第 49 卷 第 2 期：793-803　　高电压技术　　Vol.49, No.2: 793-803
2023 年 2 月 28 日　　High Voltage Engineering　　February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220667

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

边晓燕[1]，谌云峰[1]，周歧斌[1,2]，张　耀[1]，魏本刚[3]，童　攀[4]
（1. 上海电力大学电气工程学院，上海 200090；2. 上海大学机电工程与自动化学院，上海 200444；
3. 国网上海市电力公司，上海 200122；4. 中国电子科技集团公司第二十三研究所，上海 201900）

摘　要：准确计算海底电缆动态温度场和短时允许载流量对保障海缆安全运行具有重要意义。针对现有的解析方法无法精确求解海底电缆动态温度场和短时允许载流量的问题，提出一种最优热路解析模型，将海底电缆的本体和埋设环境进行分层建模，推导出可以计算海底电缆外部环境等效热阻、热容的公式；然后采用热电类比法构建海底电缆本体和埋设环境的热路解析模型，并应用控制变量法确定热路解析模型的最优分层数和最优传热半径。最后，以某 500 kV 型号的交流海底电缆为例，对所提最优热路解析模型进行分析验证。计算结果表明：该最优热路解析模型具有较好的准确性和高效性；基于该模型对海底电缆的短时允许载流量进行评估，计算发现海底电缆短时允许最大载流量与海底电缆的初始稳态电流和过载时间有关。
关键词：海底电缆；环境分层建模；等效热阻和热容；热路解析模型；动态温度场；短时允许载流量

Dynamic Temperature Field Calculation and Short-time Allowable Ampacity Evaluation of Submarine Cable Based on Thermal Analytical Model

BIAN Xiaoyan[1], CHEN Yunfeng[1], ZHOU Qibin[1,2], ZHANG Yao[1], WEI Ben'gang[3], TONG Pan[4]
(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;
3. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China;
4. The 23rd Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shanghai 201900, China)

Abstract: Accurate calculation of dynamic temperature field and short-time allowable ampacity of submarine cables is of great significance to ensure safe operation of submarine cables. Aiming at the problem that the existing analytical methods can not accurately solve the dynamic temperature field and short-time allowable ampacity of submarine cables, an optimal thermal route analytical model is proposed. Building layered model of the cable body and the buried environment, deducing a set of formulas to calculate the equivalent thermal resistance and heat capacity of the external environment of the cable. Then the thermal path analytical model of the cable body and the environment is established by using thermoelectric analogy method. The optimal number of layers and optimal heat transfer radius of thermal path analytical model was selected by using control variable method. Finally, a 500 kV alternating current submarine cable is taken as an example to analyze and verify the proposed optimal thermal route analytical model, and the results show that model has good accuracy and high efficiency. The short-time amperage of submarine cable is evaluated based on the model, which shows that the short-time allowable maximum ampacity of submarine cable is related to the initial steady current and overload time of submarine cable.
Key words: submarine cable; building layered model of environment; equivalent thermal resistance and heat capacity; thermal analytical model; dynamic temperature field; short-time allowable ampacity

0　引言

海底电缆广泛应用于海洋环境中的新能源电力系统，如海上风电、潮汐电力传输，以及为偏远海岛提供电力输送[1-2]。

保证海底电缆的安全运行及其载流量的充分利用是海上新能源电力传输过程中的重要环节。海底电缆故障的主要原因是绝缘失效，而海底电缆绝

基金资助项目：上海市科技计划(21DZ203900)。
Project supported by Shanghai Science and Technology Project (21DZ203900).

缘层温度过高是造成绝缘失效的一个重要因素[3]。海底电缆运行中导体温度的准确计算关系到输电线路的安全可靠运行，在工程应用中准确计算海底电缆的导体温度不仅可以预防导体温度过高导致的绝缘材料寿命缩短，还可以防止导体运行温度过低带来的载流量低效利用[4]。此外，海底电缆负载电流的动态变化会引起温度场的动态变化，因此研究海底电缆动态电流下的温度场和载流量具有重要意义。

目前，主要有 3 种用于计算电缆的温度场和载流量方法，分别是实验测试法、有限元法和解析计算法。文献[5-6]使用了实验测试法作为研究海底电缆载流量和过载能力的辅助验证手段。文献[7-9]利用有限元法分别研究了空气温度、土壤温度、相邻电缆间距、太阳辐射强度对地下电缆温度和载流量的影响；文献[10-12]用有限元方法建立关于海底电缆多物理场的模型，分别研究了海底环境和敷设方式对海底电缆稳态温度场和电场的影响。解析计算法也叫热路解析法，即利用热电类比法建立热路模型求解电缆的温度场和载流量。国际电工委员会颁布了 IEC-60287 标准[13-14]和 IEC-60853 标准[15]用于计算电缆稳态和暂态的温度场和载流量，这两部标准均使用热路解析法求解电缆温度场，但其计算结果过于保守，不能充分利用电缆的载流量，因此很多学者对标准给出的方法进行了改进；文献[16]利用有限元精确的仿真结果来修正 IEC-60287 标准中的参数，但是文中没有考虑海水对于海底电缆传热的影响；文献[17]则介绍了一个暂态热路模型，该模型将 IEC-60853 标准中的热路模型进行简化，只适用于电缆沟铺设情况，不适用于海底电缆敷设的情况；国外学者 R.S.Olsen 为了建立电缆和环境一体的热路模型，构造离散化土壤模型，搭建了适用于计算电缆动态温度变化的热路解析模型，但该模型需要约 100 层才能获得足够的精度，而层数过多会导致计算冗长[18-20]；为此，Diaz-AguilóM 等人在 R.S.Olsen 的研究基础上，根据陆地电缆传热原理提出了一种不均匀分割法来建立热路模型[21]，使模型更符合传热物理规律，但是该模型只能用于一种传热介质，而埋设于海底的电缆传热过程需要考虑土壤和海水 2 种传热介质的作用。

从目前国内外研究现状来看，实验测试法需要搭建复杂的实验平台，费用昂贵，而且海底电缆的敷设环境很难通过实验模拟；有限元法具有较高的计算精度，适用于海底电缆复杂的敷设环境，但是需要大量的计算资源，且计算时间较长，不能满足工程应用中快速计算的要求；热路解析法可以高效地计算陆地电缆的温度变化，所需的计算时间较少，具有较高的计算效率[22-23]，可以满足工程现场的计算需求。由于海底电缆和陆地电缆的结构、敷设环境并不相同，海底电缆的结构更复杂，且海底电缆的埋设环境需要考虑土壤和海水的共同作用，因此目前暂未看到采用热路解析模型研究海底电缆动态温度场和载流量的相关报道。为充分考虑海缆的敷设环境，并实现快速精确求解海缆导体动态温度的目的，有必要对现有的解析计算方法进行改进，为此提出了一种兼顾计算效率和计算精度的模型，以实现对海缆动态温度场的求解和短时允许载流量的评估。

本文在前人研究的基础上，推导出用于计算 2 种导热介质环境下的热阻和热容公式，提出一种用于求解埋设场景下的海底电缆动态温度场和评估海底电缆短时允许载流量的最优热路解析模型。通过分析热路解析模型中外部环境不同分层数和不同传热半径对计算结果的影响，并建立多物理场有限元模型(finite element model，FEM)求解同等条件下的海缆导体温度，比较 2 种方法的计算结果，以此选取热路解析模型的最优分层数和最优传热半径，进而确定一个最优热路解析模型，并用 2 种不同时间周期的动态负载电流来检验该最优模型。此外，该最优热路解析模型还用来对具体运行环境下的海底电缆通过的短时载流量进行评估，从而为海底电缆的实际运行提供参考数据。

1 热路解析模型建立

传统热路模型只对电缆的本体进行分层建模，从而求出其本身的等效热阻和热容值，但其敷设环境的等效热阻和热容不通过分层方式计算。本文为了构建包括海缆本体和埋设环境的等效热阻和热容(heat resistance and heat capacity，RC)网络，需要将环境也进行分层建模，得到环境所等效的热阻和热容网络，从而与海缆本体的 RC 热路网络模型联立为一个整体。若对海缆埋设环境进行分层建模，则现有方法无法计算其环境的等效热阻和热容。为解决这个问题，本文基于海缆在土壤和海水 2 种导热介质中的传热机理，参考海缆本体的分层建模方法，将海缆埋设环境划分为不均匀厚度的圆环层，圆环层中含有海水和土壤 2 种导热介质，推导出一套新

公式来计算每个圆环层所等效的热阻和热容。为建立适用于求解埋设情景下海缆动态温度场的完整热路解析模型，按图 1 所示的流程图进行建模。

图 1 表明利用有限元法(finite element method, FEM)和热路解析法分别建模，并借助有限元(FEM)多物理场模型的计算结果确定热路解析模型的最优分层数和最优传热半径，可以得到海缆本体和环境所等效的最优热路解析模型；再施加动态负载电流，即可验证所得最优热路解析模型的准确性和高效性，并应用该模型来评估海缆的短时允许载流量。

1.1 海底电缆外部环境分层模型

海底电缆的热路解析模型由 2 部分组成：一部分是海底电缆本体等效的 RC 梯形网络；另一部分则是由海底电缆外部环境等效的 RC 梯形网络。在海底电缆工作运行时，海底电缆的温度场会受其负荷电流和外部环境的影响，如何建立其外部环境等效模型对于准确计算海底电缆的温度场和载流量至关重要。埋设环境下的海缆散热主要通过热传导和热对流实现，热传导是介质内无宏观运动时的传热现象，在固体、液体和气体中均可发生；热对流则是指传热发生在一个以一定流速流动的流体内，能量通过流动或输运进行传递，且热对流有 2 种形式，分别为自然热对流和强制热对流。海缆在附近的土壤中主要依靠热传导散热，而在海水中则主要是自然热对流散热。

为体现海缆埋设环境中流动海水的自然热对流散热，本文将海水的自然热对流作用等效为热阻和热容形式[24-25]，选取海水典型的热参数进行计算，该热参数虽然为热阻热容形式，但其数值可以等效体现海水的自然热对流散热。考虑到海水流速的影响，文献[10]指出正常海水流速不小于 0.02 m/s，而海水流速在 0.02~2 m/s 范围内，海水流速基本不影响埋设环境下海缆的散热，因此海缆外部环境分层模型中土壤和海水部分的热阻和热容参数选取完全浸水饱和沙土的等效参数[26]和海水流动下的典型热参数[27]。

海底电缆外部环境分层模型如图 2 所示，模型以轴线 L 为轴呈轴对称，L1 是海水与土壤的分界线；L2 为海底电缆的中心轴线，H 表示 L2 与 L1 的垂直距离，S_{n-1}、S_n、S_{n+1} 分别表示第 $n-1$、n、$n+1$ 个圆环层中海水部分面积的一半。r_0 表示海缆的半径，r_1、r_{n-1}、r_n、r_{n+1} 分别为第 1、$n-1$、n、$n+1$ 层圆环的外半径，θ_{n-1} 表示第 $n-1$ 层圆环的外半径 r_{n-1} 与竖直轴线 L 的夹角。从图 2 可以看出，海底电缆的外部环境被分为多层不均匀圆环，越靠近海

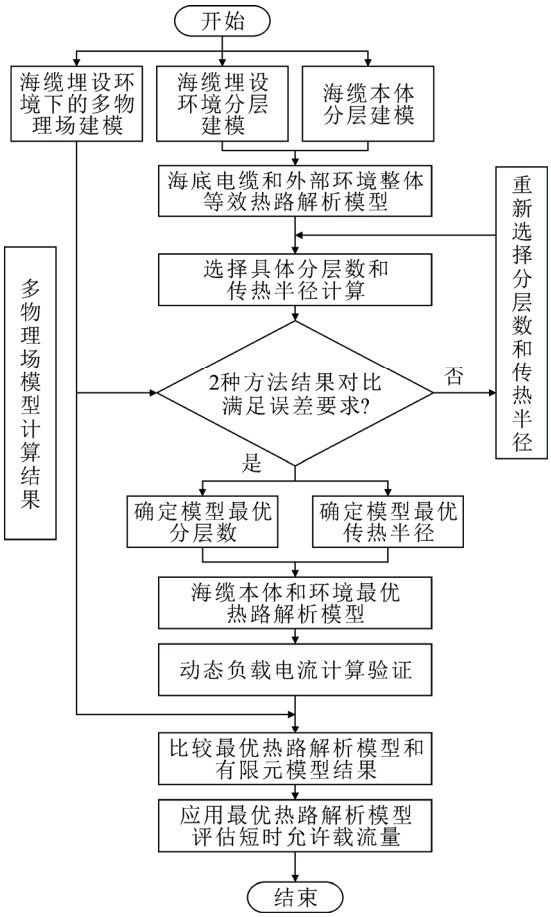


图 1 建立海底电缆热路解析模型及短时允许载流量评估流程图

Fig.1 Framework of establishing thermal analytical model for submarine cable and short-time allowable ampacity evaluation

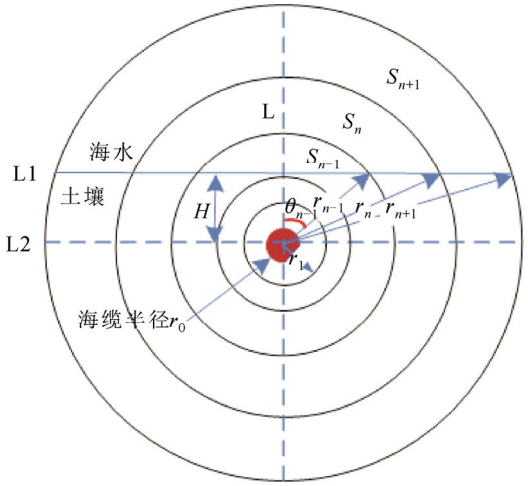


图 2 海底电缆外部环境分层示意图

Fig.2 Schematic diagram of the layering of the external environment of submarine cable

底电缆的地方，温度梯度越大，这些位置需要细分来获取更精确的温度变化；而距离海底电缆较远的地方，温度梯度小，适当粗分也不会影响计算精度，每一层的热阻和热容以图 3 中的热电等效图替代[21]，R_{en} 和 C_{en} 代表第 n 层圆环所在环境等效的热阻和热容。

文献[28]给出了计算单一导热介质时圆环层热阻和热容的表达式式(1)和式(2)。

$$R_{en}=\frac{\rho}{2\pi}\ln\left(1+\frac{d}{r_{n-1}}\right) \tag{1}$$

$$C_{en}=\pi(r_n^2-r_{n-1}^2)C_{\mathrm{p}} \tag{2}$$

式(1)和式(2)不适用含有 2 种导热介质的情况。借鉴式(1)和式(2)的推导过程引入比例系数 a 和 b 改进式(1)和式(2)，改进后得到的式(3)和式(4)适用于含有 2 种导热介质的情况。因此，外部环境分层模型中第 n 层的等效热阻和热容可通过式(3)和式(4)来计算。

$$R_{en}=\frac{1}{2\pi}\ln\left(1+\frac{d}{r_{n-1}}\right)(\rho_{\mathrm{w}}a_n+\rho_{\mathrm{s}}b_n) \tag{3}$$

$$C_{en}=\pi(r_n^2-r_{n-1}^2)(C_{\mathrm{pw}}a_n+C_{\mathrm{ps}}b_n) \tag{4}$$

式中：d 代表第 n 层圆环的厚度；ρ_{w}、ρ_{s} 分别为海水流动下的典型对应热阻系数和完全浸水饱和沙土的热阻系数；C_{pw}、C_{ps} 分别为对应的体积热容；a_n 和 b_n 为比例系数，分别代表每层海水和土壤部分所占面积与其所在圆环层的面积之比。a_n 和 b_n 的计算式如下：

$$a_n=\frac{2(S_n-S_{n-1})}{\pi(r_n^2-r_{n-1}^2)} \tag{5}$$

$$b_n=1-a_n \tag{6}$$

$$S_n=\frac{\pi}{2}r_n^2\frac{\theta_n}{180}-\frac{H}{2}r_n\sin\theta_n \tag{7}$$

其中

$$\theta_n=\arccos\frac{H}{r_n} \tag{8}$$

式中 θ_n 表示第 n 层圆环的外径 r_n 与竖直轴线 L 的夹角。对于只含有土壤的圆环层，即圆环层的外径 $r\leq H$ 时，S_n 的值为零，此时 a_n=0，b_n=1。

1.2 海底电缆与环境整体等效热路解析模型

海底电缆本体的等效热路模型采用 IEC-60287 标准中电缆分层方法构建[13]，再结合本文的海底电缆外部环境分层模型形成完整的热路解析模型，如图 4 所示。图 4 中的 W_2 为绝缘材料的介质损耗，对于采用交联聚乙烯(crosslinked polyethylene，XLPE)作为主绝缘材料的电缆而言，电压等级高于

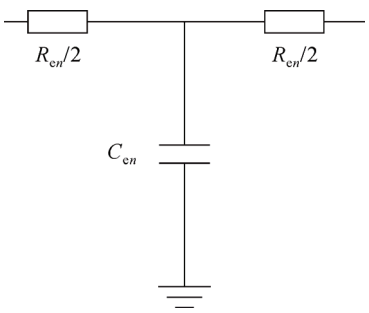


图 3 每个圆环层的热电等效电路图

Fig.3 Thermo-electric equivalent circuit diagram for each ring layer

63.5 kV 时，需要考虑绝缘材料的介质损耗，低于此值时可以忽略电缆的介质损耗。文献[15]中给出了计算海底电缆本体各种损耗 W_1—W_4 和热容分配系数 p 的计算式。R_{si} 和 C_{si} 代表图 4 热路网络模型中外部环境的等效热阻和热容；t_{c} 和 t_{en} 分别代表海底电缆导体和海底电缆外部环境的温度。R_{si} 和 C_{si} 的计算式如下[21]：

$$R_{s0}=\frac{1}{2}R_{\mathrm{e1}} \tag{9}$$

$$R_{si}=\frac{1}{2}(R_{ei}+R_{\mathrm{e}(i+1)}),\quad i=1,2,\cdots,n-1 \tag{10}$$

$$R_{sn}=\frac{1}{2}R_{en} \tag{11}$$

$$C_{sn}=C_{en} \tag{12}$$

式中：$R_{\mathrm{s}0}$ 为分层模型中第 1 个圆环层等效热阻值的一半；R_{si} 为分层模型中第 i 个圆环层等效热阻值的一半与第 i+1 个圆环层等效热阻值一半之和；R_{sn} 为分层模型中第 n 个圆环层等效热阻值的一半；C_{sn} 代表分层模型中第 n 个圆环层的等效热容值。

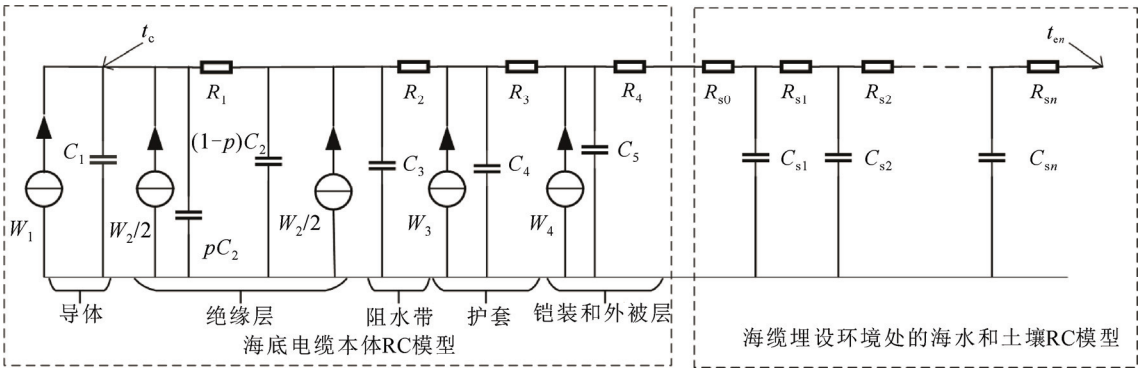
1.3 RC 热路网络模型求解

对于图 4 所示的 RC 热路网络模型，可以采用类似电路中的节点电压法列写微分方程组。图 4 中 RC 热路网络模型对应的微分方程组可转换成：

$$\boldsymbol{AT}_1+\boldsymbol{BT}_2=\boldsymbol{C} \tag{13}$$

式中：$\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 为 $n\times n$ 阶系数矩阵；$\boldsymbol{C}$ 为 $n\times 1$ 阶列向量；$\boldsymbol{T}_1$ 为各节点温度变量对时间的一阶导数组成的 $n\times 1$ 阶列向量；$\boldsymbol{T}_2$ 为 $n\times 1$ 阶温度列向量。

微分方程组的推导和转换见附录 A。在微分方程组中的参数和初始条件确定之后，可利用 4 阶龙格库塔法求解该微分方程组。求解后可得到 RC 热路网络模型中每一个节点在任意时刻的值，即每一层在任意时刻的温度，由此可以实现对海底电缆导体动态温度的实时计算。



W_1—海底电缆导体损耗；W_2—绝缘材料介质损耗；W_3—金属护套损耗；W_4—铠装损耗；R_1—海底电缆绝缘层和屏蔽层热阻；R_2—阻水带热阻；R_3—聚乙烯护套和内衬层热阻之和；R_4—外被层热阻；C_1—海底电缆导体热容；C_2—绝缘层和屏蔽层热容之和；C_3—阻水带热容；C_4—金属护套、聚乙烯护套、内衬层三者热容之和；C_5—金属铠装、外被层两者热容之和；C_{s1}、C_{s2}、C_{sn}分别代表海缆外部环境不均匀圆环层第 1、2、n 层的等效热容

图 4　海底电缆本体及环境所等效的 RC 热路网络模型

Fig.4　Equivalent RC thermal network model of submarine cable and environment

1.4　海底电缆多物理场有限元模型建立

建立海底电缆的多物理场有限元模型是为了和热路解析模型的计算结果进行比较，从而确定热路解析模型最优分层数以及最优半径，并对确定的最优热路模型的准确性进行验证。本文选择文献[10]的多物理场有限元模型作为参照，该模型综合考虑了海缆传热过程中的热传导和海水的热对流效应，且模型的准确性和实用性也是经过了验证的，因此选择该模型对热路解析模型的计算结果进行比较和验证。

2　模型参数对海缆导体温度的影响

海缆本体的分层数取决于海底电缆本身的层结构，而海缆埋设环境的分层数则不是固定的，过大的分层数会导致模型复杂，使得计算环境等效热阻和热容的过程变得繁琐，进而导致计算时间增大，影响模型的实际应用；分层数太小则会产生不准确的热阻和热容值，影响热路模型计算的准确性。此外，海缆外部环境分层模型中，圆环层边界的确定与海缆的传热半径有关系，传热半径的大小也会影响模型的复杂程度和计算的准确性。因此，确定热路解析模型的最优分层数和最优半径对模型的准确性和实用性都是必需的。

2.1　模型层数 N

合理选择海底电缆外部环境模型分层数，找到最优分层数对模型的应用至关重要。本文采用控制变量法求解海缆外部环境模型最优分层数，先固定传热半径 r，只研究不同分层数对海底电缆导体温度的影响。为避免 r 取值对计算结果产生影响，r 的取值需要保证海缆传热距离足够，参考文献[29]取的足够大的 r 为 5 m。海底电缆埋设深度 H 参考文献[27]中的数据，为 0.6~2 m，环境温度为 20 ℃，对海底电缆施加 1400 A 电流，分别研究 20 h 和 600 h 条件下海底电缆的温度变化，得到不同分层数情况下海底电缆导体的温升曲线，分别如图 5、图 6 所示。同时，在海缆的多物理场有限元模型当中，对相同的研究对象设置相同的初始和边界条件进行仿真，将两者计算结果进行比对。

选取 H 为 0.6 m 时的结果进行说明，见图 5 和图 6，无论是在 20 h 还是 600 h 条件下，当热路解析模型的外部环境分层数<5 层时，其对应的导体温升曲线均偏离有限元(finite element method, FEM)计算结果较远。图 5 表明，外部环境分层模型不同分层数的热路解析模型对应的导体温升曲线在 4 h 之前与 FEM 计算结果基本重合；随着时间增大，分层数为 1 层、3 层、5 层的热路解析模型对应的导体温升曲线逐渐偏离 FEM 计算的结果，且温差越来越大。这是因为在 4 h 前，热传导只在海底电缆本体内进行，与外部环境的分层基本无关；而在 4 h 之后，不同分层数的热路解析模型对应的 RC 热路网络中的外部等效热阻和热容不一样，从而造成 4 h 后不同分层数对应的解析计算结果出现较大不同。

从图 5 和图 6 中可以发现，外部环境模型分层数越大，其对应的结果也更精确，但当分层数>7 层时，增加分层数带来的温度变化不会超过 0.5 ℃。这是因为热路解析模型外部环境分层采取了不均匀

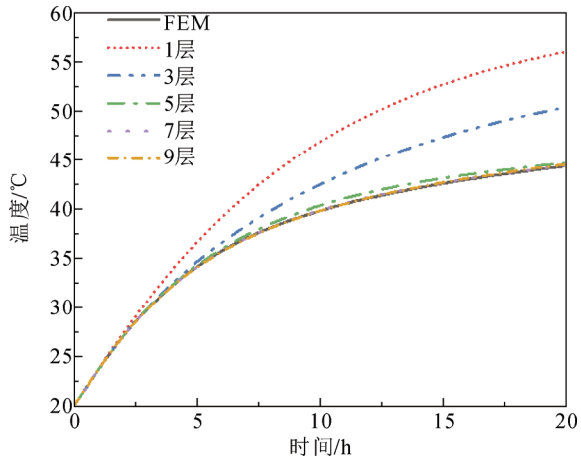


图 5 海底电缆在 20 h 下导体的温升曲线

Fig.5 Temperature rise curve of submarine cable conductor within 20 h

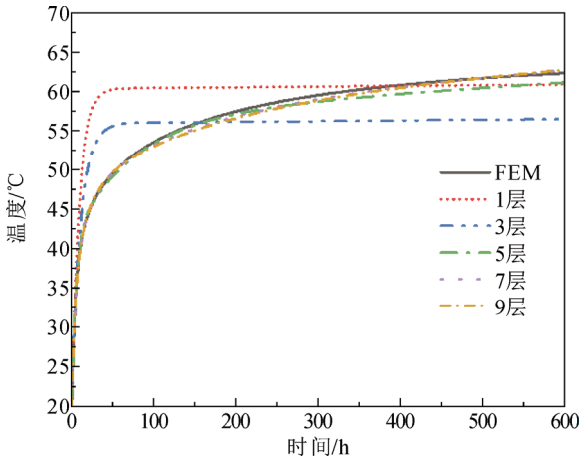


图 6 海底电缆在 600 h 下导体的温升曲线

Fig.6 Temperature rise curve of submarine cable conductor within 600 h

的分层方法，7 层就可以实现较高的计算准确性。海缆外部环境模型分层数为 7 时对应的计算结果在 20 h 和 600 h 时的数值，与有限元模型(FEM)计算结果相比，其最大误差百分比分别为 0.14%和 1.16%，最大温度误差都不超过 1 ℃。为同时兼顾热路解析模型的准确性和计算量，选择 7 层作为模型的最优分层数。经过计算比较发现，7 层在 H 为 1 m、1.5 m、2 m 时同样可以作为热路解析模型的最优分层数。

2.2 模型传热半径 r

在选择热路解析模型的传热半径时，文献[29]指出电缆 2 m 之外的土壤温度不受电缆温度影响，但本文海底电缆所处的环境包括了土壤和海水 2 种导热介质，与只含有土壤的情况不同。为确定模型最优的传热半径，本文研究在相同时间下，不同传热半径对海底电缆导体温度的影响。同样采取控制变量方法，海缆外部环境模型分层数选定为 7 层，海底电缆埋设深度 H 为 0.6 m，环境温度为 20 ℃，对海底电缆施加 1600 A 电流，分别选取传热半径为 2 m、3 m、4 m、5 m 进行建模计算。计算 800 h 内不同传热半径下的海缆导体的温度变化，将 4 种不同半径下的海缆导体温升曲线分别与多物理场有限元模型求解得到的温升曲线进行比较，并计算最大误差百分比，结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出，传热半径为 2 m 和 3 m 时，最大温度差分别为 1.90 ℃和 1.51 ℃，传热半径为 4 m 和 5 m 时，最大温差都为 1.1 ℃左右。比较最大温度差可得出，传热半径过小会影响海缆的散热，选择 4 m 或者 5 m 作为传热半径是比较合理的，考虑到更大的传热半径会使模型求解变复杂，因此选择 4 m 作为最优的传热半径。

表 1 不同传热半径下的误差比较

Table 1 Error comparison under different heat transfer radii

传热半径值/m	最大温度差/℃	最大误差百分比/%
2	1.90	2.55
3	1.51	1.90
4	1.10	1.20
5	1.13	1.20

图 7 为多物理场有限元模型计算海缆在 4000 h 和稳态下的导体温度图和温度等值线图，比较图 7(a)和图 7(b)可以发现，海缆在 4000 h 时达到了稳态，此时两者温度相差 0.7 ℃，基本一致。图 7(c)表明 4000 h 时的海缆传热距离也接近 4 m，说明在海缆温度接近稳态情况下，其散热能影响的最远区域在 3~4 m 之间，所以选择 4 m 作为最优传热半径是合适的。

3 模型的验证和应用

3.1 海底电缆和电流选择

为验证第 2 章确定的最优热路解析模型的准确性和高效性，选择具体的海底电缆和环境参数进行计算。以某 500 kV XLPE 单芯交流海底电缆为研究对象，考虑海底电缆绝缘层的介质损耗，文献[30]提供了海底电缆的结构和材料参数，该海底电缆结构示意图如图 8 所示。

对埋设情景下的该海底电缆本体和外部环境进行分层建模，外部环境模型分层数为 7 层，传热

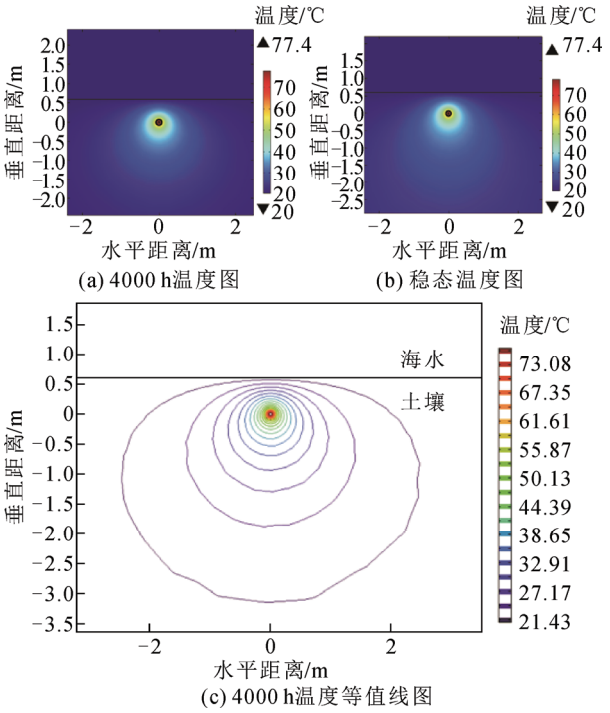


图 7　海缆稳态温度图和 4000 h 下的温度图及等值线图

Fig.7　Steady state temperature map and temperature map and contour map at 4000 h of submarine cable

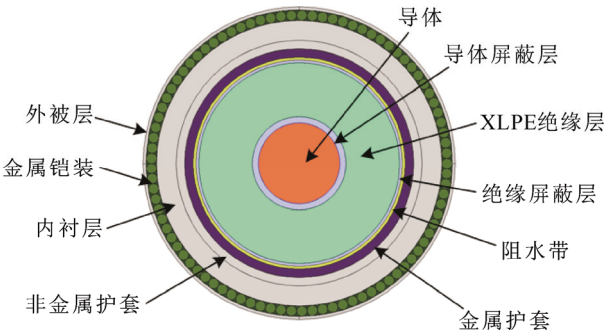


图 8　500 kV XLPE 单芯交流海底电缆结构示意图

Fig.8　Structure diagram of 500 kV XLPE single core alternating current submarine cable

半径为 4 m，埋设深度 H 为 0.6 m，构建海缆本体和外部环境的等效 RC 热路网络模型。设定初始环境温度为 20 ℃，应用式(3)—式(8)计算海底电缆外部环境对应的每层等效热阻、热容，计算结果如表 2 所示。得到了 R_{en} 和 C_{en} 后，将结果代入式(9)—式(12)，可以得到 RC 热路网络模型中的 R_{si} 和 C_{si}。

表 2 中 r_{n-1} 和 r_n 分别表示外部环境分层模型中第 n 层圆环层的内半径和外半径，从表 2 的数据可以看出，海缆外部环境分层模型采用不均匀分层方法，第 1 层的厚度只有 0.0050 m，第 7 层的厚度为 1.9835 m。第 1 层的厚度以海底电缆本体中最薄层

表 2　海底电缆外部环境分层模型热阻和热容值

Table 2　Thermal resistance and capacity of the layered model for the external environment of submarine cable

n	d/m	r_{n-1}/m	r_n/m	R_{en}/((m²·K)·W⁻¹)	C_{en}/(J·K⁻¹)
1	0.0050	0.0915	0.0956	0.0085	1.50×10^{4}
2	0.0200	0.0956	0.1165	0.0300	6.79×10^{4}
3	0.1000	0.1165	0.2165	0.0986	5.31×10^{5}
4	0.2000	0.2165	0.4165	0.1041	2.01×10^{6}
5	0.6000	0.4165	1.0165	0.1326	1.51×10^{7}
6	1.0000	1.0165	2.0165	0.0939	5.86×10^{7}
7	1.9835	2.0165	4.0000	0.0915	2.37×10^{8}

的厚度作为参考标准，第 2 层和第 3 层厚度选取为前一层厚度的 4~5 倍；第 4 层到第 7 层厚度选取为前一层的 2~3 倍。经过多次计算验证，以上参考标准可以保证热路解析模型的计算结果与有限元模型(FEM)的仿真结果之间的误差较小。总体原则是各层厚度不均匀，靠近海缆附近的区域需要细分，较远处则粗分。

考虑到海缆实际运行过程中的负载电流可能会随时间变化，使用第 2 章确定的最优热路解析模型求解海缆在通过动态电流时其导体的温度变化，以检验该模型计算海底电缆导体温度的准确性和高效性。选择 1 天内每 4 h 变化 1 次和 1 周内每 24 h 变化 1 次的负载电流施加在海缆上，负载电流曲线如图 9 和图 10 所示，应用最优热路解析模型进行求解，可得到海缆导体温度随时间变化的温度曲线。

3.2　海底电缆温度动态变化结果

从图 9 和图 10 中可以看出，无论是在 24 h 还是 168 h 的动态负载电流下，第 2 章提出的最优热路解析模型求得的结果与有限元模型(FEM)计算所得结果都十分接近。

图 9 和图 10 中，24 h 和 168 h 下最优热路解析模型求解结果与 FEM 对应结果最大温差分别为 0.94 ℃和 1.04 ℃，最大误差百分比分别为 2.39% 和 2.26%。对于外部环境分层数为 1、3、5 的热路解析模型，其对应的海缆导体温升曲线都偏离 FEM 对应的结果较远，外部分层数越少，偏离越大，这也说明了较少的外部分层数无法表征海缆的实际散热过程。外部分层数过少会造成图 4 所示的等效 RC 热路网络模型中外部环境等效的热容过大，而热容过大又会造成暂态下热量不易散发，从而使得海缆导体温度快速升高。如图 9 和图 10 所示，对于分层数<7 的模型，大概在 4 h 之后开始与 FEM 对应的

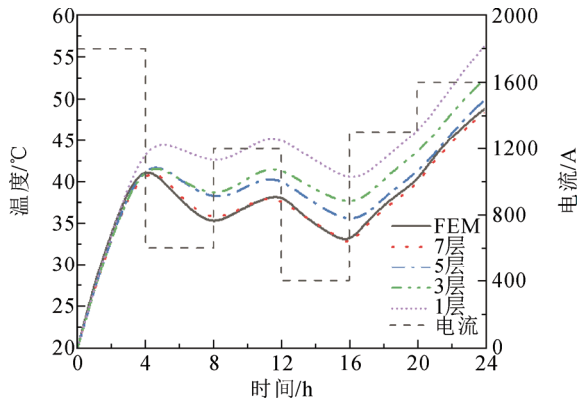


图 9 海缆在 24 h 内的负载电流和导体温度曲线

Fig.9 Load current and conductor temperature curves of submarine cable within 24 h

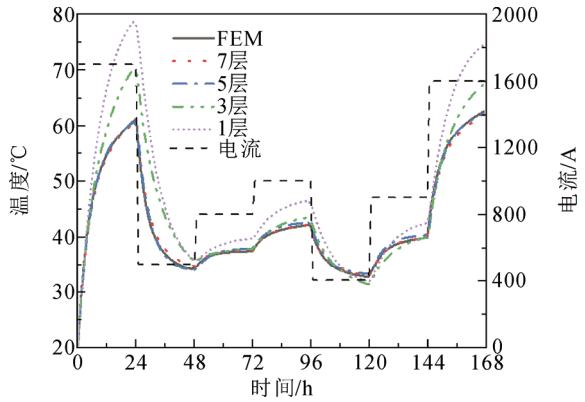


图 10 海缆在 168 h 内的负载电流和导体温度曲线

Fig.10 Submarine Load current and conductor temperature curve of submarine cable within 168 h

结果产生较大偏差，但偏差随分层数的增大而减小，随时间增大，这种较大的偏差逐渐较小，原因是热容过大带来的影响随时间增大而慢慢减弱了。

多物理场有限元模型(FEM)和最优热路解析模型的求解时间有很大差异，在配置为 Inter(R)core(TM)i9-10900k CPU @3.7GH 处理器、32GB RAM 的电脑上求解 2 种模型时，有限元模型仿真时间为 1 h+15 min+21 s，最优热路解析模型所需时间仅为 4.9 s。以上结果可以说明，所提的最优热路解析模型具有较好的准确性和高效性。

3.3 海底电缆短时允许载流量评估

海底电缆载流量评估可以分为短时允许过载电流和长时间持续的额定电流 2 种，本文主要对海底电缆的短时允许载流量做评估。海底电缆短时允许载流量与海底电缆 XLPE 主绝缘层能承受的最大温度有关。就本文所选的交流海底电缆而言，其主绝缘层材料为 XLPE，这种绝缘材料的长期运行温度不能超过 90 ℃，否则会造成绝缘材料老化，从而影响海底电缆的绝缘性能[6]，但其在短时允许电流下耐受温度却可以高于 90 ℃[31]。文献[32]对不同运行时间下的 XLPE 电缆耐受温度进行了研究，研究发现运行时间较短的电缆在温度为 105 ℃时，样品内部的 XLPE 绝缘材料开始受到损坏，XLPE 材料出现融化趋势。此外，通过对市场上现有的一些 XLPE 电缆调研发现，一些企业公布的 XLPE 电缆产品说明书将其最大耐受温度确定为 250 ℃，但耐受时间仅为 5 s，而本文选择的电缆在短时载流量下的耐受时间范围是 0.5~30 h[19]，因此选择 105 ℃作为本文研究 XLPE 交流海缆的短时允许载流量对应的最大耐受温度较为合理。

本文选用提出的最优热路解析模型来进行不同负载电流下的短时载流量评估。假定该 500 kV 海底电缆在特定环境下通过的稳态载流量分别为 1400 A 和 1500 A 时，计算 XLPE 主绝缘层温度在不同时间下上升到 105 ℃时通过的最大载流量。图 11 给出了 2 种情况下海缆通过的最大载流量与时间的关系曲线。从图 11 中可以看出，海底电缆在相同时间下所允许通过的最大载流量不一样，稳态载流量为 1400 A 对应的最大载流量要大于 1500 A 同时间所对应的载流量。这是因为在通 1400 A 的稳态电流前提条件下，海底电缆的稳态温度要比 1500 A 的对应的稳态温度要低。此外，2 种情况下，随着时间的增大，海底电缆允许通过的载流量呈下降趋势，且变化趋势越来越小，最后趋于平稳；这是因为在海底电缆主绝缘层温度达到 105 ℃所需的总损耗不变的条件下，过载时间越小时，实现温度的快速变化；而时间越大时，载流量就相应减小。从图 11 中可以看出，稳态运行下的海底电缆在遇到短时过载电流时，具有一定的耐受时间，其耐受时间与短时通过的电流大小成反比关系。通过计算海底电缆温度来评估不同短时载流量的过载时间，可以为解决海底电缆在运行时出现的故障或短时过载情况提供相应的参考。

4 结论

1）通过比较有限元模型和热路解析模型的计算结果，确定外部环境分层模型最优分层数为 7 层，此时两者结果最大温度相差不超过 1 ℃；外部环境分层模型最优分传热半径为 4 m，4 m 对应的温度相差为 1.1 ℃。

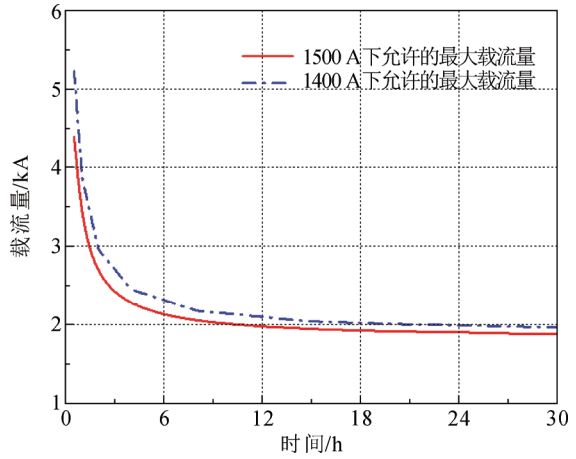


图 11　不同稳态电流下海底电缆短时通过的最大载流量与时间的关系曲线图

Fig.11　Correlation curve between time and maximum current-carrying capacity of submarine cable under different steady current

2）利用最优热路解析模型求解 500 kV 交流海缆导体的动态温度，发现最优热路解析模型与有限元模型计算结果相比最大误差百分比不超过 2.4%，且求解时间仅为 4.9 s，该最优热路解析模型具有精度高和计算效率高的优点。

3）文本应用提出的最优热路解析模型计算发现 500 kV 交流海电缆具有较强的短时电流耐受能力，海缆允许通过的短时最大载流量与其初始稳态电流和过载时间都成反比关系。

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

参考文献　References

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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 Guomin, 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.

[4] 牛海清，周　鑫，王晓兵，等. 外皮温度监测的单芯电缆暂态温度计算与试验[J]. 高电压技术，2009，35(9)：2138-2143.
NIU Haiqing, ZHOU Xin, WANG Xiaobing, et al. Calculation and experiment of transient temperatures of single-core cables on jacket temperature monitoring[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2138-2143.

[5] 张　磊，俞恩科，陈国志，等. 提升海底电缆载流量的 2 种方法及其试验研究[J]. 高电压技术，2015，41(8)：2716-2722.
ZHANG Lei, YU Enke, CHEN Guozhi, et al. Two methods for upgrading ampacity of submarine cables and their experimental study[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2716-2722.

[6] 张　伟，胡修翠，高　超，等. 长期服役 XLPE 电缆绝缘的空间电荷与热性能[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3533-3541.
ZHANG Wei, HU Xiucui, GAO Chao, et al. Space charge and thermal characteristics of long-service crosslinked polyethylene cable insulation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3533-3541.

[7] 张洪麟，唐　军，陈伟根，等. 基于有限元法的地下电缆群温度场及载流量的仿真计算[J]. 高压电器，2010，46(2)：42-45，51.
ZHANG Honglin, TANG Jun, CHEN Weigen, et al. Simulation of temperature field and ampacity of underground cable system based on finite element method[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(2): 42-45, 51.

[8] DUBITSKY S, GRESHNYAKOV G, KOROVKIN N. Refinement of underground power cable ampacity by multiphysics FEA simulation[J]. International Journal of Energy, 2015, 9: 12-19.

[9] KLIMENTA D, PEROVIĆ B, KLIMENTA J, et al. Modelling the thermal effect of solar radiation on the ampacity of a low voltage underground cable[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 134: 507-516.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 陆　莹，范明明，郑　明，等. 基于电磁–热–流耦合场的非开挖敷设方案的海底电缆载流量计算[J]. 广东电力，2020，33(5)：117-124.
LU Ying, FAN Mingming, ZHENG Ming, et al. Calculation of ampacity for submarine cables under trenchless laying method based on electromagnetic-thermal-flow coupled field[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(5): 117-124.

[13] IEC. 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: IEC Publication, 2006.

[14] IEC. Electric cables - calculation of the current rating-part 1: current rating equations (100% load factor) and calculation of losses - section 2: sheath eddy current loss factors for two circuits in flat formation: IEC 60287-1-2[S]. Geneva: IEC Publication, 1993.

[15] IEC. Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables: IEC 60853[S]. Geneva: IEC Publication, 2002.

[16] 段佳冰，尹成群，吕安强，等. 基于 IEC 60287 和有限元法的高压海底电缆温度场分析方法[J]. 高压电器，2014，50(1)：1-6.
DUAN Jiabing, YIN Chengqun, LÜ Anqiang, et al. Analysis method for temperature of high voltage submarine cable based on IEC 60287 and finite element[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 1-6.

[17] WANG X W, ZHAO J P, ZHANG Q G, et al. Real-time calculation of transient ampacity of trench laying cables based on the thermal circuit

model and the temperature measurement[C]// 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP). Xi'an, China: IEEE, 2019: 1647-1651.

[18] OLSEN R S. Dynamic loadability of cable based transmission grids[D]. Copenhagen, Denmark: Technical University of Denmark, 2013: 284-292.

[19] OLSEN R S, HOLBOLL J, GUDMUNDSDÓTTIR U S. Dynamic temperature estimation and real time emergency rating of transmission cables[C]// 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego: IEEE, 2012: 1-8.

[20] OLSEN R, ANDERS G J, HOLBOELL J, et al. Modelling of dynamic transmission cable temperature considering soil-specific heat, thermal resistivity, and precipitation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1909-1917.

[21] DIAZ-AGUILO M, DE LEÓN F, JAZEBI S, et al. Ladder-type soil model for dynamic thermal rating of underground power cables[J]. IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, 2014, 1: 21-30.

[22] XU T, XU Z F, XU Y, et al. Calculation of the equivalent thermal parameters of external environment for cable based on the real-time measurement data[C]// 12th IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Xi'an, China: IEEE, 2018: 622-628.

[23] STOJANOVIC M, TASIC D, CVETKOVIC N, et al. An approach to calculation of circulation current of single-core cables[C] // Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion. Belgrade, Serbia: IET, 2016: 1-5.

[24] 梁永春，王翔宇，傅晨钊. 地埋电缆群解析计算模型的优化及应用[J]. 高压电器，2020，56(9)：166-171，178.
LIANG Yongchun, WANG Xiangyu, FU Chenzhao. Optimization and application of analytical calculation model of underground cable group[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 166-171, 178.

[25] 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.

[26] IEC. Electric cables-calculation of the current rating-part 2-1: thermal resistance - calculation of thermal resistance: IEC 60287-2-1[S]. Geneva: IEC Publication, 2006.

[27] IEC. Electric cables - calculation of the current rating - part 3-1: sections on operating conditions - reference operating conditions and selection of cable type: IEC 60287-3-1[S]. Geneva: IEC Publication, 1999.

[28] ANDERS G J. Rating of electric power cables: ampacity computations for transmission, distribution, and industrial applications[M]. New York, USA: IEEE, 1997: 105-116.

[29] 梁永春，李彦明，柴进爱，等. 地下电缆群稳态温度场和载流量计算新方法[J]. 电工技术学报，2007，22(8)：185-190.
LIANG Yongchun, LI Yanming, CHAI Jin'ai, et al. A new method to calculate the steady-state temperature field and ampacity of underground cable system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(8): 185-190.

[30] 梁正波，徐明忠，陈　锋，等. 典型敷设环境下超高压海底电缆的热特性[J]. 高电压技术，2019，45(11)：3452-3458.
LIANG Zhengbo, XU Mingzhong, CHEN Feng, et al. Thermal characteristics of EHV submarine cable in typical layout environments[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3452-3458.

[31] 陈　新，李文鹏，李震宇，等. 高压直流 XLPE 绝缘材料及电缆关键技术展望[J]. 高电压技术，2020，46(5)：1577-1585.
CHEN Xin, LI Wenpeng, LI Zhenyu, et al. Prospect on key technology of the XLPE insulation materials and HVDC cables[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1577-1585.

[32] QIN S C, LIU R, WANG Q, et al. Study on the molecular structure evolution of long-term-operation XLPE cable insulation materials[J]. Energy Reports, 2022, 8(Supplement 1): 1249-1256.



边晓燕
1976—，女，博士，教授
主要从事海上风力发电、电力系统安全稳定方面的研究工作
E-mail: kuliz@163.com

BIAN Xiaoyan
Ph.D., Professor



周歧斌(通信作者)
1977—，男，博士，教授，博导
主要从事高电压绝缘技术、雷电防护和电磁兼容等方面的研究工作
E-mail: zhouqibin@shu.deu.cn

ZHOU Qibin
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2022-05-02　修回日期　2023-01-30　　编辑　何秋萍

附录 A

由图 4 RC 热路网络模型推导的微分方程组如下，式(13)中的矩阵来自下面微分方程组中的系数和变量。

$$
\begin{cases}
(C_1+pC_2)\dfrac{\mathrm{d}t_1}{\mathrm{d}t}+\dfrac{t_1}{R_1}-\dfrac{t_2}{R_1}=W_1+\dfrac{W_2}{2} \\
-\dfrac{t_1}{R_1}+\big((1-p)C_2+C_3\big)\dfrac{\mathrm{d}t_2}{\mathrm{d}t}+(\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2})t_2-\dfrac{t_3}{R_2}=\dfrac{W_2}{2} \\
-\dfrac{t_2}{R_2}+C_4\dfrac{\mathrm{d}t_3}{\mathrm{d}t}+(\dfrac{1}{R_2}+\dfrac{1}{R_3})t_3-\dfrac{t_4}{R_3}=W_3 \\
-\dfrac{t_3}{R_3}+C_5\dfrac{\mathrm{d}t_4}{\mathrm{d}t}+(\dfrac{1}{R_3}+\dfrac{1}{R_4+R_{\mathrm{s}0}})t_4-\dfrac{t_5}{R_4+R_{\mathrm{s}0}}=W \\
-\dfrac{t_4}{R_4+R_{\mathrm{s}0}}+C_{\mathrm{s}1}\dfrac{\mathrm{d}t_5}{\mathrm{d}t}+(\dfrac{1}{R_4+R_{\mathrm{s}0}}+\dfrac{1}{R_{\mathrm{s}1}})t_5-\dfrac{t_6}{R_{\mathrm{s}1}}=0 \\
-\dfrac{t_5}{R_{\mathrm{s}1}}+C_{\mathrm{s}2}\dfrac{\mathrm{d}t_6}{\mathrm{d}t}+(\dfrac{1}{R_{\mathrm{s}1}}+\dfrac{1}{R_{\mathrm{s}2}})t_6-\dfrac{t_7}{R_{\mathrm{s}2}}=0 \\
\vdots \\
-\dfrac{t_{n-i-1}}{R_{\mathrm{s}(n-i-5)}}+C_{\mathrm{s}(n-i-4)}\dfrac{\mathrm{d}t_{n-i}}{\mathrm{d}t}+(\dfrac{1}{R_{\mathrm{s}(n-i-5)}}+\dfrac{1}{R_{\mathrm{s}(n-i-4)}})t_{n-i}-\dfrac{t_{n-i+1}}{R_{\mathrm{s}(n-i-4)}}=0 \\
\vdots \\
-\dfrac{t_{n-1}}{R_{\mathrm{s}(n-5)}}+C_{\mathrm{s}(n-4)}\dfrac{\mathrm{d}t_n}{\mathrm{d}t}+(\dfrac{1}{R_{\mathrm{s}(n-5)}}+\dfrac{1}{R_{\mathrm{s}(n-4)}})t_n=\dfrac{t_{en}}{R_{\mathrm{s}(n-4)}}
\end{cases}
$$

式(13)中各矩阵 $\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{T}_1$ 和 $\boldsymbol{T}_2$ 如下：

$$
\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}
C_1+pC_2 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\
0 & (1-p)C_2+C_3 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\
0 & 0 & C_4 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & C_5 & \cdots & 0 & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & C_{\mathrm{s}(n-i-4)} & \vdots \\
0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & C_{\mathrm{s}(n-i-4)}
\end{bmatrix}
$$

$$
\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}
R_1^{-1} & -R_1^{-1} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\
-R_1^{-1} & R_1^{-1}+R_2^{-1} & -R_2^{-1} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\
0 & -R_2^{-1} & R_2^{-1}+R_3^{-1} & -R_3^{-1} & \cdots & 0 & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{\mathrm{s}(n-i-5)}^{-1}+R_{\mathrm{s}(n-i-4)}^{-1} & -R_{\mathrm{s}(n-i-4)}^{-1} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\
0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -R_{\mathrm{s}(n-5)}^{-1} & R_{\mathrm{s}(n-5)}^{-1}+R_{\mathrm{s}(n-4)}^{-1}
\end{bmatrix}
$$

$$
\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}
W_1+\dfrac{W_2}{2} & \dfrac{W_2}{2} & W_3 & W_4 & 0 & \cdots & 0 & \dfrac{t_{en}}{R_{\mathrm{s}(n-4)}}
\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}
$$

$$
\boldsymbol{T}_1=\begin{bmatrix}
\dfrac{\mathrm{d}t_1}{\mathrm{d}t} & \dfrac{\mathrm{d}t_2}{\mathrm{d}t} & \dfrac{\mathrm{d}t_3}{\mathrm{d}t} & \dfrac{\mathrm{d}t_4}{\mathrm{d}t} & 0 & \cdots & \dfrac{\mathrm{d}t_{n-i}}{\mathrm{d}t} & \dfrac{\mathrm{d}t_n}{\mathrm{d}t}
\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}
$$

$$
\boldsymbol{T}_2=\begin{bmatrix}
t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & 0 & \cdots & t_{n-i} & t_n
\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}
$$