \frac{R_0 \times P_0}{V_0} = 0 \\ & V_0 - \left(1 + \frac{R_0}{R_1}\right) \times V_1 + \frac{R_0}{R_1} \times V_2 - \frac{R_0 \times P_{OE}}{\eta_{ORU}(V_1) \times V_1} = 0 \\ & V_1 - \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \times V_2 + \frac{R_1}{R_2} \times V_3 - \frac{R_1 \times P_{OE}}{\eta_{ORU}(V_2) \times V_2} = 0 \\ & V_2 - \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) \times V_3 + \frac{R_2}{R_3} \times V_4 - \frac{R_2 \times P_{OE}}{\eta_{DIG}(V_3) \times V_3} = 0 \\ & \dots \\ & V_{i+1} - 2V_{i+2} + V_{i+3} - \frac{R_3 \times P_{DE}}{\eta_{DIG}(V_{i+2}) \times V_{i+2}} = 0 \\ & V_{N+1} - \left(1 + \frac{R_3}{R_{N+2}}\right) \times V_{N+2} + \frac{R_3}{R_{N+2}} \times V_{N+3} - \frac{R_3 \times P_{DE}}{\eta_{DIG}(V_{N+2}) \times V_{N+2}} = 0 \\ & V_{N+2} - V_{N+3} - \frac{R_{N+2} \times P_{TE}}{\eta_{TAL}(V_{N+3}) \times V_{N+3}} = 0 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

需要注意的是,在式(3)推导过程中,已经假设了每条工作段的长度均相同的特点,于是电阻也相等,即  $R_3 = R_1 = \dots = R_{N+1}$ 。

通常,在大型长距离拖缆供电的时候,船载高压电源设备会提供 200 V 以上的直流电,从而减少线上损耗。而另一方面,电源线的电阻值在  $0.35 \Omega/10^2 \text{ m}$  的量级,设备功率 30 W 以内。因此,式(3)中的功率项都很小,为便于数值计算程序的设计,并减少算法的收敛时间,假设该项均近似为 0,于是可得到式(3)的 Jacobi 行列式<sup>[13]</sup>为:

$$J = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 - \left(1 + \frac{R_0}{R_1}\right) & \frac{R_0}{R_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 - \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) & \frac{R_1}{R_2} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) & \frac{R_2}{R_3} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -2 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 1 - \left(1 + \frac{R_3}{R_{N+2}}\right) & \frac{R_3}{R_{N+2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 1 & -1 \end{vmatrix}$$

这是一个常数,将极大简化计算过程。假设电压向量为  $\mathbf{V}$ ,增量为  $\Delta \mathbf{V}$ ,构建迭代方程组(线性):

$$\mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{V} = \mathbf{F}(\mathbf{V}) \quad (4)$$

其中  $\mathbf{F}(\mathbf{V})$  为式(3)的函数所构建。于是式(3)的求解问题变成式(4)的迭代问题,构建迭代过程 ( $\mathbf{V}^k \rightarrow \mathbf{V}^{k+1}$ ) 如下:

$$\begin{cases} \mathbf{V}^{k,0} = \mathbf{V}^0 \\ \mathbf{V}^{k,i} = \mathbf{V}^{k,i-1} - \frac{F(\mathbf{V}^{k,i-1})}{\mathbf{J}}, i = 1, \dots, m; k = 0, 1, \dots \\ \mathbf{V}^{k+1} = \mathbf{V}^{k,m} \end{cases} \quad (5)$$

该式表示由当前值 ( $\mathbf{V}^k$ ) 每迭代一次获得下一次数值 ( $\mathbf{V}^{k+1}$ ) 的时候, 都需要内部循环  $m$  次以求解线性式 (4)。迭代过程停止的条件是  $\Delta V$  小于预设的阈值。因此, 构建算法如下:

1) 给出算法停止的误差阈值  $\delta$  (如电源电压输出值  $\Delta V_0 < \delta$ ), 同时给出预估初始值向量  $\mathbf{V}^0$ ;

2) 根据迭代公式, 计算第  $k$  步的电压值  $V^k$ ;

3) 计算误差值  $\Delta V^k = V^k - V^{k-1}$ , 并判断其中的高压电源输出值的误差是否小于阈值  $\delta$ 。如小于该值, 则计算停止, 并输出电压值  $V^k$  作为计算结果; 如大于该值, 则返回至步骤 2) 继续进行迭代。

在计算的过程中, 如果初值选取不恰当, 或者电路参数不合理从而使得算法不收敛。为避免不收敛的过程导致程序进入死循环过程, 可在步骤 3) 中加入时间或总迭代次数的限制, 超出该限制值则程序自动退出。

### 3 模型分析与应用

根据前一节所描述算法, 利用 Mathematica 数学软件进行建模分析, 参数如下:

甲板电缆长度  $L_0 = 50$  m, 前导段长度  $L_1 = 600$  m, 弹性段长度  $L_2 = 75$  m, 工作段长度  $L_3 = 600$  m (由 4 条 150 m 的子单元构成); 电源线电阻值为  $r = 0.35 \Omega/100$  m, 前导段的电阻为  $0.35 \Omega/600$  m, 数字包内电源控制开关的导通电阻为  $15 \text{ m}\Omega$ 。于是,  $R_0 = 0.175 \Omega, R_1 = 365 \text{ m}\Omega, R_2 = 277.5 \text{ m}\Omega, R_3 = R_4 = \dots = R_{N+2} = 2.115 \text{ m}\Omega$ 。

假设光中继器额定功率  $P_{OE} = 2$  W、工作段单元 (含数字包和采集传输单元电路, 共计 48 道) 功率  $P_{DE} = 30$  W、尾靶  $P_{TE} = 48$  W。

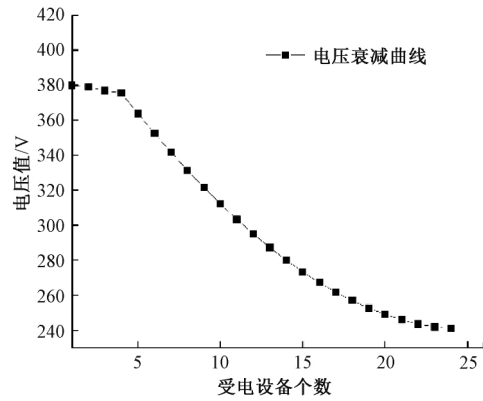
各级设备电源采用 DC-DC 模块, 其输入为高压 (200~400 VDC), 输出为 48 VDC, 当输入 380 V 电压, 输出 0.7 A 的时候, 效率大约 77%; 随着供电距离的增加, 后级设备的输入电压降低, 从而会使其效率提高, 如 250 V 输入时, 同样的供电电流下, 电压效率为 80%。为简化模型的计算过程, 在迭代计算的过程中, 效率函数模型如下:

$$\eta(V_{in}) \Big|_{I_m=0.65 \text{ A}} = \begin{cases} 77\%, & \text{当 } V_{in} > 380 \text{ V} \\ 80\%, & \text{当 } V_{in} < 380 \text{ V} \end{cases}$$

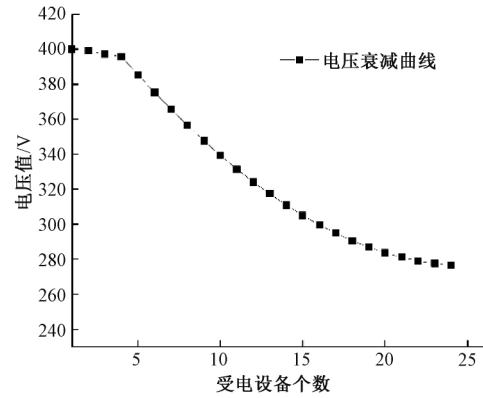
将参数带入算法, 并利用软件计算得到在 12 km 配置的电缆规模下, 各级设备的输入电压分布如图 3 所示。

由图 3 可知, 当电缆长度达到 15 km 的时候, 末端电压仍然能够保证电源模块正常工作, 并且系统总功率小于 1 kW。

基于本模型分析结果, 进行应用实际, 完成了海洋地震拖缆采集装备水下系统供电方案设计, 实际完成水下电



(a) 输入 380 V, 末端电压 241 V, 总功率 813 W



(b) 输入 400 V, 末端电压 276 V, 总功率 776 W

图 3 拖缆各级设备的输入电压分布

缆工作段产业化制造并应用于海洋油气地震勘探生产作业。按照上述系统标准配置情况下, 通过对系统水下拖缆供电单元的电压、电流等实际数据测试, 实际结果与模型分析结果总体一致, 验证了本模型方法的有效性。

### 4 结 论

电源系统关系到整个海洋物探水下设备的工作运行, 是系统中的核心部分。目前, 并没有一个较好的理论模型用于指导此类水下系统装备供电方式的研究。本文提出一种模型, 能够用于指导水下系统主要电气参数的设计, 如功率、电源线电阻值、供电电压等, 最终能够明确知道在特定参数情况下的供电长度, 从而降低了系统研制的风险, 明确了系统参数优化的方向。相比于其他方法<sup>[14-16]</sup>, 该数值计算方法具有速度快、精度高等优点, 能够用于对电源分发有需求的相关领域。

### 参考文献

[1] 刘光鼎. 回顾与展望——21 世纪的固体地球物理[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 191-197.  
 [2] 赵士振. 能源与环境科普知识系列 地震勘探: 目前最重要的找油方法[J]. 中国石化, 2009, 5(284): 47-48.  
 [3] SPITZER R. Designing 3-D high-resolution seismic surveys[J]. Seg Technical Program Expanded Abstracts,

- 1998, 17(1):2092.
- [4] 马灵. 海上地震数据多缆采集与记录系统设计研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2012.
- [5] 王文良. 世界地震勘探仪器装备技术发展综述—记新千年首届物探装备技术研讨会[J]. 物探装备, 2002, 12(1):1-10.
- [6] 钱绍瑚. 高分辨率勘探与地震仪器[J]. 物探与化探, 1995, 10(2):114-121.
- [7] 罗福龙. 地震数据采集系统综述和展望[J]. 中国石油勘探, 2007, 12(2):41-46.
- [8] 甘志强, 刘帅, 朱萍, 等. 地震仪器智能化现状及前景展望[J]. 石油管材与仪器, 2020, 6(2):53-56.
- [9] 曾翔, 阮福明, 曹平. 用于海上地震勘探拖缆的电源网络[J]. 物探技术, 2013, 23(3):173-175.
- [10] 郭宏. 水下生产控制系统供电电压降落分析及方案设计[J]. 中国海上油气, 2015, 27(3):150-153.
- [11] 陈斌, 杨洪庆, 苏锋, 等. 水下生产系统长距离输配电技术研究[J]. 海洋工程装备与技术, 2017, 4(2):134-136.
- [12] 莫运德, 淡淑恒. 关于直流输电线路电压调整的研究[J]. 通信电源技术, 2016, 33(2):113-115.
- [13] 冯光明, 陆超, 黄志刚, 等. 基于雅可比矩阵的电压控制区域划分的改进[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(12):7-11.
- [14] 郝宾宾. 地震勘探仪器中电源技术的研究与实现[D]. 武汉:中国地质大学, 2014.
- [15] 吕文贵. 海洋地震勘探长缆系统关键技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2015.
- [16] 唐成. 深海地震长缆水下低功耗模块化数据传输系统设计[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2019.

#### 作者简介

黄龙君, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋地球物探勘探装备研制与产业化研究。

E-mail: huanglj6@cosl.com.cn

胡勇, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋地球物理勘探装备电子学系统研究。

E-mail: huyong6@cosl.com.cn