

海底电缆J型管段载流量多物理场仿真研究

邹丹丹¹, 彭新毅¹, 余金祥¹, 邵戎², 袁佳歆³

(1. 华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 中国电建集团江西省电力设计院有限公司, 江西 南昌 330096;
3. 武汉大学, 湖北 武汉 430072)

摘要:作为海上风电场重要的输电装备之一,海底电缆途经J型管段、海底段、滩涂段和登陆段这四个区域,其中J型管段周围环境复杂多变,载流量随环境变化影响颇大,同时介于海水与空气间的J型管道易引起海洋生物的附着,影响J型管内海底电缆的载流量。文中以海上风电常用的35 kV三芯铜芯交联聚乙烯海底电缆为研究对象,采用多物理场仿真建立海底电缆J型管段敷设环境下模型,研究海底电缆J型管段载流量数值,分析这两个区段载流量的影响因素。利用有限元方法建立了电磁-热-流耦合三维仿真模型,对比分析不同敷设条件下的载流量,研究了J型管几何结构和管外环境变化对载流量的影响规律。

关键词:海底电缆; J型管段; 载流量

中图分类号: TM 75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-348X(2025)03-0048-07

0 引言

随着经济的快速发展和城市化进程的持续推进,社会用电需求显著增加,跨海输电的需求也日益迫切^[1]。“十四五”规划中提出要推进能源革命,构建现代化能源体系,大力发展风电、光伏发电,有序发展海上风电^[2]。海底电缆作为海上风电工程的重要组成部分,不仅能够为岛屿与岛屿之间供电,还能将近海风电场的发电输送至内陆地区。随着海上风电产业的快速扩张,海底电缆受到了各界的广泛重视^[3]。

海上输电方式主要依靠海底电缆进行配送,海上风电的配电结构由升压站平台开始,经过J型管段、海底段、滩涂段、登入段最后进入陆上终端站,不同区段具有不同的敷设环境,导致不同的区段载流量不尽相同^[4-7]。海缆系统各区段通常使用相同规格的海底电缆,这样可以避免中间接头,海底电缆敷设的不同区域段中,任何一段载流量的不足都会影响到整条线路的输送能力,据此采用简单的增大海底电缆截面这种方法,将会极大地增加投资^[8]。海底电缆J型管段的运行载流量最低,成为了海底电缆电力输送区域的瓶颈段。

为提升海上风电场整条线路的最大输电能力,有必要对海底电缆敷设区段的J型管段载流量进行研究,分析对载流量的影响因素,并提出相应的载流量提升方法,同时为海底电缆线路运行的安全性、可靠性和稳定性提供保证。

早在1983年,A.E.Kennely对地下电缆载流量计算提出了相应的方法;J.H.Neher^[9]与M.H.Mcgrath^[10]对之前理论进行了进一步的研究,经过完善形成N-M理论。国际电工委员会(IEC)成立的工作小组基于上述研究结果,发布了第一个版本IEC-60287标准^[11]。利用IEC-60287标准求解海底电缆载流量简单方便,是国内外对载流量计算的一种常用的方法,受到了国内外学者的广泛使用;孟凡凤等人^[12]在IEC-60287标准的基础上,研发了一款以图形化的方式对电力电缆载流量计算的软件;刘士利等人^[13]采用解析法和数值法,对空气中敷设66 kV电压等级电缆的直流载流量进行计算,验证了解析法和数值法的可行性;唐铭^[14]利用CDEGS仿真软件建立海洋直流接地极和海底电缆的仿真模型;Zhang Y^[15]利用COMSOL软件研究了不同铺设方式、海水速度、海水温度、铺设深度和土壤热导率对海底电缆温度和载流量的影响;

收稿日期:2024-12-18

基金项目:江西省自然科学基金杰出青年项目(低温螺旋等离子体射流单一手性合成机制及调控方法,20242BAB23043)。

作者简介:邹丹丹(1985),男,博士,副教授,主要从事高电压工程、放电等离子方向研究。

吴冰洁等人^[16]基于有限元法,搭建了海底电缆的电磁-热-流多物理场耦合模型,得到降低频率可有效提高海缆载流量;李根等人^[17]基于热分析法提出了J型管段海底电缆径向-轴向传热解析模型,同时基于有限元法建立海底电缆J型管系统三维热-流耦合数值模型;Chippendale 等人^[18]提出了一种新的二维分析方法,并对比了三维仿真下J型管段的空气段载流量;游磊^[19]为提升海上风电场送出海底电缆载流量,采用2D热路法、quasi-3D热路法、有限元法和结合计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)的热-流耦合仿真法对J型管段载流量进行了研究。

综上所述,J型管段是海底电缆的瓶颈段。对于J型管段,目前国内的研究较少,国内学者主要研究的为直流单芯海底电缆。文中以35 kV三芯海底电缆为研究对象,截面如图1所示,采用多物理场仿真对海底电缆J型管段载流进行研究,分析影响海底电缆瓶颈段载流量的影响因素,提出提升载流量意见,为海底电缆的选型提供参考,提升海底电缆允许的安全性。

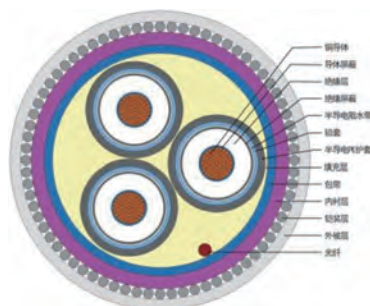


图1 三芯海底电缆截面

1 J型管段结构与热路分析

1.1 J型管段引入结构与简化模型

海上风电场送出的海底电缆路径中,其引入海上平台结构示意图如图2(a)所示。一般海洋工程中的海上构筑物都为桩基础支撑的海上平台,其主要的工作/生活区域都集中在距海平面最高达到十多米的平台上,海底电缆需要从距海底泥/沙面以下数米深的地底经过一条垂直的通道引入至海上平台中,因电缆引上平台的管道形似英文字母“J”,所以海上平台的引上管道都称之为J型管。

J型管段海底电缆所处环境与其它区段相差非常

大,海底电缆在引入至海上平台的路径上,会面临海洋中水流的冲刷以及水流中夹带的泥沙对海底电缆表面的摩擦等作用,影响到海底电缆的安全。因此,海底电缆往往通过钢制的管道引入至海上平台,钢管悬挂在海水之中,而一部分垂直于海平面的管道则暴露在空气当中。

为更好的研究J型管段载流量,对J型管段模型进行简化以减少计算量,进行以下几点假设:

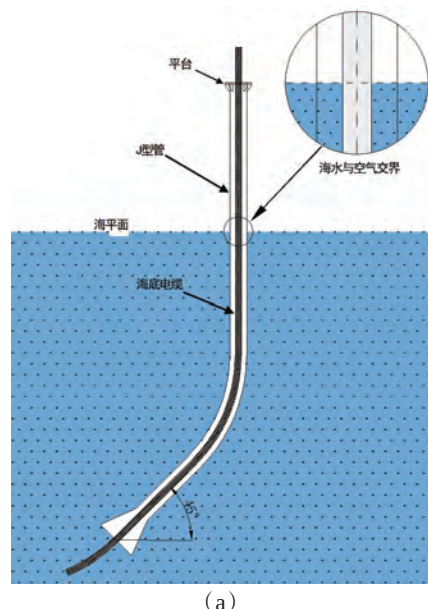
1) 对海底电缆在海水段中的管道弯曲部分作简化处理,原因是弯曲的管道对载流量的影响微乎其微,可视为整个J型管段的管道是垂直于海平面,海底电缆居于管道的中心位置。

2) 平台的厚度远小于海底电缆J型管段的长度,对整段的载流量影响很小,可以忽略不计,可将模型中的平台视为在J型管段上的封闭层。

3) 海底电缆中导体屏蔽、绝缘层、绝缘屏蔽、半导体阻水带、聚乙烯(polyethylene, PE)护套、包带、内衬层、外被层等结构均为非金属材料,对载流量几乎无影响,可以将上述这些材料与PE填充进行合并。

4) 海水中的导热性要比空气段好,海水段管道与海底电缆间温差也小,因此忽略管道与海底电缆间海水的自然对流,可将其视为固体看待。

简化的海上升压站J型管段几何构造示意图如图2(b)所示,采用有限元法对海底电缆J型管段的载流量和温度场进行计算,需建立J形管段的热路模型和仿真模型,为简化模型以减少计算量。



(a)

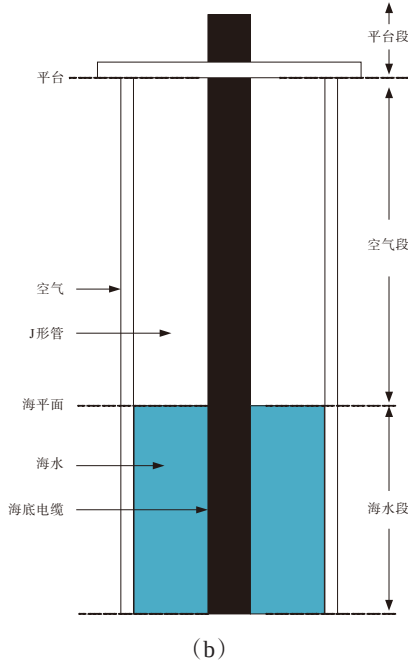


图2 海底电缆从J型管道引入海上平台以及简化后J型管几何构造

1.2 J型管段不同区段热路分析

整个J型管段由平台段、空气段和海水段构成,分别研究分析空气段、平台段和海水段的径向热路模型,通过设定一个导体轴向热阻将三者联系起来,然后在三段导体施加相同电流,直到整个J型管段导体最高温度达到限定值,这时的电流值即为所求载流量,且同时得到了整个J型管段导体的温度分布。J型管段包含的平台段、空气段和海水段的径向热路模型如图3所示,图中 T_1 为三相导体和金属铅护套之间的总热阻; T_2 为金属铅护套和铠装钢丝之间的总热阻; T_3 为外护套热阻; W_c 、 W_d 、 W_s 、 W_o 分别为导体层、绝缘层、金属护套和铠装层的损耗。

平台段的热路模型如图3(a)所示,图中 q_{total} 为海底电缆的总损耗, q_{con_ext} 和 q_{rad_ext} 分别为海底电缆外壁向外界环境的对流和辐射传热量, q_{solar} 为海底电缆外壁所吸收的太阳辐射量。

空气段和海水段的热路模型分别对应图3(b)和图3(c),图中 q_{total} 为海底电缆在对应区段的总损耗,管道与海底电缆间海水的自然对流忽略不计,将 T_{water} 视为海水段管道与海底电缆间海水的径向等效热阻, T_{tube} 为该区段管道的热阻, q_{con_int} 为海底电缆外壁与管道内壁间的对流换热量, q_{rad_int} 为管道外壁与管

道内壁间的净辐射热通量, q_{con_ext} 和 q_{rad_ext} 分别为管道外壁向外界环境的对流和辐射传热量, q_{solar} 为管道外壁所吸收的太阳辐射量。

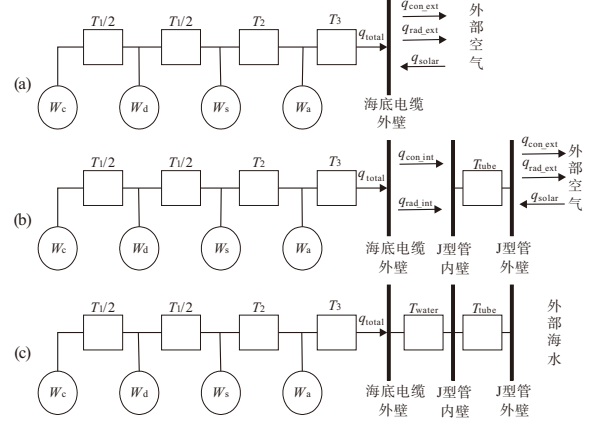


图3 J型管段不同区段热路模型

图3(b)中热阻 T_{tube} 的计算如式(1)所示:

$$T_{tube} = \frac{1}{2\pi} \rho_{tube} \ln \left(\frac{D_0}{D_d} \right) \quad (1)$$

式中: ρ_{tube} —管道材料热阻系数; D_0 —管道的外径; D_d —管道的内径。

图3(c)中热阻 T_{water} 的计算如式(2)所示:

$$T_{water} = \frac{U}{1 + 0.1(V + Y\theta_m)D_e} \quad (2)$$

式中: U 、 V 、 Y 分别为不同敷设条件下的常数值,文中所研究的海底电缆 U 、 V 、 Y 的值可分别取5.2、1.4、0.011; θ_m —海底电缆与管道间介质的平均温度; D_e —海底电缆成缆的直径。

热路模型中热平衡方程如式(3)所示:

$$\begin{aligned} q_{total} &= q_{con_int} + q_{rad_int} \\ q_{total} + q_{solar} &= q_{con_ext} + q_{rad_ext} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: q_{con_int} 正比于海缆外壁(θ_c ,K)和管道内壁(θ_i ,K)的温度差,其计算公式如式(4)所示:

$$q_{con_int} = h_{con_c} A_c (\theta_c - \theta_i) \quad (4)$$

式中: h_{con_c} —海底电缆表面的平均对流换热系数; A_c —单位长度海底电缆的表面积。式(4)中,对流换热系数 h_{con_c} 的计算公式如下:

$$\begin{cases} h_{con_c} = \frac{Nu\lambda}{\delta_{gap}} \\ Nu = 0.188Ra^{0.322} AR^{0.238} K^{0.442} \\ Ra = \frac{Pr g \beta (\theta_c - \theta_i) \delta_{gap}^3}{v^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: Nu —密闭空间内空气的努塞尔数; λ —空气

的导热系数; δ_{gap} —管道内壁的半径与海底电缆成缆的半径差; Ra —密闭空间内空气的瑞利数; AR —密闭空间的高度与宽度比,可由空气段长度与 δ_{gap} 的比计算; K —密闭空间体的半径比,可由管道内径与海底电缆外径的比计算; Pr —空气的普朗特数; g —重力加速度; β —空气的热膨胀系数; ν —空气的运动粘度。

式(3)中 $q_{\text{rad-int}}$ 的计算公式如下:

$$q_{\text{rad-int}} = F_{\text{con-in}} A_c (\theta_c - \theta_i) \quad (6)$$

式中: $F_{\text{con-in}}$ —辐射形状因子,它与海底电缆外壁和管道内壁的反射率、发射率和表面积等因素相关。

$q_{\text{con-ext}}$ 和 $q_{\text{rad-ext}}$ 与管道外壁(θ_j, K)和环境空气(θ_{air}, K)的温度差成正比,其计算公式如下:

$$\begin{cases} q_{\text{con-ext}} = h_{\text{con-j}} A_j (\theta_j - \theta_{\text{air}}) \\ q_{\text{rad-ext}} = \varepsilon_j \sigma A_j (\theta_j - \theta_{\text{air}}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $h_{\text{con-j}}$ —管道外壁的对流换热系数; A_j —单位长度管道的表面积; ε_j —管道外壁的发射率; σ —Stefan-Boltzmann常数。

空气段中的导体温度分布如下所示:

$$\theta_a(z_a) = \theta_c - c_1 \frac{e^{-Bz_a}}{Be^{BL_a/2}} - c_2 \frac{e^{Bz_a}}{Be^{BL_a/2}}, -\frac{L_a}{2} \leq z_a \leq \frac{L_a}{2} \quad (8)$$

$$c_1 = \left(\frac{\partial \theta_a}{\partial z_a} \right) \bigg|_{z_a = -L_a/2} + \frac{\partial \theta_a}{\partial z_a} \bigg|_{z_a = -L_a/2} \cdot e^{-BL_a} / (1 - e^{-2BL_a}) \quad (9)$$

$$c_2 = \left(\frac{\partial \theta_a}{\partial z_a} \bigg|_{z_a = -L_a/2} \cdot e^{-BL_a} + \frac{\partial \theta_a}{\partial z_a} \bigg|_{z_a = L_a/2} \right) / (1 - e^{-2BL_a}) \quad (10)$$

$$B = \sqrt{T_L (T_1 + T_2 + T_3 + T_{\text{air}} + T_{\text{tube}})^{-1}} \quad (11)$$

$$T_L = \frac{1}{\lambda_{\text{con}} A_{\text{con}}} \quad (12)$$

$$T_{\text{air}} = \frac{\theta_c - \theta_i}{q_{\text{total}}} \quad (13)$$

式中: θ_a —海底电缆导体轴向温度; z_a —空气段中导体的垂直位置坐标; θ_c —海底电缆最高允许温度; θ_i —海底电缆内壁的平均温度; λ_{con} —导体导热系数; A_{con} —导体横截面面积; L_a —空气段长度; B —空气段内部空气的径向等效热阻; T_{air} —空气段内部空气的径向等效热阻; T_L —导体轴向热阻。

1.3 J型管段外部边界

J型管段包含的平台段、空气段和海水段外部边界条件各有所不同,需分别对J型管段所包含的不同

区段进行分析。海水段中管道外壁与外海水直接接触,而外界海水体积无限大且海水在做永不停息的潮流运动,管道外壁散热条件极好。对于空气段和平台段,外界空气流场的求解需要大量的计算时间,故外界空气并不包括在仿真模型中,而是通过施加外壁表面的对流换热系数来考虑与外界环境的联系如式(14)所示:

$$h_{\text{com}} = \sqrt{h_n^2 + h_f^2} \quad (14)$$

式中: h_{com} —混合换热系数; h_n —自然对流换热系数; h_f —强迫对流系数。

式(14)中, h_n 和 h_f 计算方法如式(15)和(16)所示:

$$\begin{cases} h_n = Nu_n \cdot \lambda / L_a \\ Nu_n = c (Gr \cdot Pr)^n \\ Gr = g \beta (\theta_{\text{OR}} - \theta_{\text{amb}}) L_a^3 / \nu^2 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} h_f = Nu_f \cdot \lambda / (D_{\text{OR}}/2) \\ Nu_f = b (Re)^p Pr^{1/3} \\ Re = V_{\text{air}} D_{\text{OR}} / \nu \end{cases} \quad (16)$$

式中: D_{OR} —管道外径; Nu_n 、 Nu_f —自然对流换热努塞尔数、强迫对流努塞尔数; λ —空气导热系数; L_a —特征尺寸; Gr —格拉晓夫数, c 、 n 取值由 Gr 决定; Pr —普朗特数; β —空气热膨胀系数; θ_{OR} —管道外壁温度; θ_{amb} —管道内壁空气温度; ν —空气的运动粘度; Re —雷诺数; b 、 p 取值由 Re 决定; V_{air} —周围环境风速。

最后,在外壁施加边界热源来考虑太阳辐射的影响,关系如式(17)所示:

$$q_b = \frac{\alpha_0 q_{\text{sun}}}{2} \quad (17)$$

式中, q_b —为边界热源; α_0 —太阳辐射吸收系数; q_{sun} —太阳辐射强度。

2 有限元软件三维模型建立与仿真

2.1 三维仿真模型建立

文中的主要任务是研究海底电缆的载流量,因此海底电缆中能够产生损耗,对仿真结果有重要影响的结构,包括导体、铅护套、铠装等是不能简化忽略的材料。

如图4所示,仿真模型包含的主要结构由外往内依次为J型管道、空气层(海水层)、海底电缆。上侧

视为封闭的薄层,管道内上方流体介质为空气,下方流体介质为海水。仿真模型中,海底电缆位于J型管中央,其中J型管的厚度为15 mm,外径为312 mm,J型管材料为钢,导热系数为 $43.12\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。构建J型管道结构,输入J型管内径和外径值,以高度为2 m构建圆柱体,海底电缆J型管段的三维几何模型如图5示。

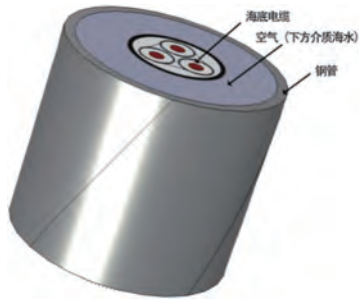


图4 J型管仿真模型



图5 J型管段海底电缆仿真模型

2.2 J型管段网格划分

将对应的材料添加后,仿真模型的计算还需对网格进行合理的划分,网格划分越细,得到的结果虽越精准,但计算量也会随之增大,同理网格划分越大,计算量会减小,但得到的结果误差会增大。

在海底电缆三维模型中,三相铜导体、金属铅屏蔽和铠装层的铠装钢丝都呈螺旋体状,属于相对规则的结构。因此,在划分网格时,可以首先在导体一端的横截面上采用自由三角形网格划分,然后通过扫描的方式进行进一步处理。

目前,整个三维模型还需要对海缆PE填充、管内介质和J型管进行网格划分。由于这些部分的几何结构不规则,只能选择自由四面体网格进行划分。考虑到这些部分不是研究的重点,可以采用相对于金属组件更为粗化的网格。自由四面体网格的划分尺寸设定为最大值15 mm和最小值5 mm。最终J型管段模型网格划分如图6所示。

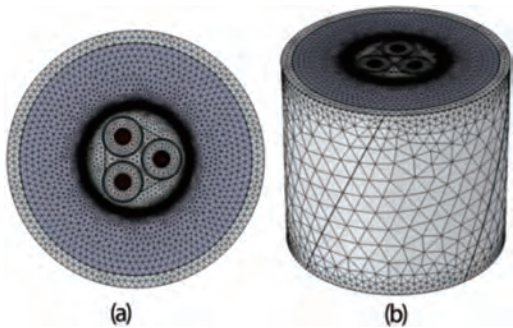


图6 J型管段网格划分

2.3 仿真运行结果分析

当所施加的负载电流为501.5 A,电磁热耦合仿真模型的截面温度场分布和整体温度分布如图7(a)和图7(b)所示。

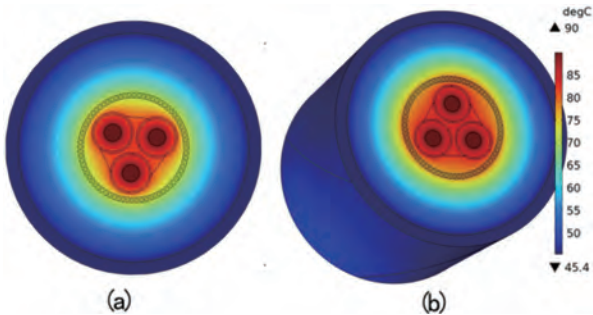


图7 J型管段温度分布图

海底电缆中的电流分布与电磁损耗分布相同,这是因为电磁损耗与电流的比值为常数,即电阻值。三相导体的电磁损耗在邻近铠装的部分面损耗偏大,这是因为电流通入三相导体后,三相导体中会产生集肤效应和邻近效应。在给三相导体施加电流后,同时会在金属屏蔽和铠装钢丝中产生感应电流及损耗。通过仿真运算结果可得,三相导体损耗为15.740 W,金属屏蔽损耗为0.626 W,铠装钢丝损耗为1.143 W。

3 载流量的影响因素

3.1 J型管厚度

为研究J型管厚度对载流量的影响,在J型管外径312 mm和其他条件不变情况下,分别研究10 mm、15 mm、20 mm、25 mm和30 mm厚度下对载流量的影响,J型管厚度与载流量关系如表1所示。

由表1结果可知,随着J型管的管壁变厚,J型管段载流量会随之下下降。J型管段载流量整体受J型管厚度变化的影响较小,J型管厚度每增加5 mm,J型管段载

流量下降约 2 A,对比 J 型管厚度在 10 mm 与 30 mm 下的载流量,可知载流量的最大相差仅有 9.5 A。这是因为当 J 型管厚度增加时,J 型管段空气段的空气域减小,从而导致空气流动能力下降,则载流量因此降低。

表 1 不同 J 型管厚度下载流量

J 型管厚度(mm)	10	15	20	25	30	35
载流量(A)	505.0	501.5	499.0	497.0	496.0	495.5

3.2 J 型管外径

控制 J 型管厚度 15 mm 和其他条件不变情况下,研究 J 型管外径对载流量的影响规律,不同 J 型管外径与载流量的变化关系如表 2 所示。由表 2 可知,在 J 型管厚度保持 15 mm 条件下,J 型管外径越大,J 型管段海底电缆的载流量越高。原因是随着 J 型管外径增加,J 型管内部的空间也会相应增加,从而提升海底电缆的散热,则载流量也会随之增加。仿真计算结果表明 J 型管外径每增加 30 mm,载流量的提升约 2 A,因此可知 J 型管外径增加对 J 型管段海底电缆载流量的提升效果有限。

表 2 不同 J 型管外径下载流量

J 型管外径(mm)	282	312	342	372	402	432
载流量(A)	496.0	501.5	504.0	506.0	507.0	508.0

3.3 J 型管外风速

J 型管外风速是影响海底电缆载流量的重要因素之一,当风速增加时,会导致 J 型管段的载流量升高。风速的变化对载流量的影响如图 8 所示,当风速从 0 增加到 2 m/s,载流量从 326 A 提升到了 501.5 A,提升了 53.8%。当风速从 2 m/s 开始继续增大,对流带来的冷却效果达到了极限值,载流量提升效果也迅速降低,随后风速每增加 2 m/s,载流量的提升并不明显,仅提升了约 2%。

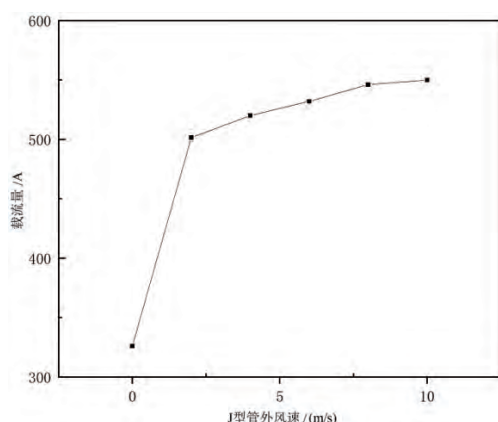


图 8 J 型管外风速与载流量关系

3.4 海洋生物附着和环境空气温度

海洋生物附着钢管的成分主要包括蛋白质、多糖和矿物质。海洋生物能够分泌蛋白质和多糖物质,通过与钢管表面的化学成分相互作用,形成物理连接;同时,一些海洋生物还能从周围环境中吸收和沉积矿物质,增加附着的牢固性;此外,生物胶结物的分泌也起到了增加附着牢固性的作用。这些成分和机理的相互作用,使海洋生物能够牢固地附着在钢管表面。文中将附着的生物群落视为一个整体附着物,其仿真运行如表 3 所示。

表 3 附着于管道上的生物参数

名称	电导率($S \cdot m^{-1}$)	热容($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	导热系数($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	密度($kg \cdot m^{-3}$)
附着物	0.01	10	0.29	1

J 形管是海底电缆线路上引至海上风机平台的通道,长时间浸泡在海水中易引起海洋生物的附着,海洋生物的附着会对 J 型管产生腐蚀,改变 J 型管周围的环境热阻,从而影响到该段海底电缆的载流量。海洋生物附着对与载流量关系如图 9 所示。

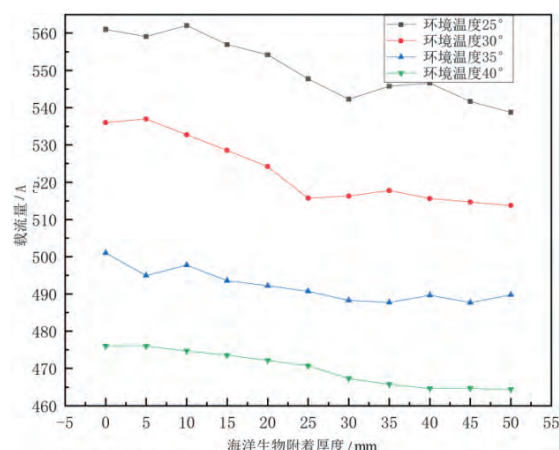


图 9 海洋生物附着和环境温度与载流量变化关系

由图 9 可以看出,海洋生物附着初期对载流量的影响不大,当附着的厚度达到 10 mm 之后,逐步对载流量的大小产生影响,其原因是随着附着厚度的增加,该段的散热性能越差,则能允许通过的电流越小,即载流量越小。

此外,由图 9 还可以看出,环境空气温度的变化同样对海底电缆温度有影响,周围环境温度的改变会引起导体温度的变化。研究发现环境温度从 25℃升至 30℃、30℃升至 35℃、35℃升至 40℃时,引起的载流量下降量分别为 25.7 A、34.3 A、24.1 A。可见,随着环境温度的升高,载流量也会随之降低。

4 结语

文中基于理论分析和有限元仿真,依据型号为HYJQF 41-26/35 kV-3×300 mm²的海底电缆为研究对象,利用多物理场仿真软件建立模型,对海上风电场中海底电缆J型管段的载流量进行研究。研究发现,J型管厚度与J型管外径对载流量的影响较小,J型管厚度每降低5 mm或J型管外径增加30 mm载流量的提升约2 A;而J型管段周围环境对载流量影响更为明显,环境风速从0 m/s提升到10 m/s时,J型管段载流量提升了68.7%;海洋生物附着量的增加会使得J型管段载流量下降,5年左右时间后,J型管段载流量下降约5.0%,而随着海洋生物附着的堆积物增多使得空气自然散热性能变差,能允许通过的电流变小,载流量也随之变小。

参考文献:

- [1] 姜丽,王群,王琦.国外海洋风能发展现状及对我国的借鉴意义[J].海洋信息,2014(1):56-58.
- [2] Arshad M, O'Kelly B. Global status of wind power generation: theory, practice, and challenges[J]. International Journal of Green Energy, 2019, 16(14): 1073-1090.
- [3] Rodrigues S, Restrepo C, Kontos E, et al. Trends of offshore wind projects[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 49: 1114-1135.
- [4] 张伟.海底电缆系统工程设计及实施[J].电力安全技术, 2023, 25(9): 20-23.
- [5] 刘兵.海上风电场工程220 kV海底电缆敷设施工简介[J].中国工程咨询, 2016(5): 60-62.
- [6] 余佳.复杂敷设电缆线路输电瓶颈及其负载能力时空特性研究[D].广州:华南理工大学, 2018.
- [7] 李萌.海底电缆载流量计算方法的研究与应用[D].保定:华北电力大学, 2018.
- [8] 李春梅.交流单芯海底电缆载流量提升方法探讨[J].光纤与电缆及其应用技术, 2017(6): 33-35.
- [9] Neher J H, McGrath M H. The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems[J]. RATIO, 1994, 50(2): 5.
- [10] Neher J H. The transient temperature rise of buried cable systems[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1964, 83(2): 102-114.
- [11] 马国栋.电线电缆载流量(第2版)[M].北京:中国电力出版社, 2013.
- [12] 孟凡凤,梁永春,李彦明,等.交联电缆额定载流量计算的软件实现[J].高压电器, 2006(3): 194-195, 198.
- [13] 刘士利,李宁,蔡国伟,等.66 kV交流交联聚乙烯电缆线路改为直流运行的直流载流量[J].高电压技术, 2017, 43(5): 1664-1669.
- [14] 唐铭.海洋直接地极对海底电缆的影响与防护研究[D].宜昌:三峡大学, 2022.
- [15] Zhang Y, Chen X, 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] 吴冰洁,丁苒苒,陈晨,等.220 kV交联海缆的低频载流能力及温度场分布仿真研究[J].绝缘材料, 2023, 56(12): 34-42.
- [17] 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.
- [18] Chippendale R D, Pilgrim J A, Goddard K F, et al. Analytical thermal rating method for cables installed in J-Tubes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 32(4): 1721-1729.
- [19] 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, 2019.