第 49 卷 第 2 期：597-607 高电压技术 Vol.49, No.2: 597-607
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221476

不同敷设方式下±500 kV 高压直流海缆稳态载流量仿真分析

乔镜琪，赵学童，夏　源，冯　勇，肖永健，杨丽君
（重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室，重庆 400044）

摘　要：稳态载流量是衡量高压直流海缆电能传输能力的重要指标。为此，采用 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件建立了±500 kV 直流海缆电−热−流耦合模型，基于控制变量法研究了 J 型管、电缆沟和隧道 3 种典型敷设方式下的尺寸参数、材料热导率、排列方式等对海缆稳态载流量的影响。结果表明：在 J 型管敷设段，减小 J 型管管壁厚度和增大 J 型管外径均可有效提高海缆稳态载流量；在电缆沟敷设段，随着埋深的增加，稳态载流量逐渐降低，而空气域截面尺寸和电缆沟材料热导率的增大则可提高稳态载流量；在隧道敷设段，考虑到空气对流换热等因素，当电缆横向排列且间距为 900 mm 时，稳态载流量达到最大值；稳态载流量最低的隧道段为瓶颈段，可通过增加通风设备提升瓶颈段稳态载流量。
关键词：海缆；稳态载流量；J 型管；电缆沟；隧道

Simulation Analysis of Steady-state Ampacity of ±500 kV High-voltage DC Submarine Cables Under Different Laying Methods

QIAO Jingqi, ZHAO Xuetong, XIA Yuan, FENG Yong, XIAO Yongjian, YANG Lijun
(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The steady-state ampacity is an important index to measure the power transmission capacity of high-voltage DC submarine cables. In this paper, an electric-thermal-flow coupling model of ±500 kV DC submarine cables was built by using the COMSOL Multiphysics finite-element analysis software. Based on the control variate method, the effects of dimensional parameters, material thermal conductivity and arrangement on the steady-state ampacity of the submarine cables were studied, which were laid in 3 different sections, including the J-tube section, the cable trench section and the tunnel section. The results show that, in the J-tube section, the steady-state ampacity can be increased by both reducing the wall thickness and increasing the outer diameter of the J-tube. In the cable trench section, the steady-state ampacity gradually decreases with the increase of the depth of the cable trench. However, it can be effectively boosted by increasing the cross-section size of the air domain in the cable trench and increasing the thermal conductivity of the cable trench materials. In the tunnel section, due to the factors such as air convection and heat transfer, the steady-state ampacity reaches its maximum when the submarine cables are arranged horizontally with a space of 900 mm. The tunnel section with the lowest steady-state ampacity is the bottleneck section, which can be improved by adding ventilation equipment.
Key words: submarine cables; steady-state ampacity; J-tube; cable trench; tunnel

0　引言

为支撑我国经济社会可持续发展，保障国家能源安全，迫切需要构建安全可靠、经济高效以及环境友好的新型电力系统。柔性直流输电作为新型电力系统的重要组成部分，与传统输电方式相比，其在大规模风电场并网方面的技术优势显著。目前，我国已建成了多项大规模柔性直流输电工程，如厦门双极柔性直流输电工程[1]、浙江舟山多端柔性直流输电示范工程[2]、广东南澳多端柔性直流输电系统工程等[3]。在这些工程中，海底直流电缆在连接海上风电场与陆地电网上发挥了重要作用[4]。目前，以交联聚乙烯(crosslinked polyethylene cable, XLPE)

基金资助项目：国家自然科学基金(51877016)；教育部霍英东教育基金(171050)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51877016), Fok Ying-Tong Education Foundation of China (171050).

为主绝缘的海缆已经得到广泛应用[5]。稳态载流量是指电缆在长期稳态运行中，导体能够承载而不使其稳定温度超过规定值(一般为 70 ℃)的电流[6-7]，是衡量电力电缆传输能力的重要指标。对于直流电缆而言，若稳态载流量过低，电缆在运行过程中载流能力就不能得到充分利用，导致传输效率下降，造成电缆成本的提高和资源的浪费；若稳态载流量过高，电缆导体的运行温度高于规定温度，将加速电缆绝缘的老化，最终缩短其使用寿命。因此，准确计算海缆稳态载流量对于优化海缆结构和提高海缆利用效率至关重要。

目前，海缆稳态载流量的计算方法主要有两种，分别是等效热阻法和数值分析法。等效热阻法主要基于 IEC 60287-2-1—2015 标准，建立电力电缆等效热阻模型，根据传热学公式计算得到线芯导体长期运行允许的最高温度和稳态载流量数值[8-9]。数值分析法包括边界元法、差分法和有限元法等，其中有限元法因其可以设定复杂边界条件并进行多个物理场的准确耦合计算而得到广泛应用[10-12]。对于交流海缆，文献[13]以舟山 220 kV 典型海缆工程为实例，对潜在瓶颈段稳态载流量进行仿真计算和比较，确定了海缆线路瓶颈区段的稳态载流量以及短时过负荷能力；文献[14]以交流三芯电缆 HYJQF41−F−26/35 kV 电缆为例，利用 COMSOL 有限元分析软件建立了基于电磁场、流体场和传热场的多物理场耦合模型，分析了电缆沟内敷设电缆的温度场变化，研究了不同敷设方式对电缆载流量大小的影响；文献[15]针对不同铺设情况下的 220 kV 三芯交流海缆，探究了海水速度、温度、海缆铺设深度和土壤热导率对海缆温度和载流特性的影响；文献[16]比较了交流 500 kV 海缆登陆段不同载流能力提升方案的效果。

近年来，随着直流输电得到的关注度不断提高，有学者研究了不同敷设方式下直流海缆载流量的变化，但其研究内容多基于海底敷设和埋设两种方式[17-20]。在实际工程应用中，直流海缆输电工程整体敷设环境包括 J 型管段、滩涂段、登陆段等，不同敷设段的敷设方式存在差别，从而影响电力电缆的稳态载流量。因此，亟需对高电压等级直流海缆输电线路进行整体的载流量分析。本文针对±500 kV 高压直流海缆，采用 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件建立了 J 型管段、滩涂段和登陆段海缆的载流量分析模型，其中，滩涂段采用电缆沟敷设方式，登陆段采用隧道敷设方式。通过仿真计算，分析了 3 种敷设条件对海缆稳态载流量的影响，并通过添加通风设备的方式提升瓶颈区段的稳态载流量，从而为提高海缆输电工程的经济效益以及海缆的前期设计、敷设施工等阶段提供重要指导和参考。

1 物理场控制方程

在复杂的海底环境中，加载在电缆本体上的电流会产生热量，热量在固体和流体环境中传递，并在周围环境的影响下进行对流热交换。因此，海缆的稳态载流量计算模型可等效为电缆与其敷设环境的电−热−流多物理场耦合模型，所涉及到的电场、传热场和流场可以使用如下控制方程进行描述。

电场控制方程为：

$$\nabla \cdot \boldsymbol{J} = Q_{\mathrm{j},\varphi} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{J} = \sigma \boldsymbol{E} + \boldsymbol{J}_{\mathrm{e}} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{E} = -\nabla \varphi \tag{3}$$

式中：∇为矢量微分算子；$\boldsymbol{J}$ 为电流密度矢量，单位为 A/m^3；$Q_{\mathrm{j},\varphi}$ 为电流源的电流密度，单位为 A/m^3；σ 为材料电导率，单位为 S/m；$\boldsymbol{E}$ 为电场强度矢量，单位为 V/m；$\boldsymbol{J}_{\mathrm{e}}$ 为外部注入电流密度，单位为 A/m^3；φ 为电势，单位为 V。

传热场控制方程为

$$d_{\mathrm{z}}\rho C_{\mathrm{p}}\boldsymbol{v}\cdot\nabla T+\nabla\cdot(-d_{\mathrm{z}}k\nabla T)=d_{\mathrm{z}}Q+q_0 \tag{4}$$

式中：d_{z} 为模型厚度，单位为 m；ρ 为材料密度，单位为 kg/m^3；C_{p} 为恒压热容，单位为 J/(kg·K)；$\boldsymbol{v}$ 为速度矢量，单位为 m/s；T 为材料温度，单位为 K；k 为材料的导热系数，单位为 W/(m·K)；Q 为固体材料的内热源，单位为 W/m^3；q_0 为材料的初始热量，单位为 J。

流场控制方程为：

$$\rho_{\mathrm{l}}(\boldsymbol{v}\cdot\nabla)\boldsymbol{v}=-\nabla p+\nabla\cdot\left(\mu(\nabla\boldsymbol{v}+(\nabla\boldsymbol{v})^{\mathrm{T}})-\frac{2}{3}\mu(\nabla\cdot\boldsymbol{v})\boldsymbol{I}\right) \tag{5}$$

$$\nabla\cdot(\rho_{\mathrm{l}}\boldsymbol{v})=0 \tag{6}$$

式中：ρ_{l} 为流体密度，单位为 kg/m^3；p 为流体压强，单位为 Pa；μ为流体动力黏度，单位为 Pa·s；$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。

2 仿真模型建立

本研究建立了±500 kV 直流海缆在 3 种不同敷设方式下的多物理场耦合仿真模型，分别为 J 型管敷设、电缆沟敷设和隧道敷设。海缆敷设段全段示

意图如图 1 所示。

2.1　有限元模型建立

2.1.1　电缆结构及尺寸

本文所采用的海缆为±500 kV 铜芯交联聚乙烯绝缘铅套钢丝铠装纤维外被层海底光电复合电缆，其具体结构和结构参数分别如图 2 和表 1 所示。

2.1.2　敷设方式

在 J 型管敷设段，当海缆从海上换流站平台桩基外部进入桩基上部平台时，为避免海浪的冲击，通过 J 型管将海缆向上引至换流站平台甲板，因此，仿真计算需考虑管壁之内介质分别为空气和海水的情况，即模拟 J 型管位于海面之下和海面之上 2 种情况。如图 3 所示，海缆位于 J 型管正中央，管壁材质为 Q345C 钢材。

电缆沟是海缆在登陆段的主要敷设方式，电缆沟内海缆结构参数与 J 型管段相同，电缆沟布置如图 4 所示。通常认为，如果电缆沟所埋的土壤左右边界足够远，那么海缆产生的热量不会在左右边界处发生对流换热，因此设置土壤边界尺寸为 8 m×4 m。海缆放置在电缆沟底部，电缆沟埋设在距离地表 30 cm 的土壤中，沟壁厚度为 25 cm，盖板厚度为 15 cm，其中电缆沟材料为钢筋混凝土。

在隧道敷设段，为了保证更好的散热条件，电缆隧道采用分舱设计，将 2 根直流电缆放置在电缆舱室的撑台上。隧道模型宽 2 m，高 2.6 m，隧道壁厚度为 20 cm，材料为钢筋混凝土，电缆隧道埋设在距离地表 2.3 m 的土壤中。隧道敷设环境下的电缆布置示意图如图 5 所示。

2.2　网格剖分和边界条件设置

有限元分析计算是在剖分网格的基础上进行的，网格划分得越密集，计算结果就越准确，但同时计算量也越大，计算时间也越长。因此，在保证计算精度的前提下需要对仿真模型进行合理的网格剖分。对电缆周围尺寸较小区域及电缆本体进行细密的网格划分；对敷设环境，例如空气域及外部土壤等，进行相对粗糙的网格划分，在保证计算准确率的同时缩短计算时间。

仿真模型中主要涉及到电场、传热场和流场 3 个模块，具体边界条件设置如下：

1）电场条件设置：导体至合金铅套层部分为需要计算电场的区域，在电缆导体一端施加 500 kV 电压，铅套层接地，导体另一端以法向电流密度的形式施加电流。

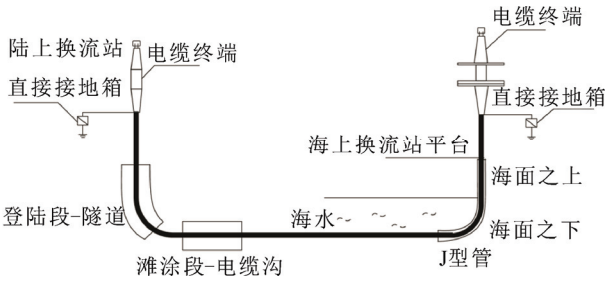


图 1　海缆工程敷设示意图

Fig.1　Laying diagram of submarine cables

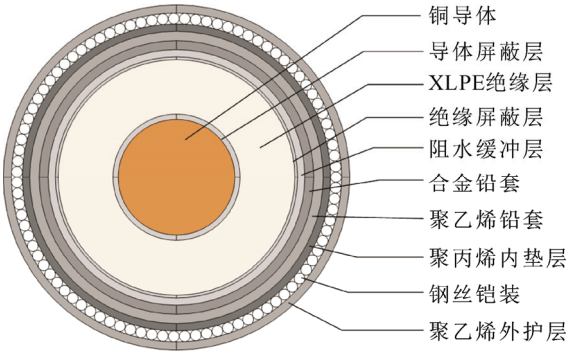


图 2　海缆结构图

Fig.2　Structure of the submarine cables

表 1　海缆结构参数

Table 1　Structural parameters of the submarine cables

海缆结构	厚度/mm	内径/mm	外径/mm
铜导体	—	—	64
导体屏蔽层	2.9	64	69.8
XLPE 绝缘层	30	69.8	129.8
绝缘屏蔽层	1.5	129.8	132.8
阻水缓冲层	4	132.8	140.8
合金铅套	4.9	140.8	150.6
聚乙烯护套	5.2	150.6	161
聚丙烯内垫层	4	161	169
钢丝铠装	6	169	181
聚乙烯外护层	4.5	181	190

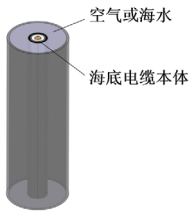


图 3　J 型管示意图

Fig.3　Diagram of the J-tube

2）传热场条件设置：空气域或海水域部分设置为流体传热，其他部分设置为固体传热。当 J 型

管位于海面之上时，J 形管外壁与空气进行对流换热，同时在 J 型管外壁施加边界热源以模拟其受太阳辐射影响[21-23]。当 J 型管位于海面之下时，考虑到海水散热效果良好，J 型管外壁恒定为环境温度。电缆沟和隧道模型左右两侧边界为土壤边界，热通量为 0；上边界为土壤与空气接触边界，发生对流换热；下边界为深层土壤，由于距离电缆本体较远，可以看做恒温边界条件，温度设置为 20 ℃。

3）流场条件设置：对于 J 型管模型来说，海缆与 J 型管之间为流体域，重力竖直向下。在电缆沟和隧道敷设环境中，空气域为流体域，流体初始速度均为 0，界面压力设置为 0，空气可以自由流动。

3 稳态载流量仿真结果分析

基于上述模型，在仿真过程中对电缆导体施加一定电流值，稳态载流量对应海缆线芯温度达 70 ℃时的稳态工作电流。采用控制变量法研究了 J 型管、电缆沟和隧道 3 种敷设方式下不同因素对稳态载流量的影响。

3.1 J 型管敷设方式

3.1.1 J 型管位于海面之上

当 J 型管位于海面之上时，管壁与海缆之间的介质为空气。设置环境温度为 20 ℃，分别改变 J 型管的管壁厚度和外径，探究 J 型管尺寸对海缆稳态载流量的影响，仿真计算结果如图 6 所示。由图 6(a)可知，当壁厚为 25 mm 时，增大 J 型管外径，稳态载流量随之增加。图 7 为海面之上 J 型管在同一壁厚、不同外径条件下的温度分布图，从中可以看出，空气流通区域的温度随着外径的增加而降低。这是由于外径增大使得 J 型管尺寸增加，同时增大了空气的体积，空气更容易流动，增强了散热效果。由图 6(b)可知，保持外径 600 mm 尺寸不变，稳态载流量随着壁厚的减薄而增大。图 8 为海面之上 J 型管在同一外径、不同壁厚条件下的温度分布图，从中可以看出，由于 J 型管外围尺寸没有变化，减小壁厚相当于增大空气域体积，因此可以得到与增大 J 型管外径相似的结果。当 J 型管位于海面之上时，在文中所计算范围内，通过改变壁厚，稳态载流量最高可提升 35 A；通过改变外径，稳态载流量最高可提升 58 A。

在实际工程中，为了防止环境因素等导致海缆铠装层损坏，同时为了对风电机组基础附近的海缆进行有效防护，减小增加海缆外防护层带来的制造

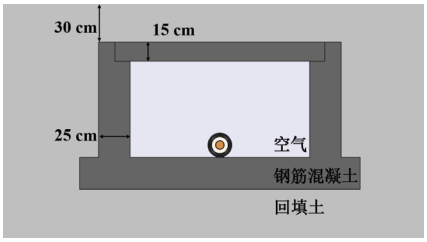


图 4 电缆沟示意图

Fig.4 Diagram of the cable trench

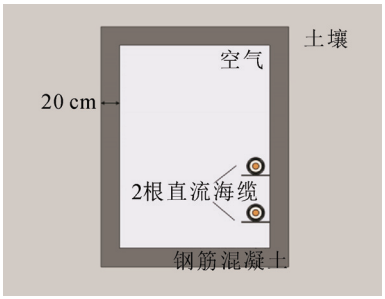


图 5 隧道示意图

Fig.5 Diagram of the tunnel

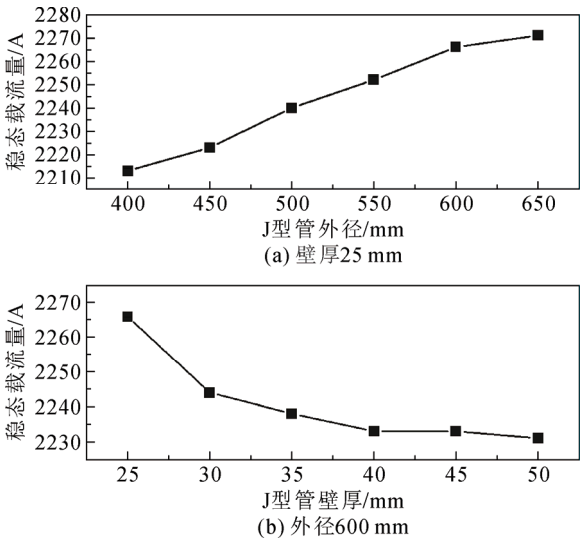


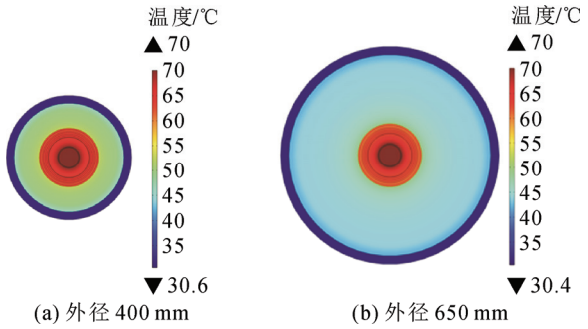
图 6 电缆稳态载流量与 J 型管尺寸参数的关系(海面之上)

Fig.6 Steady-state ampacity versus J-tube dimensional parameters (above the sea level)

成本，海缆防护通常采用 J 型管防护[24]。根据前述仿真计算结果，外径大、管壁薄的 J 型管可以有效提高电缆稳态载流量。然而，管壁过薄会导致材料机械强度降低，外径过大会额外增加敷设和材料施工成本。因此，在综合考虑工程需求和经济效益等因素的前提下，应尽量选择外径大、管壁薄的 J 型管。

3.1.2 J 型管位于海面之下

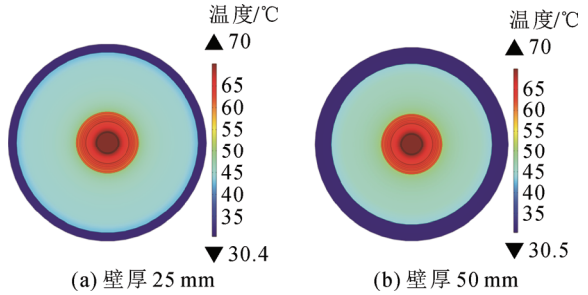
当 J 型管位于海面之下，管壁与电缆本体之间填充的介质为海水，其流动会带走海缆产生的热量。



(a) 外径 400 mm　(b) 外径 650 mm

图 7　J 型管壁厚为 25 mm 时海缆在 J 型管段的温度分布(海面之上)

Fig.7　Temperature distribution of the submarine cables in the J-tube with a wall thickness of 25 mm (above the sea level)



(a) 壁厚 25 mm　(b) 壁厚 50 mm

图 8　J 型管外径为 600 mm 时海缆在 J 型管段的温度分布(海面之上)

Fig.8　Temperature distribution of the submarine cables in the J-tube with an outer diameter of 600 mm (above the sea level)

改变 J 型管壁厚和外径，研究海面之下 J 型管尺寸参数对海缆稳态载流量的影响，仿真结果和温度分布如图 9—图 11 所示。

由图 9 可知，随着 J 型管外径的增加和壁厚的减小，海缆的稳态载流量均呈现升高的趋势。当 J 型管位于海面之下时，J 型管外径从 400 mm 增加到 650 mm，稳态载流量提升了 19 A；J 型管壁厚由 50 mm 减小至 25 mm，稳态载流量提升了 7 A。相比于 J 型管位于海面之上的情况，J 型管位于海面之下时稳态载流量的提升幅度明显降低，但其稳态载流量数值要远远高于 J 型管位于海面之上的情况。由图 10 和图 11 可以看出，管内海水域的温度接近环境温度 20 ℃，同时海缆本体的温度沿径向呈现明显的梯度变化，海缆外层温度降低到 25~30 ℃，这是由于海水散热效果良好，因此 J 型管位于海面之下的稳态载流量较大，而海水域和海缆外层的温度已经接近环境温度，故改变 J 型管壁厚和外径对海缆的稳态载流量影响不大。

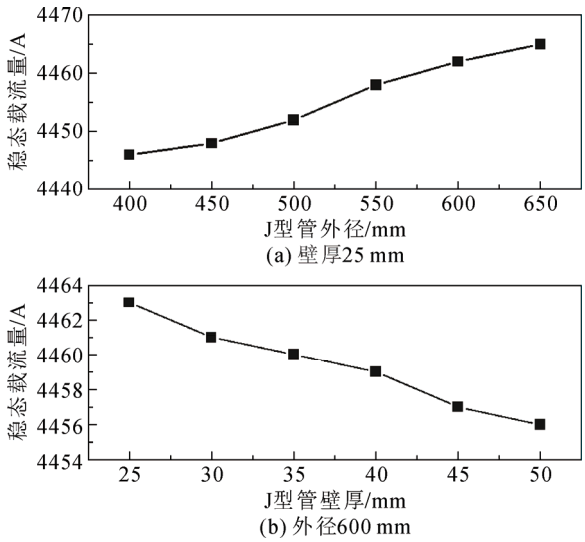
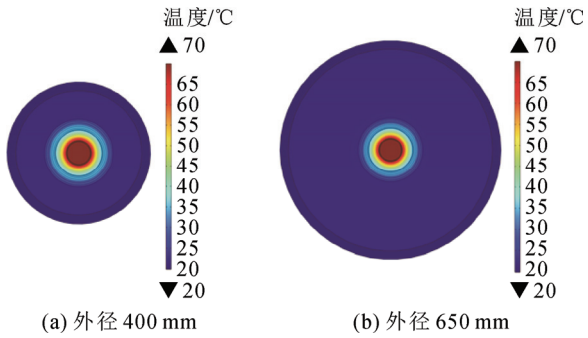


图 9　电缆稳态载流量与 J 型管尺寸参数的关系(海面之下)

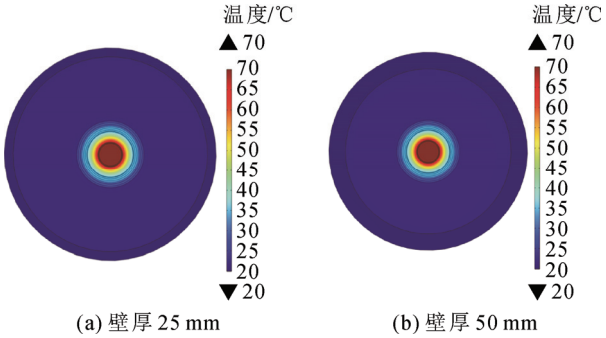
Fig.9　Steady-state ampacity versus J-tube dimensional parameters (below the sea level)



(a) 外径 400 mm　(b) 外径 650 mm

图 10　J 型管壁厚为 25 mm 时海缆在 J 型管段的温度分布(海面之下)

Fig.10　Temperature distribution of the submarine cables in the J-tube with a wall thickness of 25 mm (below the sea level)



(a) 壁厚 25 mm　(b) 壁厚 50 mm

图 11　J 型管外径为 600 mm 时海缆在 J 型管段的温度分布(海面之下)

Fig.11　Temperature distribution of the submarine cables in the J-tube with an outer diameter of 600 mm (below the sea level)

3.2 电缆沟敷设方式

3.2.1 电缆沟埋深

在环境温度为 20 ℃的自然对流条件下，通过改变电缆沟盖板到地表土壤之间的距离来模拟电缆沟埋深的变化。以埋深 30 cm 为初始距离，埋设深度每增加 10 cm 记录 1 次稳态载流量，计算结果如图 12 所示。从图 12 可以看出，随着深度的增加，稳态载流量数值逐渐下降。当埋深为 30 cm 时，稳态载流量为 2480 A；当埋深为 80 cm 时，稳态载流量已经下降至 2440 A，整体下降了约 1.6%。从图 13 不同埋深下的空气流速分布可以看出，电缆沟中部以及电缆沟四壁空气流速较大，海缆产生的热量一部分通过盖板传递到地表土壤中，与外部空气形成对流传热，另一部分通过电缆沟壁扩散到环境土壤中。当埋深为 30 cm 时，空气流速最大值为 0.19 m/s，计算得出空气流速平均值为 0.093 m/s；当埋深为 80 cm 时，虽然空气最大流速达到 0.18 m/s，但是平均流速下降至 0.088 m/s。电缆产生的热量通过电缆沟内部的空气对流换热传递到土壤，随着埋深的增加，在土壤热阻系数不变的情况下，散热过程中所经过土壤的热阻增加[16]，地表自然对流对散热的影响减弱，内部空气流速降低，从而导致稳态载流量降低。同时，考虑到电缆沟敷设段是长距离输电，挖掘较深沟道的人工成本较大，因此综合来看，选择电缆敷设深度时宜浅不宜深[25]。

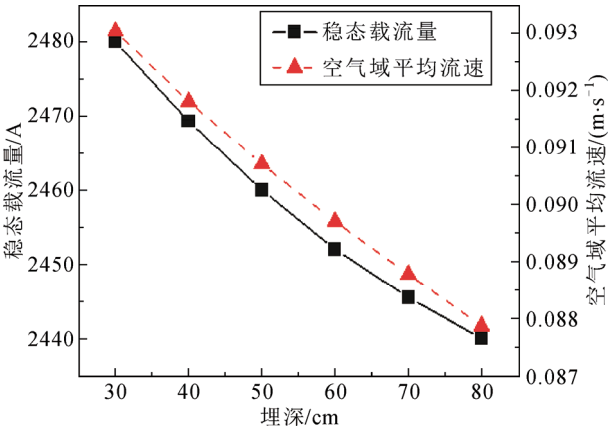


图 12 电缆稳态载流量与电缆沟埋深的关系

Fig.12 Steady-state ampacity of the cables versus the cable trench depth

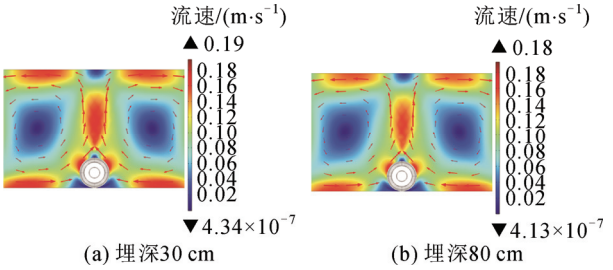


图 13 不同埋深下的空气流速分布

Fig.13 Distribution of the air flow rate at different depths

3.2.2 空气域截面尺寸

在电缆沟中，海缆主要通过周围空气与外部环境进行对流换热，因此散热空间的尺寸在一定程度上影响稳态载流量的大小。保证环境温度为 20 ℃且埋深为 30 cm 的条件不变，使空气域截面尺寸等比例扩大，研究散热空间尺寸对于稳态载流量的影响，计算结果如图 14 所示。

从图 14 可以看出，空气域截面尺寸的增加会使稳态载流量得到提升。当空气域截面尺寸为 946 mm×500 mm 时，稳态载流量仅为 2334 A；当截面尺寸增加到 1185 mm×625 mm 时，稳态载流量提升至 2430 A，相比之下提高了 96 A。随着空气域截面尺寸的增加，稳态载流量的增幅不断减小，稳态载流量呈现先增加后趋于平稳的趋势，表明空气域截面积的增大对稳态载流量的提高是有限的。从图 15 不同空气域截面尺寸下的空气流速分布可以看出，随着空气域截面尺寸的增加，空气域中低流速区域面积逐渐减小，这是由于散热空间增大，空气得到充分流动，这种变化提升了电缆沟内空气的散热效果。电缆沟空间受限，由于受到电缆本体与电缆沟壁位置的约束，自然对流过程形成环状流动，换热过程与两壁面的相对位置密切相关，但随着空气域截面积的增大，空间大小对散热过程的影响效果逐渐减弱，因此稳态载流量的增长趋势逐渐放缓。

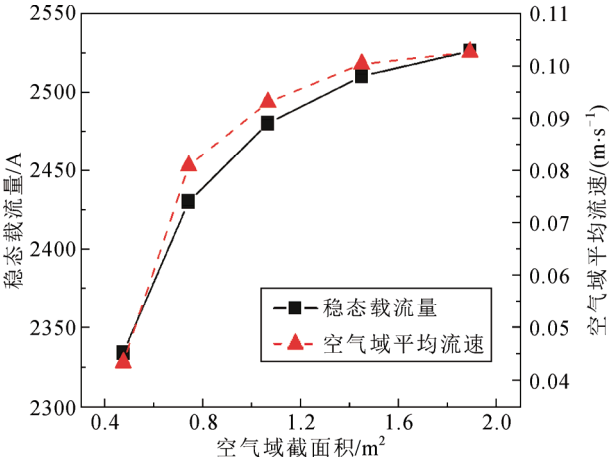
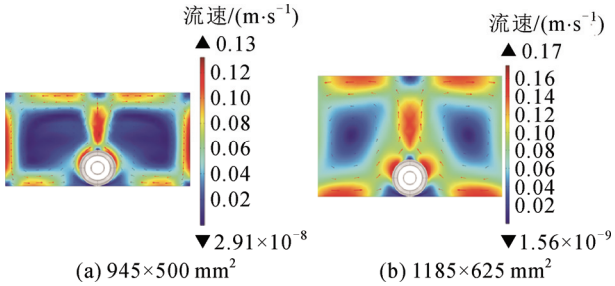


图 14 电缆稳态载流量与电缆沟空气域截面积的关系

Fig.14 Steady-state ampacity of the cables versus cross-sectional area of the air domain in the cable trench



(a) 945×500 mm²　(b) 1185×625 mm²

图 15　不同空气域截面尺寸下的空气流速分布

Fig.15　Distribution of the air flow rate for different air domain sizes

3.2.3　材料热导率

海缆产生的热量与周围空气发生对流换热，在电缆沟壁以及环境土壤中发生热传导。固体材料的热导率决定了热量传递的能力，从而影响散热过程。因此，有必要分析电缆沟材料和回填材料的热导率对稳态载流量的影响[18]。保证环境温度为 20℃且埋深为 30 cm 的条件不变，分别改变回填材料和电缆沟材料，电缆稳态载流量的变化如表 2 和表 3 所示。

从表 2 可以看出，与采用混凝土和砖砌体作为电缆沟材料相比，采用高导热系数的钢筋混凝土提高了稳态载流量。由于电缆沟尺寸不变，对流换热面积不变，且电缆沟并非与海缆直接接触，因此单纯提高电缆沟材料的导热系数对于稳态载流量的提升有限。

从表 3 可以看出，回填材料的导热系数越大，海缆产生的焦耳热消散速度越快，减少热量堆积的效果越好[16]，稳态载流量提升越明显。在相同条件下，回填材料采用夯实黏土时的稳态载流量比采用轻质黏土时的稳态载流量提高了约 5.4%。在实际工程上，在考虑成本的基础上应选用导热系数较高的回填材料。

3.3　隧道敷设方式

3.3.1　电缆纵向排列

在隧道敷设段，取 2 根直流陆缆布置在电缆舱室中，探究不同排列方式对电缆稳态载流量的影响。在环境温度 20 ℃不变的情况下，固定 1 根直流电缆在右侧隧道壁，改变 2 根电缆的纵向间距，计算稳态载流量，仿真结果如图 16 和图 17 所示。

由图 16 和图 17 可知，随着电缆间距的增加，稳态载流量逐渐降低，由于电缆产生焦耳热，空气受热向上流动，因此电缆舱室内部上方空气的温度高于下方空气的温度。由于在仿真过程中是通过抬高上方电缆来改变电缆间距，因此电缆纵向间距越大，上方电缆所处位置越高，周围空气温度越高。由此可知，温度最大值总是出现在上方电缆缆芯处，说明上方电缆总要比下方电缆更早达到 70 ℃临界值。

表 2　不同电缆沟材料下的稳态载流量

Table 2　Steady-state ampacity of the cables with different cable trench materials

材料	导热系数/(W·m⁻¹·K⁻¹)	密度/(kg·m⁻³)	载流量/A
钢筋混凝土	1.74	2500	2480
混凝土	1.50	2400	2465.2
砖砌体	0.81	1800	2397

表 3　不同回填土下的稳态载流量

Table 3　Steady-state ampacity of the cables under different backfills

材料	导热系数/(W·m⁻¹·K⁻¹)	密度/(kg·m⁻³)	载流量/A
夯实黏土	1.16	2000	2480
加草粘土	0.76	1600	2429
建筑用砂	0.58	1600	2388
轻质粘土	0.47	1200	2352

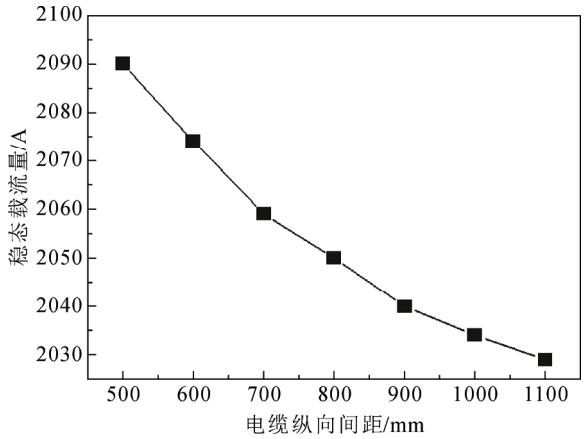
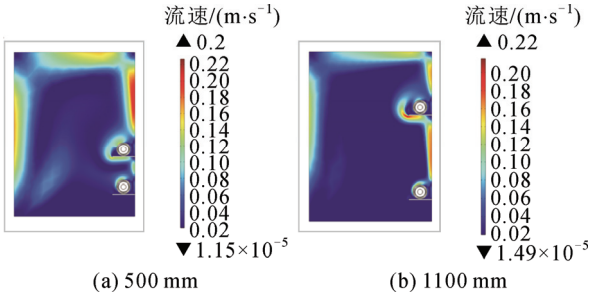


图 16　电缆稳态载流量与电缆纵向间距的关系

Fig.16　Steady-state ampacity of the cables versus longitudinal cable spacing



(a) 500 mm　(b) 1100 mm

图 17　不同电缆纵向间距下的空气流速分布

Fig.17　Distribution of the air flow rate for different longitudinal cable spacing

3.3.2 电缆横向排列

将电缆的排列方式由纵向排列改为横向排列，并保证 2 根电缆之间的距离为 1100 mm 不变，空气流速分布仿真结果如图 18 所示。由计算结果得出，电缆横向排列时的稳态载流量要比纵向排列时的高 71 A。由图 17(b）和图 18 可知，横向排列情况下空气流速最大值高于纵向排列，且横向分布情况下高流速区域面积更大，说明此时空气流动散热效果更好，有利于稳态载流量的提高。对隧道内部空气流速平均值进行计算也印证了这一结果，即当 2 根电缆纵向排列时，隧道内部平均空气流速为 0.03 m/s，而当 2 根电缆横向排列时，隧道内部平均空气流速为 0.1 m/s。

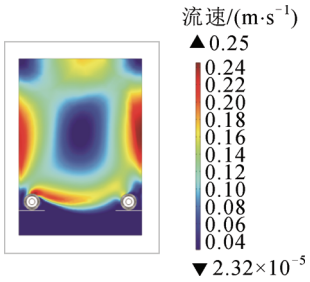


图 18 电缆横向排列且间距为 1100 mm 时的空气流速分布

Fig.18 Distribution of the air flow rate when the cables are arranged laterally and the spacing is 1100 mm

无论是横向排列还是纵向排列，2 根电缆均置于撑台之上且在电缆舱室中处于悬空的状态。由于电缆一部分热量通过撑台和隧道壁传递到外界土壤当中，而悬空状态下撑台与隧道壁接触面积小，导致热量传递慢，从而使计算得到的稳态载流量偏低。因此，仿真计算 2 根电缆对称排列置于隧道地面的情况，并改变它们与隧道壁之间的间距，仿真结果如图 19 和图 20 所示。

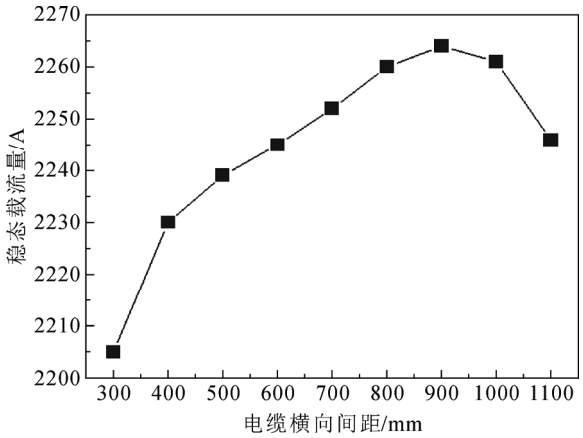


图 19 电缆稳态载流量与电缆横向间距的关系

Fig.19 Steady-state ampacity of the cables versus lateral cable spacing

由图 19 可知，随着 2 根电缆离壁距离的增加，即 2 根电缆之间距离的减小，稳态载流量呈现先增大后减小的趋势，当电缆间距为 900 mm 时，稳态载流量达到最大值 2264 A。如图 20 所示，当电缆间距较大，即离壁距离较近时，电缆与隧道壁之间的空气流速较低。可能由于供给散热的空气不足，循环的空气不足以及时带走热量，导致稳态载流量稍低。随着电缆间距减小，这种情况有所改善，电缆稳态载流量得到提升。同时，由于 2 根海缆在隧道段平行放置，电流流过电缆时产生焦耳热，2 根电缆相当于 2 个热源，当 2 根电缆间距继续减小时，海缆之间的相互影响作用增强，使得缆芯温度更容易到达 70 ℃，从而导致电缆稳态载流量降低。

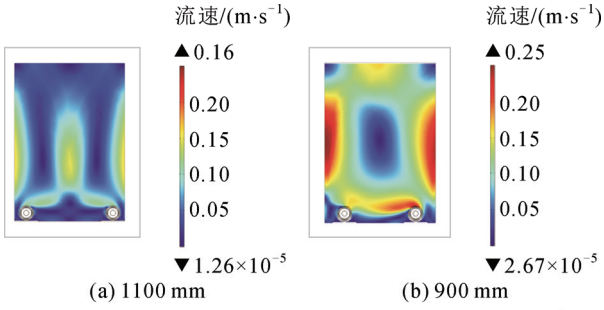


图 20 2 根电缆置于地面时不同电缆横向间距下的空气流速分布

Fig.20 Distribution of the air flow rate for different cable lateral spacing when the two cables are placed on the ground

3.4 瓶颈段通风

3 种敷设方式下电缆稳态载流量对比结果如图 21 所示。

由图 21 可以看出，由于海水良好的散热能力，当 J 型管位于海面之下时，电缆稳态载流量数值明显高于其他 2 种敷设方式及 J 型管位于海面之上时的稳态载流量值。相比于 J 型管和电缆沟敷设方式，隧道敷设环境下电缆的稳态载流量最低，因此可以认为隧道段为海缆敷设段的瓶颈段。在隧道封闭敷设环境内，空气流动对电缆散热起到了积极的作用[14]。可以通过添加通风设施来改善散热环境，从而降低缆芯的温度，提高其稳态载流量。设置环境温度为 20 ℃，2 根直流电缆置于隧道地面，电缆间距为 900 mm，入口风速范围为 0.25~2.5 m/s，空气流动方向与电缆轴向平行。隧道通风过程如图 22 所示，仿真计算结果如图 23—图 25 所示。

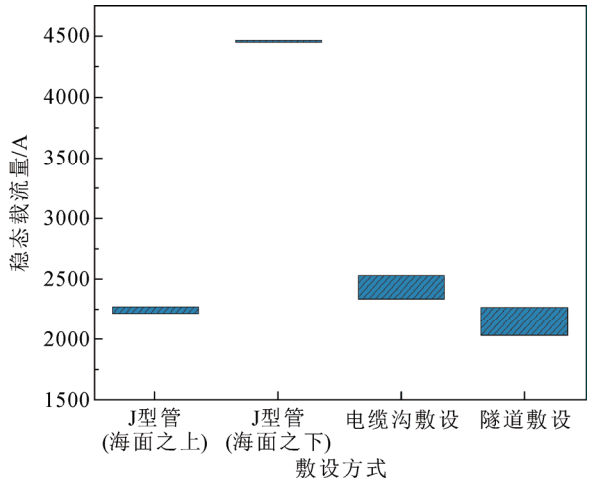


图 21　不同敷设方式下稳态载流量对比

Fig.21　Comparison of steady-state ampacity in different laying methods

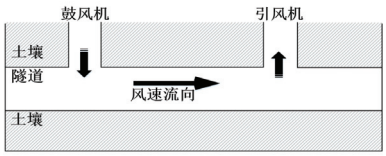


图 22　隧道通风过程示意图

Fig.22　Diagram of the tunnel ventilation process

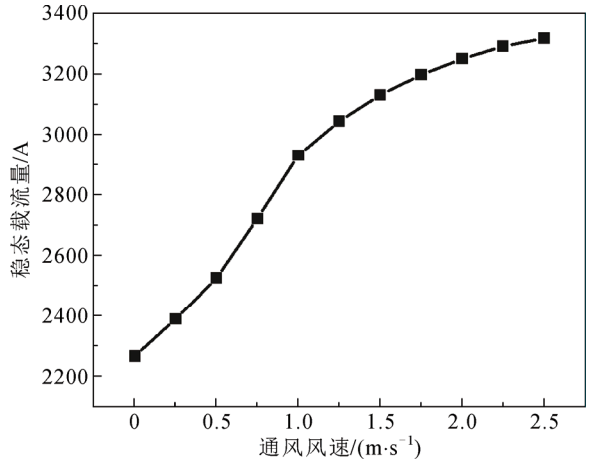


图 23　电缆稳态载流量与通风风速的关系

Fig.23　Steady-state ampacity of the cables versus the ventilation wind speed

由图 23 可知，随着风速的增加，稳态载流量呈现升高的趋势，但增长趋势逐渐放缓，最后趋于平稳。当通风风速为 0.25 m/s 时，稳态载流量提升至 2387 A；当通风风速为 2.5 m/s 时，稳态载流量达到 3318 A，与未添加通风设施时相比提升了 46.6%。总体而言，由于隧道内部通风的作用，电缆稳态载流量得到大幅度提升。由图 24 和图 25 可以看出，空气由入口到出口的流动带走了电缆产生的热量，隧道内部温度接近环境温度。随着通风风速的增加，当缆芯温度达到 70 ℃时，电缆本体温度明显下降，说明通风改善散热效果显著。隧道段是海缆线路稳态载流量的瓶颈段，在实际应用中，需合理选择通风设备以改善隧道散热环境，从而使整条输电线路利用效率最大化。

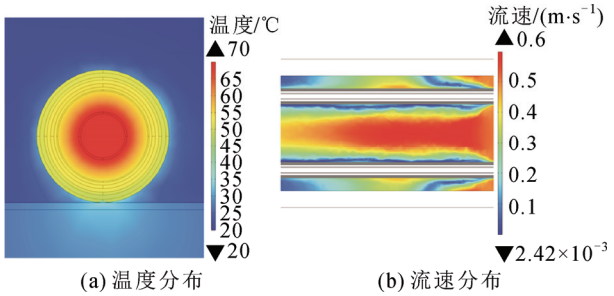


图 24　通风风速为 0.5 m/s 时的仿真结果图

Fig.24　Simulation results at a ventilation air speed of 0.5 m/s

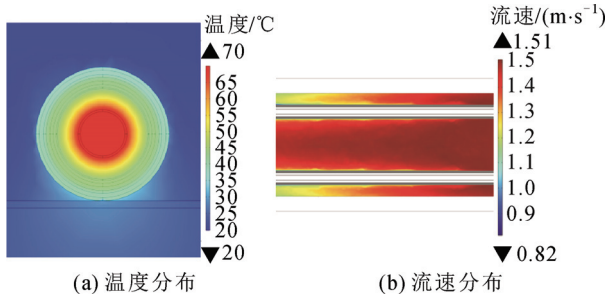


图 25　通风风速为 1.5 m/s 时的仿真结果图

Fig.25　Simulation results at a ventilation air speed of 1.5 m/s

4　结论

1）在 J 型管敷设段，J 型管管壁厚度的减小和外径的增加都可以提高稳态载流量数值。由于海水散热效果优于空气，当 J 型管位于海面之下时，海缆稳态载流量明显高于 J 型管位于海面之上的情况，且此时改变 J 型管壁厚和外径，稳态载流量的变化幅度比 J 型管位于海面之上的情况小。

2）在电缆沟敷设段，减小电缆沟埋深、增加空气域截面尺寸、选择导热系数高的电缆沟材料和回填材料均可有效提升稳态载流量，但是考虑到工程效益等问题，应对电缆沟尺寸参数和材料进行合理选择。

3）在隧道敷设段，探究了电缆排列方式对稳态载流量的影响。当 2 根海缆横向排列置于地面且

间距为 900 mm 时，稳态载流量达到最大值 2264 A。通过对瓶颈段即隧道敷设段设置通风设施，稳态载流量可提升 46.6%以上。

参考文献 References

[1] 陈 东，乐 波，梅 念，等. ±320 kV 厦门双极柔性直流输电工程系统设计[J]. 电力系统自动化，2018，42(14)：180-185.
CHEN Dong, YUE Bo, MEI Nian, et al. System design of Xiamen bipolar VSC-HCDC transmission project[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 180-185.

[2] 李亚男，蒋维勇，余世峰，等. 舟山多端柔性直流输电工程系统设计[J]. 高电压技术，2014，40(8)：2490-2496.
LI Ya'nan, JIANG Weiyong, YU Shifeng, et al. System design of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2490-2496.

[3] 黄润鸿，朱 喆，陈 俊，等. 南澳多端柔性直流输电工程高压直流断路器本体故障控制保护策略研究及验证[J]. 电网技术，2018，42(7)：2339-2345.
HUANG Runhong, ZHU Zhe, CHEN Jun, et al. Research and experimental validation of control and protection strategy of HVDC circuit breaker in fault condition application in Nan'ao multi-terminal VSC-HVDC system[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2339-2345.

[4] 王裕霜. 国内外海底电缆输电工程综述[J]. 南方电网技术，2012，6(2)：26-30.
WANG Yushuang. Review on submarine cable projects for power transmission worldwide[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(2): 26-30.

[5] 张 杰，赵学童，边浩然，等. 电荷陷阱对 XLPE 绝缘电老化特性的影响[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2991-3000.
ZHANG Jie, ZHAO Xuetong, BIAN Haoran, et al. Effect of charge traps on electrical aging of XLPE insulation[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2991-3000.

[6] 严有祥，方晓临，张伟刚，等. 厦门±320 kV 柔性直流电缆输电工程电缆选型和敷设[J]. 高电压技术，2015，41(4)：1147-1153.
YAN Youxiang, FANG Xiaolin, ZHANG Weigang, et al. Cable section and laying of Xiamen ±320 kV flexible DC cable transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1147-1153.

[7] 张洪亮，尹 毅，谢书鸿，等. 不同金属屏蔽形式 XLPE 高压直流电缆载流量计算与试验验证[J]. 高电压技术，2021，47(6)：2117-2123.
ZHANG Hongliang, YIN Yi, XIE Shuhong, et al. Calculation and testing research on current rating capacity of XLPE insulated HVDC cable with different metallic screen type[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2117-2123.

[8] International Electrotechnical Commission. Electric cables-calculation of the current rating - Part 2-1: thermal resistance-calculation of thermal resistance: IEC 60287-2-1—2015[S]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2015.

[9] 刘毅刚，罗俊华. 电缆导体温度实时计算的数学方法[J]. 高电压技术，2005，31(5)：52-54.
LIU Yigang, LUO Junhua. Mathematical method of temperature calculation of power cable conductor in real time[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(5): 52-54.

[10] 陈向荣，王启隆，于竞哲，等. 10 kV 交流 XLPE 电缆在不同直流拓扑结构和敷设方式下的直流载流量仿真研究[J]. 高电压技术，2021，47(11)：4044-4054.
CHEN Xiangrong, WANG Qilong, YU Jingzhe, et al. Simulation research on DC ampacity of 10 kV AC XLPE cable under different DC operation topologies and laying modes[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 4044-4054.

[11] ZHANG L Q, HE Y F, LIU Y C, et al. Temperature analysis based on multi-coupling field and ampacity optimization calculation of shore power cable considering tide effect[J]. IEEE Access, 2020, 8: 119785-119794.

[12] KOROVKIN N, GRESHNYAKOV G, DUBITSKY S. Multiphysics approach to the boundary problems of power engineering and their application to the analysis of load-carrying capacity of power cable line[C]// 2014 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference. Rakvere, Estonia: IEEE, 2014: 341-346.

[13] 乐彦杰，孙 璐，彭维龙，等. 典型交流高压海缆工程载流量瓶颈分析与仿真研究[J]. 高压电器，2022，58(1)：70-78.
LE Yanjie, SUN Lu, PENG Weilong, et al. Analysis and simulation research on current carrying capacity bottleneck of typical AC high-voltage submarine cable project[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(1): 70-78.

[14] 李 萌，牛胜锁，刘玉芹，等. 基于多场耦合模型的海底电缆载流量和温度场计算研究[J]. 电测与仪表，2018，55(8)：12-16，23.
LI Meng, NIU Shengsuo, LIU Yuqin, et al. Calculation of temperature distribution and ampacity for submarine cables based on multi-physics field coupling model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(8): 12-16, 23.

[15] ZHANG Y Y, CHEN X M, Zhang H, et al. Analysis on the temperature field and the ampacity of XLPE submarine HV cable based on electro-thermal-flow multiphysics coupling simulation[J]. Polymers, 2020, 12(4): 952.

[16] 胡列翔，欧阳本红，刘宗喜，等. 交流 500 kV 海底电缆登陆段载流能力提升[J]. 高电压技术，2019，45(11)：3421-3428.
HU Liexiang, OUYANG Benhong, LIU Zongxi, et al. Improvement in current carrying capacity of landing section of AC 500 kV submarine cable[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3421-3428.

[17] 张松光，郭旭敏，张畅生，等. 不同敷设环境下高压直流海缆的温度场分析[J]. 广东电力，2016，29(1)：102-107.
ZHANG Songguang, GUO Xumin, ZHANG Changsheng, et al. Analysis on temperature field of high voltage DC submarine cable in different laying environment[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(1): 102-107.

[18] DE LEON F, ANDERS G J. Effects of backfilling on cable ampacity analyzed with the finite element method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 537-543.

[19] 王雅妮，张洪亮，吴建东，等. 不同敷设方式下高压直流电缆温度场与电场仿真计算研究[J]. 绝缘材料，2017，50(7)：71-78.
WANG Yani, ZHANG Hongliang, WU Jiandong, et al. Simulation and calculation of temperature field and electric field distribution of HVDC cable under different laying modes[J]. Insulating Materials, 2017, 50(7): 71-78.

[20] 杨其鹏. 考虑不同接头影响下的海底电缆温度场分析与载流量计算[D]. 重庆：重庆大学，2017.
YANG Qipeng. Analysis of temperature field and calculation of ampacity of submarine power cable considering different joints[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2017.

[21] 朱文卫，郭耀栋，许志锋，等. 基于三维热流耦合仿真的登杆电缆载流量计算[J]. 广东电力，2021，34(6)：137-144.
ZHU Wenwei, GUO Yaodong, XU Zhifeng, et al. Ampacity calculation of vertical tube cable based on three-dimensional heat-fluid coupling simulation[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(6):

137-144.

[22] 崔戎舰，肖　湃，吴高波，等. 直流±250 kV 海底电缆 J 型管段载流量提升研究[J]. 高压电器，2022，58(1)：61-69.
CUI Rongjian, XIAO Pai, WU Gaobo, et al. Study on current-carrying improvement of J-tubes section of ±250 kV DC submarine cable[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(1): 61-69.

[23] 游　磊. 海上风电场送出海缆载流量瓶颈区段与提升方法研究[D]. 广州：华南理工大学，2018.
YOU Lei. Study on bottleneck sections and improvement methods of ampacity of export submarine cable in offshore wind farms[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2018.

[24] 苏　荣，元国凯. 海上风电场海底电缆防护方案研究[J]. 南方能源建设，2018，5(2)：121-125.
SU Rong, YUAN Guokai. Protection schemes of submarine power cables in offshore wind farm[J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(2): 121-125.

[25] 王彦楠，李　铮，杨鹏飞，等. 基于电磁热多场耦合的直埋电缆导体温度与载流量计算[J]. 计量学报，2022，43(7)：877-884.
WANG Yannan, LI Zheng, YANG Pengfei, et al. Calculation of conductor temperature and ampacity of directly buried cable based on electromagnetic thermal multi field coupling[J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(7): 877-884.



QIAO Jingqi

乔镜琪
1999—，女，硕士生
主要从事 XLPE 电力电缆绝缘性能测试与评估
E-mail: 202111131187@stu.cqu.edu.cn



ZHAO Xuetong
Post-doctorate
Professor
Corresponding author

赵学童(通信作者)
1984—，男，博士(后)，教授，博导
主要从事新型电工材料和绝缘检测技术的研究
E-mail: zxt201314@cqu.edu.cn

收稿日期　2022-09-05　修回日期　2022-11-08
编辑　张　准　余洋洋