

文献标识码: B 文章编号: 1003-0492 (2023) 09-076-09 中图分类号: TP391

基于多物理场耦合的高压电缆温度监控及仿真技术研究

Research on High-Voltage Cable Temperature Monitoring and Simulation Technology Based on Multi-physical Field Coupling

★ 邵宝宇, 高金秋 (国网北京市电力公司电缆分公司, 北京 100022)

★ 赵春明, 李艳果 (北京卓越电力建设有限公司, 北京 100029)

★ 张彦辉 (国网北京市电力公司电缆分公司, 北京 100022)

摘要: 随着电力行业的不断发展, 电缆在其中扮演着越来越重要的角色。而电缆常常由于温度过高造成运行故障, 引发经济损失, 因此电缆运行过程的温度变化值得我们深入研究。在城市电力建设中, 电缆隧道敷设因其负载能力高、便于管理和巡检等优点而越来越被广泛使用, 但目前鲜有关于隧道敷设多回高压电缆线路布置优化的研究。为了充分利用隧道内的电缆的负载能力, 本文针对电缆隧道内高压电缆测温装置单一、无法有效利用其它传感器的数据进行电缆绝缘温度监测的问题, 提出用多物理场耦合仿真软件及有限元分析法对高压电缆内部绝缘层温度进行仿真计算。成果预期能够通过仿真计算, 能够真实有效地反映在高压电缆运行过程中绝缘层所承受的长期工作温度, 对预防电缆绝缘热老化具有积极作用。

关键词: 电缆绝缘; 温度监测; 绝缘老化; 电缆发热; 应用开发; 离线式

Abstract: With the ongoing development of the electric power industry, cable plays an increasingly important role. The cable often fails due to high temperature, resulting in economic losses, so the temperature change of cable operation process is worth our in-depth study. In urban power construction, cable tunnel laying is more and more widely used because of its advantages such as high load capacity, easy management and inspection. Currently, there are few studies on optimizing the layout of multi-loop high-voltage cable laying in tunnels. In order to make full use of the load capacity of the cable in the tunnel, this paper aims to address the problem that the temperature measurement device of the high-voltage cable in the cable tunnel is single, and the data of other sensors cannot be effectively used to monitor the cable insulation temperature, and proposes to use the multi-physical field coupling simulation software and finite element analysis method to simulate the temperature of the internal insulation layer of the high-voltage cable. The results are expected to truly and effectively reflect the long-term working temperature of the insulation layer in the running process of the high-voltage cable through the simulation calculation, which has a positive role in preventing the thermal aging of the cable insulation.

Key words: Cable insulation; Temperature monitoring; Insulation aging; Cable heating; Application development; Off-line

随着电力电缆规模的扩大, 在一定程度上电缆成为了不可或缺的输电设备, 并在目前的电力系统中得到了非常广泛的应用^[1]。由于电缆敷设所在环境的特殊性, 所以电缆受外界大气条件以及周边环境的影响很小, 不会受到雷电、冰灾、鸟类、风筝等诸多因素的干扰^[2], 具有高度的可靠性。

电力电缆线路最重要的参量就是载流量^[7], 它指的是当电缆在100%负荷运行时电缆所能承受的最极限电流值^[8]。很明显, 电缆的经济性与电缆的载流量是成正比的, 由此繁衍出电缆温度场的概念。电缆发热的主要来源就是最内层铜芯流过的交流电流, 电缆导体、绝缘层、屏蔽层以及防护层都会产生一定的焦耳热和绝缘损耗热, 这些热源最终会散发到周围环境的介质, 周围环境的介质就会呈现一定的温度, 此时电缆和周围环境的温度总和就是电缆的温度场。电缆内部导芯的截面积和载流量有着正比的关系, 在电缆设计当中如果将载流量设计的很高, 最终会在电缆选型方面造成非常不必要的浪费, 投资很大, 经济效益很低。

如果对电力电缆采用有限元法分析, 可以模拟电缆的各种工况及实验方案, 减少实验时间和经费, 而且所得到的数据准确性很高, 实时性也很强, 这样就大幅度地减少了维护人员的工作量。同时电缆在不同工况下仿真结果也会在后台积累大量的数据, 这对电缆的评估是非常重要的, 给负责管理的电力系统人员提供了宝贵的资源。

本文首先通过分析多回路高压电缆的电学和热学原理, 研究其电缆载流量解析计算方法, 并以某隧道敷设

电缆线路隧道为例，研究隧道内电磁场和温度场的微分方程，分析场路结合的原理；然后基于COMSOL有限元仿真软件搭建隧道敷设多回路高压电缆的电-磁-热多物理场结合电路仿真模型，仿真计算电缆外皮各部位温度和周围环境温度变化等。

本文具体的工作主要包括以下几点：

(1) 介绍电力电缆的基本结构及原理，在工程传热学的基础上结合热量传递的三种方式对电缆的损耗进行理论计算，探讨电缆的温度场数值计算方法，为仿真计算提供理论基础。

(2) 基于有限元法建立高压单芯电缆的多物理场耦合模型，模拟隧道敷设多回路高压电缆的电-磁-热-流特性；结合电缆实际敷设环境，仿真模式尺寸更精确地同时在一期基础上考虑隧道环境，加入隧道温度、湿度等影响因素，模拟不同排列方式与不同电压等级下的电缆升温情况，并对计算结果进行分析。

(3) 基于上述反馈结果，根据电缆运行的实际情况建立了一个离线式COMSOL Complier电缆隧道及电缆本体温度场分布仿真APP，从而提升了对电缆故障的预判能力以及故障检修速度，大大降低了检修工作的难度。

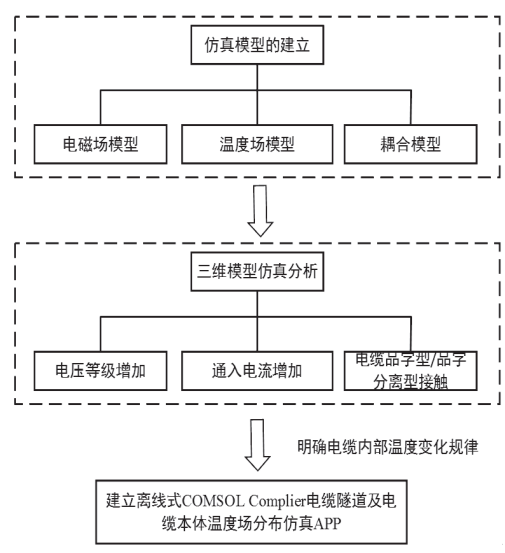


图1 技术路线

1 高压电缆及电缆隧道仿真建模方法

1.1 电缆仿真几何模型

此次项目设计了矩形隧道、拱形隧道2种不同的电

缆隧道形状以及三根电缆按照品字接触型敷设或品字分离型敷设2种不同的电缆排列方式，两两组合成4种不同的模型；采用了COMSOL Multiphysics建立电缆、电缆隧道等效模型。模型剖面结构及尺寸如图2~图6所示。

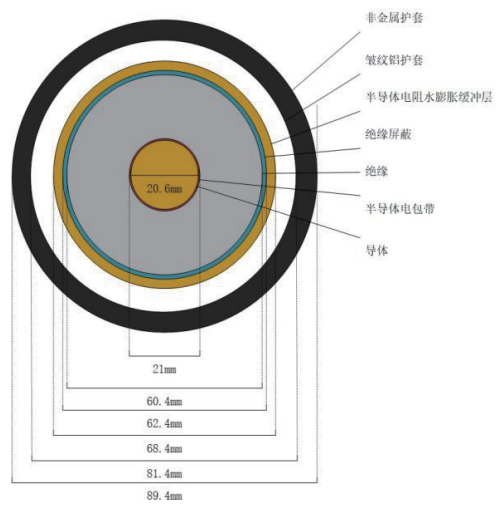


图2 电缆剖面图例

电缆仿真模型具有7层结构，分别是导体、半导体电包带、绝缘、绝缘屏蔽、半导体电阻水膨胀缓冲层、皱纹铝护套和非金属护套。不同结构对应的几何直径均在图2中标出。

当电压为66kV时电缆采用品字接触型敷设，如图3所示。

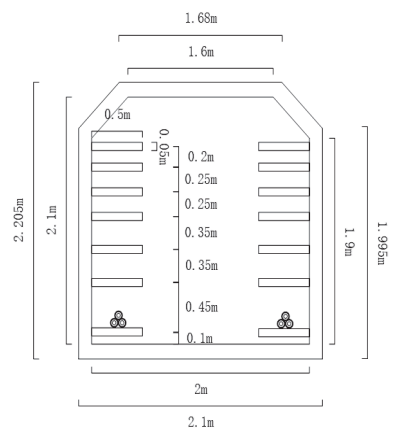


图3 矩形隧道中三根电缆按照品字接触型敷设的模型图例

由图3可知，电缆按照品字接触型敷设时矩形隧道内部左右对称设有7对支架，支架尺寸一致，但间距不等。在由下至上数的第一层支架上放上按照品字接触型敷设的三根电缆。

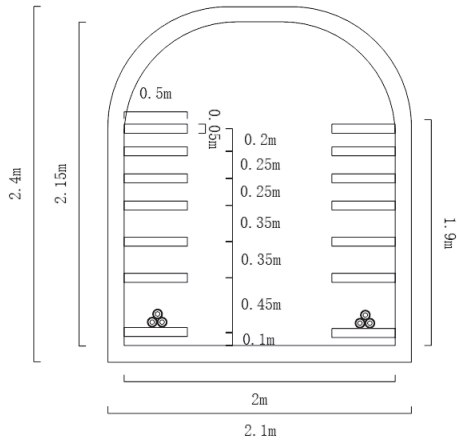


图4 拱形隧道中三根电缆按照品字接触型敷设的模型图例

拱形隧道与矩形隧道内部构造相同，宽度相同。但因外层顶部设计不同，故隧道高度较矩形隧道高出0.195m，如图4所示。

当电压为220kV时电缆采用品字分离型敷设，如图5所示。

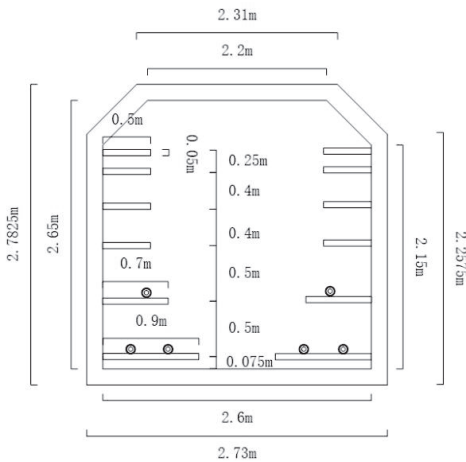


图5 矩形隧道中三根电缆按照品字分离型敷设的模型图例

由图5可知，电缆按照品字分离型敷设时矩形隧道内部左右对称设有6对支架，支架尺寸不一致，间距不等。在由下至上数的第一层支架上放有两根分离的电缆，在由下至上数的第二层支架上放有一根电缆。

拱形隧道与矩形隧道内部构造相同，宽度相同。但因外层顶部设计不同，故隧道高度较矩形隧道高出0.2175m，如图6所示。

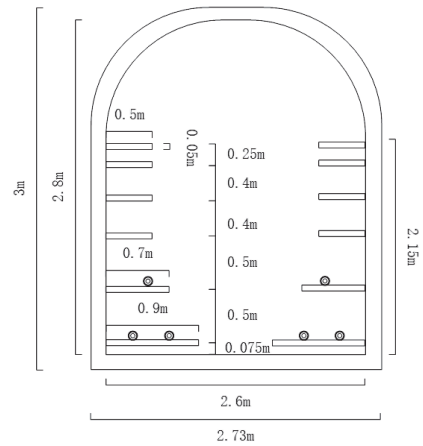


图6 拱形隧道中三根电缆按照品字分离型敷设的模型图例

1.2 电缆发热耦合原理

在COMSOL中建模之前先分析涉及的控制方程，加载的电压电流基于电场控制方程，温度分布基于传热控制方程，导体通电产生的焦耳热基于电热耦合控制方程，控制方程应包括电场模块、传热模块和电热耦合模块。

1.2.1 电-磁-热场耦合模型

1.2.1.1 电场模块控制方程为：

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

式(1)为麦克斯韦—安培定律的微分形式，其中 ∇ 为矢量微分算符， J 为电流密度矢量， A/m^3 表明某个点的磁场强度 H 的旋度等于该点的电流密度。

$$B = \nabla \times A \quad (2)$$

磁通密度呈螺旋线形，或者说无散度。这意味着，磁场可以写成其他矢量场的旋度，如式(2)所示。其中，场 A 称为矢量磁势。

$$J = \sigma E \quad (3)$$

式(3)中， σ 为电导率， S/m ， E 为电场强度矢量， V/m ，说明电流密度与电场成正比。

1.2.1.2 传热模块控制方程

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_{ted} \quad (4)$$

式(4)为用温度描述能量守恒的方程。其中 Q 为热源发热功率， W/m^3 ， Q_{ted} 为热弹性阻尼热源， W/m^3 ， ρ 为密度， kg/m^3 ， \mathbf{u} 是固体传热的速度矢量， m/s ， T 为温度， K ， C_p 为恒压热容， $J/(kg \cdot K)$ 。

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \quad (5)$$

式(5)为傅里叶导热定律(k 为导热系数, $W/(m \cdot K)$), \mathbf{q} 为传导热通量矢量, W/m^2 。

1.2.1.3 电热耦合模块控制方程

为了将电热耦合, 需要找出焦耳热与电流密度之间的关系, 如式(6)所示。

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_c \quad (6)$$

$$Q_c = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \quad (7)$$

式(7)中, Q_c 为电磁热源, W/m^3 为电流密度矢量, A/m^3 。

1.2.2 参数设置

电缆仿真模型中不同材料的参数设计如表1所示。

表1 模型中不同材料的参数设计

材料	相对磁导率	相对介电常数	密度 kg/m^3	恒压热容 $J/kg \cdot K$	导热系数 $W/(m \cdot K)$
主要绝缘层: 半导体电包带、绝缘、绝缘	2.5* (1-0.001j)	1	100	100	0.46
外部绝缘层: 皱纹铝护套	1	1	100	100	0.17
外部环境: 空气、非金属护套	1	1	rho (pA,T)	rho (pA,T)	Cp (T)
导体	1	1	100	100	50
屏蔽层: 半导体电阻水膨胀缓冲层	1	1	100	100	50

1.2.3 边界条件

本模型默认导体通电以前, 整个系统中磁矢势为0, 即仅考虑由电流产生的磁场; 整个系统初始时刻温度为293.15K。

· 线圈

本电缆模型中导体默认为各向同性, 每组品字形电缆中各电缆导体电流相位差设置为120。电缆中心导体电导率初始值满足 $\sigma_{con0} = 5.96 * 10^7 S/m$, 电导率与温度的关系为:

$$\sigma_{con} = \rho_{con} * \sigma_{con0} / (1 + \alpha_{con} * (|T| - T_{ref}))$$

其中, T_{ref} 是参考温度(通常为20°C, 即273.15K); α_{con} 是主线圈电阻率温度系数, 取 $3.9 * 10^{-3}$ 。 ρ_{con} 是主导体横截面积与中心导体面积之比, 可通过线圈面积和线圈直径计算得到, 如下式:

$$\rho_{con} = S_{con} / (\pi * (D_{con} / 2)^2)$$

其中, S_{con} 为线圈面积, 取 $8 * 10^{-4} m^2$; D_{con} 为线圈直径, 取0.0206m。

· 金属屏蔽层

本模型中将电缆中金属屏蔽层以线圈的形式等效, 屏蔽层电导率与温度的关系为:

$$\sigma_{scr} = \sigma_{scr0} / (1 + \alpha_{scr} * (|T| - T_{ref}))$$

其中, 屏蔽层电导率初值 σ_{scr0} 为 $4.55 * 10^6 S/m$; α_{scr} 是屏蔽层电阻率温度系数, 取 $3.86 * 10^{-3}$; T_{ref} 是参考温度(通常为20°C, 即273.15K)。

· 热接触

模型中空气与隧道内壁之间以对流热通量的形式进行热量交换, 热通量与温度和传热系数的关系为:

$$q_0 = h \cdot (T_{ext} - T)$$

其中, T_{ext} 是外部温度, 取273.15 K。

h 为传热系数, 可以通过海床的平均导热系数、电缆直径和设定环境温度的距离计算得到:

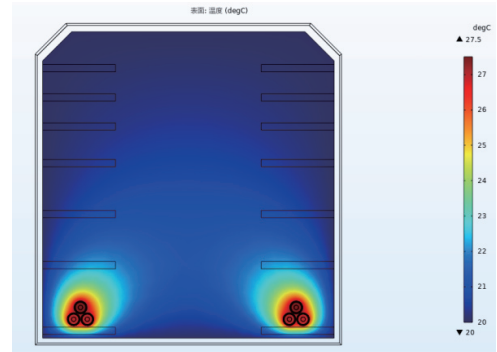
$$h = k_{sea} / (D_{cab} / 2 * \ln(L / (D_{cab} / 2)))$$

其中, k_{sea} 是海床的平均导热系数, 取 $1 W/(m \cdot K)$; D_{cab} 是电缆直径, 取0.2m; L 是设定环境温度的距离, 取5m。

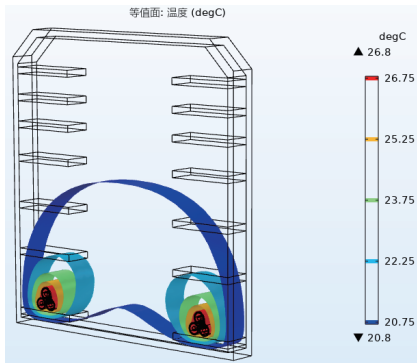
2 电缆隧道温度场仿真结果与讨论

2.1 不同隧道类型下电缆隧道温度分布情况

根据实际隧道类型, 选择四种不同的模型进行仿真, 并对模型求解电缆升温问题, 结果如图7~图10所示。



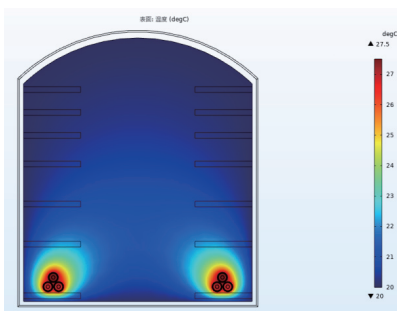
(a) 电缆截面温度图



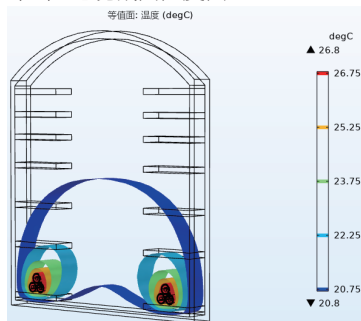
(b) 温度等值面3D图

图7 设置电缆长度为200mm, 环境温度为20°C, 电流为110A, 电压为66kV时三根电缆按品字接触型敷设在矩形隧道的热场仿真结果

由图7可知, 当矩形隧道环境温度为20°C, 电流为110A, 电压为66kV, 三根电缆按照品字接触型敷设在矩形隧道时导线内部最高温度为27.5°C, 三根电缆表面温度为26.75°C。热场从导线内部向外辐射, 电缆周围温度较高于环境温度, 未敷设电缆部分温度不变。



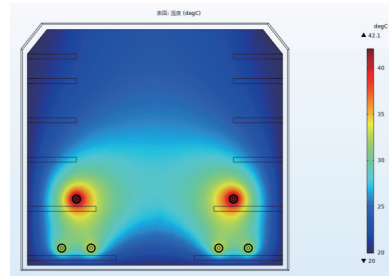
(a) 电缆截面温度图



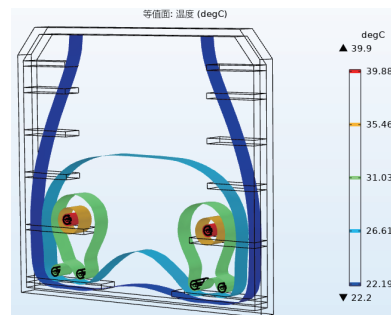
(b) 温度等值面3D图

图8 设置电缆长度为200mm, 环境温度为20°C, 电流为110A, 电压为66kV时三根电缆按品字接触型敷设在拱形隧道的热场仿真结果

由图8可知, 当拱形隧道环境温度为20°C, 电流为110A, 电压为66kV, 三根电缆按照品字接触型敷设在拱形隧道时导线内部最高温度为27.5°C, 三根电缆表面温度均为26.75°C。热场从导线内部向外辐射, 电缆周围温度较高于环境温度, 未敷设电缆部分温度不变。



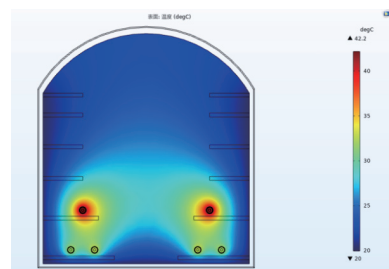
(a) 电缆截面温度图



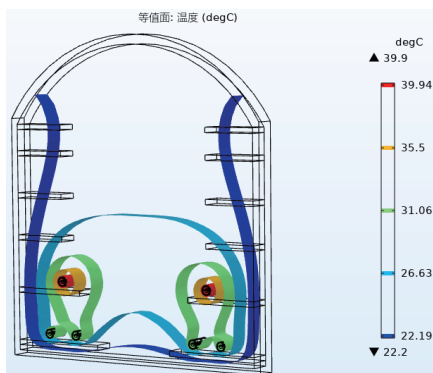
(b) 温度等值面3D图

图9 设置电缆长度为200mm, 环境温度为20°C, 电流为110A, 电压为220kV时三根电缆按品字分离型敷设在矩形隧道的热场仿真结果

由图9可知, 当矩形隧道环境温度为20°C, 电流为110A, 电压为220kV, 三根电缆按照品字分离型敷设在矩形隧道时电缆导线内部最高温度为42.1°C, 由上部电缆体现。热场主要从上部电缆导线内部向环境辐射, 三根电缆周围温度都较高于环境温度, 上部电缆表现更明显, 上部电缆表面温度约为39.88°C, 下部电缆内部及表面温度均为31.03°C, 未敷设电缆部分温度基本不变。



(a) 电缆截面温度图



(b) 温度等值面3D图

图10 设置电缆长度为200mm，环境温度为20°C，电流为110A，电压为220kV时三根电缆按品字分离型敷设在拱形隧道的热场仿真结果

由图10可知，当拱形隧道环境温度为20°C，电流为110A，电压为220kV，三根电缆按照品字分离型敷设时电缆导线内部最高温度为42.2°C，由上部电缆体现。热场主要从上部电缆导线内部向环境辐射，三根电缆周围温度都较高于环境温度，上部电缆表现更明显，上部电缆表面温度为39.94°C，下部电缆内部及表面温度均为31.06°C，未敷设电缆部分温度基本不变。

让我们将以上数据填入表格2内，以获得更直观的结论。

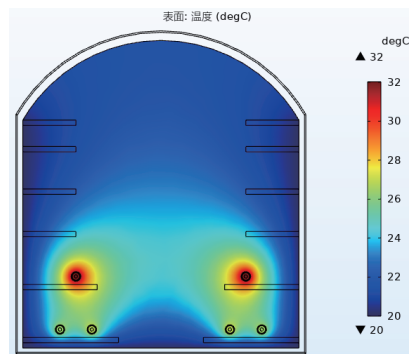
表2 热场仿真结果数据表

敷设类型 温度 (°C)	品字接触型 (66kV)		品字分离型 (220kV)	
	矩形隧道	拱形隧道	矩形隧道	拱形隧道
最高温度 (°C)	27.5	27.5	42.1	42.2
表面温度 (°C)	26.75	26.75	39.88 (上部) 31.03 (下部)	39.94 (上部) 31.06 (下部)

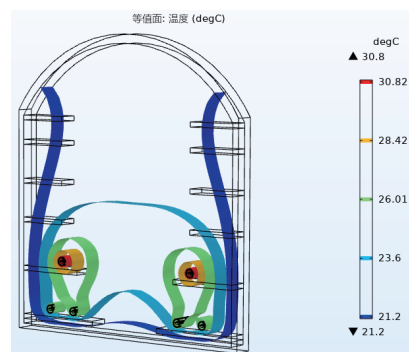
综上所述可知，仅当电缆隧道结构不同时，电缆温升情况基本一致，环境温度受电缆影响不大；当电缆敷设类型不同时，按品字分离型敷设的电缆热场辐射得更远，但高温范围较小；当电压条件不同时，电压等级为220kV的电缆导线内部温度更高。

2.2 不同负荷情况下电缆隧道温度分布情况

选取将电缆按品字分离型敷设在拱形隧道内的仿真模型，改变施加的电流幅值，观察不同的电流值对其的影响。选取的电流值分别为80A、110A、125A、140A。



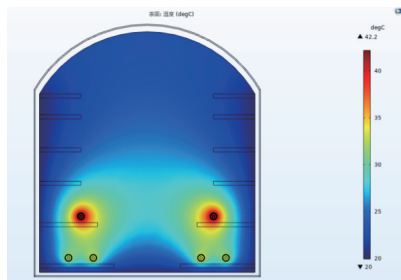
(a) 电缆截面温度图



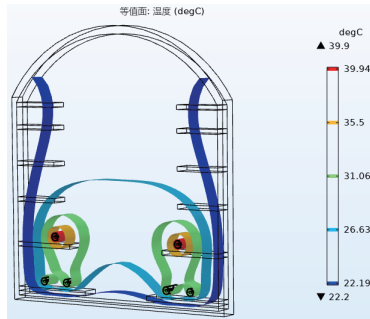
(b) 温度等值面3D图

图11 设置电缆长度为200mm，环境温度为20°C，电流为80A，电压为220kV时三根电缆按品字分离型敷设在拱形隧道的热场仿真结果

由图11可知，当拱形隧道环境温度为20°C，电流为80A，电压为220kV，三根电缆按照品字分离型敷设时电缆导线内部最高温度为32°C，由上部电缆体现。热场主要从上部电缆导线内部向环境辐射，三根电缆周围温度都较高于环境温度，上部电缆表面温度为30.82°C，下部电缆内部及表面温度均为26.01°C，未敷设电缆部分温度（隧道环境温度）上升至21.2°C。



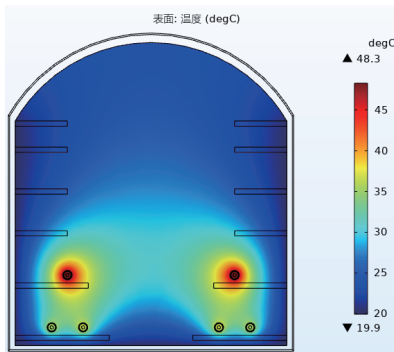
(a) 电缆截面温度图



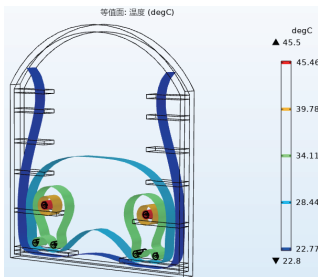
(b) 温度等值面3D图

图12 设置电缆长度为200mm，环境温度为20°C，电流为110A，电压为220kV时三根电缆按品字分离型敷设在拱形隧道的热场仿真结果

由图12可知，当拱形隧道环境温度为20°C，电流为110A，电压为220kV，三根电缆按照品字分离型敷设时电缆导线内部最高温度为42.2°C，由上部电缆体现。热场主要从上部电缆导线内部向环境辐射，三根电缆周围温度都较高于环境温度，上部电缆表面温度为39.94°C，下部电缆内部及表面温度均为31.06°C，未敷设电缆部分温度（隧道环境温度）上升至22.2°C。



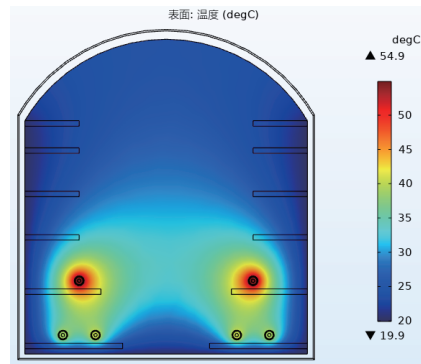
(a) 电缆截面温度图



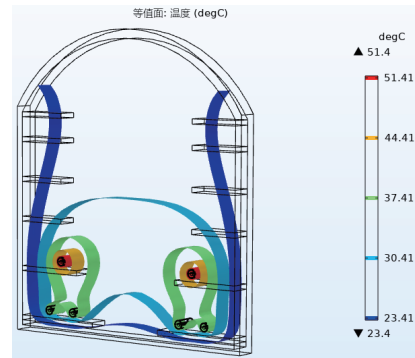
(b) 温度等值面3D图

图13 设置电缆长度为200mm，环境温度为20°C，电流为125A，电压为220kV时三根电缆按品字分离型敷设在拱形隧道的热场仿真结果

由图13可知，当拱形隧道环境温度为20°C，电流为125A，电压为220kV，三根电缆按照品字分离型敷设时电缆导线内部最高温度为48.3°C，由上部电缆体现。热场主要从上部电缆导线内部向环境辐射，三根电缆周围温度都较高于环境温度，上部电缆表面温度为45.46°C，下部电缆内部及表面温度均为34.11°C，未敷设电缆部分温度（隧道环境温度）上升至22.8°C。



(a) 电缆截面温度图



(b) 温度等值面3D图

图14 设置电缆长度为200mm，环境温度为20°C，电流为140A，电压为220kV时三根电缆按品字分离型敷设在拱形隧道的热场仿真结果

由图14可知，当拱形隧道环境温度为20°C，电流为140A，电压为220kV，三根电缆按照品字分离型敷设时电缆导线内部最高温度为54.9°C，由上部电缆体现。热场主要从上部电缆导线内部向环境辐射，三根电缆周围温度都较高于环境温度，上部电缆表面温度为51.41°C，下部电缆内部及表面温度均为37.41°C，未敷设电缆部分温度（隧道环境温度）上升至23.4°C。

让我们将以上数据填入表格3内，以获得更直观的结论。

表3 热场仿真结果数据表

电流值 温度	80A	110A	125A	140A
最高温度 (°C)	32	42.2	48.3	54.9
表面温度 (°C)	30.82 (上部 电缆) 26.01 (下部 电缆)	39.94 (上部 电缆) 31.06 (下部 电缆)	45.46 (上部 电缆) 34.11 (下部 电缆)	51.41 (上部 电缆) 37.41 (下部 电缆)
上下部电缆表 面温差 (°C)	4.81	8.88	11.35	14
隧道环境温度 (°C)	21.2	22.2	22.8	23.4

从表格中数据来看,当施加给电缆的电流值越大时,电缆的最高温度越高(由上部电缆体现),上下部电缆表面温差越大,未敷设电缆部分(隧道环境温度)上升得越多。这是因为当负荷电流增大时,铜芯导体的发热量随之增大,造成铜芯导体的温度升高;当负荷电流较小时,铜芯导体的发热量小,导致铜芯导体的温度较低;热场从导线内部向环境辐射,影响了环境温度。

3 离线式电缆隧道温升APP的开发与应用

3.1 COMSOL Compiler工作原理

COMSOL Compiler™的作用是将我们所需的功能封装起来,编译成独立的可执行软件。在仿真模型建好后,我们可以将使用COMSOL Multiphysics® APP开发器创建的仿真APP编译成独立的可执行文件,以在Windows®、Linux®和macOS操作系统上运行(需要在Windows®版的COMSOL Multiphysics®来构建APP)。编译操作十分简单,只需在“APP开发器”用户界面中设置好相关数据,再单击“编译”按钮即可。还可以在“APP开发器”的“可执行文件”设置窗口中修改相关选项,选择已设计好的启动画面和桌面图标,当启动已编译的仿真APP时,就会显示该启动画面。

3.2 电缆隧道温升APP开发流程

电缆隧道温升APP开发流程可分为:确认物理仿真模型,明确使用对象,界面设计及开发,调试APP正常运行、编译部署并投入使用。

生成电缆隧道温升APP步骤如下:

- (1) 建立所需的仿真模型后,打开“APP开发器”。
- (2) 点击“新建表单”,选择我们所需加入APP

中的内容。

(3) 选择所需要的输入、输出项,例如给电缆施加的电流、电压值。

(4) 选择需要生成的图形。

(5) 添加相应的功能按钮。

(6) 将添加的内容进行排版。

(7) 调节后,呈现效果如下。

(8) 点击“可执行文件”,进行编译。

(9) 在设置窗口中,选择所需的平台及输出目录,完善相关数据,修改runtime为嵌入(Embedded);点击“编译”。

(10) 生成APP如下,可填入所需的电缆长度、电流电压值以及环境温度,进行计算,即可得到电缆隧道温升结果。

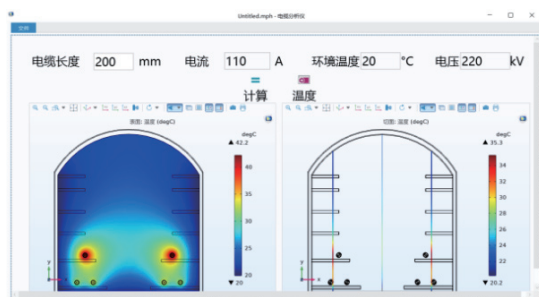


图15 生成APP效果图

3.3 电缆隧道温升APP应用效果

最终生成的电缆隧道温升APP界面如图15所示。为了模拟不同情况下电缆温升的效果,可改变电缆长度、电流、环境温度以及电压的数值,得到不同的计算结果。还可以通过鼠标左键拖拽生成图形,以便通过各个角度观察所生成的模型。

4 总结与展望

电缆隧道敷设因其负载能力高、便于管理和巡检等优点而越来越广泛地被用于城市输电网络使用。为了让隧道内的电缆被充分利用,本文对隧道敷设不同接触类型高压电缆进行了多物理仿真研究。

本研究选取隧道内高压电缆作为研究对象进行三维建模,利用多物理场仿真软件建立高压电缆及电缆隧道模型,根据其电力隧道和高压电缆结构进行三维建模,考察在隧道类型、导线载流量和排列方式不同的情

况下对导线温度的影响,得到了初步的仿真结果。

通过实例计算与结果对比分析证实了温度场模型的正确性,结果表明:

(1) 当电缆隧道结构不同时,电缆温升情况基本一致,环境温度受电缆影响不大。

(2) 不同的排列方式导致导线散热不同,从而温度差异也不同。品形排列方式使得电缆堆叠在一起,不利于散热,故整体温度差异不大;品字分离型敷设热场辐射得更远,但由于隧道内空气流动对电缆散热起到了积极作用,能带走部分热量,导致上下层电缆温度差距较大。因此在实际敷设时适当在敷设区域内增加出风口或者引入通风设备,均可以有效降低电缆温升,从而达到提升电缆载流量的效果。

(3) 相同排列方式的电缆温度及环境温度均随着通入电流的增加而升高。 **AP**

作者简介:

邵宝宇 (1994-), 男, 天津人, 助理工程师, 学士, 现就职于国网北京市电力公司电缆分公司, 主要从事电缆运维、检修、试验等工作。

高金秋 (1994-), 女, 北京人, 助理工程师, 学士, 现就职于国网北京市电力公司电缆分公司, 主要从事电缆运维、检修、试验等工作。

赵春明 (1980-), 男, 北京人, 工程师, 专科, 现就职于北京卓越电力建设有限公司, 主要从事电缆运维、检修、试验等工作。

李艳果 (1976-), 男, 河北人, 工程师, 学士, 现就职于北京卓越电力建设有限公司, 主要从事电缆运维、检修、试验等工作。

张彦辉 (1984-), 女, 吉林长春人, 高级工程师, 学士, 现就职于国网北京市电力公司电缆分公司, 主要从事电缆运维、检修、试验等工作。

参考文献:

- [1] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (10): 8 - 17.
- [2] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (13): 7 - 12.
- [3] 蔡光柱, 赵爽, 杨振, 等. 基于物联网技术的特高压导线舞动检测仪设计[J]. 山东电力技术, 2020, 47 (09): 34 - 38.
- [4] 赵晚君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 1 - 16.
- [5] 刘刚, 雷鸣, 阮班义, 等. 考虑轴向传热的单芯电缆芯温度实时计算模型研究[J]. 高电压技术, 2012, 38 (8): 1877 - 1883.
- [6] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (34): 6007 - 6020.
- [7] 周远翔, 赵健康, 刘睿, 等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 高电压技术, 2014, 40 (9): 2593 - 2612.
- [8] 尹毅, 韩社教, 屠德民. 固体绝缘中空间电荷测量装置的研制和应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (8): 2 - 6.
- [9] 刘刚, 王鹏宇, 周凡, 等. 电力电缆暂态热路模型中绝缘层的优化[J]. 高电压技术, 2018 (5).
- [10] 张荣, 李忠华, 郭文敏, 等. 同轴电极下非线性绝缘介质阶跃响应仿真分析[J]. 高电压技术, 2008, 34 (7): 1363 - 1367.
- [11] 叶信红, 韩宝忠, 黄庆强, 等. 交联聚乙烯绝缘高压直流电缆电场分布计算[J]. 电机与控制学报, 2014, 18 (5): 19 - 23.
- [12] 杨佳明, 王暄, 韩宝忠, 等. LDPE纳米复合介质的直流电导特性及其对高压直流电缆中电场分布的影响[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (9): 1454 - 1461.