

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2021.08.021

岸电电缆特殊工况分析及温度分布影响因素研究

油 飞¹, 杨 浩², 刘 恒³, 杨 帆²

1. 重庆建筑科技职业学院, 重庆 401331; 2. 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;
3. 重庆川仪自动化股份有限公司技术中心, 重庆 401121

摘要: 岸电电缆作为港口船舶供电的关键设备, 受阳光直射、海风、潮汐的影响, 具有运行工况复杂、绝缘老化速度快等特点, 严重影响岸电电缆的使用寿命和载流能力. 本文首先对岸电输电系统和岸电电缆的特殊使用工况进行分析, 其次建立了温度场仿真模型研究环境温度、风速和太阳辐射对岸电电缆温度分布的影响规律, 为岸电电缆的敷设优化和载流量的提升提供参考. 研究表明: 导体温度随环境温度近似线性变化, 环境温度上升 10 °C, 导体温度约增加 11.66 °C; 风速从静止增加至 10 m/s 时, 导体最大温度下降 13.84 °C; 在夏季极炎热天气下, 岸电电缆导体最高温度可达 117.6 °C, 超过了最高载流温度 90 °C.

关键词: 岸电电缆; 环境因素; 温度场; 太阳辐射

中图分类号: TM726.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2021)08-0167-10

随着国家“一带一路”倡议的实施, 中国与世界各国的经济贸易、文化交流愈加频繁, 21 世纪海上丝绸之路的开通使得各国之间往来的船只越来越多, 但同时也向大气排放越来越多的污染物. 船舶排放的气体主要包括 PM_{2.5}、氮氧化物和硫氧化物, 不仅会造成环境污染, 人体吸入后还会产生许多呼吸道和心血管疾病^[1]. 为了解决停港船舶污染排放严重的问题, 国际海事组织、世界卫生组织、欧共体等制定了国际公约(MARPOL 73/78), 提出采用岸电输电以限制停港船舶发电机的使用, 相比船舶直接发电, 岸电输电可节约 3 倍的成本^[2].

随着岸电输电技术的发展, 岸电电缆在岸电输电中得到了越来越广泛的应用, 与传统电缆相比, 岸电电缆的不同之处在于以下几个方面:

- 1) 岸电电缆长期裸露在空气中, 受阳光直射, 电缆外表面为黑色, 易吸光发热, 热老化程度较大;
- 2) 一些岸电电缆的敷设会与海水接触, 且港口的环境较为潮湿, 使得岸电电缆更易受潮, 老化速度大于普通电缆;
- 3) 岸电电缆的连接须要用到起重机、绕盘等器械, 运行时还会受到海风、潮汐的影响导致船舶晃动^[3], 电缆机械老化程度较大.

岸电电缆长期处于这种复杂的环境以及高强度、交变的机械应力状态下, 使得岸电电缆易发生大形变、疲劳磨损, 将加速岸电电缆的绝缘老化, 从而导致机械性能和绝缘性能下降. 我国岸电输电技术是近 10 年才发展起来, 应用年限较短, 关于岸电电缆方面的研究非常匮乏, 尤其多物理场计算理论几乎没有. 通常电缆在电、热、机械力作用下, 绝缘会出现损伤或老化^[4], 绝缘老化表现出的主要特征之一

是绝缘介质中出现“树枝”，“树枝”的出现将引起电缆绝缘局部放电，将降低绝缘击穿场强^[5]。电缆绝缘老化不仅会降低绝缘介质的电性能^[5-7]，还将导致绝缘介质的机械性能下降^[6, 8]。另外电缆绝缘受潮还会形成水树，使得绝缘局部放电增加，介质损耗增加，热老化速度也将加快。若不提升电缆自身材料结构性能和作业形式，将难以满足岸电电缆复杂的环境条件及特殊的使用工况。无论是在电缆结构材料的设计还是电缆连接装置的设计方面，现有研究均存在不足，难以满足岸电电缆高强度、耐磨损、抗撕裂、长期浸水性能优异等要求。

通常普通电缆使用年限可超过 30 年^[9]，但由于目前柔性电缆制造水平的限制和岸电电缆特殊的使用工况，其绝缘老化速度比普通电缆快得多，使岸电电缆的使用年限仅有 3~5 年。电缆绝缘老化后将引起机械性能和热性能发生变化^[10]，严重影响电缆运行状况和载流量，而载流量的准确计算与电缆温度息息相关。电缆温度场的获取方法包括实验测量、解析计算和数值计算。实验测量相对复杂，研究成本高、周期长、通用性差，难以测量电缆缆芯的温度；解析计算方法相对简单，易于编程，计算速度快，但计算结果具有一定的不准确性；基于有限元的数值计算虽然计算速度慢，但计算精度高，能考虑复杂的环境因素。文献[11]基于电热协调潮流及输电线路动态热路模型和算法，研究了负荷扰动和短路情况下架空线路温升变化过程。文献[12]在忽略架空输电线路载流与温度的不同步性的基础上研究了考虑电-热耦合对架空输电线路潮流计算精度的影响。架空线路与电缆具有相似之处，那么电-热耦合方法也可运用于岸电电缆，对其温度场的准确计算具有指导作用。与架空线路不同的是，电缆存在金属套、绝缘层以及外护套，其温度场的计算比架空线路复杂。对于交流电缆，线路自身导体和金属护套之间存在交链磁通，不同线路、不同回路之间也存在交链磁通，温度分布计算还要考虑电磁感应效应。文献[13-14]针对高压单芯电缆，采用解析法计算了由感应电压引起的金属护套环流。文献[15]针对单回路三芯电缆，采用有限元仿真分析计算了三角排列和水平排列时护套的感应电压，但并未进一步对温度场进行计算。文献[16]基于涡流场和流场计算模型，采用有限元仿真软件计算了多回路排管敷设电缆的温度分布，可为岸电电缆空气流动环境下的温度计算提供参考。

因此本文通过现场调研和查阅国内外相关文献综合分析岸电电缆的特殊使用工况，为岸电电缆的材料结构设计和岸电电缆连接方式设计提供参考，并基于电磁学和传热学理论方法^[17]，建立岸电电缆电磁-热-流仿真模型，分析环境温度、风速和太阳辐射对岸电电缆温度分布的影响规律，为岸电电缆的敷设优化和载流量的提升提供参考。

1 船舶用岸电电缆系统分析

如图 1 所示为岸电输电系统，包括电能转换、船岸交互两部分。电能转换具有变频、变压的作用，以满足国内外不同用电频率、不同电压等级船舶的需求；船岸交互包括通讯、电缆管理、电缆连接等设施^[18-20]。船舶用电要从大电网获取电能，通过变电站降压将电能输送到港口的变电箱进行变频、变压，再通过接线箱和绕盘来实现岸电系统与船舶之间的连接，最终将电能输送到船舶配电系统中。

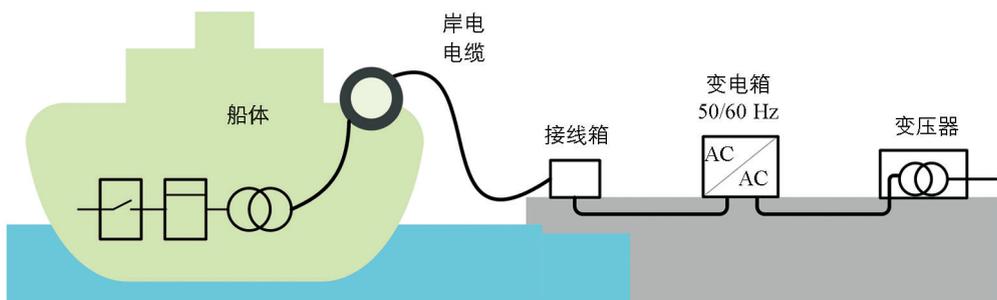


图 1 岸电输电系统

要实现船岸交互, 需要通过船上的电缆盘将电缆与岸上的接线箱连接, 有时还会用到起重机和吊车。不管是电缆的结构材料、连接方式还是敷设方式, 都必须适应潮汐的变化、船舶的移动, 防止船的晃动导致电缆受力过大而变形。

2 岸电电缆的连接和运行工况

2.1 岸电电缆的连接

岸电电缆是岸电输电中最薄弱的环节, 设计良好的电缆管理系统能够快速连接和断开岸电供电, 还能保证港口作业人员的安全。岸电电缆有两种存放方式, 一种是放在船舶上, 当船靠岸时将电缆放下, 与岸电箱连接, 优点是随船移动, 可实现即插即用, 缺点是每个船舶均需配备至少一卷电缆; 另一种是放在码头, 当船靠近时将岸电电缆与船舶相连, 其优点是可采用移动式装置将电缆运至任意泊位, 大大减小了岸电电缆的使用数量, 缺点是调度速度慢, 耽搁船舶供电时间。

要实现船岸交互, 需要通过电缆盘将电缆与岸上的岸电箱连接, 有时还会用到起重机、吊车以及人为的拖拽(图 2), 从而导致电缆弯曲以及外护套磨损严重。电缆弯曲将导致最大弯曲点的绝缘变薄, 严重时出现绝缘裂纹, 甚至出现绝缘击穿现象^[21]; 电缆外护套磨损严重时, 潮气会入侵到电缆内部, 导致金属套受潮腐蚀, 还会形成绝缘水树导致绝缘介损增大, 进一步加大电缆绝缘老化, 降低电缆使用寿命。采用一体化可移动式输送车能防止岸电电缆的拖拽磨损^[22], 合理设计岸电电缆连接时的作业方式也能减少岸电电缆连接过程中受到的机械损伤。



图 2 岸电电缆的连接

2.2 岸电电缆的运行工况

我国岸电的应用时间相对较短, 仅有 10 年左右, 岸电电缆的敷设并未形成统一标准, 均是根据港口实际情况进行敷设。对于水平面较低的泊位如图 3(a)所示的重庆港口, 船舶与地面落差较小, 岸电电缆运行受自身重力影响较小; 对于水平面较高的泊位如图 3(b)所示的舟山港口或一些大型船舶, 船岸落差较大, 岸电电缆运行时受自身重力影响较大, 使电缆拉伸较大或存在较大弯曲的弧垂, 会降低绝缘厚度或出现绝缘裂纹。另外, 受潮汐和海风的影响, 岸电电缆会上下或左右摆动, 岸电电缆两端受到的力最大, 长时间的反复摆动容易造成岸电电缆疲劳损伤, 导致绝缘变弱, 也会在绝缘部分形成裂纹。若岸电电缆绝缘部分出现裂纹气隙, 空气的击穿场强为 30 kV/cm, 10 kV 的岸电电缆绝缘气隙内的场强可达 48.9 kV/cm, 超过了空气击穿场强^[23]。

岸电电缆与陆缆的区别在于其直接敷设于空气中, 受风速、湿度和太阳辐射影响较大, 且电缆外护套一般为黑色, 吸收热量较大, 其热老化速度较直埋电缆和隧道电缆快, 严重削弱了岸电电缆的载流能力。在夏季炎热天气, 很多大型船舶均是夜晚作业, 因为白天温度较高、太阳辐射较大, 岸电电缆的载流能力难以满足船舶的需求, 而夜晚无太阳辐射, 环境温度也较低, 岸电电缆载流量较高。更有一些港口大型货船集中在冬季作业, 冬季环境温度较低, 电缆载流能力强。



(a) 重庆港口岸电电缆现场图



(b) 舟山长宏国际码头岸电电缆现场图

图 3 岸电电缆敷设情况

3 岸电电缆温度场仿真

3.1 物理模型

由于岸电电缆裸露敷设于港口,其温度场分布受到温度、风速、水流速度和太阳辐射的影响,根据重庆佛耳岩港岸电电缆敷设情况,建立 10 kV 三回路岸电电缆电-热-流多物理场仿真模型如图 4 所示,计算域尺度是电缆外径的 50 倍,材料参数见表 1.

表 1 岸电电缆材料参数

结构	相对介电常数	电导率/ ($S \cdot m^{-1}$)	比热容/ [$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$]	热导系数/ [$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$]
导体	趋于 ∞	58×10^6	385	400
绝缘	3	趋于 0	2 300	0.287 5
半导体	100	6	1 005	0.287 5
填充层	1.6	趋于 0	1 883	0.016 9
内护套	3.6	趋于 0	2 100	0.2
铝护套	趋于 ∞	38×10^6	871	273
外护套	3.5	趋于 0	2 070	0.2

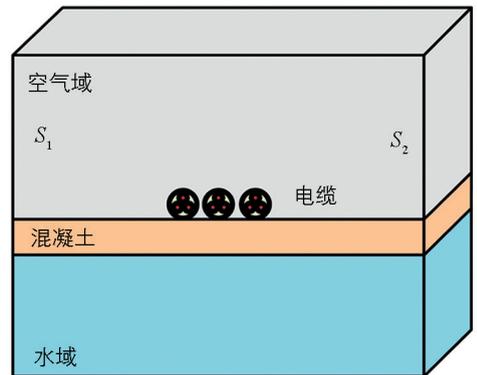


图 4 岸电电缆仿真模型

3.2 控制方程

3.2.1 电磁场

当电缆金属套处于交变磁场中时,会存在涡流效应,组成回路的金属中就会存在感应电流^[24-25].因此本文采用涡流求解器对电缆电磁场进行求解,正弦电磁场磁矢位和电位计算的控制方程分别为

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times \dot{\mathbf{A}} = (\sigma + j\omega \epsilon_0 \epsilon_r) (-j\omega \dot{\mathbf{A}} - \nabla \dot{\varphi}) \quad (1)$$

$$\epsilon_0 \epsilon_r \nabla^2 \dot{\varphi} = -j\omega \nabla \cdot \dot{\mathbf{A}} - \dot{\rho} \quad (2)$$

式中: $\dot{\mathbf{A}}$ 为磁矢位, Wb/m; $\dot{\varphi}$ 为电位, V/m; ω 为角频率, rad/s; ϵ_0 为真空的介电常数, F/m; ϵ_r 为相对介电常数; μ_0 为真空的磁导率, H/m; μ_r 为相对磁导率; σ 为电导率, S/m; $\dot{\rho}$ 为体电荷密度, C/m³.

根据电荷守恒, 引入洛伦兹规范

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{A}} + j\omega \mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r \dot{\varphi} = 0 \quad (3)$$

便可求得电位和磁矢位, 从而求得电缆的电场和磁场分布.

3.2.2 温度和流场

根据傅里叶传热定律和能量守恒定律, 得到岸电电缆三维温度场导热微分方程, 可表示为

$$C_P \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \nabla^2 \theta + Q_i \quad (4)$$

式中, ρ 为物质密度, kg/m³; C_P 为比热容, J/(kg · K); θ 为温度, K; λ 为导热系数(假设导热系数各向同性), W/(m · K); Q_i 为单位体积热源, W/m³, 包括电缆导体、金属屏蔽、铝护套的损耗以及绝缘介质损耗, 由电磁模块计算得出.

岸电电缆除了导体到外表面的固体传热外, 还涉及到电缆表面的对流散热和辐射散热. 对流散热问题的求解需要满足以下三大守恒方程.

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (5)$$

其中, 速度矢量 $\mathbf{V} = (u, v, w)$, m/s.

由于可将水看作不可压缩流体, 质量守恒方程可忽略密度对时间的微分项, 则有

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (7)$$

其中, p 为静压, Pa; \mathbf{g} 为重力加速度, m/s²; \mathbf{F} 为外力, N; $\boldsymbol{\tau}$ 是应力张量, Pa, 表达式为

$$\boldsymbol{\tau} = \eta [(\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{V} \mathbf{I}] \quad (8)$$

其中, η 为分子动力黏度, Pa · s; \mathbf{I} 为单位张量.

能量守恒方程:

$$C_P \rho \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = \lambda \nabla^2 \theta + Q_i \quad (9)$$

电缆表面会吸收一定的太阳辐射, 使得原本高于环境温度的电缆表面温度更高, 电缆表面又会向周围辐射热量. 电缆单位表面积向外界辐射的热量为

$$E = \xi_s b [(\theta_s + 273.15)^4 - (\theta_f + 273.15)^4] \quad (10)$$

其中, b 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 其值为 5.67×10^{-8} W/m² · K⁴; ξ_s 为电缆表面发射系数, 小于等于 1; θ_s 为电缆表面温度, °C; θ_f 为环境温度, °C.

3.3 边界条件

3.3.1 电磁边界

电缆缆芯电位为高电位 10 kV, 金属屏蔽和铝护套为零电位, 三相导体通入 308 A 正弦电流, 相位分别相差 120°. 磁矢位在电缆金属导体外部空间快速衰减, 距离电缆表面 1 m 处其数值大小约为 0, 设置外边界为气球边界, 可模拟无限大空间.

3.3.2 流体边界条件

进风口为垂直于面 S_1 和 S_2 的速度边界, 出风口为恒压边界, 分别表示为

$$V_{in} |_{S_1} \times n = 0 \quad (11)$$

$$p |_{S_2} = 0 \quad (12)$$

其中, V_{in} 为流体的入口速度; n 为面 S_1 和 S_2 的单位法向量; p 为流体出口压力。

3.3.3 温度边界条件

根据传热学理论, 常见的温度边界条件有三类, 分别规定了边界上的温度值, 边界上的热流密度值和边界上与周围流体间的表面散热系数和流体周围温度^[26]。由于模型远大于电缆, 设置空气域上边界和水域下边界为恒温边界条件, 进风口温度和环境温度一致, 也为恒温边界。

3.4 结果分析

3.4.1 环境温度的影响

由于岸电电缆敷设于港口, 我国沿江沿海地域分布较广, 各地气候差异较大, 气温变化范围也较大, 大连港口年最低温度可达 $-17\text{ }^\circ\text{C}$, 重庆、武汉等地最高温度可达 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 。设环境温度(用 θ_f 表示)范围为 $-20\text{ }^\circ\text{C} \sim 40\text{ }^\circ\text{C}$, 仿真计算不同环境温度下岸电电缆导体温度变化规律。

图 5 为不同环境温度下的导体温度随风速的变化曲线。从计算结果看出, 随着环境温度的增加, 电缆导体温度也相应增加, 环境温度每增加 $10\text{ }^\circ\text{C}$, 电缆导体温度平均增加约 $11.66\text{ }^\circ\text{C}$, 而并非 $10\text{ }^\circ\text{C}$, 即环境温度与导体温度并非满足线性关系, 原因是环境温度也会影响电缆表面对流散热、电缆间和电缆与环境的辐射散热, 但在温度很小变化范围内, 可近似看作是线性关系。

3.4.2 风速的影响

图 6 为各回路导体最大温度随风速的变化曲线, 从结果可知, 电缆导体温度随风速的增加逐渐降低, 在低风速区温度下降很快, 高风速区电缆导体温度趋于稳定。风速从静止增加至 10 m/s 时, 各回路导体最大温度分别下降 $13.60\text{ }^\circ\text{C}$, $14.25\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $13.68\text{ }^\circ\text{C}$, 平均值为 $13.84\text{ }^\circ\text{C}$ 。通过计算可知, 若环境温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 当风速大于 0.67 m/s 时, 各回路导体温度均小于 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 。由于电缆温度与环境温度可近似呈 $1:1$ 的线性关系, 那么就得出结论: 若环境温度为 $40\text{ }^\circ\text{C}$, 当风速大于 0.67 m/s 时, 各回路导体温度均小于 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 。图 7 和图 8 分别为风速等于 0.67 m/s 时的速度和温度分布云图, 风速在电缆迎风面上方最大, 为 0.84 m/s 。

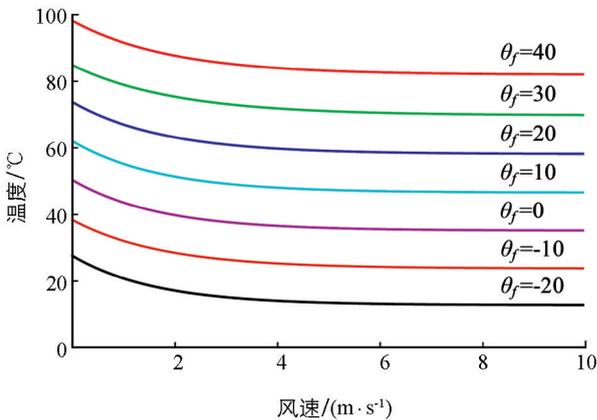


图 5 不同环境温度下的导体温度随风速的变化曲线

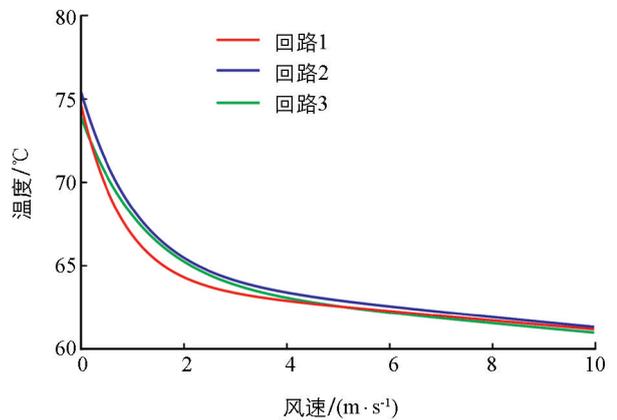


图 6 不同风速下温度曲线

3.4.3 太阳辐射的影响

这里首先考虑环境最恶劣的情况下岸电电缆温度的变化情况。设负荷电流为 308 A , 环境温度为 $40\text{ }^\circ\text{C}$, 风速为 1 m/s , 地面太阳辐射强度为 1000 W/m^2 , 太阳位于电缆正上方, 即方向矢量为 $\vec{P} = (0, 1, 0)$; 电缆表面对太阳辐射的吸收率为 0.9 , 混凝土对太阳辐射的吸收率为 0.39 。

仿真计算得到电缆稳态温度分布如图 9 所示, 此时回路 1、回路 2 和回路 3 的电缆导体最大温度分别为 $113.4\text{ }^\circ\text{C}$, $117.6\text{ }^\circ\text{C}$, $112.2\text{ }^\circ\text{C}$ 。由于受辐射传热的影响, 中间相电缆温度分别高于两端电缆温度 $4.2\text{ }^\circ\text{C}$ 。

和 5.4 °C. 辐射传热是温度的四次方关系, 温度越高, 辐射传热越明显. 对于中间相电缆, 导体温度超过最大载流温度 27.6 °C, 严重限制了岸电电缆载流量, 但电缆并不是一直处于最大辐射的状态, 太阳辐射强度会根据一天中太阳所处的方位而变化, 也会随着季节而变化, 同时风速和环境温度也会不同.

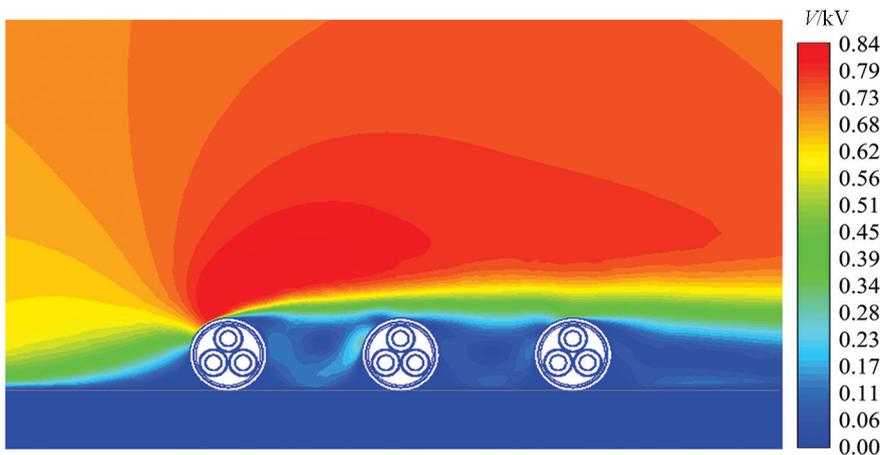


图 7 $V_{ai}=0.67$ m/s 时的速度分布云图

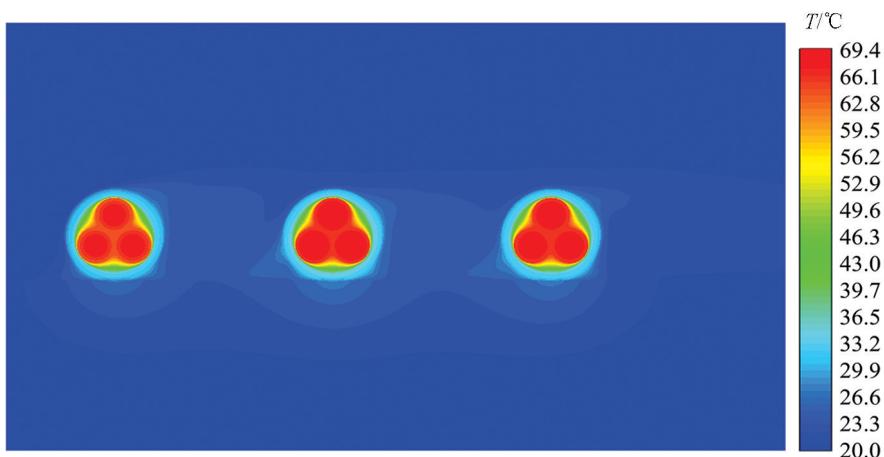


图 8 $V_{ai}=0.67$ m/s 时的温度分布云图

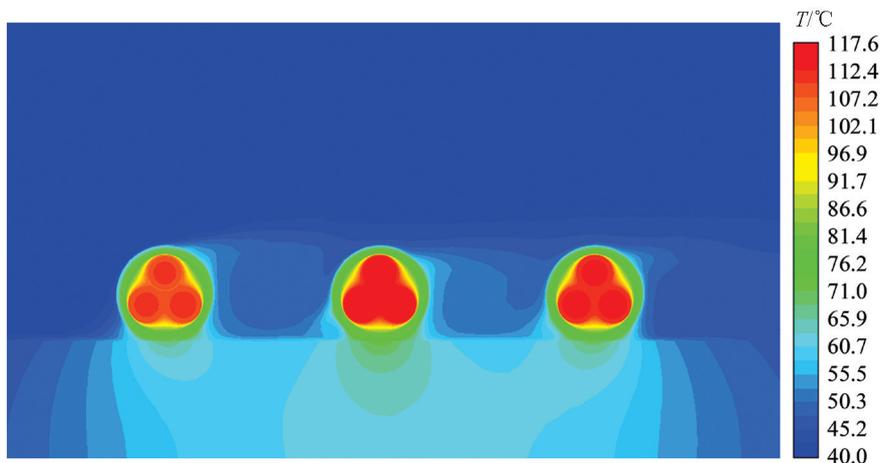


图 9 考虑太阳辐射时温度分布云图

选择重庆 2020 年 8 月 6 日炎热天气为例, 将风速、环境温度、太阳辐射强度和辐射方向矢量作为仿真

输入条件, 假设 6: 00 和 18: 00 分别为日出和日落, 整个量程为 180° , 每一时刻间隔 15° . 设负荷电流为 308 A, 计算白天时段岸电电缆温度分布. 表 2 为 8: 00—18: 00 每隔 2 h 的气候情况以及导体最大温度, 图 10 为岸电电缆温度分布云图. 由计算结果可知, 早晚环境温度和太阳辐射强度较低时, 导体温度均低于 90°C , 10: 00—16: 00 电缆导体温度均超过 90°C , 因此在炎热夏季, 白昼期间应采取相应措施降低岸电电缆温度, 以提高电缆载流量.

表 2 重庆 2020 年 8 月 6 日气候变化

时间	风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	环境温度/ $^\circ\text{C}$	太阳辐射强度/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	辐射方向矢量	导体最大温度/ $^\circ\text{C}$
8: 00	1.9	30.4	405	(0.867, 0.5, 0)	87.2
10: 00	1.9	33.6	580	(0.5, 0.867, 0)	99.6
12: 00	2.7	35.6	910	(0, 1, 0)	107.7
14: 00	3.1	37.2	1011	(-0.5, 0.867, 0)	111.2
16: 00	2.4	37.2	689	(-0.867, 0.5, 0)	105.4
18: 00	2.1	32.2	287	(-1, 0, 0)	86.9

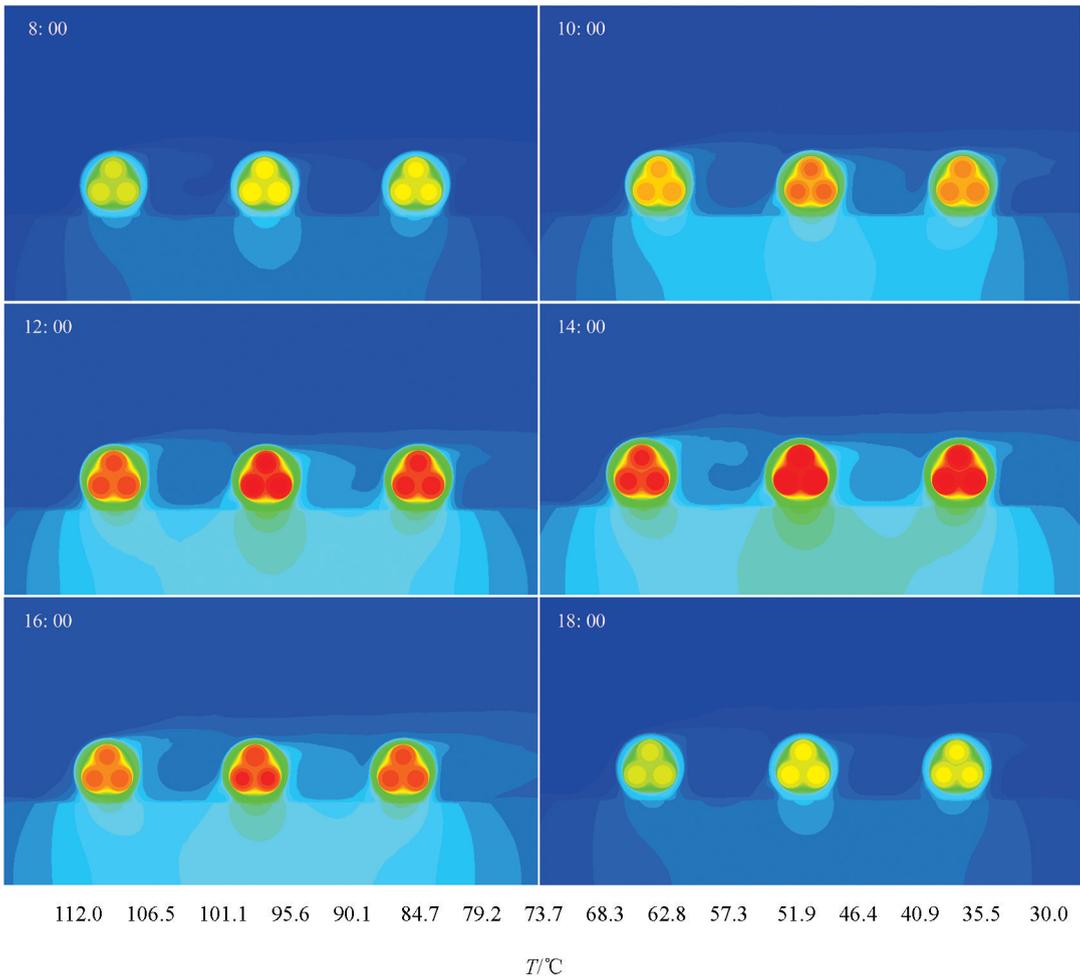


图 10 重庆 2020 年 8 月 6 日不同时段温度分布云图

4 结论与建议

由于岸电电缆的特殊使用工况, 其机械老化和热老化较陆缆严重, 是限制岸电电缆寿命和载流量能力的主要因素, 本文介绍了岸电电缆的特殊使用工况, 采用多物理场仿真计算了环境温度、风速和太阳辐射对岸电电缆温度分布的影响规律, 得出以下结论:

1) 环境温度每增加 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 电缆导体温度平均增加约 $11.66\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而并非满足线性关系, 在温度很小变化范围内, 可近似看作是线性关系;

2) 风速从静止增加至 10 m/s 时, 导体最大温度下降 $13.84\text{ }^{\circ}\text{C}$, 若环境温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 当风速大于 0.67 m/s 时, 各回路导体温度均小于 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$;

3) 极端高温和辐射条件下岸电电缆最高温度可达 $117.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10:00-16:00$ 电缆导体温度均超过 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, 该期间应采取相应措施降低岸电电缆温度。

由于岸电电缆的连接还存在机械老化, 因此从改善电缆材料结构、敷设方式和电缆提升装置几个方面提出以下建议:

1) 采用柔性绞合导体, 单丝直径更小, 使得电缆柔韧度更强, 抗弯曲和拉伸性能优异, 便于成盘卷绕;

2) 绝缘材料选型重点考虑耐高温、柔软和电气绝缘性能好的材料, 尤其要确保长期浸水电性能优异的目标, 可采用三元乙丙橡胶(EPDM)和低密度聚乙烯(LDPE)的复合材料, 兼具了柔软性和耐绝缘性;

3) 护套选型主要考虑高强度、柔软、耐磨损、抗撕裂和吸热性能等特性, 热塑性聚氨酯(TPU)综合性能比现有电缆所用的交联聚乙烯、氯丁橡胶等材料更为优异, 具有高强度、柔软、耐磨损、抗撕裂等特性。外护套尽量采用浅色, 或在表面涂一层白色或黄色导热胶, 降低对太阳辐射的吸收;

4) 根据港口实际情况优化岸电电缆敷设方式, 避免太阳直射, 可借鉴海缆敷设方式, 采用强制水冷等措施降低电缆温度, 减缓岸电电缆老化速度;

5) 设计合理的电缆提升装置和作业方式, 在电缆连接时尽量避免人为拖动, 防止电缆过度弯曲导致电缆损伤。

参考文献:

- [1] CORBETT J J, WINEBRAKE J J, GREEN E H, et al. Mortality from Ship Emissions; A Global Assessment [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(24): 8512-8518.
- [2] SMOLENSKI R, BENYSEK G, MALINOWSKI M, et al. Ship-to-Shore Versus Shore-to-Ship Synchronization Strategy [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(4): 1787-1796.
- [3] PETERSON K L, CHAVDARIAN P, ISLAM M. Tackling Ship Pollution from the Shore [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2009, 15(1): 56-60.
- [4] 熊必凤, 唐超, 王谦, 等. 电力电缆外护套故障定位研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, 41(8): 138-144.
- [5] TURAN F M, JOHAN K, SAHIMI N S, et al. Development of Integrated Assessment System for Underground Power Cable Performance: a Case Study [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 226: 012020.
- [6] 张振鹏, 蒙绍新, 夏荣, 等. 振动载荷条件下的交联聚乙烯绝缘老化特性试验研究 [J]. 高电压技术, 2016, 42(8): 2399-2405.
- [7] 雷志鹏. 乙丙橡胶绝缘介电性能及其气隙和沿面放电机理的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [8] 罗潘, 任志刚, 徐阳, 等. 退役高压交联聚乙烯电缆绝缘老化状态分析 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 41-46.
- [9] 徐俊, 王晓东, 欧阳本红, 等. 热老化对交联聚乙烯电缆绝缘理化结构的影响 [J]. 绝缘材料, 2013, 46(2): 33-37.
- [10] NEDJAR M, BEROUAL A, BOUBAKEUR A. Influence of Thermal Aging on the Electrical Properties of Poly(Vinyl Chloride) [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 102(5): 4728-4733.
- [11] 丁希亮, 韩学山, 张辉, 等. 电热协调潮流及输电线路温度的变化过程分析 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 138-144.
- [12] FRANK S, SEXAUER J, MOHAGHEGHI S. Temperature-Dependent Power Flow [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4007-4018.
- [13] 王波, 罗进圣, 黄宏新, 等. 220kV 高压单芯电力电缆金属护套环流分析 [J]. 高压电器, 2009, 45(5): 141-145.
- [14] 徐欣, 陈彦. 单芯高压电力电缆金属护套感应电流的研究之一——感应电流的计算和预控 [J]. 电线电缆, 2010(5): 42-46.
- [15] 高俊国, 于平澜, 李紫云, 等. 基于有限元法的电缆金属护套感应电压仿真分析 [J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 714-720.
- [16] 乐彦杰, 郑新龙, 张占奎, 等. 基于电磁-热-流耦合场的多回路排管敷设电缆载流量数值计算 [J]. 科学技术与工程,

2017, 17(5): 197-202, 261.

- [17] 陈 昶, 张建军, 陈 睿. 制动盘结构参数对温度场和应力场的影响研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(4): 109-115.
- [18] CUCULIC A, VUCETIC D, TOMAS V. High Voltage Shore Connection [C] //Proceedings ELMAR-2011. September 14-16, 2011, Zadar, Croatia. IEEE, 2011: 257-259.
- [19] SULLIGOI G, BOSICH D, PELASCHIAR R, et al. Shore-to-Ship Power [J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(12): 2381-2400.
- [20] TARNAPOWICZ D, GERMAN-GALKIN S. International Standardization in the Design of "Shore to Ship" Power Supply Systems of Ships in Port [J]. Management Systems in Production Engineering, 2018, 26(1): 9-13.
- [21] 江天炎, 成守花, 毕茂强, 等. 基于 ANSYS 的电缆接头典型绝缘缺陷电热场仿真研究 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(9): 151-158.
- [22] 申展超, 黄迎春, 李万里, 等. 船舶岸电电缆输送车 [J]. 设备管理与维修, 2019(15): 108-109.
- [23] HAO Y, HENG L, FAN Y, et al. Electromagnetic-Thermal-Stress Coupling Simulation for Shore Power Cable with Insulating Crack Air Gap [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2020, 62(3): 461-475.
- [24] 徐 明, 赵俊霖, 伍家洁. 架空地线电磁感应电流计算与仿真分析 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2019, 44(10): 49-53.
- [25] 江天炎, 刘 翔, 毕茂强, 等. 电力电缆护套环流磁光效应传感器仿真设计 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(3): 158-164.
- [26] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 44-45.

Analysis of Special Working Conditions of the Shore Power Cable and Research of the Influencing Factors for Temperature Distribution

YOU Fei¹, YANG Hao², LIU Heng³, YANG Fan²

1. Chongqing College of Architecture and Technology, Chongqing 401331, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. Technology Center of Chongqing Chuanyi Automation Co., LTD, Chongqing 401121, China

Abstract: As the key equipment for ship power supply in a port, shore power cable is affected by direct sunlight, sea breeze and tide. It is characterized by complicated operating conditions and fast insulation aging, which seriously affects the service life and ampacity of shore power cable. In this paper, the special working conditions of the shore power transmission system and the shore power cable are analyzed, and then a temperature field simulation model is established to study the influence of environmental temperature, wind speed and solar radiation on the shore power cable temperature distribution, so as to provide reference for optimizing the laying of the shore power cable and the improving of its ampacity. The results show that the conductor temperature changes approximately linearly with the ambient temperature. When the ambient temperature rises by 10 °C, the conductor temperature increases by approximately 11.66 °C; when the wind speed increases from static to 10 m/s, the maximum conductor temperature decreases by 13.84 °C. In hot weather in summer, the maximum temperature of the shore power cable conductors may climb to as high as 117.6 °C, which exceeds the maximum current carrying temperature of 90 °C.

Key words: shore power cable; environmental factor; temperature field; solar radiation

责任编辑 汤振金