

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.09.022

基于相似原理求解隧道电缆稳态温升的计算方法研究

傅晨钊¹, 司文荣¹, 赵莹莹¹, 梁永春²

(1. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437; 2. 河北科技大学, 石家庄 050018)

摘要: 文中提出了一种基于相似原理求解电缆温升的计算方法。利用相似性与气体辐射特性等传热学知识,将隧道电缆温升计算涉及的对流与辐射相对分离。通过比例缩放,实现利用小尺寸模型下的对流特性反映大尺寸模型的对流传热特性,结合辐射散热系数求解,联立建立表示隧道电缆组温升特性的隐函数方程组,将场域的仿真计算转化为方程组的求解,从而在较少计算资源下进行电缆温升的快速计算。算例验证表明,该方法可信,误差可控,极大提高计算准确性与效率。

关键词: 相似原理; 隧道电缆; 温升

Study on Calculation Method for Steady-state Temperature Rise of Tunnel Cables Based on Similarity Principle

FU Chenzhao¹, SI Wenrong¹, ZHAO Yingying¹, LIANG Yongchun²

(1. State Grid Shanghai Electrical Power Research Institute, Shanghai 200437, China; 2. Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: In this paper a calculation method for determining cable temperature rise based on the similarity principle is presented. By leveraging heat transfer principles such as similarity theory and gas radiation characteristics, the convective and radiative components involved in the calculation of tunnel cable temperature rise are relatively decoupled from each other. Through proportional scaling, the convective heat transfer characteristics of the full-scale model are represented by those obtained from a small-scale model. Combined with the determination of the radiative heat transfer coefficient, a system of implicit equations characterizing the temperature rise behavior of the tunnel cable group is established. By transforming the field simulation into the solution of this equation system, rapid cable temperature rise calculation is achieved with relatively low computational resources. Validation through case studies demonstrates that the proposed method is reliable with controllable errors, significantly improving both computational accuracy and efficiency.

Key words: similarity principle; tunnel cables; temperature rise

0 引言

隧道能够保护电缆设备免受外界环境侵蚀,较大空间可容纳的电缆回路数多,输送容量大,且方便运检人员巡查检修。IEC 60287系列标准是电力电缆温升与载流量计算的主要依据^[1-3]。IEC 60287

系列标准主要依据解析方法与工程经验,对于隧道电缆组而言,仅适用于典型结构与简化布置形式。其中,将隧道电缆看成无限大空间,按架空电缆的传热特性进行计算,再考虑电缆与墙壁的距离进行载流量的修正,而隧道内多个回路电缆间的热相互作用考虑不足。

收稿日期:2026-04-08; 修回日期:2026-06-09

基金项目:国网上海市电力公司科技项目(520940250024)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company(520940250024).

目前,需要对隧道电缆温升进行较为准确评估时,特别是必须计及相邻回路的热效应影响时,由于涉及复杂的热场—流场分析,且缺乏公认的工程算法,往往通过数值计算进行^[4-10]。研究表明,隧道内流形和流速较为复杂,电缆群内部存在较强的互热效应。然而现有研究多针对工程设计阶段,在给定电缆群恒定负荷组合、边界环境的条件下进行,重点关注温度场校核与载流量优化调整,未充分挖掘不同负荷组合影响下传热特性的变化,特别是互热效应的分析,成果不能直接应用于电缆群载流能力的预测管理。考虑到隧道内存在大体积的空间(对于矩形隧道,宽度、高度一般在2 m以上),且对流散热多属于自然对流,采用数值计算的方式,不仅对计算资源有着较高的要求,复杂耗时,而且收敛性差。如何降低计算资源的要求,提高计算的速度与效率对于隧道电缆温升的实时估算,进而支持运行条件下的载流量评估而言,显得尤为重要。

文中利用传热学知识,将隧道电缆温升计算涉及的对流与辐射相对分离。其中,针对计算繁杂的流场,基于传热学相似原理,通过比例缩放,实现利用小尺寸模型下的对流特性较为便捷、准确反映大尺寸模型的对流传热特性;针对电缆外皮与隧道壁间的辐射热场,基于气体辐射特性分析,便捷获得辐射系数。两者联立建立表示隧道电缆组温升特性的隐函数方程组,实现在较少计算资源条件下进行大截面隧道内电缆温升快速计算的目标。算例验证表明,该方法可信,误差可控,提高计算效率,并为后续研究深化创造了便利条件。

1 计算原理与流程

1.1 气体辐射特性

气体辐射存在波长选择性^[11]。气体分子的量子能级跃迁决定了气体辐射的波长选择。根据气体种类的差异,其光带有所差异,具体表现为仅在特定的光带内吸收或发射辐射能量。空气特性主要取决于其主要组成成分:氮气与氧气的特性。其中氮气光带主要在紫外和近红外范围,集中在260~280、337、1 525 nm。氧气光带主要在紫外线范围内,集中在175~240、200~280、450~750 nm。

对于隧道电缆而言,运行条件下保证线芯温度低于85~90℃,其外皮温度普遍低于60~70℃,此时辐射光带波长为8.45~10.6 μm,不属于氮气、氧气的主要光带分布范围。计算分析时,隧道内的热辐射只发生在各电缆外皮与隧道壁之间,而与空气介质

无关。

1.2 相似原理

1)相似原理^[11]。传热学相似原理是指在不同的传热系统中,如果这些系统的几何形状、边界条件和物理特性(如流体的密度、黏度、比热容、热传导率等)之间存在一定的比例关系,那么这些系统在传热性能上也会表现出相似性。这种相似性可以通过无量纲数与实验关联式来表达。

大空间自然对流是自然对流的主要形式之一,实验关联式见式(1)(本节所列公式中未说明的参数与标注含义,请参照文[11])。

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)_m^n \quad (1)$$

式(1)中: Nu 为努塞尔数; Gr 为格拉晓夫数; Pr 为普朗特数; C 、 n 均为由实验确定的特定结构条件下的常数。根据式(1),可能实现利用小尺寸模型下的对流特性反映大尺寸模型的对流传热特性。

2)隧道对流的相似性分析。对于隧道电缆而言,一是其外皮温度不高,对流发展有限,以层流为主(Gr 适用范围为 $1.43 \times 10^4 \sim 5.76 \times 10^8$),二是隧道内存在大体积的空间(对于矩形隧道,宽度、高度一般在2 m以上),而电缆截面面积相对较小,整体对流接近于大空间或近似大空间条件下的自然对流,满足式(1)所示相似性,为简化计算模型提供了可能。需要指出,具体应用时,需要进行验证确认相似性的成立。

对于电缆组而言,一般采用水平布置,满足长圆柱体的实验关联式,式(1)中的 n 取0.25,见式(2),结合努塞尔数与格拉晓夫数的定义式,可得式(3):

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^{1/4} \quad (2)$$

$$h = Nu \times \lambda / l \times \Delta T =$$

$$C \left(\frac{g \alpha_v \Delta T l^3}{\nu^2} \times Pr \right)^{1/4} \times \lambda / l \times \Delta T = \quad (3)$$

$$C \left(\frac{g \alpha_v \Delta T}{\nu^2} \times Pr \right)^{1/4} \times \lambda / l^{1/4} \times \Delta T$$

应用相似理论简化后,为保证缩小比例(如50%几何尺寸或更小)后的电缆组外皮温度、空间内温度分布等结果,能够等效100%几何尺寸条件下的结果,应对发热量 Q 进行相应调整,见式(4)

$$Q = h \times \pi \times l \times \Delta T = \quad (4)$$

$$C \left(\frac{g \alpha_v \Delta T}{\nu^2} \times Pr \right)^{1/4} \times \lambda \times l^{3/4} \times \Delta T = C_1 \times l^{3/4}$$

式(4)中, C_1 不变,特征尺寸 l (自然对流条件下,特征尺寸为电缆直径)变化时,同步比例调整损耗 Q ,温升 ΔT 基本不变。根据式(4),若特征尺寸缩小为原尺寸的50%,对应的 Q 应调整为原损耗的59.3%。需要说明,考虑到隧道环境与理论上的自

然对流大空间有所差异,且电缆截面、相对位置等条件不同,不同尺寸间电缆外皮温升数值可能存在一定偏差。工程应用时,可能需要对损耗调整、温升偏差进行调整,具体参见后续算例。

1.3 计算流程

隧道电缆组温度计算模型,见式(5)-(8)^[12]。

外皮温度

$$t_{s,i} = \sum_{j=1}^n (Q_j - Q_{\text{rad},i,j}) \times R_{i,j} \quad (5)$$

辐射散热量

$$Q_{\text{rad},i,j} = \sum_{j=0}^n [r_{i,j} \times (t_j + 273)]^4 \quad (6)$$

对流散热热阻

$$R_{i,j} = \sum_{j=0}^n [p_i + p_{i,j} \times \text{power}(t_j, k_{i,j})] \quad (7)$$

线芯温度

$$t_{c,i} = t_{s,i} + Q_i \times R_{\text{cab},i} \quad (8)$$

式(5)-(8)中: $t_{c,i}$ 为第*i*根(回)电缆线芯温度; $t_{s,i}$ 为第*i*根(回)表皮温度; t_0 为环境温度; Q_i 为第*i*根(回)的发热量; $Q_{\text{rad},i,j}$ 为第*i*根(回)对第*j*根(回)的辐射散热量;第*i*根(回)电缆的对流散热热阻包括 $R_{i,i}$ 与 $R_{i,j}$,其中 $R_{i,i}$ 为第*i*根(回)的对流热阻; $R_{i,j}$ 为第*j*根(回)对第*i*根(回)的互热效应热阻; n 为隧道电缆组内根(回)数量; r_{ij} 为辐射角系数 X_{ij} 、表面发射率 ε_i 与电缆表面积的乘积,用于表示电缆与隧道壁、电缆间的辐射散热能力,文中简称为辐射散热系数; $R_{\text{cab},i}$ 为第*i*根(回)自身热阻。

在获得一定数量解的基础上,根据式(5)-(8),通过回归拟合、迭代求解等方式,能够获得 p_i 、 $p_{i,j}$ 、 $k_{i,j}$ 、 $r_{i,j}$ 的数值与 $R_{i,j}$ 、 $Q_{\text{rad},i,j}$ 的数学形式表示,即隧道电缆发热量、环境温度与温升的关系。对于确定电缆而言,式(8)中的电缆自身热阻 R_{cab} 可直接根据材料特性与结构参数计算获得,给定电流(自身损耗)时,其线芯温升可通过“外皮温升+自身损耗×自身热阻”简便获得,因此隧道电缆温升计算难点主要聚焦于电缆外皮温升的求解。计算流程见图1。

计算流程说明:

1)根据传热学原理,辐射角系数与绝对尺寸无关,仅与相对位置、相对尺寸、材料表面发射率有关,通过解析方法或仿真快速求解,结合表面发射率与电缆表面积,获得式(6)中的辐射散热系数 $r_{i,j}$ 。

2)暂不考虑热辐射条件下,利用小尺寸模型求解若干组随机损耗、环温下外皮温升数据。再根据式(4),可获得相应大尺寸和损耗时的电缆外皮温升。进而获得大尺寸模型下对流散热与热载荷、环

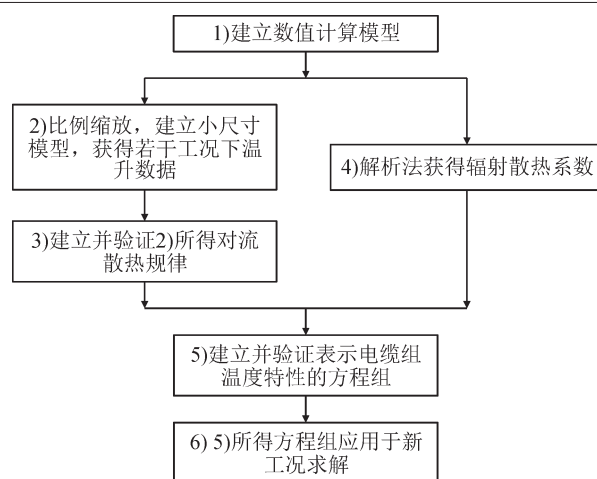


图1 计算流程示意图

Fig. 1 Calculation flowchart

温的数学关系,即式(7)所表示的对流散热热阻 $R_{i,i}$ 与 $R_{i,j}$ 的表达。

3)将1)中辐射散热系数表示与2)中对流散热热阻表示联合,构成表示隧道电缆组温度特性的方程组式(5)-(8),利用麦考特、准牛顿法等多种迭代搜索方法可以求解^[12-15],即可获得给定工况的电缆组温升结果。

以上计算流程步骤虽然多,看似繁琐,但是避免大尺寸模型复杂的直接计算,极大提高计算准确性与效率;将辐射与对流散热等传热因素数值化表示,为后续量化分析提供了充分依据;针对确定的隧道与电缆组合,隐函数方程组(式(5)-(8))表示确定的隧道电缆稳态热特性,由于其不依赖于电缆本身发热量或电流大小,只与隧道截面、电缆热特性相关,故隐函数组建立后,变换电缆电流时就无需重复复杂的数值计算,可直接通过隐函数组迭代计算和损耗修正获得可信结果,即将温度场的仿真计算转化为隐函数方程组的求解,计算效率显著提升,这为依托一定数据量开展的传热规律研究提供了便利条件。

2 适用性验证

2.1 算例描述

文中选用通用有限元计算软件及其计算结果作为验证依据。隧道截面为圆形(半径为2 m);电缆组分为三叠放置与水平放置;空气无强制通风,自然对流;电缆线芯选用铜导体,导体半径2.5 cm;绝缘层选用XLPE材料,总厚度2.5 cm;计算选择第一类边界条件,即各工况给定隧道壁温。热载荷随机变化。计算中暂不考虑热辐射。隧道电缆群截面见图2。

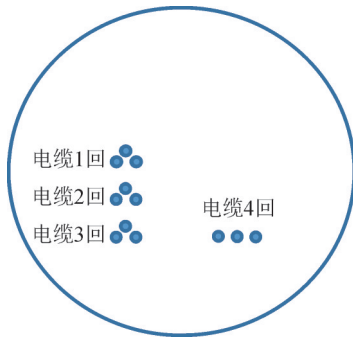


图2 隧道电缆群截面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the cross-section of a tunnel cable group

2.2 验证过程

结合工程实际,进行以下简化:各回电缆三相损耗一致;受散热影响,中相温度最高,以中相外皮温升代表该回电缆外皮温升。验证步骤为:

1)12.5%尺寸下,随机生成10组电缆各回损耗与环境温度。

2)根据式(4)计算25%特征尺寸下对应1)的各回损耗。

3)无辐射条件下,应用1)、2)的各回损耗与1)环境温度通过有限元方法分别计算12.5%、25%尺寸下温度分布。

4)比较12.5%与25%尺寸下电缆外皮温升,统计各工况下各回电缆外皮温升比例系数。

以某一工况为例,12.5%与25%尺寸下环温、损耗 Q 与对应的各电缆外皮温升的数据见表1。推算示例数据见表2。

表1 某工况,各尺寸下环温、损耗与温升数据

Table 1 Computational parameters and results for different scale ratios under a specific operating condition

参数	12.5%尺寸, 30.42 °C	25%尺寸, 30.42 °C	温升比例系数
Q_1/W	4.65	$4.65 \times 1.681 = 7.82$	—
Q_2/W	4.16	$4.16 \times 1.681 = 7.00$	—
Q_3/W	6.32	$6.32 \times 1.681 = 10.62$	—
Q_4/W	10.44	$10.44 \times 1.681 = 17.55$	—
1回外皮温升/K	38.29	35.22	$35.22/38.29=0.92$
2回外皮温升/K	34.09	31.99	$31.99/34.09=0.94$
3回外皮温升/K	32.01	31.27	$31.27/32.01=0.98$
4回外皮温升/K	35.77	29.54	$29.54/35.77=0.83$

表2 推算示例

Table 2 Calculation example

推算温升/K	仿真结果/K	误差/K
$38.29 \times 0.93 = 35.61$	35.22	0.39
$34.09 \times 0.94 = 32.04$	31.99	0.05
$32.01 \times 0.98 = 31.37$	31.27	0.10
$35.77 \times 0.87 = 31.12$	29.54	1.58

重复以上过程,对各电缆外皮温升比例系数进行统计(为充分验证,可附加计算50%尺寸下各电缆外皮温升),统计结果见表3,误差分布见图3(以电缆1回为例)。统计表明,12.5%与25%尺寸间电缆各回外皮温升比例系数基本稳定,均值在0.85~1.0范围内,表明隧道内对流散热基本满足相似原理;最大偏差基本在6%($3\sigma=6\%$,对应外皮温升50 K,其误差为3 K)以内,能够满足运行需求。

表3 不同尺寸电缆外皮温升比例系数统计(12.5%→25%)

Table 3 Statistical analysis of the temperature rise proportion coefficients for cable outer sheaths at different scale ratios(12.5%→25%)

电缆	极小值	极大值	均值	标准差
1回	0.88	0.96	0.93	0.02
2回	0.92	0.97	0.94	0.01
3回	0.97	1.00	0.98	0.01
4回	0.83	0.90	0.87	0.02

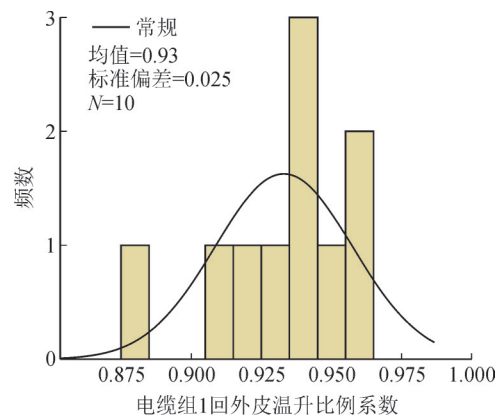


图3 电缆1回外皮温升比例系数统计直方图

Fig. 3 Statistical histogram of the temperature rise proportion coefficient for the outer sheath of cable 1 circuit

温升比例系数可用于12.5%模型温升结果推算25%模型温升结果见表3,过程示例如表1推算部分。其中,假定已知12.5%尺寸下温升结果,推算比例缩放后25%尺寸下的温升数据,并与直接仿真计算的温升数据进行比较。重复以上过程,得到12.5%尺寸→25%尺寸的温升推算误差,统计见表4,其中最大误差小于3 K。

表4 12.5%尺寸→25%尺寸温升推算误差

Table 4 Temperature rise prediction error from the 12.5% scale model to the 25% scale model

统计数量	极小值/K	极大值/K	均值/K	标准差/K
40	-1.20	1.58	-0.02	0.76

根据2.2节分析,可知:在不改变对流特征条件下,温升比例系数只与模型缩放的比例有关,不随尺寸的绝对数值变化,因此可根据小尺寸模型温升结果推算大尺寸模型的模型温升结果,如12.5%

尺寸→25%尺寸→50%尺寸→100%尺寸。

3 算例应用

3.1 对流散热热阻求取及综合应用

1)图1所示计算模型,忽略热辐射,随机产生若干组损耗与环境温度,获得12.5%尺寸模型的电缆外皮温升。

2)根据式(4)与表3所示的调整系数,将1)所得各组解转化为100%尺寸模型下的解集。转化过程示例见表5。

表5 某工况,12.5%尺寸→100%尺寸的数据转化示例

Table 5 Example of data scaling from the 12.5% model to the full-scale (100%) model under a specific operating condition

参数	12.5%尺寸, 30.42 ℃	100% 尺寸, 30.42 ℃
Q_1/W	4.65	$4.65 \times 1.681 \times 1.681 \times 1.681 = 22.09$
Q_2/W	4.16	$4.16 \times 1.681 \times 1.681 \times 1.681 = 19.76$
Q_3/W	6.32	$6.32 \times 1.681 \times 1.681 \times 1.681 = 30.02$
Q_4/W	10.44	$10.44 \times 1.681 \times 1.681 \times 1.681 = 49.59$
1回外皮温升/K	38.29	$38.29 \times 0.93 \times 0.93 \times 0.93 = 29.82$
2回外皮温升/K	34.09	$34.09 \times 0.94 \times 0.94 \times 0.94 = 27.42$
3回外皮温升/K	32.01	$32.01 \times 0.98 \times 0.98 \times 0.98 = 30.13$
4回外皮温升/K	35.77	$35.77 \times 0.87 \times 0.87 \times 0.87 = 26.26$

3)利用2)形成若干组解的集合,通过全局优化法进行式(7)中各参数的求解估计。需要说明,参数求解估计本质上为最优解的搜索,选用方法与方法设置等差异可能导致各参数结果的具体数值不唯一,但均不影响后续应用效果。

3.2 辐射散热系数求取及综合应用

通过数值计算软件的直接积分功能,求取图1所示隧道电缆组的辐射散热系数,即获得式(6)中的 $r_{i,j0}$ 。

1)给定电缆电流,参照文[16]方法得到环温条件

下各回电缆损耗,利用4.1与4.2节所得参数,通过迭代求解,获得100%尺寸模型下电缆温升拟合结果。其中,考虑到热载荷(损耗)为温度的函数,需要通过“温度—损耗”迭代过程以获得电缆组稳态温升。某工况迭代求解过程示意图见表6,其中经过4次迭代后,迭代间最大差异已经小于0.1℃,认为计算获得了稳态温度。

表6 迭代过程数据

Table 6 Data in the iteration process

环温/ ℃	迭代 步数	损耗/ (W·m ⁻¹)	线芯温度/ ℃	误差/ ℃
30.01	1	25.10	60.23	—
		24.42	59.41	—
		28.13	60.93	—
		42.00	67.68	—
	2	27.16	62.78	2.55
		26.03	61.80	2.40
		30.46	63.53	2.60
		46.32	71.38	3.70
	3	27.30	62.95	0.17
		26.16	61.95	0.15
		30.62	63.70	0.17
		46.66	71.67	0.29
	4	27.31	62.96	0.01
		26.16	61.96	0.01
		30.63	63.71	0.01
		46.68	71.70	0.03

2)100%尺寸模型中,利用损耗数据进行有限元直接计算电缆温升直接计算结果。

3)若干组电缆温升拟合结果与仿真计算结果见表7。误差统计见表8,误差直方图见图4(以电缆1回为例)。统计表明,外皮温升误差范围与均值能够满足实际需要(12.5%~100%尺寸时,3σ基本小于3K),且满足0.05水平的正态分布显著性检验。

表7 电缆组外皮温度数值计算与拟合计算的比较

Table 7 Comparison between FEM calculated and fitted skin temperature of cables

热流/W				环温/℃	有限元计算/℃				文中方法/℃				温升误差/K			
Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	T_a	T_{s1}	T_{s2}	T_{s3}	T_{s4}	t_{s1}	t_{s2}	t_{s3}	t_{s4}	dt_1	dt_2	dt_3	dt_4
27.31	26.16	30.63	46.68	30.01	46.72	45.49	45.91	44.76	47.18	46.84	46.01	44.76	0.46	1.35	0.10	0.00
44.19	29.65	30.63	49.59	30.01	51.55	48.27	46.53	47.08	53.34	48.75	46.14	45.77	1.79	0.48	-0.39	-1.31
44.04	8.54	22.50	30.61	23.54	43.53	32.73	35.90	34.94	43.85	32.76	35.44	33.81	0.32	0.03	-0.46	-1.13
70.46	10.25	22.50	34.98	23.54	52.97	34.98	36.61	36.59	53.21	34.67	35.97	35.49	0.24	-0.31	-0.64	-1.10
32.87	37.62	9.08	32.20	28.78	45.84	48.17	36.78	40.44	46.64	47.28	35.78	39.30	0.80	-0.89	-1.00	-1.14
52.59	45.14	9.08	36.80	28.78	53.11	52.04	37.67	42.12	54.19	50.93	36.44	40.98	1.08	-1.11	-1.23	-1.14
30.67	49.99	27.96	20.64	8.37	26.65	33.96	25.18	18.66	28.31	34.07	24.20	17.16	1.66	0.11	-0.98	-1.50
49.07	59.99	27.96	23.59	8.37	35.11	38.67	25.99	20.01	36.07	38.44	24.79	18.39	0.96	-0.23	-1.20	-1.62
31.71	28.47	33.76	60.98	28.16	46.10	46.27	46.41	47.43	47.85	46.57	45.61	46.13	1.75	0.30	-0.80	-1.30
50.74	34.17	33.76	69.69	28.16	54.39	49.60	47.25	50.03	55.27	49.55	46.18	48.60	0.88	-0.05	-1.07	-1.43

表8 电缆外皮拟合温升与仿真计算温升误差

Table 8 Error between the fitted temperature rise of the cable outer sheath and the temperature rise obtained from simulation

统计数量	极小值/K	极大值/K	均值/K	标准差/K
40	-1.62	1.79	-0.24	0.98

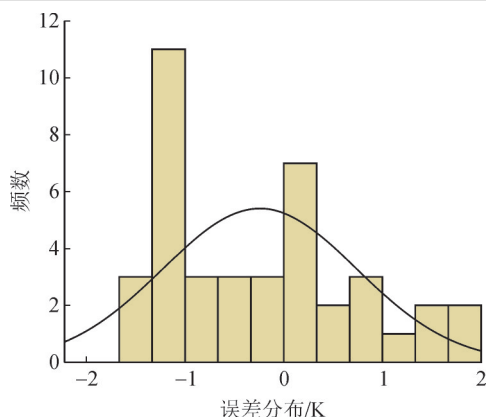


图4 电缆各回外皮温升误差直方图

Fig. 4 Histogram of the temperature rise errors for the outer sheath of each cable circuit

本算例中,100%尺寸模型剖分单元数超过100万,单次工况计算时间约为5 h。12.5%尺寸模型剖分单元数不超过2万,单次工况计算时间约为10 min。25%尺寸模型剖分单元数不超过10万,单次工况计算时间约为20 min。结合规律分析与验证等环节,建立方程组总时间约为20 h。方程组建立后,100%尺寸模型的温升求解可在1 min内完成,支持载流量实时评估。

4 结论

文中基于相似原理开展隧道电缆组温升计算方法研究,主要得到以下结论:

1)理论分析与算例表明,隧道电缆对流散热满足相似原理;辐射散热与对流散热相对独立。其中通过尺寸与损耗的比例缩放,利用小尺寸下的对流特性可以便捷、准确地反映大尺寸下的对流特性。

2)综合应用相似原理与气体辐射特性,联立建立描述隧道截面热特征的规律的隐函数方程组,求解即可获得电缆温升。验证算例表明,该方法是合理的,误差基本在3 K以内,能够满足工程需求。

3)针对确定的隧道与电缆组合,隐函数方程组表示确定的隧道电缆固有稳态热特性,一经建立,即将温度场的仿真计算转化为隐函数方程组的求解,计算效率显著提升,这为后续依托一定数据量开展的传热规律研究提供了便利条件。文中研究结果亦可为大型变压器温升仿真等研究提供参考。

参考文献:

- [1] IEC 60287-1 Electric cables calculation of the current rating, part 1-1: current rating equations(100% load factor) and calculation of losses, general[S].
- [2] IEC 60287-2 Electric cables calculation of the current rating, part 2-1: thermal resistance calculation of thermal resistance[S].
- [3] Anders G J. Rating of electric power cables: ampacity computations for transmission, distribution, and industrial applications[M]. New York: McGraw-Hill, 1997.
- [4] 梁永春. 高压电力电缆载流量数值计算[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
Liang Yongchun. Numerical calculation of ampacity of high voltage cables[M]. Beijing: National Defense University Press, 2012.
- [5] 倪 镭, 孟 毓, 杨文威, 等. 500 kV 电缆隧道的热场分析[J]. 华东电力, 2009, 37(11): 1886-1890.
Ni Lei, Meng Yu, Yang Wenwei, et al. Thermal field analysis for 500 kV cable tunnels[J]. East China Electric Power, 2009, 37(11): 1886-1890.
- [6] 严有祥, 方晓临, 张伟刚, 等. 厦门±320 kV 柔性直流电缆输电工程电缆选型和敷设[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1147-1153.
Yan Youxiang, Fang Xiaolin, Zhang Weigang, et al. Cable section and laying of Xiamen ±320 kV flexible DC cable transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1147-1153.
- [7] 何江涛, 焦 阳, 叶 笛, 等. 电缆不同敷设方式下温度场与载流量的仿真计算[J]. 电测与仪表, 2016, 53(3): 99-104.
He Jiangtao, Jiao Yang, Ye Di, et al. Simulation and computation of temperature field and ampacity of conduit cable laying in different ways[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(3): 99-104.
- [8] 杨永明, 程 鹏, 陈 俊, 等. 考虑空气流场影响的电缆散热研究及其影响因素与经济性分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 50-54.
Yang Yongming, Cheng Peng, Chen Jun, et al. Cable heat dissipation considering air flow field, its influencing factors and economical efficiency[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 50-54.
- [9] 郭孝峰, 夏再忠, 吴静怡, 等. 埋地电力隧道温度预测与优化设计分析[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(5): 827-830.
Guo Xiaofeng, Xia Zaizhong, Wu Jingyi, et al. Research and optimum analysis on temperature field prediction of underground power transmission tunnel[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(5): 827-830.
- [10] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
Tao Wenquan. Numerical heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988.
- [11] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [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] 谢彦红, 李金娜, 张成, 等. 麦夸特算法在转炉炼钢过程建模中的应用[J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(3): 371-374.
- Xie Yanhong, Li Jinna, Zhang Cheng, et al. Marquardt algorithm application in modeling of the converter steelmaking process[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2014, 45(3): 371-374.
- [14] 王恺尔, 叶美盈, 许友生. 基于1stOpt的质子交换膜燃料电池模型优化[J]. 电源技术, 2009, 33(8): 698-700.
- Wang Kaier, Ye Meiyong, Xu Yousheng. Proton exchange membrane fuel cell model optimization based on 1stOpt[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2009, 33(8): 698-700.
- [15] 曾蒙秀, 宋友桂. 麦夸特算法在X射线衍射物相定量分析中的应用[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2013, 38(2): 431-440.
- Zeng Mengxiu, Song Yougui. Application of the Levenberg - Marquardt algorithm to X-ray diffraction quantitative phase analysis [J]. Earth Science - Journal of China University of Geosciences, 2013, 38(2): 431-440.
- [16] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- Ma Guodong. Electric wire and cable capacity[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.

傅晨钊(1975—), 男, 工学博士, 正高级工程师, 主要研究方向为输变电设备运行检测技术(E-mail: 13512111246@139.com)。

梁永春(1971—), 男, 工学博士, 教授, 主要研究方向为电力电缆热状态评估(通信作者)(E-mail: lycocan@163.com)。

《高压电器》2026年9期广告单位

封面: 西安交通大学

封二: 苏州科陆东自电气有限公司

封三: 厦门业盛电气有限公司

封底: 上海乐研电气有限公司

封面拉页: 泉州宇极新材料科技有限公司

前彩1: 江苏洛凯机电股份有限公司

前彩2: 正泰电器股份有限公司

前彩3: 厦门宏发电声股份有限公司

前彩4: 江苏省埃迪机电设备实业有限公司

前彩5: 广东金晖隆电气股份有限公司

前彩6: 陕西龙翔电器有限公司

前彩7: 陕西泰普瑞电工技术有限公司

前彩8: 杭州华创高科有限公司

前彩9-12: 特约主编寄语

中彩1: 杭州西湖电子研究所

中彩2: 温州昌泰电气有限公司

中彩3: 扬州金源机器人自动化设备有限公司

中彩4: 西安华伟电力电子技术有限责任公司

中彩5: 西安高压电器研究院股份有限公司(业务)

中彩6: 中国振华电子集团宇光电工有限公司

中彩7: 西安高压电器研究院股份有限公司(认证)

中彩8: 温州锐亚科技有限公司

后彩1: 甘肃电器科学研究院

后彩2: 广东诚为电气有限公司

后彩3: 上海华银开关厂有限公司

后彩4: 陕西仕科密封技术有限公司

后彩5: 广州创研智能科技有限公司

后彩6: 成都双高实业有限责任公司

后彩7: 浙江聚弘凯智能电气股份有限公司

后彩8: 重庆铎鸿电力设备有限公司

后彩9: 华星传动科技无锡有限公司

后彩10: 巨东电气有限公司

后彩11: 德姆勒互感器(浙江)有限公司

后彩12: 玛堡工业元件(上海)有限公司