

## 计及轴向传热的中低压单芯电缆导体温升状态空间模型

朱立位<sup>1</sup>, 潘宏承<sup>2</sup>, 应展烽<sup>3</sup>, 何玲<sup>1</sup>

(1. 国网连云港供电公司, 江苏 连云港 222003;

2. 国家电网公司交流建设分公司, 北京 110021;

3. 南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 电力电缆导体温度可为线路载流量及运行状态的评估提供依据。然而, 在当前电缆温度计算中, 导体的轴向温度分布通常被忽略, 无法准确描述电缆运行的热动态过程。为此, 基于热平衡原理, 在状态空间内提出了计及轴向传热的中低压单芯电缆导体的温升模型。为克服模型参数难以确定的问题, 提出了基于粒子群优化算法的电缆热路参数辨识方法。为验证模型精度, 建立了电缆温升实验平台, 在不同电流下对空气中敷设电缆进行了轴向温升实验。计算结果与实验结果的对比表明, 当电缆存在轴向温度梯度时, 所提状态空间模型结果精度高于 IEC 60287 标准模型, 能够满足中低压单芯电缆导体在不同电流条件下的轴向温升计算要求。

**关键词:** 电缆导体温升; 轴向温度分布; 状态空间模型; 参数辨识; 粒子群

**中图分类号:** TM726

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2019)01-0024-07

### 0 引言

电力电缆导体温度是影响电缆绝缘寿命的关键因素<sup>[1-2]</sup>, 也是评估线路载流量及运行状态的重要参数<sup>[3-6]</sup>。近年来, 随着线路温度对电力系统运行影响研究的逐步深入, 电缆导体温度还被应用于电热协调潮流计算和电力系统优化调度中<sup>[7-13]</sup>, 提高了输电经济性与可靠性。因此, 建立准确的电缆导体温度计算模型具有重要意义。

目前, 电缆导体温度计算的方法主要有热路模型与数值模拟模型两类。其中, 热路模型是一种基于热电类比理论的计算方法<sup>[14-15]</sup>, 可将传热分析转化为电路问题求解, 具有计算简便、易于工程实现等优势, 已形成了以 IEC 60287 为核心的相关计算标准<sup>[16-18]</sup>。近年来, 为提高模型精度、简化运算, 改进热路模型也在不断被提出<sup>[19-20]</sup>。数值模拟模型则是一种基于数值传热学理论的温升计算方法, 该类模型利用有限元<sup>[21-22]</sup>、有限差分<sup>[23-24]</sup>、边界元<sup>[25]</sup>等数值方法分析电缆温度场, 具有运算灵活、可模拟复杂工况等优势, 能够得到空间分辨率较高的电缆内部温度分布。

然而, 上述模型大多只考虑了电缆导体热量在径向上的传导, 事实上, 温度分布还会存在于电缆轴向上。一般来看, 轴向温度分布主要由以下 3 个原因引起: 其一, 电缆在不同介质(空气、土壤及水)间敷设时, 外部环境散热条件的差异会引起轴向温

度梯度; 其二, 即使在同一介质中, 介质密度、温度、湿度等特性的变化也会引起相应轴向温度分布; 其三, 接续金具处接触电阻过大会导致电缆局部过热。因此, 建立计及轴向传热的电缆导体温升模型可以更加准确地描述电缆的热动态过程, 也有助于更加可靠地评估线路载流能力及运行状态。

现有温升模型在计算电缆轴向温度分布时均存在一定不足。对于热路模型而言, 当电缆产生轴向温差后, 其温升过程已不再是简单的一维传热问题, 故模型中的热路参数不能简单的视为各层材料热阻和热容的组合。另外, 电缆各层材料之间还存在难以估计的接触热阻和空气间隙<sup>[26]</sup>, 因此热路模型参数计算十分困难。对于数值模拟模型而言, 为准确估计轴向温度, 计算中所需网格的尺寸应远小于材料之间的空气间隙, 但由此产生的巨大计算量导致模型难以工程应用。

为此, 文中以中低压单芯电缆为对象, 提出了一种计及轴向传热的电缆导体温升状态空间模型。该模型通过微元热路建立, 避免了复杂的数值计算, 并通过基于粒子群优化算法的电缆热路参数辨识方法, 克服了模型参数难以确定的问题。实验与计算结果的对比表明了研究的有效性。

### 1 计及轴向传热的中低压电缆温升状态空间模型

#### 1.1 中低压电缆导体的热平衡分析

文中以无铠装中低压 YJV 单芯电缆为研究对象, 其物理结构主要包括: 导体、导体屏蔽、绝缘、绝

缘屏蔽、金属屏蔽、绕包带及外护套,如图1所示。

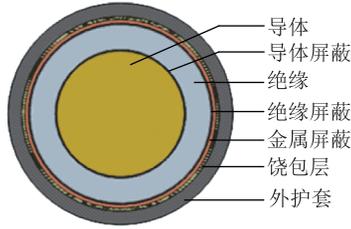


图1 单芯无铠装 YJV 电缆物理结构

Fig.1 The physical structure of single-core YJV cable without armour

根据材料性质,单芯电缆内部发热主要来自3类热损耗,即导体的热损、介质热损及金属屏蔽损耗<sup>[26-27]</sup>。上述热损功率均可参照 IEC 60287 标准计算。图2给出了不同载流或电压等级下的各类热损对比结果。容易发现,对于10 kV 以下的中低压电缆而言,介质热损与金属屏蔽损耗分别为 $10^{-2}$ 和 $10^{-3}$ 量级,远小于导体热损,可忽略不计。

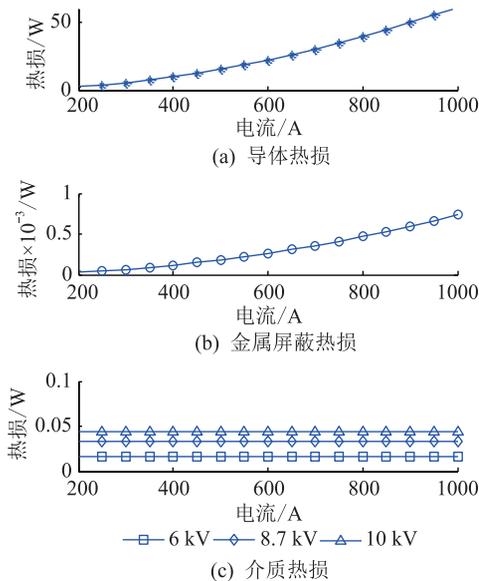


图2 单芯无铠装 YJV 电缆热损耗对比

Fig.2 The thermal loss comparison of single-core YJV cable without armour

若将电缆沿轴向等间隔分割为图3所示的若干微元,并设微元内电缆材质均匀,那么各微元中电缆的热损功率及材料热特性参数可近似相等。根据传热学理论<sup>[28]</sup>,当导体存在轴向温差时,每个微元*i*内导体产生的热流量不仅沿径向传递,同时还沿轴向传递。因此,导体热损功率可等效分解为径向热功率 $q_y$ 和轴向热功率 $q_x$ 两个分量。很明显,此刻只有同时考虑径向和轴向两个热平衡过程,才能准确反映电缆导体温度。

从径向上看,在忽略了介质热损与金属屏蔽损耗的条件下,影响电缆传热的主要参数是径向各层

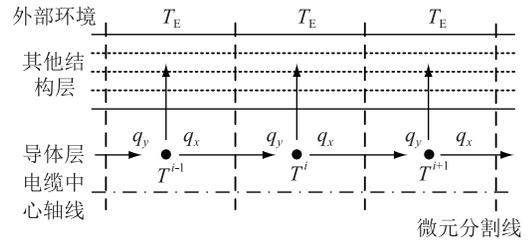


图3 电缆微元热平衡示意图

Fig.3 Cable infinitesimal thermal equilibrium diagram

材料的热阻和热容。由于文中旨在计算电缆的导体温度,并不关注电缆各层材料之间温度分布,因此可以采用文献[29]中的一阶热路模型来描述导体的径向传热,达到简化计算的目的。此时,微元导体的径向热平衡方程可表达为:

$$q_y = C_y \frac{dT^i}{dt} + \frac{T^i - T_E}{R_y} \quad (1)$$

式中: $T^i$ 和 $T_E$ 分别为微元*i*的导体温度和环境介质温度; $C_y$ 为导体微元径向等效热容; $R_y$ 为环境介质与导体间的等效热阻,表征了电缆各层材料及环境介质对导体径向传热的综合影响。

从轴向上看,微元*i*内的导体不仅向温度较低的临近微元导体散热,同时也从温度较高的临近微元导体中吸热。那么,根据热电类比理论,可得到微元导体的轴向热平衡方程:

$$q_x = C_x \frac{dT^i}{dt} + \frac{T^i - T^{i+1}}{R_x} - \frac{T^{i-1} - T^i}{R_x} \quad (2)$$

式中: $C_x$ 为导体轴向热容; $R_x$ 为相邻微元导体之间的等效热阻。考虑到电缆导体是由多股铜线互绞而成,故 $R_x$ 包含了线股间的接触热阻和空隙热阻对轴向传热的综合影响。

将式(1)和式(2)结合,可得到同时考虑径向和轴向传热的微元导体热路模型,如下式所示。

$$C \frac{dT^i}{dt} = q_J - \frac{T^i - T_E}{R_y} - \frac{T^i - T^{i+1}}{R_x} + \frac{T^{i-1} - T^i}{R_x} \quad (3)$$

$$q_J = q_x^i + q_y^i \quad (4)$$

$$C = C_x + C_y \quad (5)$$

式中: $q_J$ 为电缆导体总热损功率,可参考文献[16]求得; $C$ 为微元导体的总热容。

## 1.2 中低压单芯电缆导体温升的状态空间模型

根据式(3),并综合考虑所有电缆微元的导体热路模型,可得如图4所示的线性电路系统。

再根据线性系统理论,电缆导体轴向温度可视为状态空间中的状态变量,而导体热损功率、环境温度可视为系统输入量,由此可建立*k*时刻下的电缆导体温升状态空间模型:

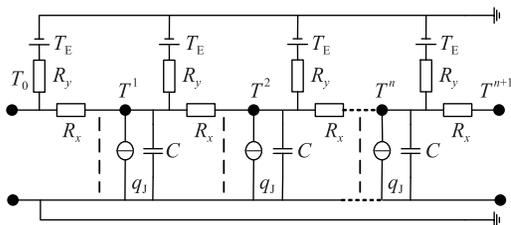


图4 电缆导体热路模型的等效电路系统

Fig.4 The equivalent circuit system of cable conductor thermal circuit model

$$\mathbf{T}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{T}(k) + \mathbf{B}\mathbf{U}(k) \quad (6)$$

式中： $\mathbf{U}$ 为输入矩阵； $\mathbf{B}$ 为输入向量； $\mathbf{T}$ 为状态向量； $\mathbf{A}$ 为状态矩阵。上述各量分别如式(7)一式(10)所示， $\Delta t$ 为时间间隔。易见，相比传统电缆热路模型，文中所建立的状态空间模型能够有效描述电缆轴向温升过程，反映电缆运行时的热动态特性。

$$\mathbf{U}(k) = \begin{bmatrix} q_1(k)\Delta t & T^0(k)\Delta t & T_E(k)\Delta t \\ q_1(k)\Delta t & 0 & T_E(k)\Delta t \\ \dots & \dots & \dots \\ q_1(k)\Delta t & 0 & T_E(k)\Delta t \\ q_1(k)\Delta t & T^{n+1}(k)\Delta t & T_E(k)\Delta t \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C} & \frac{1}{CR_x} & \frac{1}{CR_y} \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$\mathbf{T}(k) = [T^1(k) \quad T^2(k) \quad \dots \quad T^{n-1}(k) \quad T^n(k)]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} W & P & & & \\ P & W & P & & \\ & \dots & \dots & \dots & \\ & & & P & W & P \\ & & & & P & W \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$P = \frac{\Delta t}{CR_x} \quad (11)$$

$$Q = \frac{\Delta t}{CR_y} \quad (12)$$

$$W = 1 - 2P - Q \quad (13)$$

## 2 模型参数辨识

在所提状态空间模型中，模型参数  $C$ 、 $R_x$  及  $R_y$  还缺乏理论计算方法，这主要由两方面原因引起。其一，当电缆出现轴向温度后，其传热分析不再属于一维传热问题，故相关热路参数属于等效参数，无法由各层材料的热阻和热容简单相加得到。其二，电缆互绞的铜导体内部及各层材料接触面之间存在难以估计的接触热阻和空气间隙，使热路参数确定更加困难。为解决上述问题，提出了基于粒子群优化算法的模型热路参数辨识方法。

为了实现参数辨识，首先建立相关目标函数。设时刻  $k$  时，第  $j$  次实验中微元  $i$  的导体温度为  $T_j^i(k)$ 。考虑到所提状态空间模型是一种时间因果系统，故  $T_j^i(k)$  可由  $k$  时刻之前的输入量及初始时刻状态量逐时间步递推获得。那么，根据式(6)， $T_j^i(k)$  可改写为如下函数表达形式：

$$T_j^i(k) = f_j[\mathbf{T}(0), \mathbf{U}(0), \mathbf{U}(1), \dots, \mathbf{U}(k-1), \mathbf{x}] \quad (14)$$

其中， $\mathbf{x}$  为待辨识向量：

$$\mathbf{x} = [C \quad R_x \quad R_y]^T \quad (15)$$

为令模型计算结果与实验结果误差最小，可构造辨识目标函数：

$$J = \min \|\mathbf{f}_j[\mathbf{T}(0), \mathbf{U}(0), \dots, \mathbf{U}(k-1), \mathbf{x}] - \bar{T}_j^i(k)\|^2 \quad (16)$$

s.t.  $\mathbf{x} \geq 0$

式中： $\bar{T}_j^i(k)$  为  $k$  时刻时第  $j$  次实验中微元  $i$  导体实测温度。

基于粒子群优化算法求解上述目标函数。首先定义搜索种群  $\mathbf{G}$ ：

$$\mathbf{G} = \left\{ \bigcup_{u=1}^n \mathbf{P}_u \mid \mathbf{P}_u \in \mathbf{R}^3 \quad n \in \mathbf{N}, \forall 1 \leq u \leq n \right\} \quad (17)$$

式中： $\mathbf{R}^3$  为搜索空间； $\mathbf{P}_u$  为搜索粒子，由位置向量  $\mathbf{L}_u = [l_u^1 \quad l_u^2 \quad l_u^3]$  和速度向量  $\mathbf{V}_u = [v_u^1 \quad v_u^2 \quad v_u^3]$  描述； $\mathbf{L}_u$  代表待辨识参数值； $\mathbf{V}_u$  表示粒子向下一位置搜索的方向。

种群初始化完成后，将每个粒子的位置向量代入式(11)所示目标函数中，计算目标函数适应度值，并筛选出最优粒子与最优适应度值。之后，进行粒子位置与速度向量更新，进行下一轮寻优，第  $s$  次寻优的更新公式为：

$$\mathbf{V}_u^s = w^s \mathbf{V}_u^{s-1} + c_1(\mathbf{P}_{ub} - \mathbf{L}_u^{s-1}) + c_2(\mathbf{G}_b - \mathbf{L}_u^{s-1}) \quad (18)$$

$$\mathbf{L}_u^s = \mathbf{V}_u^s + \mathbf{L}_u^{s-1} \quad (19)$$

式中： $\mathbf{P}_{ub}$  为粒子最优解； $\mathbf{G}_b$  为种群最优解； $c_1$ 、 $c_2$  为学习因子，分别代表粒子向自身和其他粒子的学习能力； $w^s$  为权重系数，对其采用线性递减的调整方法，权重调整公式为：

$$w^s = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{N} s \quad (20)$$

式中： $w_{\max}$ 、 $w_{\min}$  分别为最大、最小权重系数； $N$  为最大寻优次数； $s$  为当前寻优次数。应用线性递减的调整方法可使种群在寻优初期和后期分别具备较强的全局与局部搜索能力，使辨识算法兼具较快的收敛速度与较高的辨识精度。参数辨识算法流程如图5所示。

## 3 电力电缆温升实验平台

为辨识模型参数并验证模型精度，设计如图6

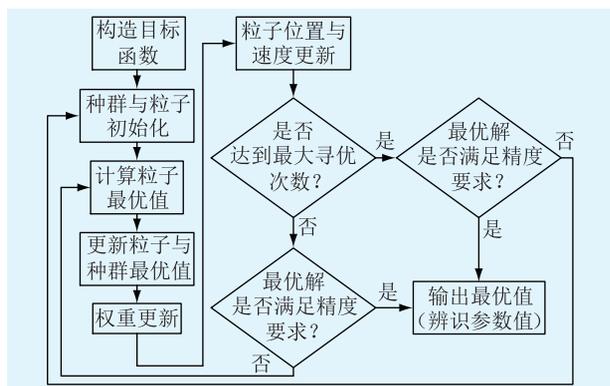


图5 模型辨识算法流程

Fig.5 The flow chart of model identification algorithm

所示电力电缆温升实验平台,主要包括:单芯电缆、温度探头、大电流发生器、耦合线圈、数据采集装置及上位机。

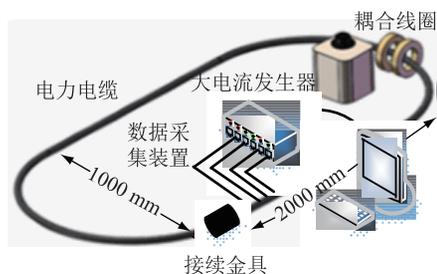


图6 温升实验平台示意图

Fig.6 The schematic diagram of power cable temperature experiment platform

实验中选用的电缆型号及部分参数如表1所示。实验电缆置于空气敷设环境,且首末端由接续金具(电缆接头)连接构成回路。由于接触电阻的存在,电缆接续点附近将产生轴向温度分布。

表1 电缆部分参数表

Table 1 Partial parameter of cable

参数名	参数值
规格	YJV-8.7/15 1×400
导体标称截面/mm <sup>2</sup>	400
标称截面导体的假设直径/mm	22.6
绝缘标称厚度/mm	4.5
金属屏蔽标称最小厚度/mm	0.12
外护套标称厚度/mm	2.3
导体直流电阻/( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	0.047
导体电阻率(20 $^{\circ}\text{C}$ )/( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$1.724 \times 10^{-8}$
导体温度系数(20 $^{\circ}\text{C}$ )/ $\text{K}^{-1}$	$3.93 \times 10^{-3}$

自接续金具处起,电缆上顺序排布编号为D0—D7的八处电缆细孔。各细孔深至电缆导体中心,轴向间距为300 mm。实验时,孔内安置经由精度校准的微型温度探头,以测量电缆导体温度。

输出可调节的大电流发生器将预设电流通过耦合线圈加载至实验电缆。同时数采装置以500 ms采样频率实时采集探头温度,并将数据通过串口传输至上位机,实时显示、存储。

#### 4 验证与分析

实验用单芯电缆空气敷设时载流量为745 A。由于工程中通常关注电缆在较大负荷,甚至过载时的温升,因此分别选取550 A,600 A,650 A,700 A,750 A和800 A作为实验电流,每次实验时长5 h。考虑到工程中温度采集间隔一般为1 min,故模型验证时也将实验数据进行时窗长度为1 min的平均处理。

以图7的650 A电流实验数据为例,对电缆轴向温度分布进行说明。由图可见,电缆各点导体温度在电流加载初期迅速升高,随后温升速率逐渐下降,温度最终达到稳态。因接续金具处电缆的接触电阻较大,故该处发热明显,进而导致D0至D4点间产生显著的温度梯度,最大温差可达12  $^{\circ}\text{C}$ 。然而由于轴向热阻的存在,接续金具对电缆温度分布的影响逐渐减弱,故D5至D7点间的温度差异逐渐减小。其他电流条件下,电缆导体各点温升趋势及轴向温度分布与650 A时的实验现象相似,不再赘述。

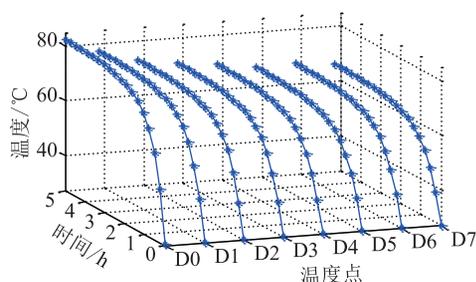


图7 实验电流650 A时的电缆导体温升实测结果

Fig.7 The measured results of cable conductor temperature under 650 A experimental current

利用上述6组电流下电缆导体温升实测数据进行参数辨识,可得导体等效热容 $C$ 为1745.302  $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ ,轴向等效热阻 $R_x$ 为1.475  $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ,径向等效热阻 $R_r$ 为4.276  $\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ 。再将辨识结果代入状态空间模型中,可得电缆导体轴向各点温升计算结果。

图8给出了电流为650 A时,基于状态空间模型和IEC模型所得的电缆轴向温升计算值,相应计算误差曲线对比如图9所示。综合图8和图9可见,由于忽略了轴向传热,IEC模型误差相对较高。尤其在轴向温升较大的导体位置上,最大计算误差可达13.5%。而文中模型计算结果与实验结果吻合度较高,最大误差仅为2.0%,能够准确反映电缆导

体轴向温升的动态过程。

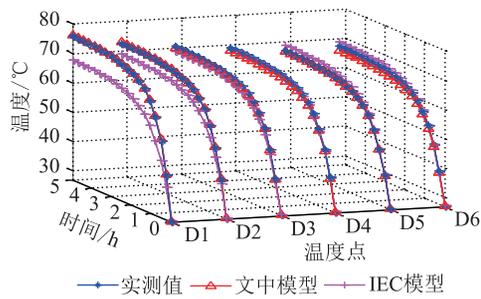


图8 实验电流为 650 A 时的模型计算结果对比  
Fig.8 The model calculation results comparison figure under 650 A experimental current

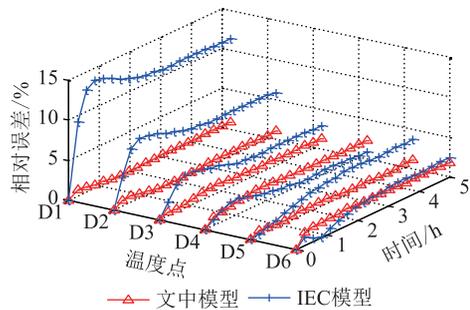


图9 实验电流为 650 A 时的相对计算误差曲线对比  
Fig.9 The relative calculation error curve comparison figure under 650 A experimental current

除最大误差外,工程中通常还以平均相对误差来衡量模型的实用性。表2给出了6组电流实验下,状态空间模型和IEC模型的平均计算误差。对比可见,文中模型平均误差不超过2.7%,具有较高的精度,满足工程计算需要。而IEC模型平均误差可达16%,已超出了工程误差允许范围。这也表明IEC模型在电缆轴向温差较明显时不宜使用。

表2 不同实验电流下的模型平均相对误差对比

Table 2 The model average relative error comparison under various experimental current

温度点	平均相对计算误差/%						
	550 A	600 A	650 A	700 A	750 A	800 A	
文中模型	D1	2.1	0.5	0.3	1.1	0.2	1.6
	D2	0.8	0.5	0.3	0.6	0.4	2.2
	D3	0.6	1.8	0.9	1.6	1.6	1.2
	D4	1.1	1.7	1.9	1.2	2.7	0.6
	D5	0.9	1.4	0.6	1.3	2.5	2.3
	D6	2.0	0.3	2.0	2.4	1.0	1.2
IEC模型	D1	7.5	12.7	11.1	8.1	16.2	10.0
	D2	4.0	7.4	5.7	3.3	9.9	4.2
	D3	2.0	1.8	2.7	1.3	6.8	1.3
	D4	1.2	4.5	0.8	1.2	4.1	1.3
	D5	1.5	2.4	2.2	2.5	7.1	4.0
	D6	1.1	0.9	1.7	1.9	5.8	3.4

在上述验证分析中,相关实验的温升实测数据均为模型参数辨识的输入条件。由于参数辨识的目标是使模型计算和实验结果误差最小,因此为进一步验证研究的有效性,还有必要利用其他电流等级下的实验和计算结果来进行分析。为此,文中随机增补了575 A,675 A和775 A 3组电流下的电缆温升实验,但相关实验结果不参与参数辨识。利用先前参数辨识结果,结合状态空间模型,计算对应于增补实验的电缆轴向温升过程,其平均计算误差如表3所示,结果表明,此时的状态空间模型同样具有较高计算精度,并同样高于IEC模型计算精度。因此,在得到模型参数辨识结果后,所提模型可满足不同电流条件下的电缆导体轴向温升计算需要,具有良好的适用性。

表3 随机实验电流下的模型平均相对误差

Table 3 The model average relative error under randomized experimental current

温度点	计算相对误差/%			
	575 A	675 A	775 A	
文中模型	D1	2.4	2.4	3.1
	D2	1.1	2.2	3.0
	D3	0.5	0.4	0.9
	D4	2.0	1.7	1.3
	D5	0.7	0.5	0.6
	D6	1.9	1.8	1.6
IEC模型	D1	10.3	13.5	12.2
	D2	7.6	6.2	8.1
	D3	4.3	4.7	5.9
	D4	2.1	2.9	3.8
	D5	2.5	2.2	4.1
	D6	2.1	1.1	2.7

需要说明的是,尽管文中实验中的电缆长度有限,但状态空间模型基于微元法建立,因此轴向温度计算点数量并不受限制,可推广至长距离电缆的温升估计中。另外,模型热路参数通过参数辨识得到,并不受敷设环境介质的限制,因此模型也可推广至土壤敷设时的中低压电缆温升计算中,具有较好的工程价值。

文中状态空间模型计算误差产生的一个主要原因是忽略了电缆材料热学参数的温度变化特性。事实上,电缆是由复合材料构成,故当温度发生变化时,材料导热特性及相互之间的热应力也会发生变化,并在一定程度上改变了状态空间模型的热路参数。因此,未来应当深入研究模型参数随电缆运行电流和导体温度的变化规律,以进一步提高电缆轴向温度的计算精度。

## 5 结论

文中提出了能够计及轴向传热的中低压单芯电缆温升状态空间模型,并提出了基于粒子群优化的模型参数辨识方法。通过实验和计算结果的对比,得到如下结论:(1)在模型参数辨识之后,所提状态空间模型具有较高精度,能够满足不同电流条件下的中低压电缆导体轴向温升计算需要;(2)当线路存在轴向温度分布时,所提模型精度明显优于 IEC 60287 标准模型。

### 参考文献:

- [1] 赵建华,袁宏永,范维澄,等.基于表面温度场的电缆线芯温度在线诊断研究[J].中国电机工程学报,1999,19(11):52-54,68.  
ZHAO Jianhua, YUAN Hongyong, FAN Weicheng, et al. Surface temperature filed based online diagnoses study for electric cable's conductor temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(11): 52-54, 68.
- [2] 刘毅刚,罗俊华.电缆导体温度实时计算的数学方法[J].高电压技术,2005,31(5):52-54.  
LIU Yigang, LUO Junhua. Mathematical method of temperature calculation of power cable conductor in real time[J]. High Voltage Engineering, 31(5): 52-54.
- [3] GARRIDO C, OTERO A F, et al. Theoretical model to Calculate ste-ady-state and transient ampacity and temperature in buried cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2003, 18(3): 667-678.
- [4] OLSEN R, ANDERS G J. 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.
- [5] NAKAMURA S, MOROOKA S, KAWASAKI K. Conductor temperature monitoring system in underground power transmission XLPE cable joints[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1909 - 1917.
- [6] 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.
- [7] BANAKAR H, ALGUACIL N, GALIANA F D. Electrothermal coordination part I: theory and implementation schemes [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 798-805.
- [8] 沈一平,蔡岳峰,王昕.架空绝缘导线带电接续技术的研究[J].浙江电力,2016,35(1):19-22.  
SHEN Yiping, CAI Yuefeng, WANG Xin. Research on live-wire connection technology of overhead insulated conductor[J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(1): 19-22.
- [9] 张兴华,童歆渝,刘伟.考虑铁芯损耗的内置式永磁同步电机模型参数测量[J].电力自动化设备,2018,38(3):194-198,204.  
ZHANG Xinghua, TONG Xinyu, LIU Wei. Model parameter measurement of permanent magnet synchronous motor considering core loss[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 194-198, 204.
- [10] 张云柯,李博通,贾健飞,等.带并联电抗器的超高压电缆-架空混合线路三相永久性故障识别方法[J].电力自动化设备,2017,37(10):107-111,125.  
ZHANG Yunke, LI Botong, JIA Jianfei, et al. Three phase permanent fault identification method for EHV cable overhead hybrid lines with shunt reactors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 107-111, 125.
- [11] 黄清,魏旭,周志成.激光对架空输电导线的温度影响研究[J].江苏电机工程,2016,35(6):45-49.  
HUANG Qing, WEI Xu, ZHOU Zhicheng. Research on temperature effect of laser on overhead transmission line[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(6): 45-49.
- [12] ALGUACIL N, BANAKAR H, GALIANA F D. Electrothermal coordination part II: case studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1738-1745.
- [13] OLSEN R, HOLBOELL J, et al. Electrothermal coordination in cable based transmission grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems. 2013, 28(4): 4867-4874.
- [14] 应展烽,冯凯,杜志佳,等.高压架空导线电流与轴向温度关系计算的热路模型研究[J].中国电机工程学报,2015,35(11):2887-2895.  
YING Zhanfeng, FENG Kai, DU Zhijia, et al. Study of thermal circuit model for calculation relationship of high voltage overhead conductor ampacity and axial temperature [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2887-2895.
- [15] 冯凯,应展烽,张旭东,等.基于内点法参数辨识的架空导线径向热路模型[J].高电压技术,2015,41(7):2321-2326.  
FENG Kai, YING Zhanfeng, ZHANG Xudong, et al. Radial thermal circuit model of overhead conductors based on parameter identification with interior point method [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2138-2143.
- [16] Calculation of the current rating-part 1: current rating equations (100% load factor) and calculation of losses: IEC 60287-1—2001[S].
- [17] Calculation of the current rating-part 2: thermal resistance; IEC 60287-2—2001[S].
- [18] Calculation of the current rating-part 3: sections on operating conditions; IEC 60287-3—1999[S].
- [19] 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.
- [20] 刘刚,雷成华,刘毅刚,等.根据电缆表面温度推算导体温

- 度的热路简化模型暂态误差分析[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 212-217.
- LIU Gang, LEI Chenghua, LIU Yigang, et al. Analysis on transient error of simplified thermal circuit model for calculating conductor temperature by cable surface temperature[J]. Power System Technology. 2011, 31(5): 52-54.
- [21] 王有元, 陈仁刚, 陈伟根, 等. 有限元法计算地下电缆稳态温度场及其影响因素[J]. 高电压技术, 2008, 34(12): 3086-3092.
- WANG Youyuan, CHEN Rengang, CHEN Weigen, et al. Calculation of static temperature field of buried cable based on FEM and analysis of influential factors[J]. High Voltage Engineering. 2008, 34(12): 3086-3092.
- [22] VAUCHERET P, HARTLEIN R A, BLACK W Z. Ampacity derating factors for cables in short segment of conduit [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1-6.
- [23] HANNA M A, CHIKHANI A Y. Thermal analysis of power cables in multi-layered soil part 1: theoretical model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 304-309.
- [24] HANNA M A, CHIKHANI A Y. Thermal analysis of power cables in multi-layered soil part 3: case of two cables in a Trench[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 772-778.
- [25] GELA G, DAI J J. Calculation of thermal fields of underground cables using the boundary element method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery 1988, 3(4): 1341-1347.
- [26] 赵健康, 樊友兵, 王晓兵, 等. 高压电力电缆金属护套下的热阻特性分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2483-2487.
- ZHAO Jiankang, FAN Youbing, WANG Xiaobing, et al. Thermal resistance properties of the part between metal sheath and conductor in high-voltage power Cable[J]. High Voltage Engineering. 2008, 34(11): 2483-2487.
- [27] 高升宇, 顾自强, 王震, 等. XLPE 电缆排管敷设时稳定载流量的理论计算析[J]. 电力设备, 2007, 8(9): 6-11.
- GAO Shengyu, GU Ziqiang, WANG Zhen, et al. Theoretical calculation of steady current-carrying capacity for XLPE cable of duct laying[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(9): 6-11.
- [28] 陶文铨. 传热学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006: 4-15.
- TAO Wenquan. Heat transfer [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006: 4-15.
- [29] Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables-part 2: cyclic rating of cables greater than 18/30 (36) kV and emergency ratings for cables of all voltages; IEC 60853-3—1999[S].

作者简介:



朱立位

朱立位(1981),男,学士,工程师,从事科技与智能电网管理工作(E-mail: zhuliwei4760@163.com);

潘宏承(1981),男,硕士,高级工程师,从事高压输电线路及电气设备状态监测方面研究工作;

应展烽(1981),男,博士,副教授,研究方向为高压架空线路状态监测及高压电气设备热动态特性分析。

## The state space model of conductor temperature estimation considering axial heat conduction for middle and low voltage single core power cable

ZHU Liwei<sup>1</sup>, PAN Hongcheng<sup>2</sup>, YING Zhanfeng<sup>3</sup>, HE Ling<sup>1</sup>

(1. State Grid Lianyungang Power Supply Company, Lianyungang 222003, China;

2. National Power Grid Corp Exchange Construction Branch Company, Beijing 110021, China;

3. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Power cable conductor temperature is an important parameter to evaluate the ampacity and operation status of transmission line. However, the current cable temperature calculation model can not accurately describe thermal dynamic process of cable operation for ignoring the axial conductor temperature distribution. To solve this problem, a state space model of conductor temperature estimation considering axial heat conduction for middle and low voltage single core power cable was proposed in this paper which based on thermal equilibrium principle. To overcome the shortcoming that the thermal parameters are difficult to accurately calculate, a power cable conductor thermal parameter identification algorithm based on particle swarm optimization (PSO) was proposed. To verify model accuracy, a cable temperature experiment platform was established and the axial temperature of air laying power cable under various current was measured. Comparison of calculation results and experimental results shows that the precision of proposed model is higher than that of IEC 60287 model, the proposed model can meet the precision requirement of middle and low voltage power cable conductor temperature calculation under various current which can be applied to describe the single core power cable thermal dynamic process more accurately.

**Keywords:** power cable conductor temperature; axial temperature distribution; state space model; parameter identification; PSO

(编辑 钱悦)