

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.021

## 基于电热流三场耦合的隧道敷设高压电缆温度分布仿真方法研究

张强<sup>1</sup>, 鞠登峰<sup>1</sup>, 黄杰<sup>1</sup>, 曲全磊<sup>2</sup>, 魏斌<sup>3</sup>, 胡靖<sup>3</sup>, 马国明<sup>3</sup>

(1. 国网智能电网研究院有限公司, 北京 102209; 2. 国网青海省电力公司电力科学研究院, 西宁 810001;  
3. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

**摘要:** 导体温度是制约电缆载流量的直接因素,在隧道电缆集群敷设复杂环境下,现有IEC 60287中的电缆热路模型对电缆温度计算存在误差。为此,基于电场、热场、流体场三场耦合建立了单回高压电缆温度计算仿真模型,针对对流换热系数难以确定的难题,设计建立了电缆多层结构温度原位检测试验平台,基于温升试验实测数据确定了模型中的对流换热系数,与试验结果对比,表明所建立的多场耦合模型可以准确获得单回高压电缆各层温度分布。之后,针对电缆隧道通风强制对流影响,在仿真模型中耦合考虑湍流因素,将单回电缆模型推广为隧道敷设的多回高压电缆模型。对隧道中实际运行的多回高压电缆表面温度和载流量进行实测,结果表明,文中所提出的多场耦合计算方法与IEC方法相比,仿真计算平均误差降低了11.08%。  
**关键词:** 高压电缆; 电热流耦合场仿真; 隧道敷设; 有限元法

### Study on Simulation Method for Temperature Distribution of High-voltage Cables Laid in Tunnels Based on Electric-thermal-fluid Fields Coupling

ZHANG Qiang<sup>1</sup>, JU Dengfeng<sup>1</sup>, HUANG Jie<sup>1</sup>, QU Quanlei<sup>2</sup>, WEI Bin<sup>3</sup>, HU Jing<sup>3</sup>, MA Guoming<sup>3</sup>

(1. State Grid Smart Grid Research Institute, Beijing 102209, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810001, China; 3. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Conductor temperature is a direct factor limiting the cable ampacity. In the complex environment of tunnel-based clustered cable laying, the thermal circuit model in the current IEC 60287 standard exhibits errors in calculating cable temperatures. Therefore, a temperature calculation simulation model of single-circuit high voltage cable based on the coupling of electric field, thermal field and fluid field is set up. As for the difficult determination of convective heat transfer coefficient, a temperature on-site testing platform of cable multi-layer structure is designed and set up. Based on the test data of temperature rise, the convective heat transfer coefficient in the model is determined. The comparison with the experimental results shows that the established multi-field coupling model can accurately obtain the temperature distribution of each layer of single-circuit high voltage cable. Subsequently, as for the influence of forced convection from tunnel ventilation on cable cooling, the turbulent factors are incorporated into the simulation model. The single-circuit cable model is extended to the multi-circuit high voltage cable model in the tunnel. The surface temperature and ampacity of multi-circuit high voltage cables operating in the tunnel is measured. The result shows that the proposed multi-field coupling calculation method, compared with the IEC method, can reduce the average error by 11.08%.

**Key words:** high-voltage cables; simulation of electric-thermal-fluid field; tunnel laying; finite element method

收稿日期:2025-09-07; 修回日期:2025-11-20

基金项目:国家电网有限公司总部管理科技项目(5500-202158334A-0-0-00)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5500-202158334A-0-0-00).

## 0 引言

为了满足持续增长的用电负荷和城市规划建设需求,越来越多的大型城市采用高压电缆隧道集群敷设工程来加强电网建设,提高供电效率<sup>[1-4]</sup>。在隧道敷设方式下,电缆布置方式和敷设环境等对电缆导体温度的影响不可忽略<sup>[5-6]</sup>。

高压电缆敷设时,导体温度是确定最大允许载流量的重要依据<sup>[7]</sup>。目前广泛使用的IEC 60287标准通过集中参数将电缆传热转为热路模型,以便于计算电缆的额定载流量<sup>[8]</sup>。但是在复杂的隧道敷设环境下,该标准中的电缆热路模型并不准确。IEC 60287标准将隧道敷设环境简化为电缆放置于静止空气中且不受阳光照射。但实际上,隧道下电缆的敷设环境和实际运行工况对电缆热路模型中的各个参数产生了不可忽略的影响。一方面,隧道两端通风,内部存在强制对流,影响热空气流动。另一方面,相邻电缆之间的排列方式和排列间距不同,会影响电缆的互热效应。例如,常见的电缆隧道安装方式有品字接触排布和水平排布,表面间距和分组位置的不同导致电缆间互热效应差异较大,进而影响散热效果<sup>[9]</sup>。上述两方面的问题导致IEC计算方法在计算隧道敷设电缆温度、评估电缆载流量时存在误差。

目前研究中,俄罗斯学者Simon Dubitsky<sup>[10]</sup>指出由于电缆间的电磁和热相互作用,电缆载流量的IEC计算结果与仿真结果存在较大误差。Ali Sedaghat<sup>[11]</sup>认为电缆稳态条件的IEC标准计算与实验测试和有限元方法仿真之间存在明显的不匹配现象,其根源是电缆表面和外部空气传热计算不准确。他优化了电缆表面与空气的热阻计算方法,开展了有限元仿真和三芯电缆试验验证,但仅分析了排管敷设下电缆的温度分布情况,未涉及电缆隧道敷设复杂环境。文[12]中提出,根据电缆在排管、隧道等不同敷设条件下的传热方式的不同,可以构建不同的散热热阻模型,包括导热散热热阻、对流散热热阻和辐射散热热阻。相应地,提出了不同敷设条件下散热方式和热阻的量化规律,并构建了基本的热路模型。上海电力大学马爱清在考虑隧道电缆间互热效应对散热系数的影响后,通过重新修正电缆热阻计算参数,结合电缆材料属性、安装方式、分组位置和环境等因素,提出了一种能够准确、快速计算隧道电缆导体温度的热路模型。尽管该模型能够得到比较准确的结果,但与有限元仿真结果

仍存在一定的差距。

文[13-15]基于有限元仿真,探讨了隧道敷设电缆载流量的影响因素,包括隧道温度、隧道通风、电缆回路数量等。文[16]基于电热耦合,搭建了直埋敷设方式下的电缆仿真模型,深入分析了环境参数和载流量对电场分布以及温度场的影响规律。文[17]同样基于电热耦合搭建电缆模型,但主要分析了导体材料的电阻率、临界电流密度和运行温度之间的强耦合关系。以上仿真模型均欠缺试验验证,仿真结果准确性未知。文[18-19]基于热流耦合,搭建了电缆沟敷设方式下的电缆仿真模型,并开展真实试验进行验证,但由于未能考虑到电缆中负荷的变化对各层温度分布的影响,使得仿真结果与测试结果均存在一定差距。

文中为掌握隧道敷设情况下电缆温度分布,综合考虑了隧道环境因素、电缆架构及电缆间互热效应对散热的影响,基于电场、热场、流体场三场耦合建立了高压电缆温度计算仿真模型。对隧道中实际运行的多回高压电缆表面温度和载流量进行实测,将仿真计算结果与IEC计算结果进行对比,验证了所提出方法的准确性。

## 1 单回电缆温度场分布仿真

### 1.1 单回电缆初始仿真模型构建

文中主要针对实际中使用较多的110 kV高压交联聚乙烯绝缘电缆开展研究,该电缆的结构见图1<sup>[20]</sup>。

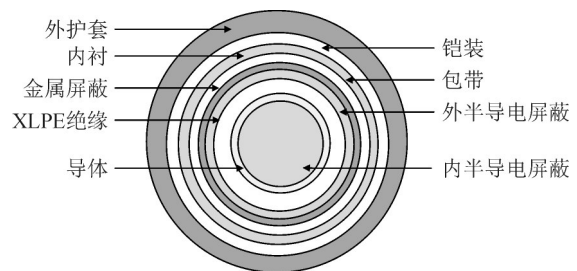


图1 110 kV交联聚乙烯电缆结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 110 kV XLPE cable structure

#### 1.1.1 数学模型

在文中建立的数学模型中,电缆铜芯为热源。含内热源的固体导热偏微分方程为<sup>[21]</sup>

$$\nabla \cdot (k \cdot \nabla T) = -Q + c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式(1)中: $T$ 为温度场内各点温度,K; $k$ 为各微元体的导热系数,W/(m·K); $c$ 为各微元体的比热容,J/(kg·K); $Q$ 为单位体积中内热源的生成热,W/m<sup>3</sup>; $t$ 为时间,s。

电缆群在隧道内的敷设会形成一个稳态温度

场,该场景属于存在内部热源的、各向同性、二维的稳态导热问题。针对带有热源的区域(如电缆导体、金属屏蔽层和铠装层)的温度控制方程可以简化为

$$\frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \frac{\partial T^2}{\partial y^2} + q_v = 0 \quad (2)$$

式(2)中: $T$ 为温度场中 $(x, y)$ 处温度; $q_v$ 为体积发热率。

无热源区域(如电缆其他层、土壤等)的温度控制方程为

$$\frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \frac{\partial T^2}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

### 1.1.2 边界条件

采用有限元法计算温度场时,确定场域的边界条件十分关键。在传热问题中,通常将边界条件分为3类<sup>[22]</sup>:

第1类,已知边界温度随时间的变化规律;

第2类,已知边界法向热流密度随时间的变化规律;

第3类,已知对流换热系数和流体温度。

单回电缆仿真模型设置在开阔的静止空气中,符合第一类边界条件,其边界温度可视为恒定的环境温度。

### 1.1.3 电缆部分参数设置

在电缆实体中,导体与绝缘层之间、绝缘层与金属屏蔽之间都有半导电屏蔽层。但这些半导电屏蔽层较薄,对传热影响较小,为了提高计算效率,将内屏蔽层尺寸归并到导体尺寸上,忽略外屏蔽层尺寸,理论分析表明这种简化对电缆温度计算影响较小。文中采用的电缆各材料参数见表1<sup>[23]</sup>。

表1 电缆各层材料参数

Table 1 Material parameters cable layers

结构名称	电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	相对介电常数	导热系数/[W·(m·K) <sup>-1</sup> ]
铜芯	5.998×10 <sup>7</sup>	—	401.000
XLPE	—	2.17	0.406
金属屏蔽	5.998×10 <sup>7</sup>	—	401.000
包带	—	3.20	0.167
铠装护套	5.000×10 <sup>7</sup>	—	60.000
外护套	—	2.30	0.400
空气层	—	1.00	20.000

电缆在运行过程中不可避免发热,这使得电缆的表皮温度将会高于环境温度。在存在温差条件下,电缆主要依靠热辐射和热对流进行散热,而根据周围环境以及电缆结构与材料参数的不同,电缆模型中的对流换热系数也有所不同,从而显著影响温度的分布。结合传热控制方程,得到电热耦合

的控制方程为<sup>[24]</sup>

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k_0 \nabla T) + \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \quad (4)$$

式(4)中: $v$ 为空气流速, m/s;  $\rho$ 为空气密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\mathbf{J}$ 为电流密度矢量, A/m<sup>3</sup>;  $\mathbf{E}$ 为电场矢量, V/m;  $k_0$ 为对流换热系数, W/(m<sup>2</sup>·K)。

由式(4)可得,对流换热系数 $k_0$ 越高,热传递就越快,电缆模型径向的温度分布也就越均匀。反之则热传递越慢,电缆模型径向的温度分布越不均匀,文中通过温升试验来获得这一关键参量。

## 1.2 单回电缆稳态温升试验

### 1.2.1 试验系统介绍

文中所搭建的单回高压电缆稳态温升试验平台,使用的试验设备主要包括调流器、升流变压器,试验电缆本体、温度传感器。电缆温度测量平台布置见图2。试验电缆采用型号为YJ(L)LW02(03)的110 kV、1 200 mm<sup>2</sup>交联聚乙烯绝缘皱纹铝套防水层塑料护套电力电缆。试验电缆避免了阳光照射,处于自然对流环境下。

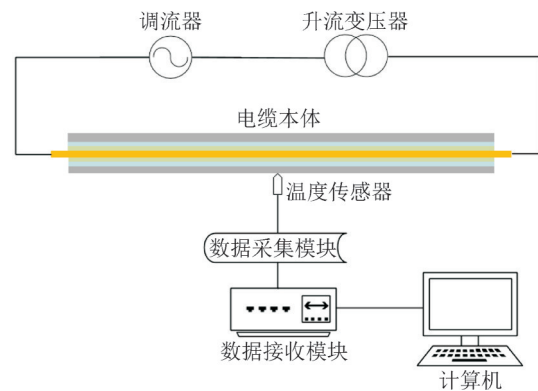


图2 电缆温度测量平台

Fig. 2 Cable temperature measurement platform

电缆温度传感器布置示意图3。由于FBG具有体积小、无源、绝缘性好、抗电磁干扰等特点<sup>[25]</sup>。为了尽量减小传感器的引入对电缆结构的影响,选用光纤布喇格光栅(FBG)作为温度传感器。

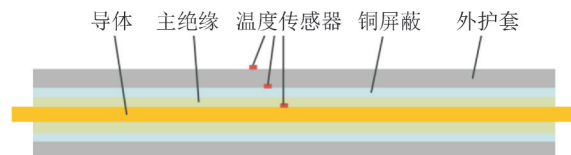


图3 电缆温度传感器布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cable temperature sensor arrangement

### 1.2.2 试验结果

无负荷初始条件下,用升流变压器对高压电缆施加恒定电流,以模拟电缆从启动到稳定运行并基

本保持不变的情况。通过此模拟,可以获得该工况下电缆不同层的温度分布,包括电缆导体和表皮层。

首先缓慢加载电流至电缆的导体温度达到额定最大温度 90 ℃,以确定加载电流最大值  $I_{max}$ ,为 1 700 A,接着待电缆冷却后再次加载 1 700 A 恒定电流直到电缆导体温度达到 90 ℃,期间每隔 5 min 记录一次数据,直至电缆各测点温度值基本保持稳定,记录下此时的环境温度。电缆各层温度曲线见图4。

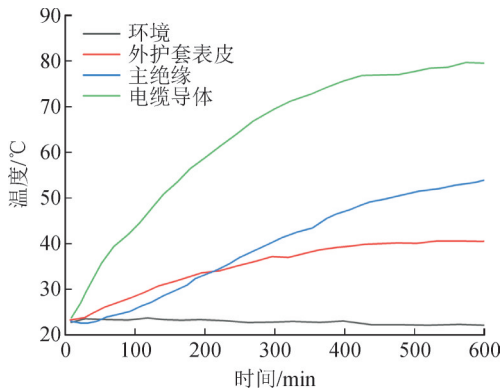


图4 加载电流 1 700 A 时电缆各层温度随时间变化曲线

Fig. 4 Temperature curve of each cable layer with time under loading current of 1 700 A

试验结果表明,在加载额定电流直到电缆各层温度稳定时,最大温度出现在电缆导体部位,约为 80 ℃,主绝缘温度约为 55 ℃,电缆外护套表皮稳态温度约为 40 ℃。

图4中,在 200 min 之前,出现了外护套表皮温度高于主绝缘温度的异常情况,经过检查后认为,为适应电缆内部狭小的空间,用于电缆主绝缘及导体温度测量的FBG传感器选用的封装较为薄弱,因此在传感器安装时存在预应力,影响FBG的中心波长,进而导致前 200 min 的温度测量值出现反常。随着温度升高,预应力逐渐消除,FBG温度传感结果变得准确。

### 1.3 单回电缆模型修正

根据上述单回电缆稳态温升试验结果,使用基于电热耦合的温度场稳态求解模型,开展试验环境下单回电缆的温度仿真计算,通过修正仿真模型中的对流换热系数,使得仿真结果和试验结果相符,此时对流换热系数为  $7.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。使用修正后的单回电缆模型在加载 1 700 A 运行电流时电缆本体温度分布和等温线分布图,见图5、6。

由仿真结果得电缆导体温度为 80.7 ℃,主绝缘温度为 58.2 ℃,外护套表皮温度为 42.9 ℃,仿真误差均在 6% 以内。

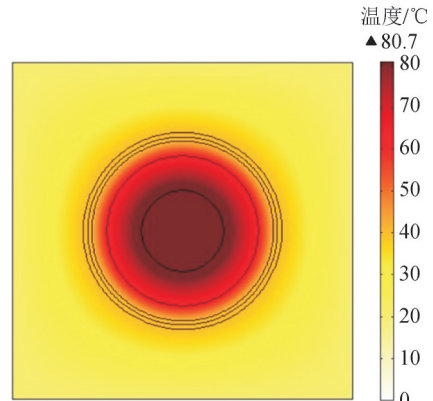


图5 加载电流 1 700 A 时电缆稳态温度分布

Fig. 5 Steady-state temperature distribution of cable under loading current of 1 700 A

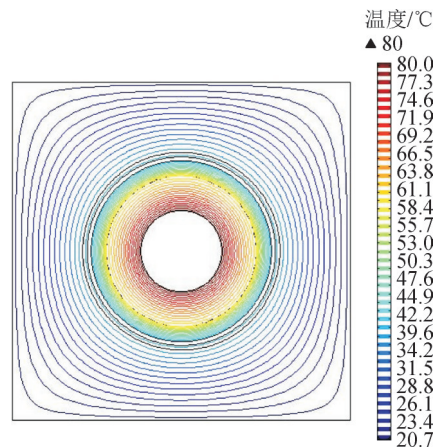


图6 加载电流 1 700 A 时电缆稳态等温线

Fig. 6 Steady-state isotherm of cable under loading current of 1 700 A

## 2 多回电缆温度场分布仿真

当考虑到多回电缆在隧道中敷设和运行所面临的实际情况时,电缆温度仿真模型与前述单回电缆在自然对流环境中的计算模型存在区别:①随着隧道敷设电缆回路数量的增加,电缆与电缆之间出现互热效应,对电缆的散热造成不利影响,进而影响电缆的温度场分布;②隧道敷设电缆为增加运行电缆的最大载流量,常布置有隧道通风装置来提高运行电缆的散热效率。因此,将单回电缆仿真模型推广到隧道中多回电缆温度计算时,需要考虑上述两个因素。

### 2.1 多回电缆稳态温升试验

依托实际工程,在深度为 17 m 的电缆隧道中对隧道环境和运行电缆温度展开现场实测,隧道内部高压电缆集群敷设断面图见图7。

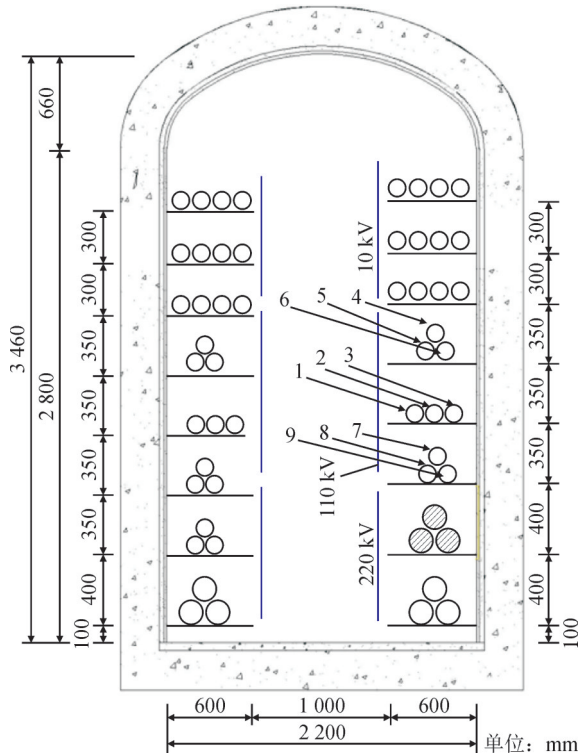


图7 电缆隧道断面及传感器安装位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of cable tunnel cross section and sensor installation position

2.1.1 试验系统介绍

该隧道结构左右对称,上下共8层。其中1~2层为220 kV电缆,3~5层为110 kV电缆,6~8层为10 kV电缆。其中第4层电缆铝制导体,其余各层为铜制导体。各层电缆规格尺寸见表2。

表2 电缆结构尺寸表

Table 2 Cable structure dimension

参数	数值		
电压等级/kV	110	220	110
线芯材料	铜	铜	铝
导体截面/mm	400	1 000	400
导体直径/mm	23.8	38.0	23.8
绝缘厚度/mm	17.0	27.0	17.0
电缆外径/mm	92.3	139.0	92.3

此次现场温度测试主要是对多回线路的多条线路进行测量。温度传感器统一采用不锈钢封装的贴片式DS18B20数字式传感器,以适应在隧道中可能出现的潮湿等恶劣环境。对三相电缆本体表皮温度进行测量,每相温度传感器安装在等距的对称位置。

本次实测对上下两回线路进行测量,上层的三相线路均采用平行排列结构,下层线路的三相线路采用的是品字形结构。两回线路的传感器布置见图8、9,现场测量时不同编号传感器的具体安装位置见图7。环境温度监测传感器安置在距离电

缆本体测量点1 m处。为保证各点温度传感器与被测物体充分接触,应使用导热硅脂和导热胶填充空隙。导热硅脂含微量银,具有良好的抗氧化性能,并可在-30~180 °C的温度范围内工作。并且,导热胶的导热性能以及稳定性能均较为理想<sup>[26]</sup>,同时还具有黏贴性,适合用于固定于表面安装的传感器。



图8 平行排列方式电缆表皮温度传感器布置

Fig. 8 Layout of cable skin temperature sensors in parallel arrangement



图9 品字型排列方式电缆表皮温度传感器布置

Fig. 9 Layout of cable skin temperature sensors in trefoil arrangement

2.1.2 试验结果

对在线运行的电缆线路的导体或者绝缘部分进行实时温度监测存在安全隐患,并且较为困难,故在多回电缆试验中不再对每根电缆的各层温度进行监测,而主要是对各个电缆的表皮温度进行测量,并记录实际测量温度见表3。测量期间,各层电缆负荷电流见表4。

表3 电缆表皮稳态温度测量结果

Table 3 Measurement results of steady-state temperature on cable skin

传感器位置	1	2	3	4	5	6	环境
测量温度/°C	16.8	16.9	17.0	15.9	15.4	15.5	14.1

表4 温度测量期间电缆载流情况

Table 4 Current carrying capacity of cable during temperature measurement

层数	电压等级/kV	负荷电流/A
第1层	220	257.39
第2层	220	62.30
第3层	110	93.43
第4层	110	49.84
第5层	110	174.00

## 2.2 基于电热流三场耦合模型的多回电缆温度分布计算

隧道内的空气流动分为自然对流和强制对流。但由于隧道内安装了通风设备,因此强制对流是主要的流动形式,自然对流的影响被忽略。通过检测,在试验时刻隧道内的风速为0.9 m/s。在使用标准空气密度 $1.29 \text{ kg/m}^3$ 和空气动力学粘度值 $17.9 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (一个标准大气压、气体温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ),根据雷诺数的计算公式<sup>[24]</sup>,见式(5),所得结果远大于4 000,因此,在仿真模型中需要考虑湍流因素。

$$R_e = \frac{\rho VL}{\eta} \quad (5)$$

式(5)中: $V$ 为流体速度,m/s; $L$ 为隧道直径,m; $\rho$ 为空气密度, $\text{kg/m}^3$ ; $\eta$ 为动力学粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

单根电缆对流换热系数 $k_0$ 为<sup>[8]</sup>

$$k_0 = \frac{\lambda}{D} 0.42 \left( \frac{\beta g \Delta \theta_s D^3 P_r}{\nu^2} \right)^{0.25} \quad (6)$$

式(6)中: $\lambda$ 为空气导热率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ; $\nu$ 为空气运动黏度, $\text{m}^2/\text{s}$ ; $\beta$ 为空气热膨胀度, $1/\text{K}$ ; $P_r$ 为空气普朗特数; $D$ 为电缆外径,m; $g$ 为重力加速度, $\text{kg/m}$ ; $\Delta \theta_s$ 为环境与电缆表皮的温度差,K。

由式(6)可以看出,隧道中空气流速变化及排布方式不会影响对流换热系数,因此对于同一电压等级的电缆,对流换热系数 $k_0$ 可以由单回推广到隧道中多回情况下使用,而对于不同型号的电缆,则可以根据电缆外径进行修正后应用。

试验中发现10 kV电缆运行时发热少,以及隧道左侧电缆对右侧电缆温度场影响较小,故在仿真中忽略隧道中10 kV电缆;由于隧道总深度超过17 m,而其高度约为3.5 m,隧道外边界均为深层土壤,故上下右边界符合第一类边界条件,又因隧道内壁温度实测为 $14.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,故设置上下右边界保持恒定温度 $14 \text{ }^\circ\text{C}$ ;由于隧道左侧电缆对右侧电缆温度场影响较小,则可忽略隧道左侧温度分布,中间边界符合第二类边界条件,设置为绝热面,其法向热流密度设置为零。

电缆各层材料参数见表1,不同电压等级高压电缆结构尺寸见表2,最后结合实测隧道结构、电缆布置方式,建立了电热流耦合的隧道敷设多回电缆仿真模型。计算获得的多回电缆温度分布见图10。

## 2.3 结果与讨论

按照IEC 60287标准提供的算法<sup>[27]</sup>,根据各回路电缆负荷电流和现场环境温度反算各回路电缆导

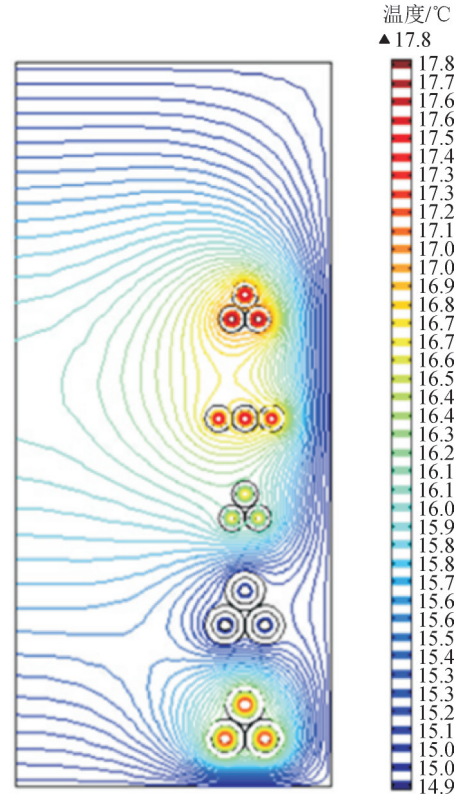


图10 隧道敷设多回电缆及周围空间等温线

Fig. 10 Multi-circuit cable and surrounding space isotherm under tunnel laying mode

体温度,得到IEC算法下的电缆外护套表皮温度。现场实测数据与仿真结果和IEC标准计算结果以及二者的误差见表5(环境温度为 $14.1 \text{ }^\circ\text{C}$ )。

表5 电缆表皮温度实测与计算结果对比

Table 5 Comparison between measured and calculated results of cable surface temperature

参数	数值					
传感器位置	1	2	3	4	5	6
实测温度/ $^\circ\text{C}$	16.8	16.9	17.0	15.9	15.4	15.5
IEC计算温度/ $^\circ\text{C}$	19.2	19.2	19.2	17.6	17.6	17.6
仿真计算温度/ $^\circ\text{C}$	16.9	17.0	17.0	16.2	16.1	16.1
IEC计算误差/%	14.3	13.6	12.9	10.9	14.5	13.8
仿真计算误差/%	0.59	0.59	0.00	1.89	4.55	3.87

由表5可知,应用IEC 60287标准提供的计算方法所得结果误差较大,IEC计算温度均比测量温度高10%以上,这也印证了IEC算法计算载流量时偏低。电热流三场耦合模型仿真误差均小于5%,平均误差为1.92%,平均误差水平降低11.41%,与IEC方法相比,电热流三场耦合模型计算精度更高。

## 3 结语

文中基于电、热、流体耦合计算,提出了一种针对隧道敷设多回电缆的仿真计算方法。通过试验

掌握了三场耦合模型中尚不明确的对流换热系数。考虑了隧道通风环境以及电缆间的互热效应的影响,将单回电缆温度计算模型推广到实际的多回电缆温度计算模型。在电缆隧道开展了实测,结果表明 IEC 计算误差在 10.9%到 14.5%之间,平均误差 13.3%;而仿真估计误差均小于 5%,平均误差为 1.92%,平均误差水平降低 11.41%,与 IEC 方法相比,文中所提出的电热线三场耦合模型计算精度更高。

## 参考文献:

- [1] 高飞,黄磊,张蕾,等.高压长距离分段电缆随公共交通隧道敷设电磁影响分析[J].高压电器,2021,57(12):156-161.  
GAO Fei, HUANG Lei, ZHANG Lei, et al. Electromagnetic influence analysis of high voltage long distance segment cable laying in public transportation tunnel[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12): 156-161.
- [2] 李国伟,王俊波,张殷,等.基于 GprMax 正演模拟的直埋电缆探测效果影响因素分析[J].南方电网技术,2024,18(12):10-18.  
LI Guowei, WANG Junbo, ZHANG Yin, et al. Influence factor analysis on detection effect for directly buried cable based on GprMax forward modeling[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(12): 10-18.
- [3] 黄金波,邹国平,焦建格,等.基于 IGA-BP 的地下电缆健康指数预测[J].电力科学与技术学报,2025,40(3):265-274.  
HUANG Jinbo, ZOU Guoping, JIAO Jiange, et al. Prediction of underground cable health index based on IGA-BP neural network [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(3): 265-274.
- [4] 李童欣,赵隆,刘思雨,等.±500 kV 直流海底电缆 J 型管工程化设计与热管理优化[J].智慧电力,2025,53(6):85-92.  
LI Tongxin, ZHAO Long, LIU Siyu, et al. Engineering design and thermal management optimization of ±500 kV DC submarine cable J-tube[J]. Smart Power, 2025, 53(6): 85-92.
- [5] DORISON E, FRELIN W, ANDERS G J, et al. New issues in current rating of power cables installed in tunnels[C]//9th International Conference on Insulated Power Cables. Versailles: [s.n.], 2015: 257-264.
- [6] 刘英,肖阳,刘松华.隧道内电缆集群敷设对载流量的影响研究[J].高压电器,2019,55(8):123-130.  
LIU Ying, XIAO Yang, LIU Songhua. Influence of cluster laying on permitted current rating of power cables in tunnels[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 123-130.
- [7] 孙建宇,陈绍平,沙菁,等.电缆用交联聚乙烯热老化寿命评估和预测[J].电机与控制学报,2022,26(6):31-39.  
SUN Jianyu, CHEN Shaoping, SHA Jing, et al. Evaluation and prediction of thermal aging life of XLPE for cables[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(6): 31-39.
- [8] Electric cables-calculation of the current rating-part 2-1: Thermal resistance-calculation of thermal resistance: IEC 60287-2-1: 2015 [S]. 2015.
- [9] 马爱清,张杨欢.考虑互热效应的超高压电缆隧道敷设热路模型[J].高电压技术,2022,48(3):1068-1076.  
MA Aiqing, ZHANG Yanghuan. Thermal circuit model of EHV cable laid in tunnel considering mutual thermal effect[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1068-1076.
- [10] DUBITSKY S, GRESHNYAKOV G, KOROVKIN N. Comparison of finite element analysis to IEC-60287 for predicting underground cable ampacity[C]//2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). Belgium: IEEE, 2016: 1-6.
- [11] SEDAGHAT A, LU Haowei, BOKHARI A, et al. Enhanced thermal model of power cables installed in ducts for ampacity calculations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2404-2411.
- [12] 傅晨钊,司文荣,祝令瑜,等.隧道电缆稳态温升快速计算方法研究[J].高压电器,2021,57(1):75-81.  
FU Chenzhao, SI Wenrong, ZHU Lingyu, et al. Study on fast calculation method for steady temperature rise of tunnel cables[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1): 75-81.
- [13] 刘刚,王鹏宇,毛健琨,等.高压电缆接头温度场分布的仿真计算[J].高电压技术,2018,44(11):3688-3698.  
LIU Gang, WANG Pengyu, MAO Jiankun, et al. Simulation calculation of temperature field distribution in high voltage cable joints[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3688-3698.
- [14] 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.  
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.
- [15] 石大城,李乾,余志强,等.基于电磁-热-流体耦合的隧道敷设电缆载流量分析[J].绝缘材料,2022,55(12):111-118.  
SHI Dacheng, LI Gan, YU Zhiqiang, et al. Current carrying capacity analysis of cables laid in tunnel based on electromagnetism-heat-fluid coupling[J]. Insulating Materials, 2022, 55(12): 111-118.
- [16] 冯珮琦. 35 kV 电力电缆电热耦合特性与故障分析研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.  
FENG Peiqi. Study on the electric-thermal coupling characteristics and fault analysis of 35 kV power cables[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.
- [17] 张振宇,程诺,罗翔,等.10 kV 配电网高温超导电缆电热耦合模型仿真分析[J].高压电器,2020,56(11):203-209.  
ZHANG Zhenyu, CHENG Nuo, LUO Xiang, et al. Electrical-thermal coupling model analysis of high temperature superconducting power cable utilized in 10 kV power distribution system[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 203-209.
- [18] 范华,翁利国,平伟军,等.基于暂态热流耦合仿真的沟内密集堆积配电网电缆群载流能力预测及新增负荷优化配置[J].高电压技术,2023,49(12):5002-5010.  
FAN Hua, WENG Liguang, PING Weijun, et al. Ampacity prediction of densely stacked distribution cables in trench and optimal allocation of new load based on transient thermal-fluid coupling simulation[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 5002-5010.
- [19] 郑文坚.空气敷设电缆热流耦合场仿真及其参数研究[D].广

- 州:华南理工大学,2018.
- ZHENG Wenjian. Simulation and parameter study of thermal-fluid coupling field for air-laid cables[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [20] 云腾. 110 kV 高压 XLPE 电缆护层结构特性分析及优化设计研究[D]. 济南:山东大学,2020.
- YUN Teng. Structural characteristic analysis and optimization design of 110 kV high voltage XLPE cable sheath[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [21] 张磊,宣耀伟,乐彦杰,等. 110 kV 单芯海缆的载流量计算、温度场仿真及其热循环试验研究[J]. 高压电器, 2016, 52(6): 135-140.
- ZHANG Lei, XUAN Yaowei, YUE Yanjie, et al. Ampacity calculation, temperature simulation and thermal cycling experiment for 110 kV submarine cable[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(6): 135-140.
- [22] 梁永春. 高压电力电缆温度场和载流量评估研究动态[J]. 高压电压技术, 2016, 42(4): 1142-1150.
- LIANG Yongchun. Technological development in evaluating the temperature and ampacity of power cables[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1142-1150.
- [23] 黄吉超. 高压直流交联聚乙烯电缆电热耦合研究和稳态载流量计算[D]. 广州:华南理工大学,2016.
- HUANG Jichao. Study on electric-thermal coupling and steady-state current calculation of high-voltage direct current cross-linked polyethylene cables[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [24] 刘刚,王晓晗,马永强,等. 基于控制体—迎风有限元法的变压器绕组二维流体场—温度场耦合计算方法研究[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 1-9.
- LIU Gang, WANG Xiaohan, MA Yongqiang, et al. Study on coupled calculation method of two dimensional fluid and temperature field of transformer winding based on control volume-upstream FEM[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 1-9.
- [25] 徐元哲,王乐天,刘雪冬,等. 电力电缆接头测温系统的设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 2977-2982.
- XU Yuanzhe, WANG Letian, LIU Xuedong, et al. Design of temperature measurement system for cable junction based on FBG[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 2977-2982.
- [26] 陈舒. 高导热胶黏剂的应用研究[J]. 化纤与纺织技术, 2021, 50(3): 12-14.
- CHEN Shu. Study on the application of high thermal conductivity adhesive[J]. Chemical Fiber & Textile Technology, 2021, 50(3): 12-14.
- [27] Electric cables calculation of the current rating-part 2-3: Thermal resistance-cables installed in ventilated tunnels; IEC 60287-2-3: 2024[S]. 2024.
- 张强(1990—),男,博士,高级工程师,主要从事数据挖掘、模式识别、设备在线监测等工作(E-mail:ncepu\_zhangqiang@163.com)。
- 马国明(1984—),男,博士,教授,博导,主要从事电气设备状态监测与诊断、输变电设备状态感知等方面的研究(通信作者)(E-mail:ncepumgm@ncepu.edu.cn)。