第 50 卷 第 11 期：5058-5067 高电压技术 Vol.50, No.11: 5058-5067
2024 年 11 月 30 日 High Voltage Engineering November 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231094

考虑扭绞的三芯海底电缆温度稳态分布数值求解方法

黎云博[1]，王　航[1]，廖雁群[2]，南保峰[2]，肖集雄[1]，杨　帅[1]
（1. 湖北工业大学新能源及电网装备安全监测湖北省工程研究中心，武汉 430068;
2. 广东电网有限责任公司珠海供电局，珠海 519000）

摘　要：三芯海底电缆是连接近海风电场与陆地电网的重要装置，其正常运行对于经济发展具有重要意义。导体温度与光纤温度的关系模型是温度分布式传感的理论基础，过去的研究未考虑光纤及电缆的扭绞对导体与光纤温度关系的影响。基于有限元法构建了考虑扭绞的三芯复合光纤海底电缆的电热流耦合模型，得到了导体温度与光纤温度的关系式，并分析了在埋设和铺设两种敷设环境下节距、海水温度、海水表面换热系数及不同电缆尺寸对导体及光纤温度的影响，以及对光纤与导体温度关系式的影响。仿真结果表明：在埋设的条件下，不考虑扭绞时，导体每上升 1.03 ℃，光纤上升 1.00 ℃；考虑扭绞时，导体温度及光纤温度均高于不考虑扭绞，随着节距的增大即扭绞角度变小，温度均下降，相同导体温度时，节距越大，光纤温度越低；铺设时海水的流动对于电缆的散热效果显著强于埋设时；对流换热系数越大，导体及光纤的温度越低；相同导体温度时，导体截面积越大，光纤温度越高。

关键词：复合光纤海缆；扭绞；电热耦合；热传导；热对流

Numerical Solution Method for Temperature Steady-state Distribution in Three-core Submarine Cables with Twisted Structure

LI Yunbo[1], WANG Hang[1], LIAO Yanqun[2], NAN Baofeng[2], XIAO Jixiong[1], YANG Shuai[1]
(1. Hubei Engineering Research Center for Safety Monitoring of New Energy and Power Grid Equipment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Zhuhai Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhuhai 519000, China)

Abstract：The three-core submarine cable is an important device connecting offshore wind farms with land power grids, and its normal operation is of great significance to economic development. The relationship model between conductor temperature and fiber temperature is the theoretical basis of temperature distributed sensing, and the influence of twisting of optical fiber and cable on the relationship between conductor and optical fiber temperature is rarely taken into account in previous studies. Based on the finite element method, the electrothermal flow coupling model of three-core composite optical fiber submarine cable considering twisting is constructed, the relationship between conductor temperature and optical fiber temperature is obtained, and the effects of pitch, seawater temperature, seawater surface heat transfer coefficient and different cable sizes on the conductor and fiber temperatures under the buried and laying environment are analyzed. The simulation results show that, under the buried conditions, when the twisting is not considered, the conductor rises by 1.03 ℃, and the fiber rises by 1.00 ℃; moreover, when the twisting is considered, the conductor temperature and the fiber temperature are higher than those without considering the twisting; meanwhile, with the increase of the pitch, the twisting angle becomes smaller, and the temperature decreases; under the same conductor temperature, the larger the pitch is, the lower the fiber temperature will be. The flow of seawater during laying has a significantly stronger heat dissipation effect on the cable than that when buried. The larger the convective heat transfer coefficient is, the lower the temperature of the conductor and optical fiber will be. Under the same conductor temperature, a larger conductor cross-sectional area leads to higher fiber optic temperatures.

Key words：composite optical fiber submarine cable; twisting; electrothermal coupling; heat conduction; thermal convection

基金资助项目：南方电网公司科技项目(030400KK52220021(GDKJXM20220747))。
Project supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid (030400KK52220021(GDKJXM20220747)).

0　引言

我国海上风能资源丰富[1-3]，据统计，2022 年上半年，全球海上风电装机容量新增 6.8 GW，我国占 5.1 GW，成为全球海上风电装机容量增长最快的国家。为了进一步加快海上风电的发展，我国制定了海上风电产业发展规划，规划了五大千万千瓦海上风电基地，各地相继出台海上风电发展规划。据报道，我国“十四五”期间规划的海上风电装机容量将达到 80 GW，到 2030 年累计装机将超过 200 GW。现阶段，我国近海风电场主要采用 110/220 kV 三芯光纤复合海底电缆与陆地电网相连[4]。导体温度是决定电缆寿命的重要因素，是状态监测的重要参数，有必要研究 110/220 kV 三芯光纤复合海底电缆的内置光纤与导体温度的关系[5-10]。

目前，国内外学者对于海底电缆的温度分布[11-13]和载流量的研究较多[14-18]。随着光纤通信和传感技术的发展，越来越多的海缆采用内置光纤，同时光纤复合海缆的导体温度、光纤温度及负荷电流间的关系也引起了学术界的关注[19-23]。文献[19]构建了 110 kV 单芯光纤复合海缆的多物理场模型，分析了负荷电流、环境温度、土壤与海水的表面传热系数等因素对海缆本体及敷设环境温度分布的影响，建立了海缆导体温度、光纤温度和环境温度的关系式。文献[20]构建了外置光纤式 500 kV 单芯充油海底电缆温度场模型，建立了电缆表面温度和导体温度的关系式。文献[21]构建了±160 kV 单芯直流海底电缆的电–热–流耦合模型，基于有限元法分析了海缆载流量、海水温度和海水流速对海缆温度及电场的影响。但是，上述文献主要针对单芯海底电缆，其结构、热路与三芯海底电缆有很大差异。

文献[22]建立了中压三芯海底电缆的热路模型，并基于有限元法求解热路参数，推导了光纤与导体温度的关系式。文献[23]基于 IEC 60287 一阶热路研究了 10 kV 三芯电缆暂态温度响应，并通过试验验证了该计算方法的准确性。但是，110/220 kV 光纤复合海底电缆的线芯和光纤不是线性拉伸结构，而是三根线芯和光纤扭绞结构，上述关于中压海缆导体温度与光纤表面温度的研究都未考虑扭绞。文献[24]以 220 kV 三芯光纤复合海底电缆为研究对象，建立了考虑扭绞的海缆数值分析模型，分析了海缆的动态力学响应。文献[25]利用 ANSYS 有限元软件建立了考虑扭绞的海底电缆有限元模型，分析了海底电缆静力学特性。但是，上述文献未研究考虑扭绞的三芯复合海底电缆的热场分布及导体与光纤温度间的关系。

为探明内置光纤扭绞的三芯海底电缆稳态热场分布，本文先构建了 110 kV 复合三芯海底电缆扭绞模型，再基于有限元法计算海缆温度分布，并通过控制变量法和数值拟合，在埋设和铺设两种敷设环境下，得到了导体及光纤温度随扭绞节距、海水温度及换热系数的变化关系，并仿真了不同电缆导体截面积时的温度变化关系。

1　三芯光纤复合海底电缆稳态热场模型

三芯光纤复合海底电缆的稳态热场求解的理论实质为线芯导体焦耳热为内热源的热传导问题。电缆的运行温度一般不超过 90 ℃，热辐射功率远小于热传导功率。因此，参照 IEC 60287，本文忽略辐射散热，主要考虑热传导和热对流[26-27]。

根据傅里叶传热定律和能量守恒定律，热传导的控制方程：

$$\rho C_{\mathrm{p}} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q \tag{1}$$

式中：ρ 为密度，kg/m^3；C_{p} 为比热容，J/(kg·K)；T 为温度，K；λ 为热导率，W/(m·K)；Q 为热源，W/m^3；∇ 为微分算符。

热场求解问题常见的边界条件有以下 3 类：

1）边界的温度值

$$T\big|_{\Gamma_1} = T_0 \tag{2}$$

2）边界上的法向热流密度

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n}\bigg|_{\Gamma_2} = q \tag{3}$$

3）物体与环境温差及边界法向对流换热系数

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n}\bigg|_{\Gamma_3} = h\left(T_1 - T_2\right) \tag{4}$$

式中：q 为热流密度，W/m^2；h 为对流换热系数，W/(m^2·K)；T_1 为发热物体温度，T_2 为环境温度，K。

2　三芯海底电缆稳态热场有限元仿真建模

本文以 110 kV 三芯光纤复合海底电缆为例建立有限元模型。如图 1 所示，线芯主要由导体、半导电层、铜带屏蔽及防腐层组成，线芯及光纤之间由填充层填充，内护套紧束填充层，钢丝及复合材料外护套组成铠装层，线芯截面积为 500 mm^2。其中，线芯、光纤为螺旋体结构，均构成顺时针方向

的绞合层。建立几何模型时，采用点、线、面、体的思路，首先通过各结构的圆心建立螺旋线方程，由截面沿相对应的螺旋线方向拉伸成体，构建了绞合层。填充层、内护套、钢带铠装及外护套等非绞合层直接拉伸成体。

构建模型的绞合层时具体的参考螺旋线方程如下：

$$\begin{cases} x(\theta) = r\cos\theta \\ y(\theta) = r\sin\theta \\ z(\theta) = p\theta / 2\pi \end{cases} \tag{5}$$

式中：r 为螺线中心到任意一点的截面距离，m；θ 为角度，rad；p 为节距，决定螺旋线的高度变化，为螺线旋转一周的距离，m。

所构建模型的各层材料参数如表 1，其中铜导体的电导率随温度的变化可由式(6)计算[21,26]。

$$\sigma_c = \frac{1}{\rho(1+\alpha(T_c - 20))} \tag{6}$$

式中：ρ 为导体电阻率，Ω·m；α为电阻率温度系数。铜导体的线性电阻率为 1.72×10^{-8} Ω·m，电阻率温度系数α=3.93×10^{-3}，K^{-1}。T_c 为导体的温度，℃。

本文研究埋设和海床铺设两种敷设方式，埋设是将整根电缆埋设于土壤深度为 0.5 m 处，铺设是将整根电缆放置在海床上。参照现有研究，电缆产生的热量对于 2.0 m 外的环境造成影响可以忽略，因而，将上层海水边界设定为高 1.5 m，宽 4.0 m，电缆周围土壤设定为高 2.5 m，宽 4.0 m，仿真区域的长度与电缆长度一致，形状为长方体。

3 仿真分析

3.1 未考虑扭绞时海缆的热场分布

本节中以未考虑扭绞的三芯电缆为对照组，构建了仿真模型，载流量设置为 300~500 A，外护套及钢带铠装接地，设置深层土壤为 15 ℃。左右边界为第二类边界条件，即热流密度为 0，上层海水的温度设置为 20 ℃，上层海水对流换热系数为 5 W/(m²·K)。海水流速设置为 0.5 m/s，由左边界流入，右边界流出，前后边界及上下边界的设置为无滑移。

通过仿真最终得到导体以及光纤的温度列于表 2 中。根据表中数据得到关系式：

$$T_c = 1.03T_o - 0.52 \tag{7}$$

式中：T_o 为光纤的温度，℃。

由拟合得到导体温度与光纤温度的关系式(7)可知，光纤温度与导体温度呈线性关系，导体温度每上升 1.03 ℃，光纤上升 1.00 ℃。相同导体温度下，环境温度每上升 7.70 ℃，光纤温度上升 1.00 ℃[19]。

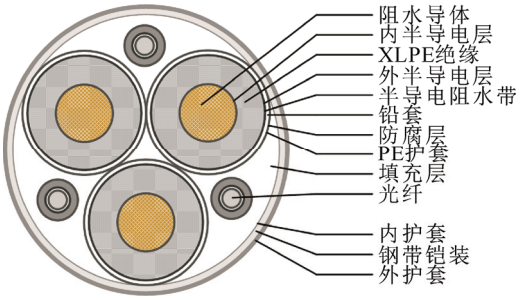


图 1 110 kV 三芯光纤复合海底电力电缆

Fig.1 110 kV three-core optical fiber composite submarine power cable structure

表 1 电缆参数

Table1 Parameters of the cable

材料	电导率/ ($S\cdot m^{-1}$)	比热容/ ($J\cdot(kg\cdot K)^{-1}$)	导热系数/ ($W\cdot(m\cdot K)^{-1}$)	密度/ ($kg\cdot m^{-3}$)
铜	见式(6)	386	400.00	8 890
半导电层	2.00	1 480	0.48	1 340
XLPE 绝缘	1.00×10^{-15}	1 000	0.29	1 000
聚乙烯	1.00×10^{-18}	2 302	0.46	935
聚丙烯	1.00×10^{-18}	1 920	0.25	946
钢	1.43×10^{4}	465	43.12	7 850
光纤	1.00×10^{-14}	703	1.38	2 203
铅	4.55×10^{6}	127	35.30	11 340
阻水带	1.00	2 500	0.50	1 050
沥青	1.00×10^{-12}	2 000	0.50	1 100

表 2 不同载流量下导体及光纤温度

Table 2 Conductor and fiber temperature changing with ampacity

I/A	T_c/℃	T_o/℃
300	35.93	35.43
350	42.78	42.04
400	50.87	49.96
450	60.82	59.56
500	72.10	70.58

3.2 扭绞节距对海缆热场分布的影响分析

本小节分别计算了埋设和海床敷设环境下，扭绞节距对海缆热场分布的影响。参数与边界条件设置与 3.1 节一致，计算了节距 0.70~1.50 m 的温度分布，图 2 为海缆埋设时给定载流量为 500 A，节距为 1.50 m 时的温度分布截面图。图 3 为绞合层的三维温度分布图。

图 4 为不同节距时导体光纤温度的拟合曲线，呈线性关系。图 5 为埋设给定电流 500 A 时，导体中心到外护套的径向温度变化曲线，从导体到外护

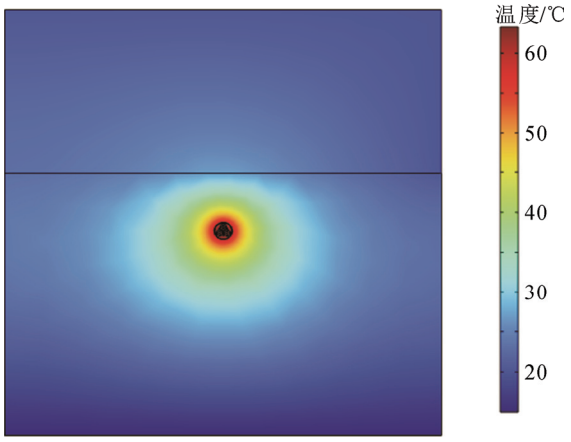


图 2　节距为 1.50 m 时海缆及环境温度分布图

Fig.2　Temperature distribution of submarine cable and environment with pitch of 1.50 m

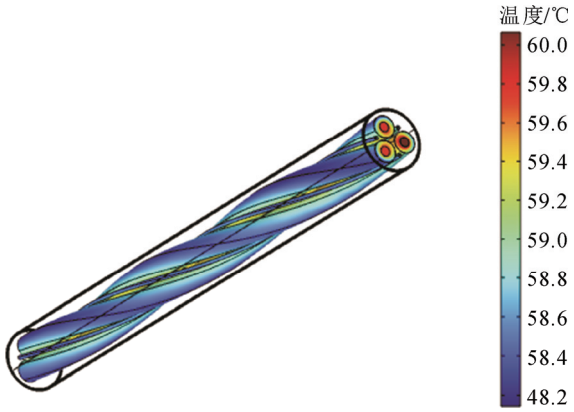


图 3　节距为 1.50 m 时绞合层的温度分布图

Fig.3　Temperature distribution of the stranded layer at pitch of 1.50 m

套的温度逐层下降，相较于大节距海缆，小节距海缆的温度下降趋势更加明显。

对比表 2 与附录中表 A1 中的数据，在相同载流量情况下，考虑扭绞时，导体和光纤温度均高于不考虑扭绞时，大节距海缆导体温度及光纤温度均低于小节距海缆的导体温度及光纤温度。原因在于，扭绞时热源为螺旋体分布，不考虑扭绞时热源为圆柱体分布，螺旋体热源不利于热传导。

根据表中数据拟合出扭绞节距 0.70 m(对应下标 p=0.70)至 1.50 m(对应下标 p=1.50)的导体温度与光纤温度关系式：

$$\begin{cases} T_{c(p=0.70)}=1.026T_{o(p=0.70)}-0.43 \\ T_{c(p=0.90)}=1.027T_{o(p=0.90)}-0.45 \\ T_{c(p=1.10)}=1.027T_{o(p=1.10)}-0.48 \\ T_{c(p=1.30)}=1.028T_{o(p=1.30)}-0.56 \\ T_{c(p=1.50)}=1.028T_{o(p=1.50)}-0.57 \end{cases} \tag{8}$$

对比式(7)与式(8)可知，在考虑电缆扭绞结构，相同导体温度时，节距越大，光纤温度越高。

据表 A2 得铺设时导体温度与光纤温度关系式：

$$\begin{cases} T_{c(p=0.70)}=1.069T_{o(p=0.70)}-1.28 \\ T_{c(p=0.90)}=1.073T_{o(p=0.90)}-1.38 \\ T_{c(p=1.10)}=1.079T_{o(p=1.10)}-1.52 \\ T_{c(p=1.30)}=1.080T_{o(p=1.30)}-1.57 \\ T_{c(p=1.50)}=1.084T_{o(p=1.50)}-1.69 \end{cases} \tag{9}$$

在海床铺设环境下，计算了节距为 0.70~1.50 m 时的温度分布，仿真及边界条件设置与 3.1 节一致，图 6 为铺设时给定载流量为 500 A，节距为 1.50 m 时的温度分布截面图，图 7 为海床铺设时导体光纤

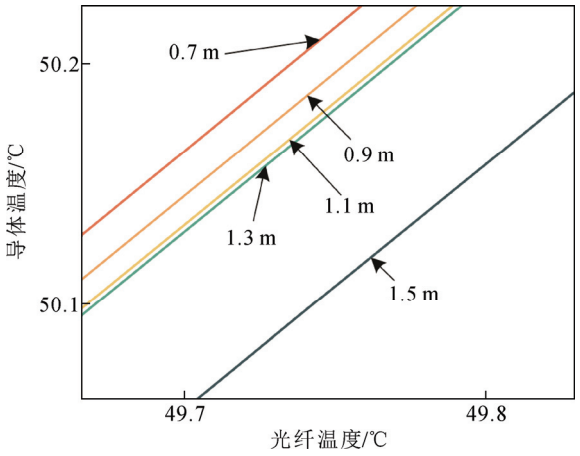


图 4　埋设时不同节距下导体光纤温度的拟合曲线

Fig.4　Conductor and fiber temperature with different pitches of embedding cable

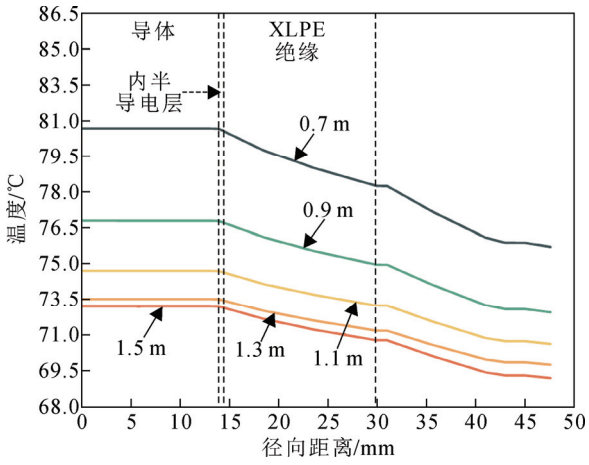


图 5　埋设时各层的温度变化

Fig.5　Temperature changing of embedding cable layers

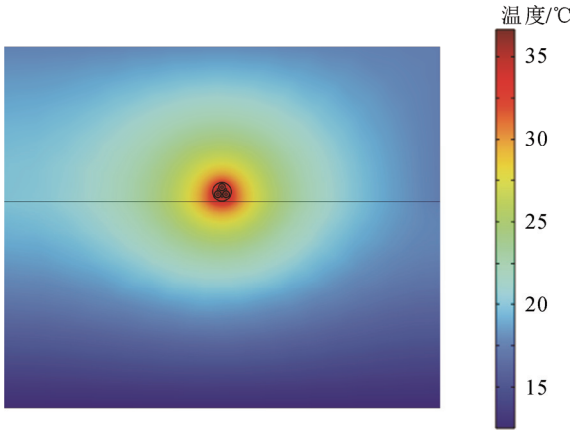


图 6 铺设时节距为 1.50 m 时海缆及敷设环境的温度分布

Fig.6 Temperature distribution of submarine cable and laying environment when the pitch is 1.50 m

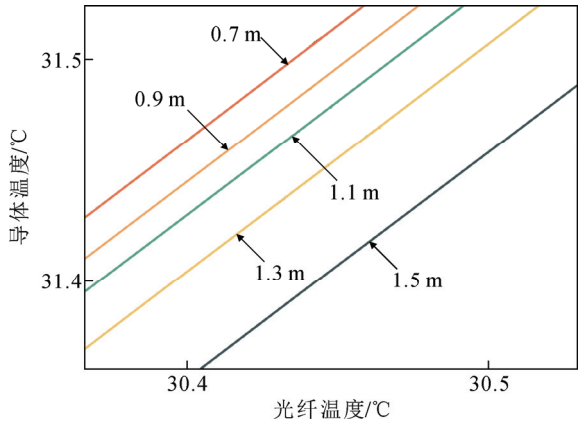


图 7 铺设时不同节距下导体与光纤温度的拟合曲线

Fig.7 Conductor and fiber temperature with different pitches of cable laying on the seabed

温度的拟合曲线。与埋设类似，海床铺设时，在相同导体温度下，节距越大，光纤温度越大。

图 8 为铺设时导体中心到外护套的径向温度变化曲线，从导体到外护套的温度逐层下降，相较于大节距海缆，小节距海缆的温度下降趋势更加明显。

对比图 5 与图 8，可知铺设时电缆温度显著小于埋设时的温度，说明海水散热效果更好。

3.3 海水温度对海缆热场分布的影响分析

为分析海水温度(T_s)对海缆热场分布的影响规律，本节所构建的模型节距为 1.5 m，仿真及边界条件设置与 3.1 节一致，计算了海水温度为 16、18、20、22、24 ℃时的温度分布，不同海水温度下光纤与导体温度列于附录中表 A3。根据表中数据拟合出海水温度分别为 16、18、20、22、24 ℃时导体温度与光纤温度的关系为：

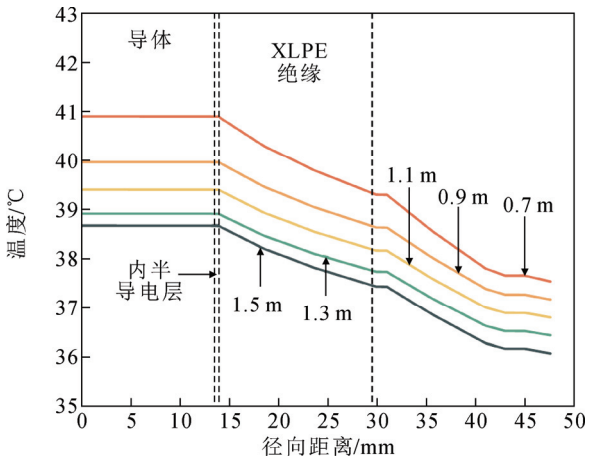


图 8 铺设时各层的温度变化

Fig.8 Temperature changing of cable layers when laying on the seabed

$$\begin{cases} T_{c(T_s=16)}=1.03T_{c(T_s=16)}-0.51 \\ T_{c(T_s=18)}=1.03T_{c(T_s=18)}-0.52 \\ T_{c(T_s=20)}=1.03T_{c(T_s=20)}-0.53 \\ T_{c(T_s=22)}=1.03T_{c(T_s=22)}-0.54 \\ T_{c(T_s=24)}=1.03T_{c(T_s=24)}-0.55 \end{cases} \tag{10}$$

埋设时导体温度与光纤温度及海水温度之间的变化关系为：

$$T_c=1.03T_o-0.01T_s-0.42 \tag{11}$$

图 9 为埋设时不同海水温度下导体与光纤的温度的拟合曲线，光纤温度与导体温度呈线性关系。

图 10 为给定电流为 500 A，节距为 1.5 m 埋设时导体到外护套的径向温度，从内到外，电缆各层温度逐步下降。

以载流量为 500 A 为例，计算导体及光纤温度与海水温度的关系式：

$$\begin{cases} T_c=0.22T_s+67.07 \\ T_o=0.22T_s+68.62 \end{cases} \tag{12}$$

由关系式可知海水温度在一定的范围内时，给电流为 500 A，海水温度每上升 4.60 ℃，导体温度上升 1.03℃，光纤温度上升 1.00 ℃。

将仿真模型的敷设环境改为铺设，仿真及边界条件保持一致，得到的导体与光纤温度列于附录中表 A4 中，铺设时不同海水温度下导体光纤温度的拟合曲线如图 11 所示，呈线性关系，关系式为：

$$\begin{cases} T_{c(Ts=16)}=1.07T_{o(T_s=16)}-1.21 \\ T_{c(Ts=18)}=1.07T_{o(T_s=18)}-1.24 \\ T_{c(Ts=20)}=1.07T_{o(T_s=20)}-1.26 \\ T_{c(Ts=22)}=1.07T_{o(T_s=22)}-1.28 \\ T_{c(Ts=24)}=1.07T_{o(T_s=24)}-1.31 \end{cases} \tag{13}$$

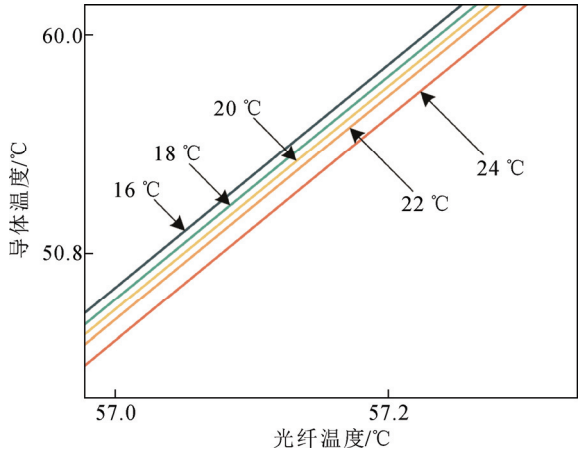


图 9　埋设时不同海水温度下导体与光纤温度的拟合曲线

Fig.9　Conductor and fiber temperature at different seawater temperatures of embedding cable

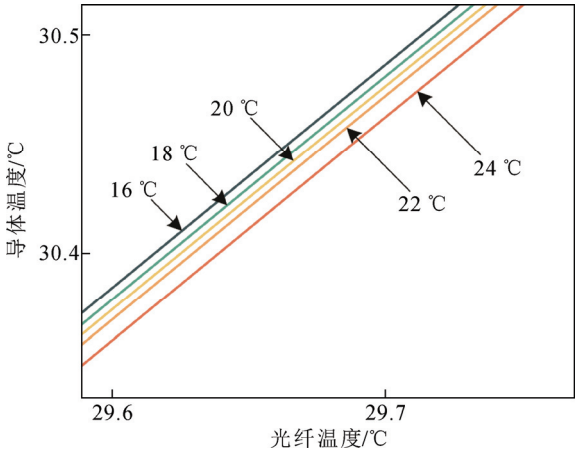


图 11　铺设时不同海水温度下导体与光纤温度的拟合曲线

Fig.11　Conductor and fiber temperature at different seawater temperatures of cable laying on the seabed

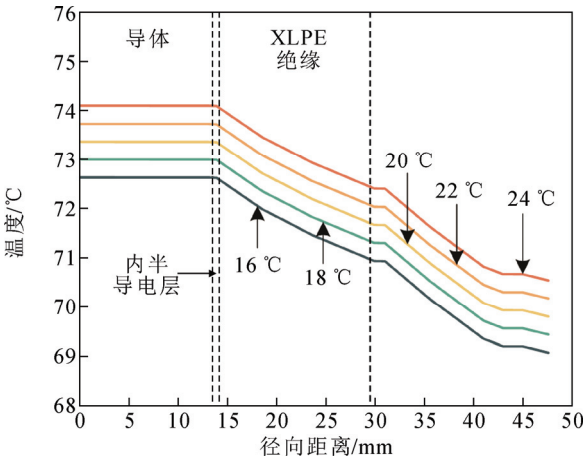


图 10　埋设时各层的温度变化

Fig.10　Temperature of embedding cable each layer

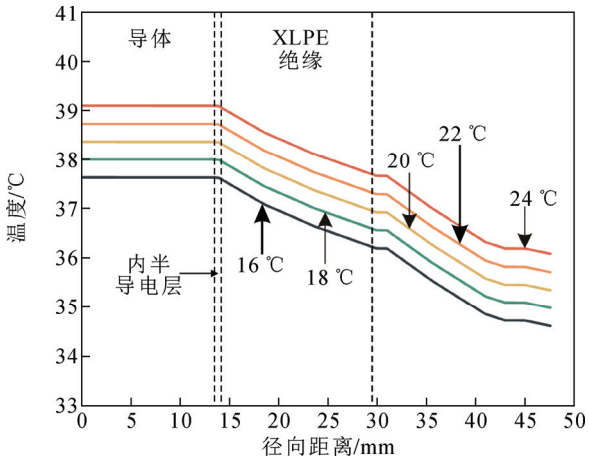


图 12　铺设时不同海水温度时各层的温度变化曲线

Fig.12　Temperature of each layer changing with sea water temperatures of cable laying on the seabed

铺设时导体温度与光纤温度及海水温度的关系式如下：

$$T_c = 1.07T_o - 0.01T_s - 1.02 \tag{14}$$

以载流量 500 A 时为例，导体及光纤温度与海水温度的关系式：

$$\begin{cases} T_c = 0.16T_s + 34.00 \\ T_o = 0.17T_s + 35.35 \end{cases} \tag{15}$$

由关系式可知海水温度每上升 6.07 ℃，导体温度上升 1.07 ℃，光纤温度上升 1.00 ℃，对比式(10)、(13)，敷设环境为铺设时导体发热传导到光纤上的温度更低，铺设时，导体温度每上升 1.07 ℃，光纤温度上升 1.00 ℃。图 12 为载流量为 500 A，海床铺设时导体中心到外护套的径向温度变化曲线，对比图 10 与图 12，铺设时导体到外护套的温度下降趋势更明显，说明热传导效果更好，海水的流动对海缆的散热效果较好，更有利于海缆的正常运行。

3.4　换热系数对海缆热场分布的影响分析

为定量分析上层海水的对流换热系数对海缆热场分布的影响规律，本节所构建的模型海水温度为 20 ℃，敷设环境为埋设，计算了对流换热系数 h 分别为 1~9 W/(m^2·K)时的温度分布，图 13 为给定电流为 500 A 时导体中心到外护套之间的径向温度变化曲线，从导体到外护套的温度逐层下降。不同对流换热系数时光纤以及导体温度列于附录中表 A5。图 14 为不同对流换热系数下导体温度与光纤温度拟合曲线图，导体温度与光纤温度呈线性关系。

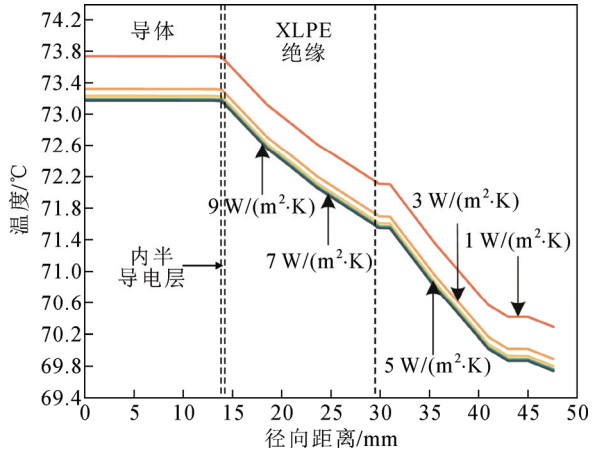


图 13 不同换热系数下各层的温度变化

Fig.13 Temperature of each layer changing of each layer with different heat transfer coefficients

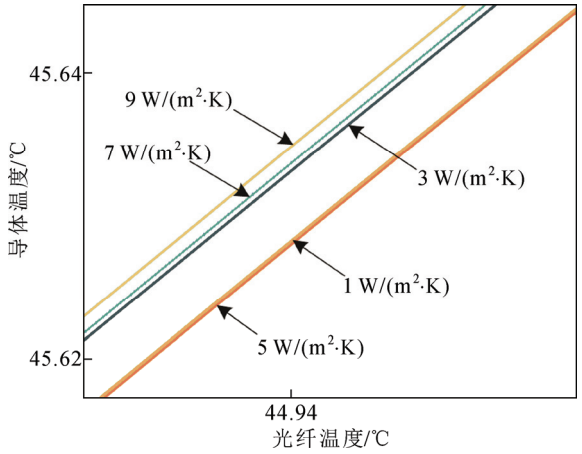


图 14 不同换热系数下导体温度与光纤温度的拟合曲线

Fig.14 Conductor temperature and fiber temperature with different heat transfer coefficients

由表 A5 中列出的数据拟合出对流换热系数 h 分别为 1~9 W/(m²·K)时导体温度与光纤温度的变化关系式：

$$\begin{cases} T_{c(h=1)} = 1.03T_{o(h=1)} - 0.60 \\ T_{c(h=3)} = 1.03T_{o(h=3)} - 0.57 \\ T_{c(h=5)} = 1.03T_{o(h=5)} - 0.57 \\ T_{c(h=7)} = 1.03T_{o(h=7)} - 0.56 \\ T_{c(h=9)} = 1.03T_{o(h=9)} - 0.56 \end{cases} \tag{16}$$

以给定载流量为 500 A 为例，得到导体及光纤的温度与对流换热系数的关系式：

$$\begin{cases} T_c = a_1 h^{b_1} + c_1 \\ T_o = a_2 h^{b_2} + c_2 \end{cases} \tag{17}$$

式中：a_1=1.12，b_1=–0.82，c_1=72.62；a_2=1.09，b_2=–0.83，c_2=71.09。

由关系式(17)可知，导体及光纤的温度均与上层海水对流换热系数成反比关系，上层海水的对流换热系数越大，更有利于海缆的散热，导体及光纤的温度越低。

3.5 截面积对海缆热场分布的影响分析

为分析不同截面积(S)电缆对海缆热场分布的影响，在本节中计算了导体截面积分别为 300、500、800 mm²，导体温度为 70 ℃，不同节距时的光纤温度，结果如表 3 所示。图 15 为不同导体截面积时的光纤温度随节距的变化曲线，随节距增大，光纤温度减小，原因在于大节距电缆相较于小节距电缆散热性能更好。在相同节距和导体温度时，导体截面积越大，光纤温度也越高，原因在于大截面电缆导体与光纤相对位置更近。

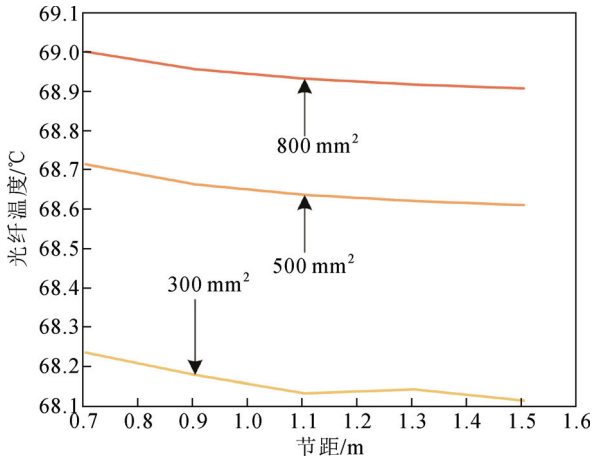


图 15 不同导体截面积时的光纤温度

Fig.15 Fiber temperature changing with different conductor cross-sections

表 3 不同导体截面积时的光纤温度

Table 3 Fiber temperature changing with different conductor cross-sections

S/mm²	T_o/℃				
	p=0.70 m	p=0.90 m	p=1.10 m	p=1.30 m	p=1.50 m
300	68.24	68.18	68.13	68.14	68.11
500	68.71	68.66	68.64	68.62	68.61
800	69.00	68.96	68.93	68.92	68.91

4 结论

1）在未考虑电缆扭绞时，导体温度与光纤温度呈线性关系，导体温度每上升 1.03 ℃，光纤温度每上升 1.00 ℃。在考虑电缆扭绞时，导体温度与光纤温度也呈线性关系，在相同载流量情况下，导体

和光纤温度均高于不考虑扭绞时，大节距海缆导体温度及光纤温度低于小节距海缆的导体温度及光纤温度。

2）在给定相同电流时，海床铺设海缆整体的温度显著低于埋设海缆，说明海床铺设时海水得散热效果更显著，对于电缆的载流量有一定的提升；导体及光纤的温度均与上层海水对流换热系数成反比关系，上层海水的对流换热系数越大，越有利于海缆的散热。

3）在埋设的敷设方式下，导体的温度均为70 ℃时，随节距增大，光纤温度减小，原因在于大节距电缆线芯距光纤更近。在相同节距和导体温度时，导体截面积越大，光纤温度也越高，原因在于大截面电缆导体与光纤相对位置更近。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] 葛　畅，阎　洁，刘永前，等. 海上风电场运行控制维护关键技术综述[J]. 中国电机工程学报，2022，42(12)：4278-4291.
GE Chang, YAN Jie, LIU Yongqian, et al. Review of key technologies for operation control and maintenance of offshore wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4278-4291.

[2] 李　辉，谢翔杰，吴　优，等. 计及主动冗余的海上直流风电机组并网混合 MMC 损耗建模与分析[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2655-2667.
LI Hui, XIE Xiangjie, WU You, et al. Power loss modeling and analysis of hybrid MMCs with active redundancy for offshore DC wind turbines[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2655-2667.

[3] 李　岩，冯俊杰，卢毓欣，等. 大容量远海风电柔性直流送出关键技术与展望[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3384-3393.
LI Yan, FENG Junjie, LU Yuxin, et al. Key technologies and prospects of VSC-HVDC for large-capacity and long-distance offshore wind power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3384-3393.

[4] 马国明，王思涵，秦炜淇，等. 输电线路运行状态光纤感知研究与展望[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3032-3047.
MA Guoming, WANG Sihan, QIN Weiqi, et al. Research and prospect in optical fiber sensing of transmission line operating conditions[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3032-3047.

[5] 刘福源，王　航，夏湛然，等. 交叉互联高压电缆护层保护器故障对同回路两端护层电流相量差的影响[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1244-1253.
LIU Fuyuan, WANG Hang, XIA Zhanran, et al. Influence of the sheath voltage limiter fault on the sheath current phasor difference between the two ends in the same sheath loop in cross-bonded HV cables[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1244-1253.

[6] 林梓圻，周　贺，牛林华，等. 隧道敷设条件下超高压电力电缆热-流场耦合分析[J]. 电力工程技术，2022，41(3)：216-223.
LIN Ziqi, ZHOU He, NIU Linhua, et al. Thermal-fluid coupling analysis of ultra-high voltage cables laid in tunnel[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 216-223.

[7] 刘宇舜，程登峰，殷巧玲，等. 基于 EEMD 与边际谱能量的电缆局部放电定位方法[J]. 电力工程技术，2022，41(1)：156-164.
LIU Yushun, CHENG Dengfeng, YIN Qiaoling, et al. Cable partial discharge location method based on EEMD and marginal spectral energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 156-164.

[8] 陈皇熹，方春华，普子恒，等. 基于 VMD-WVD 相位法的长电缆局放双端定位[J]. 电力工程技术，2022，41(3)：171-177.
CHEN Huangxi, FANG Chunhua, PU Ziheng, et al. Double-ended positioning of partial discharge for long cable based on VMD-WVD phase method[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 171-177.

[9] 边晓燕，谌云峰，周歧斌，等. 基于热路解析模型的海底电缆动态温度场计算与短时允许载流量评估[J]. 高电压技术，2023，49(2)：793-802.
BIAN Xiaoyan, CHEN Yunfeng, ZHOU Qibin, et al. Dynamic temperature field calculation and short-time allowable ampacity evaluation of submarine cable based on thermal analytical model[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 793-802.

[10] 徐志钮，樊明月，赵丽娟，等. 基于分布式光纤传感的输电线路温度和应变快速测量方法[J]. 高电压技术，2020，46(9)：3124-3134.
XU Zhiniu, FAN Mingyue, ZHAO Lijuan, et al. Fast measurement method for temperature and strain of transmission lines based on distributed optical fiber sensor[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3124-3134.

[11] 张　皓，李鹏飞，马国庆，等. 典型敷设环境下超高压交流 XLPE 海底电缆载流量分析[J]. 电力工程技术，2022，41(6)：154-162.
ZHANG Hao, LI Pengfei, MA Guoqing, et al. Ampacity analysis of extra-high voltage XLPE submarine cable in typical layout environments[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 154-162.

[12] 李　根，杜志叶，肖　湃，等. 海上风电送出 J 型管段海底电缆载流量计算模型研究[J]. 电工技术学报，2023，38(13)：3619-3629.
LI Gen, DU Zhiye, XIAO Pai, et al. Study on calculation model of submarine cable ampacity in J-tube section of offshore wind power transmission[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3619-3629.

[13] 李　娜，杨　昊，李　凯，等. 不同敷设环境下高压交流海底电缆导体温度和载流量的计算分析[J]. 电力科学与工程，2023，39(1)：17-27.
LI Na, YANG Hao, LI Kai, et al. Calculation and analysis of conductor temperature and current carrying capacity of high voltage AC submarine cable under different laying environments[J]. Electric Power Science and Engineering, 2023, 39(1): 17-27.

[14] 祝茂宇，李居跃，于治雨，等. 基于有限元法集束动态海底电缆载流量仿真计算[J]. 光纤与电缆及其应用技术，2022(5)：27-30，44.
ZHU Maoyu, LI Juyue, YU Zhiyu, et al. Simulation calculation of current-carrying capacity of bundled dynamic submarine cable based on finite element method[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2022(5): 27-30, 44.

[15] CHEN Y, WANG S, HAO Y, et al. Temperature monitoring for 500 kV oil-filled submarine cable based on BOTDA distributed optical fiber sensing technology: method and application[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 3504510.

[16] 李　强，王艳松，刘学民. 光纤温度传感器在电力系统中的应用现状综述[J]. 电力系统保护与控制，2010，38(1)：135-140.
LI Qiang, WANG Yansong, LIU Xuemin. Application situation of temperature monitoring of optic fiber sensor in power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 135-140.

[17] 夏　源，赵学童，冯　勇，等. ±500 kV 直流海缆在 J 型管敷设环境下的稳态载流量仿真研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(12)：

4851-4860.
XIA Yuan, ZHAO Xuetong, FENG Yong, et al. Simulation study on steady-state ampacity of ±500 kV DC submarine cable under J-tube laying environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4851-4860.

[18] 肖冬萍，包　杨，杨　帆，等. 计及沉积物渗透性的捆绑式高压直流海底电缆载流量评估模型[J]. 中国电机工程学报，2021，41(14)：5066-5076.
XIAO Dongping, BAO Yang, YANG Fan, et al. A model for estimating the ampacity of bundled hvdc submarine cables considering sediment permeability[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 5066-5076.

[19] 吕安强，李永倩，李　静，等. 光电复合海缆中光纤与导体温度关系的有限元分析方法[J]. 电工技术学报，2014，29(4)：91-96.
LV Anqiang, LI Yongqian, LI Jing, et al. Finite element analysis method for temperature relationship between conductor and optical fiber in optic-electric composite submarine cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 91-96.

[20] 郭　强，郝　义，王　双，等. 500 kV 充油海底电缆导体温度分布式光纤传感监测及应用[J]. 智慧电力，2021，49(1)：77-82.
GUO Qiang, HAO Yi, WANG Shuang, et al. Monitoring of 500 kV oil-filled submarine cable conductor temperature with distributed optical fiber sensing technology and its application[J]. Smart Power, 2021, 49(1): 77-82.

[21] 郝艳捧，陈　云，阳　林，等. 高压直流海底电缆电–热–流多物理场耦合仿真[J]. 高电压技术，2017，43(11)：3534-3542.
HAO Yanpeng, CHEN Yun, YANG Lin, et al. Coupled simulation on electro-thermal-fluid multiple physical fields of HVDC submarine cable[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3534-3542.

[22] 吕安强，寇　欣，尹成群，等. 三芯海底电缆中复合光纤与导体温度关系建模[J]. 电工技术学报，2016，31(18)：59-65.
LV Anqiang, KOU Xin, YIN Chengqun, et al. Modeling of temperature relation between optical fiber and conductor in 3-core submarine power cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(18): 59-65.

[23] 张　灏，周华鑫，叶梓茂，等. 三芯电缆实时导体温度实时解析与计算方法[J]. 电工技术，2021(17)：1-4.
ZHANG Hao, ZHOU Huaxin, YE Zimao, et al. Analytical calculation and experiment research on real-time conductor temperature of three-core cable[J]. Electric Engineering, 2021(17): 1-4.

[24] 李　鹏，王博士，郭　健，等. 基于有限元仿真的三芯光纤复合海缆扭转研究[J]. 郑州大学学报(工学版)，2022，43(4)：67-73.
LI Peng, WANG Boshi, GUO Jian, et al. Torsional research of three-core fiber composite submarine cable based on finite element simulation[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2022, 43(4): 67-73.

[25] 林晓波，卢志飞，甘　纯，等. 光纤复合海底电缆扭转的有限元建模[J]. 光通信研究，2016(3)：33-36.
LIN Xiaobo, LU Zhifei, GAN Chun, et al. Finite element modeling of optical fiber composite submarine power cable twist[J]. Study on Optical Communications, 2016(3): 33-36.

[26] International Electrotechnical Commission. Electric cables – calculation of the current rating-part 1-1: current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – general: IEC 60287-1-1[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2006.

[27] 吴晶晶，陈丽安，严有祥，等. ±500 kV 高压直流 XLPE 电缆温度分布及其影响因素研究[J]. 高压电器，2023，59(2)：113-119.
WU Jingjing, CHEN Li'an, YAN Youxiang, et al. Study on temperature distribution of ±500 kV HVDC XLPE cable and its influencing factors[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 113-119.



黎云博
2001—，男，硕士生
主要从事光纤复合海底电缆状态检测的研究工作
E-mail: 102210367@hbut.edu.cn

LI Yunbo



王　航(通信作者)
1989—，男，博士，讲师，硕导
主要从事电力电缆状态检测和新能源并网领域的研究工作
E-mail: wanghang@whu.edu.cn

WANG Hang
Ph.D.
Corresponding author

收稿日期　2023-08-16　修回日期　2024-03-20　　编辑　曹昭君

附录 A

表 A1　埋设时导体及光纤的温度随节距的变化

Table A1　Temperature of the conductor and the fiber changes with the pitch of embedding cable

I/A	*p* (0.70 m)		*p* (0.90 m)		*p* (1.10 m)		*p* (1.30 m)		*p* (1.50 m)	
	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃
300.00	38.46	37.90	37.18	36.67	36.64	36.14	36.48	35.92	36.24	35.70
350.00	46.22	45.43	44.44	43.75	43.78	43.09	43.31	42.60	42.99	42.30
400.00	55.68	54.66	53.35	52.41	52.33	51.39	51.86	50.87	51.28	50.34
450.00	67.02	65.72	64.08	62.80	62.51	61.31	61.70	60.47	61.25	60.03
500.00	80.49	78.84	76.66	75.06	74.77	73.19	73.59	72.04	72.98	71.43

表 A2　铺设时导体及光纤的温度随节距的变化

Table A2　Temperature of the conductor and the optical fiber changes with the pitch of cable laying on the seabed

I/A	*p* (0.70 m)		*p* (0.90 m)		*p* (1.10 m)		*p* (1.30 m)		*p* (1.50 m)	
	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃
300.00	26.98	26.42	26.50	26.02	26.35	25.85	26.17	25.71	26.17	25.67
350.00	29.68	28.99	29.25	28.52	28.84	28.19	28.68	28.03	28.67	27.98
400.00	33.14	32.14	32.30	31.37	31.86	30.98	31.75	30.82	31.75	30.79
450.00	36.86	35.61	35.88	34.70	35.37	34.21	35.09	33.95	34.83	33.74
500.00	40.99	39.57	39.83	38.43	39.43	37.92	38.94	37.53	38.82	37.37

表 A3　埋设时导体及光纤的温度随海水温度的变化

Table A3　Temperature of the conductor and the optical fiber at different sea water temperatures of embedding cable

I/A	T_S(16.00 ℃)		T_S(18.00 ℃)		T_S(20.00 ℃)		T_S(22.00 ℃)		T_S(24.00 ℃)	
	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃
300.00	35.32	34.82	35.73	35.22	36.13	35.62	36.55	36.03	36.96	36.44
350.00	42.24	41.51	42.65	41.92	43.06	42.33	43.48	42.74	43.89	43.16
400.00	50.52	49.58	50.94	49.99	51.36	50.41	51.77	50.83	52.19	51.25
450.00	60.41	59.17	60.84	59.59	61.26	60.01	61.69	60.44	62.11	60.87
500.00	72.10	70.54	72.53	70.97	72.96	71.40	73.40	71.83	73.84	72.27

表 A4　铺设时导体及光纤的温度随海水温度的变化

Table A4　Temperature of the conductor and the optical fiber at different sea water temperatures of cable laying on the seabed

I/A	T_S(16.00 ℃)		T_S(18.00 ℃)		T_S(20.00 ℃)		T_S(22.00 ℃)		T_S(24.00 ℃)	
	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃
300.00	25.57	25.04	25.89	25.36	26.22	25.68	26.54	26.00	26.87	26.33
350.00	28.05	27.34	28.38	27.66	28.70	27.99	29.03	28.31	29.35	28.64
400.00	30.85	29.99	31.15	30.31	31.48	30.63	31.81	30.96	32.14	31.29
450.00	34.18	33.09	34.50	33.42	34.83	33.74	35.17	34.08	35.49	34.40
500.00	38.00	36.64	38.32	36.97	38.65	37.29	38.98	37.62	39.32	37.96

表 A5　导体及光纤的温度随换热系数的变化

TableA5　Temperature of conductors and optical fibers varies with the heat transfer coefficient

I/A	*h*(1.00 m²·K)		*h*(3.00 m²·K)		*h*(5.00 m²·K)		*h*(7.00 m²·K)		*h*(9.00 m²·K)	
	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃	T_c/℃	T_o/℃
300.00	36.26	35.77	36.12	35.63	36.09	35.60	36.07	35.58	36.06	35.58
350.00	43.19	42.52	43.03	42.33	42.96	42.27	42.94	42.24	42.92	42.23
400.00	51.69	50.77	51.35	50.43	51.27	50.35	51.24	50.32	51.22	50.30
450.00	61.93	60.68	61.46	60.21	61.35	60.10	61.14	59.92	61.11	59.90
500.00	73.74	72.17	73.07	71.52	72.92	71.37	72.84	71.30	72.80	71.26