

## 适用于海底观测网络的恒流远供系统可靠性分析方法\*

王希晨,周学军,周媛媛,张 晓,苏彬彬  
(海军工程大学 电子工程学院,湖北 武汉 430033)

**摘要:**以水下单元的短路/开路故障模式为基础,提出一种分析缆系海底观测网络恒流远供系统可靠性的方法。根据系统供电和结构特性,将系统分成不同的供电链路和链路段。详细研究处于不同位置的各种水下单元发生故障时,对链路和观测设备的供电状态的影响。归纳导致系统和各链路无法正常导通、观测设备无法得到供电的状态情况,分析不同故障状态发生的概率,进而得出求解系统、供电链路与供电设备的供电可靠度的方法。通过算例分析,进一步梳理了3种供电可靠性的共性规律,说明在设计和建设恒流远供系统时,应综合考量这3种供电可靠性。

**关键词:**恒流;远程供电;短路故障;开路故障;可靠性

**中图分类号:**TN915.02 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)05-186-06

## A reliability analysis method on constant current remote power feeding system of cabled seafloor observatory network

WANG Xichen, ZHOU Xuejun, ZHOU Yuanyuan, ZHANG Xiao, SU Binbin

(Electronic Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Based on underwater unit short/open circuit failure modes, a method for analyzing the reliability of constant current remote power feeding system of cabled seafloor observatory network was proposed. According to system power supply and structural properties, the system was divided into different links and segments. Influence on power supply state of the links and observation equipments by unit failures in different position was studied in detail. The causes of leading system and link cannot be conducted and observation equipment cannot be operated were summarized, and the probability of different fault occurrence was analyzed, then power supply reliabilities method of system, links and observation equipments were obtained. Through example analysis, the general law of the three kinds of power supply reliability needs comprehensive considerations in system construction and design phase.

**Key words:** constant current; remote power feeding; short failure; open failure; reliability

缆系海底观测网络是我国发展海洋技术的重要切入点和热点<sup>[1]</sup>。该网络有源设备种类繁多,连接关系复杂,现有技术条件和海底自然条件决定了网络无法借鉴陆缆供电系统就地对设备供电,研究和设计适应水下工作环境的新型远程供电系统势在必行<sup>[2-4]</sup>。文献[5]设计了水下恒压远供系统,研究了系统状态估计与控制技术,提高了恒压系统在水下环境的应对故障的能力。文献[6]研究了并联系统在水下环境的高-中-低压转换技术,设计了相应的转换模块及解决了模块启动问题。恒压远供系统目前在 NEPTUNE - Canada 网络中得到应用<sup>[7-8]</sup>。文献[9]设计了水下恒流远程供电系统,研究了恒流的多路分支技术,保持全网络的恒流特性。文献[10]研究了恒

流系统在发生短路故障时的自调整能力。水下恒流远程供电系统目前在 DONET 网络中得到应用<sup>[11-12]</sup>。文献[12-15]介绍了国内的相关研究成果。浙江大学及同济大学等单位建设了恒压单节点试验系统,解决了高-中-低压转换技术,并已进行海试。海军工程大学建设了恒流双节点试验系统,解决了恒流系统的组网问题,并验证了试验系统应对故障的能力。观测网络远供系统相关技术研发与储备正趋于成熟和完善,但涉及系统供电可靠性的研究较少,远供系统是观测网络的能源基础,直接关系到网络的可用性与维护成本,因此,对远供系统的可靠性进行研究具有重要的意义。

本文以恒流远供系统水下单元的短路及开路

\* 收稿日期:2014-09-17

基金项目:国家863计划重点资助项目(2009AAJ128);国家自然科学基金资助项目(71201172)

作者简介:王希晨(1987-),男,河南驻马店人,博士研究生,Email: hjgcwxc@163.com;

周学军(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,Email: Xuejun-Zhou@163.com

故障模式为基础,提出了一种分析恒流远供系统可靠性的可行性方法。

### 1 基础模型

所涉及的恒流远供系统如图 1 所示。该系统由远供设备 (Power Feeding Equipment, PFE)、海缆、主节点及次节点组成。其中 PFE 提供恒定电流,两台 PFE 共同承担系统功率,通过功率冗余设计,单台设备可承担系统总功率;海缆的铠装铜管提供导电路径;主节点内置恒流/恒流转换设备,主要完成恒流的多路分支,保持整个系统电流恒定。该设备采用变压器耦合转换方式,以主节

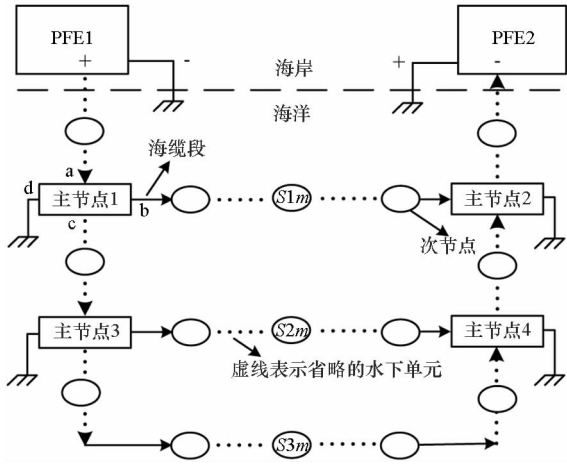


图 1 恒流远程供电系统示意图

Fig. 1 Constant current remote power feeding system

点 1 为例,共有 4 路,a 和 b 路分别为初级输入和输出,c 和 d 路为副级输入和输出,其中 d 路接地或者进一步延伸<sup>[15]</sup>。通过耦合,副级保持同初级电流相等。主节点 1 和 2 分别通过副级输出,共同承担下级链路的功率需求,可理解为两个恒流源串联。同理,主节点 3 和 4 可理解为两个恒流源串联。通过功率冗余设置,单个主节点可以承担下级链路的输出功率;次节点内置恒流/恒压转换设备,通过脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM),将恒定电流转换为一定值的恒定电压,再经 DC 模块转换,为挂接在次节点上的观测设备 (包括内部传输设备和光放大设备) 提供工作电压;次节点的具体数量由观测需求和部署范围确定。

由于 PFE 位于陆上,采用冗余备份,即使发生故障,修复时间较短,同系统水下部分相比,失效的概率相当小,基本可以忽略。基于此,本文重点对系统水下部分的可靠性进行设计与研究,系统水下部分共包含海缆、主节点及次节点 3 类子单元。

根据电流流通的不同路径,系统水下部分共包含 3 条完整的供电链路,具体如图 2 所示。以主节点的位置为界,可将系统进一步细分为不同的链路段。其中链路 I 由链路段  $D_{11}$ 、 $D_{12}$  及  $D_{13}$  组成。链路 II 由链路段  $D_{11}$ 、 $D_{21}$ 、 $D_{22}$ 、 $D_{23}$  及  $D_{13}$  组成;链路 III 由链路段  $D_{11}$ 、 $D_{21}$ 、 $D_{31}$ 、 $D_{32}$  及  $D_{13}$  组成,其中  $D_3$  由  $D_{31}$ 、 $D_{32}$  及  $D_{33}$  组成。

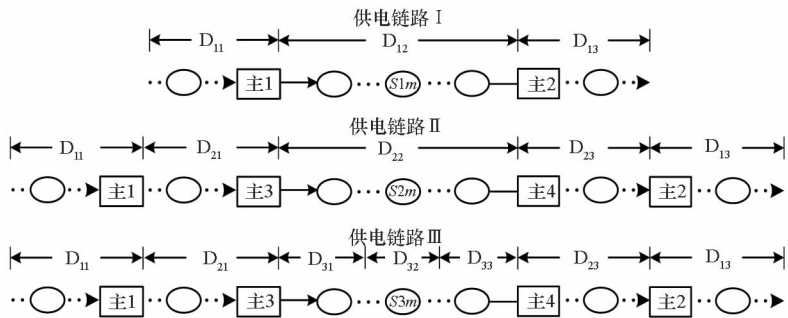


图 2 系统供电链路示意图

Fig. 2 Power link of system

远供系统工作环境特殊,海缆易因锚挂、自然灾害而发生断路故障,易发生接地短路或空接开路,其中接地短路发生的概率较高。主、次节点供电设备内置于接驳盒,当腔体水密性丧失时,易发生接地短路;当水密性能良好时,存在密封短路和密封开路的可能性。单个单元接地短路对系统的影响同密封短路相似,但多个单元接地短路对系统具有较大的影响。因此,可有如下定义和假设:

1) 短路故障:无论是接地短路还是密封短

路,均视为同海水接地短路,下文称为短路故障;

2) 开路故障:无论是空接开路还是密封开路,下文称为开路故障;

3) 系统以及各单元的故障模式是指要么短路、要么开路;

4) 无论正常工作还是故障,不同单元之间相互独立;

5) 各单元短路和开路故障相互独立。

系统工作于水下环境时,由于其恒流特性,当

链路某个单元发生短路故障时,系统具备一定的自调整能力,该链路其他单元仍可处于正常取电状态,其他链路或链路段也可能处于正常导通状态<sup>[15]</sup>;当链路某个单元发生开路故障时,该链路段无法取电,但其他链路或链路段仍可能处于正常导通状态。总之,不同的故障模式对系统、各链路和各单元工作状态的影响不同,对它们的可靠性影响也不同。因此,基于短路和开路故障模式分析系统可靠性是一种可行的方法。

## 2 故障状态分析

由于系统各组成单元的功用不同,各单元出现故障时,对系统各链路及观测设备的影响也不同。定义“1”表示当系统某单元故障时,链路或

观测设备仍能正常得到供电的事件;“0”表示当系统某单元故障时,链路或观测设备无法正常得到供电的事件。

表 1 单个主节点故障对系统供电的影响

Tab. 1 Influence of primary node failure on system power supply

子单元	故障类型	链路 I		链路 II		链路 III	
		链路	观测设备	链路	观测设备	链路	观测设备
主节点 1 或 2	短路	0	1	0	1	0	1
主节点 1 或 2	开路	0	0	0	0	0	0
主节点 3 或 4	短路	1	1	0	1	0	1
主节点 3 或 4	开路	1	1	0	0	0	0

表 2 单个次节点故障对系统供电的影响

Tab. 2 Influence of secondary node failure on the system power supply

链路段	次节点故障类型	链路 I			链路 II			链路 III		
		链路	故障节点观测设备	其他节点观测设备	链路	故障节点观测设备	其他节点观测设备	链路	故障节点观测设备	其他节点观测设备
D <sub>11</sub> 或 D <sub>13</sub>	短路	0	0	1	0	0	1	0	0	1
D <sub>11</sub> 或 D <sub>13</sub>	开路	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D <sub>12</sub>	短路	0	0	1	1	—	1	1	—	1
D <sub>12</sub>	开路	0	0	0	0	—	0	0	—	0
D <sub>21</sub> 或 D <sub>23</sub>	短路	1	—	1	0	0	1	0	0	1
D <sub>21</sub> 或 D <sub>23</sub>	开路	1	—	1	0	0	0	0	0	0
D <sub>22</sub>	短路	1	—	1	0	0	1	1	—	1
D <sub>22</sub>	开路	1	—	1	0	0	0	0	—	0
D <sub>3</sub>	短路	1	—	1	1	—	1	0	0	1
D <sub>3</sub>	开路	1	—	1	1	—	1	0	0	0

主节点 1 和 2 共同承担下级链路段 D<sub>21</sub>, D<sub>22</sub>, D<sub>23</sub> 和 D<sub>3</sub> 的功率需求;主节点 3 和 4 共同承担下级链路段 D<sub>3</sub> 的功率需求。只要主节点初级保持电流流通,通过耦合,副级输出恒流;若初级无电流流通,副级无输出恒流。通过设置保护措施,副级开路时,初级启动短路保护。恒流系统对短路故障具有调整能力。因此,上级链路开路会影响下级链路;下级链路开路或短路故障对上级链路影响较小。

当主节点 1 发生短路故障时,主节点 2 自动调整承担下级链路的用电功率,次节点可正常得到供电。同理,主节点 2 发生短路时,主节点 1 承担下级链路输出功率;主节点 1 或 2 中任一单元发生开路故障时,系统开路;当主节点 3 发生短路故障时,主节点 4 自动调整承担下级链路的用电功率,次节点可正常得到供电。同理,主节点 4 发

生短路时,主节点 3 承担下级链路输出功率;当主节点 3 或 4 中任一单元发生开路故障时,主节点 1 和 2 的保护电路启动,链路段 D<sub>21</sub>, D<sub>22</sub>, D<sub>23</sub> 和 D<sub>3</sub> 无法得到供电,上级链路 I 的供电不会受到影响。具体如表 1 所示。

次节点挂接观测设备,若某个次节点发生短路故障,只会影响该节点观测设备的供电;若某个次节点发生开路故障,上级链路主节点的保护电路启动,确保上级链路次节点正常供电,但该次节点所在链路和下级链路将无法得到供电,具体如表 2 所示。

若某条海缆段发生短路故障,不会影响次节点供电。若发生开路故障,上级链路主节点保护电路启动,确保上级链路次节点正常供电,其所在链路及下级链路将无法得到供电,具体如表 3 所示。

表3 单条海缆故障对系统供电的影响

Tab.3 Influence of submarine cable failure on the system power supply

链路段	海缆故障类型	链路 I		链路 II		链路 III	
		链路	观测设备	链路	观测设备	链路	观测设备
D <sub>11</sub> 或 D <sub>13</sub>	短路	0	1	0	1	0	1
D <sub>11</sub> 或 D <sub>13</sub>	开路	0	0	0	0	0	0
D <sub>12</sub>	短路	0	1	1	1	1	1
D <sub>12</sub>	开路	0	0	0	0	0	0
D <sub>21</sub> 或 D <sub>23</sub>	短路	1	1	0	1	0	1
D <sub>21</sub> 或 D <sub>23</sub>	开路	1	1	0	0	0	0
D <sub>22</sub>	短路	1	1	0	1	1	1
D <sub>22</sub>	开路	1	1	0	0	0	0
D <sub>3</sub>	短路	1	1	1	1	0	1
D <sub>3</sub>	开路	1	1	1	1	0	0

### 3 恒流远供系统可靠性分析

系统的供电可靠性可分为3类:①是系统的供电可靠性,其供电可靠性以系统是否完全正常导通为主要依据,全系统或某单元故障均视为故障;②是链路的供电可靠性,其供电可靠性以链路是否完全正常导通为主要依据,整链路或某单元故障均视为故障;③是观测设备的供电可靠性,其供电可靠性以是否获取正常工作电压为主要依据。

#### 3.1 系统供电可靠性分析

系统水下部分共包含海缆、主节点、次节点3种单元,其数目分别为  $a, b, c$ 。定义第  $l$  段海缆发生短路、开路故障的事件分别为  $x_{l1}, x_{l2}$ ; 对应事件的概率分别为  $F_{l1}, F_{l2}$ , 其中  $l = 1, 2, \dots, a$ 。第  $i$  个主节点发生短路、开路故障的事件分别为  $x_{2i1}, x_{2i2}$ ; 对应事件的概率分别为  $F_{2i1}, F_{2i2}$ , 其中  $i = 1, 2, \dots, b$ 。在图1所示系统中,  $b = 4$ , 第  $j$  个次节点发生短路、开路故障的事件分别为  $x_{3j1}, x_{3j2}$ ; 对应事件的概率为  $F_{3j1}, F_{3j2}$ , 其中  $j = 1, 2, \dots, c$ 。

系统供电可靠度表达式为

$$R_S = \prod_{l=1}^a (1 - F_{l1} - F_{l2}) \prod_{i=1}^4 (1 - F_{2i1} - F_{2i2}) \times \prod_{j=1}^c (1 - F_{3j1} - F_{3j2}) \quad (1)$$

#### 3.2 链路供电可靠性分析

链路 I 由链路段  $D_{11}, D_{12}$  及  $D_{13}$  组成。它们分别包含  $a_{11}, a_{12}, a_{13}$  段海缆;  $b_{11}, b_{12}, b_{13}$  个主节点和  $c_{11}, c_{12}, c_{13}$  个次节点;  $b_{11} = b_{13} = 1, b_{12} = 0$ 。令  $a_1 = a_{11} + a_{12} + a_{13}, b_1 = b_{11} + b_{12} + b_{13} = 2, c_1 = c_{11} + c_{12} + c_{13}$ ; 链路 II 由链路段  $D_{21}, D_{22}, D_{23}$  及  $D_{13}$  组

成。其中  $D_{21}, D_{22}$  及  $D_{23}$  分别包含  $a_{21}, a_{22}, a_{23}$  段海缆,  $b_{21}, b_{22}, b_{23}$  个主节点及  $c_{21}, c_{22}, c_{23}$  个次节点;  $b_{21} = b_{23} = 1, b_{22} = 0$ 。令  $a_2 = a_{21} + a_{22} + a_{23}, b_2 = b_{21} + b_{22} + b_{23} = 2, c_2 = c_{21} + c_{22} + c_{23}$ ; 链路 III 由链路段  $D_{11}, D_{21}, D_{3}, D_{23}$  及  $D_{13}$  组成, 其中  $D_3$  包含  $a_3$  段海缆,  $b_3$  个主节点及  $c_3$  个次节点,  $b_3 = 0$ 。

链路 I, II 及 III 的任一单元发生故障, 该链路均属于非正常状态, 则它们发生故障的概率为

$$F_{L1} = 1 - \prod_{l=1}^{a_1} (1 - F_{l1} - F_{l2}) \times \prod_{i=1}^2 (1 - F_{2i1} - F_{2i2}) \prod_{j=1}^{c_1} (1 - F_{3j1} - F_{3j2}) \quad (2)$$

$$F_{L2} = 1 - \prod_{l=1}^{a_2+a_{11}+a_{13}} (1 - F_{l1} - F_{l2}) \times \prod_{i=1}^4 (1 - F_{2i1} - F_{2i2}) \prod_{j=1}^{c_2+c_{11}+c_{13}} (1 - F_{3j1} - F_{3j2}) \quad (3)$$

$$F_{L3} = 1 - \prod_{l=1}^{a_3+a_{11}+a_{13}+a_{21}+a_{23}} (1 - F_{l1} - F_{l2}) \times \prod_{i=1}^4 (1 - F_{2i1} - F_{2i2}) \prod_{j=1}^{c_3+c_{11}+c_{13}+c_{21}+c_{23}} (1 - F_{3j1} - F_{3j2}) \quad (4)$$

当链路段  $D_{12}$  发生开路故障时, 链路 II 和 III 均无法得到供电。当链路段  $D_{22}$  发生开路故障时, 链路 III 无法得到供电。则  $D_{12}, D_{22}$  开路的概率分别为

$$F_{D122} = 1 - \prod_{l=1}^{a_{12}} (1 - F_{l2}) \prod_{j=1}^{c_{12}} (1 - F_{3j2}) \quad (5)$$

$$F_{D222} = 1 - \prod_{l=1}^{a_{22}} (1 - F_{l2}) \prod_{j=1}^{c_{22}} (1 - F_{3j2}) \quad (6)$$

因此, 链路 I, II, III 的供电可靠度表达式为

$$R_{L1} = 1 - F_{L1} = \prod_{l=1}^{a_1} (1 - F_{l1} - F_{l2}) \prod_{i=1}^2 (1 - F_{2i1} - F_{2i2}) \prod_{j=1}^{c_1} (1 - F_{3j1} - F_{3j2}) \quad (7)$$

$$R_{L2} = 1 - (F_{L2} + F_{D122}) = \prod_{l=1}^{a_2+a_{11}+a_{13}} (1 - F_{l1} - F_{l2}) \prod_{i=1}^4 (1 - F_{2i1} - F_{2i2}) \times \prod_{j=1}^{c_2+c_{11}+c_{13}} (1 - F_{3j1} - F_{3j2}) + \prod_{l=1}^{a_{12}} (1 - F_{l2}) \prod_{j=1}^{c_{12}} (1 - F_{3j2}) - 1 \quad (8)$$

$$R_{L3} = 1 - (F_{L3} + F_{D122} + F_{D222}) = \prod_{l=1}^{a_3+a_{11}+a_{13}+a_{21}+a_{23}} (1 - F_{l1} - F_{l2}) \prod_{i=1}^4 (1 - F_{2i1} - F_{2i2}) \times \prod_{j=1}^{c_3+c_{11}+c_{13}+c_{21}+c_{23}} (1 - F_{3j1} - F_{3j2}) + \prod_{l=1}^{a_{12}} (1 - F_{l2}) \prod_{j=1}^{c_{12}} (1 - F_{3j2}) + \prod_{l=1}^{a_{22}} (1 - F_{l2}) \prod_{j=1}^{c_{22}} (1 - F_{3j2}) - 2 \quad (9)$$

### 3.3 观测设备供电可靠性分析

系统的主要任务是为海底观测网络的用电设备提供可靠电能,使观测设备正常工作。观测设备挂接在不同的次节点上,位置不同,供电可靠度不同。每条链路段包含多个次节点,具体数目取决于观测需求,逐一分析较为累赘。位于相同链路段的次节点,虽然具体位置不同,但分析方法类似,因此重在分析方法的研究。部分链路段的次节点具有相同的供电特性,可以以示例进行分析。

链路段  $D_{11}$ ,  $D_{12}$  及  $D_{13}$  上的次节点  $S_{1m}$  (其中  $m = 1, 2, \dots, c_1$ ), 具有相同的供电特性;链路段  $D_{21}$ ,  $D_{22}$  及  $D_{23}$  上的次节点  $S_{2m}$  (其中  $m = 1, 2, \dots, c_2$ ), 具有相同的供电特性;链路段  $D_3$  上的次节点  $S_{3m}$  (其中  $m = 1, 2, \dots, c_3$ ), 具有相同的供电特性。

若次节点  $S_{1m}$  发生开路或短路故障,观测设备均无法得到供电;以  $S_{1m}$  为分割点,将链路 I 分割为左右 2 条链路,若其中 1 条链路发生短路故障,则不影响系统供电。若 2 条链路均发生短路故障,则  $S_{1m}$  的观测设备无法得到供电,可将这 2 条链路理解为并联关系,这 2 条链路同节点  $S_{1m}$  属于串联关系;若链路 I 发生开路故障,系统开路,  $S_{1m}$  上观测设备无法得到供电;其他链路单元的故障不会对  $S_{1m}$  的供电造成影响。

次节点  $S_{2m}$ ,  $S_{3m}$  的观测设备因所在链路短路而无法得到供电的分析方法同次节点  $S_{1m}$  类似,文中不再累述。链路段  $D_{12}$  发生开路故障,系统开路,  $S_{2m}$  和  $S_{3m}$  上观测设备无法得到供电;当链路段  $D_{22}$  发生开路故障,  $S_{3m}$  上观测设备无法得到供电。

分别以链路段  $D_{12}$ ,  $D_{22}$ ,  $D_3$  上第 1 个次节点的观测设备为例,它们的观测设备供电可靠度分别为

$$R_{L1S} = \left\{ (1 - F_{3j1}) \left[ 1 - \left( 1 - \prod_{l=1}^{a_{11}+1} (1 - F_{1l1}) \right) (1 - F_{2i1}) \prod_{j=1}^{c_{11}} (1 - F_{3j1}) \right] \times \left( 1 - \prod_{l=1}^{a_{12}+a_{13}-1} (1 - F_{1l1}) (1 - F_{2i1}) \prod_{j=1}^{c_{12}+c_{13}-1} (1 - F_{3j1}) \right) \right\} + \prod_{l=1}^{a_1} (1 - F_{1l2}) \prod_{i=1}^2 (1 - F_{2i2}) \prod_{j=1}^{c_1} (1 - F_{3j2}) - 1 \quad (10)$$

$$R_{L2S} = \left\{ (1 - F_{3j1}) \left[ 1 - \left( 1 - \prod_{l=1}^{a_{11}+a_{21}+1} (1 - F_{1l1}) \prod_{i=1}^2 (1 - F_{2i1}) \prod_{j=1}^{c_{11}+c_{21}} (1 - F_{3j1}) \right) \times \left( 1 - \prod_{l=1}^{a_{22}+a_{23}+a_{13}-1} (1 - F_{1l1}) \prod_{i=1}^2 (1 - F_{2i1}) \prod_{j=1}^{c_{22}+c_{23}+c_{13}-1} (1 - F_{3j1}) \right) \right] \right\} + \prod_{l=1}^{a_2+a_{11}+a_{13}} (1 - F_{1l2}) \prod_{i=1}^4 (1 - F_{2i2}) \prod_{j=1}^{c_2+c_{11}+c_{13}} (1 - F_{3j2}) + \prod_{l=1}^{a_{12}} (1 - F_{1l2}) \prod_{j=1}^{c_{12}} (1 - F_{3j2}) - 3 \quad (12)$$

$$R_{L3S} = \left\{ (1 - F_{3j1}) \left[ 1 - \left( 1 - \prod_{l=1}^{a_{11}+a_{21}+1} (1 - F_{1l1}) \prod_{i=1}^2 (1 - F_{2i1}) \prod_{j=1}^{c_{11}+c_{21}} (1 - F_{3j1}) \right) \times \left( 1 - \prod_{l=1}^{a_3+a_{23}+a_{13}-1} (1 - F_{1l1}) \prod_{i=1}^2 (1 - F_{2i1}) \prod_{j=1}^{c_3+c_{23}+c_{13}-1} (1 - F_{3j1}) \right) \right] \right\} + \prod_{l=1}^{a_3+a_{11}+a_{13}+a_{21}+a_{23}} (1 - F_{1l2}) \prod_{i=1}^4 (1 - F_{2i2}) \prod_{j=1}^{c_3+c_{11}+c_{13}+c_{21}+c_{23}} (1 - F_{3j2}) + \prod_{l=1}^{a_{12}} (1 - F_{1l2}) \prod_{j=1}^{c_{12}} (1 - F_{3j2}) + \prod_{l=1}^{a_{22}} (1 - F_{1l2}) \prod_{j=1}^{c_{22}} (1 - F_{3j2}) - 3 \quad (12)$$

### 4 算例分析

恒流远供系统(算例)如图 3 所示,假设它为规则对称系统,共包含 25 段海缆、4 个主节点和 18 个次节点。假设海缆段长度相等,相同类型的水下单元配置相同,可视它们各自具有相同的短路和开路故障概率。具体假设参数如表 4 所示。

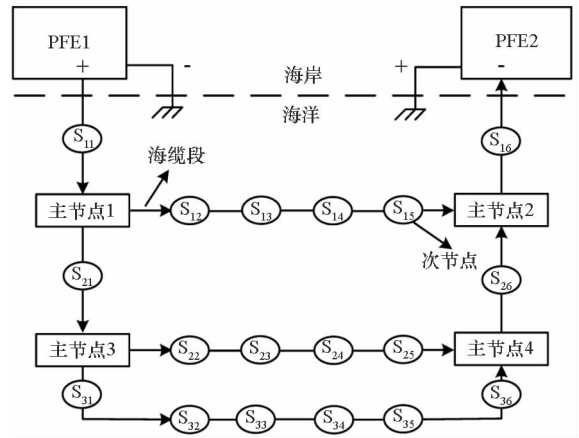


图 3 恒流远程供电系统(算例)

Fig. 3 Remote power feeding system (example)

表 4 水下单元短路与开路故障概率

Tab. 4 Failure probabilities of shortcut and open circuit

水下单元	海缆	主节点	次节点
短路故障	0.003	0.015	0.01
开路故障	0.001	0.006	0.005

参照式(1)~(9),可计算系统及各供电电路的可靠度,具体如表 5 所示。

参照式(10)~(12)的方法,可计算各次节点上观测设备的供电可靠度。由于该系统具有对称性,因此,只需计算次节点  $S_{11} \sim S_{13}$ ,  $S_{21} \sim S_{23}$ ,  $S_{31} \sim S_{33}$  上

观测设备的供电可靠度,具体如表6所示。

表5 系统及链路供电可靠度

Tab.5 Power supply reliabilities of system and links

系统	链路 I	链路 II	链路 III	
可靠度	0.633 1	0.844 3	0.747 9	0.694 2

表6 观测设备供电可靠度

Tab.6 Power supply reliabilities of electrical equipments

次节点	S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>21</sub>	S <sub>22</sub>
可靠度	0.939 9	0.937 8	0.937 5	0.886 8	0.885 0
次节点	S <sub>23</sub>	S <sub>31</sub>	S <sub>32</sub>	S <sub>33</sub>	
可靠度	0.874 7	0.847 5	0.846 9	0.846 6	

由表5和表6可知:①由于系统上级链路的供电可靠性与下级链路无关,下级链路可靠性受上级链路的影响,系统中第I级链路的供电可靠度最高,下级链路的供电可靠度低于上级链路;②在同一链路中,随链路的延伸,观测设备的可靠度逐渐降低,其中位于链路中部的供电设备可靠性最低;③上级链路的供电设备的可靠度要大于下级链路的供电可靠度;④在文中假设故障概率的条件下,由于系统包含数十个单元,每个单元故障均视为系统故障,且海缆的非人为损坏概率远低于示例概率,因此所求得的基本可靠度较低。系统的主要任务是为观测设备提供供电电压,可视观测设备的供电可靠度为系统的任务可靠度。由于恒流远供系统在水下供电方面的优势,观测设备均具有相对较高的供电可靠度。这说明系统的部分故障不会影响水下设备获取电能。在考察恒流远供系统的可靠性时,不仅要参考系统的基本可靠度,也要参考系统的任务可靠度,即观测设备的供电可靠度。

### 5 结论

本文研究了处于不同位置的水下各单元的供电状态对系统的影响,以水下单元的故障模式为基础,结合系统的具体状态,分析了系统、链路及供电设备的供电可靠性。通过算例分析,梳理了系统、链路和供电设备的供电可靠度的共性规律。下阶段将进一步融合3种供电可靠性信息,为恒流远供系统及其各单元的工程化应用提供一定的理论指导和借鉴。

### 参考文献 (References)

[1] 汪品先. 从海底观察地球——地球系统的第三个观测平

台[J]. 自然杂志, 2007, 29(3): 125 - 130.  
 WANG Pinxian. Seafloor observatories: the third platform for earth system observation [J]. Chinese Journal of Nature, 2007, 29(3): 125 - 130. (in Chinese)  
 [2] 许惠平, 姜恩祝, 徐昌伟, 等. 海底观测系统及其工程布设[J]. 科学, 2012, 64(6): 19 - 22.  
 XU Huiping, JIANG Enzhu, XU Changwei, et al. The seafloor observation system and its installation [J]. Science, 2012, 64(6): 19 - 22. (in Chinese)  
 [3] Howe B M, Chan T, Sharkawi M E, et al. Power system for the MARS ocean cabled observatory [C]//Proceedings of Applied Power Electronics Conference and Exposition, Washington, 2007.  
 [4] Kojima J, Howe B M, Asakawa K, et al. Power systems for ocean regional cabled observatories [C]//Proceedings of Oceans, Kobe, 2004.  
 [5] Chan T, Liu C C, Howe B M, et al. Fault location for the NEPTUNE power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 522 - 531.  
 [6] Lu S, El-Sharkawi M A, Kirkham H, et al. NEPTUNE power system: startup power supply for 10 kV to 400 V Dc-Dc converters [C]//Proceedings of APEC, Dallas, 2006.  
 [7] Barnes C R, Best M M R, Zielinski A. The NEPTUNE Canada regional cabled ocean observatory [J]. Sea Technology, 2008, 49(7): 10 - 14.  
 [8] Barnes C R, Best M M R, Johnson F R, et al. Challenges, benefits, and opportunities in installing and operating cabled ocean observatories: perspectives from NEPTUNE canada [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2013, 38(1): 144 - 157.  
 [9] Asakawa K, Kojima J, Muramatsu J, et al. Current-to-current converter for scientific underwater cable networks [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2007, 32(3): 584 - 592.  
 [10] Kojima J, Asakawa K. Simulation of power feeding system for the mesh-like scientific underwater cable network ARENA [C]//Proceedings of Underwater Technology, Taipei, 2004.  
 [11] Kaneda Y. Advanced ocean floor network system for mega thrust earthquakes and tsunamis [C]//Proceedings of Underwater Technology, Tokyo, 2011.  
 [12] Kawaguchi K, Araki E, Kogure Y, et al. Development of DONET2 Off kii chanel observatory network [C]//Proceedings of IEEE International UT, Tokyo, 2013.  
 [13] Lu F, Zhou H Y, Peng X T, et al. Design of an undersea power system for the East China Sea experimental cabled seafloor observatory [C]//Proceedings of Oceans-San Diego, San Diego, 2013.  
 [14] 卢汉良, 李德骏, 杨灿军, 等. 深海海底观测网络水下接驳盒原型系统设计与实现 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010, 44(1): 8 - 13.  
 LU Hanliang, LI Dejun, YANG Canjun, et al. Design and implementation of underwater junction box prototype system for deep seafloor observatory network [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(1): 8 - 13. (in Chinese)  
 [15] 王希晨, 周学军, 忽冉, 等. 海光缆远程供电系统可靠性研究 [J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(3): 428 - 433.  
 WANG Xichen, ZHOU Xuejun, HU Ran, et al. Reliability simulation of remote power feeding system [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(3): 428 - 433. (in Chinese)