

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.01.023

土壤直埋单芯电缆暂态温升计算模型的研究

傅晨钊¹, 司文荣¹, 祝令瑜², 李红雷¹, 姚周飞¹

(1. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437; 2. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要: 研究了一种集总参数模型,以提高土壤直埋单芯电缆暂态温升计算效率。利用平衡热阻和平衡热感模拟热扩散过程中热阻和热容的时变特性,从而建立不依赖外表测温的集总参数温升的计算模型。在算例验证中,分别采用集中参数模型、有限元法与通用软件对同一工况进行计算,并将结果进行对比,证明了该方法的有效性。此外,基于热传导叠加的原理对模型进行优化,将电缆自身发热和环境温度影响分别建立模型,从而使算法很好的适应环境温度的变化。

关键词: 土壤直埋; 单芯电缆; 暂态温升; 集总参数; 热传导

Research on the Calculation Model for Transient Temperature Rise of Straight Buried Single-core Cable

FU Chenzhao¹, SI Wenrong¹, ZHU Lingyu², LI Honglei¹, YAO Zhoufei¹

(1. State Grid Shanghai Electrical Power Research Institute, Shanghai 200437 China;
2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A lumped parameter model is proposed to improve the calculation efficiency of transient temperature rise of buried single-core cable. In order to build the model without monitoring jacket temperature, balancing thermal resistance and inductance are used to simulate the time-variant characteristic in the process of thermal diffusion. In the case study, the temperature rise under the same condition is obtained respectively by the lumped parameter model, finite element method, and CYMCAP. The comparative results show that the lumped parameter model is consistent with the other two methods, which verifies the accuracy of the method proposed in this paper. Besides, the model is optimized by building models considered the effects of cable heat and environment temperature, respectively, based on the superposition principle of heat conduction, so that the algorithm can adapt to the change of environment temperature wells.

Key words: straight buried; single-core cable; transient temperature rise; lumped parameter; heat conduction

0 引言

地下电缆的敷设方式主要有土壤直埋、排管、沟槽和隧道等4种方式,其中,在110 kV及以下的用电领域,土壤直埋方式仍然是大多数城市中单芯电缆线路的主要敷设方式^[1]。土壤直埋下电力电缆温升的计算模型及计算方法是近些年来研究的热点。当电缆线路发生短路、过载时,电缆中将流过比额定负荷大的电流,造成发热的急剧上升^[2]。因此研究暂态温升计算模型对于电缆短时载流量的合理确定具有重要意义。

由于电力电缆运行的特殊性,一般不可能通过直接测量获得电缆线芯温度,特别是线芯实时的暂态温度,因此技术人员提出了基于试验结果的工程经验公式法或数值算法来掌握线芯温度,其中数值算法由于适应性强,且得益于计算工具的发展,近年来发展迅速^[1-12]。但对于实际运行中的电缆,考虑到敷设截面与工况等因素的复杂性,采用数值法求解所需计算量巨大,无法满足实时获知电缆线芯暂态温度的需求。此外,实际工程应用中也有采用加装光纤测温等装置以获取电缆表皮温度,进而推算电缆线芯温度的方法^[13-18]。然而实际中也存在若干缺陷:严重依赖测温装置的健康状况,测温偏差、传

输通讯等缺陷将直接制约电缆设备运行的选择;考虑到一回电缆往往存在若干断面需要进行监测,这就需要加装多套测温装置,进而导致整体系统的可靠性较低;为提高装置、系统的整体可靠性,可能采取增强冗余设计、甚至多套并装的方法,这样不仅增大了装置与系统的一次投资,而且给后续的运行维护带来了巨大工作量。这也是目前该类方法无法大范围应用的主要原因。因此,开展电缆暂态温升的快速计算具有很强的实用性和必要性^[19-24],而首先需要开展的是单芯电缆暂态温升快速算法的研究。

为了提高土壤直埋单芯电缆暂态温升计算效率,文中首先建立了一种不依赖外表测温的集总参数温升计算模型,研究分析了与该模型与有限元法、通用软件 Cymcap 计算结果的差异,进而基于热传导叠加原理进行了考虑环境温度的模型优化。该研究为土壤直埋单芯电缆暂态温升的快速计算奠定了基础。

1 单芯电缆暂态模型

单芯电缆的发热取决于电缆损耗与所处断面的热学特征,前者与运行电流及运行温度已有明确的对应关系,已在工程中广泛应用;后者主要取决于断面的几何参数、各部分的物理参数,一般认为在运行温度范围内这些物理参数保持不变,以上为模型的建立提供了理论依据。

根据传热学原理,文中所建立的线芯暂态温度计算模型见图 1。图 1 中: Q_1 为电缆热载荷; C_1 为电缆自身等效热容; C_2 为土壤断面等效热容; R_1 为土壤断面等效热阻的平衡热阻; R_2 为电缆线芯对环境的等效热阻; L_1 为断面等效热阻的平衡热感。

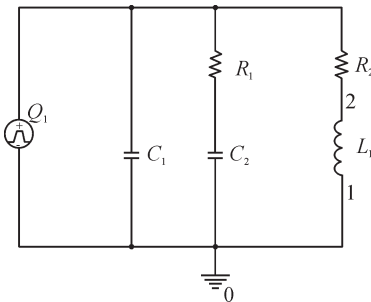


图 1 单芯电缆集总参数暂态热路模型

Fig. 1 Transient thermal circuit model with lumped parameter for single-core cable

该模型的温度参考点为环境温度,且计算不依赖于表皮测温。其中,为克服电缆向邻近环境的散热动态特征的傅里叶数与毕渥数不能满足集总参数的问题,采用了平衡热阻与平衡热感的概念(分别

为 R_1 和 L_1),可用于模拟热扩散的热阻与热容的时间特性。同时,考虑到电缆与土壤在质量、导热系数、比热容的显著差异,模型中将电缆与土壤分别考虑。

由于该模型的确定不依赖于电缆本身发热量或电流大小,只与电缆及周围材料的热特性相关。因此,模型建立后,变换电缆电流时就无需重复复杂的数值计算,可直接通过简单热路计算和损耗修正获得满意结果。

需要指出的是,根据传热学 3 种边界条件类型的不同,模型的具体参数将有所差异;而边界条件的类型确定后,边界条件具体数值的变化对模型参数具体数值的影响将可忽略不计。

2 模型的建立与验证

2.1 模型参数的提取

模型的建立过程实质上是利用集总参数来模拟或提取传热过程的规律。图 1 所示模型的参数提取过程需要参考有限元计算结果,因此首先建立单芯电缆有限元计算模型。

2.1.1 有限元模型

有限元计算模型见图 2。电缆的结构参数、热力学参数等见表 1。设定流过电缆芯线的电流为 1 000 A,波形为阶跃波;边界 1 选取环境温度 10 ℃,边界 2、3、4 为自由边界条件;时间步长为 0.25 h,计算时长为 200×0.25 h。计算结果见图 3。

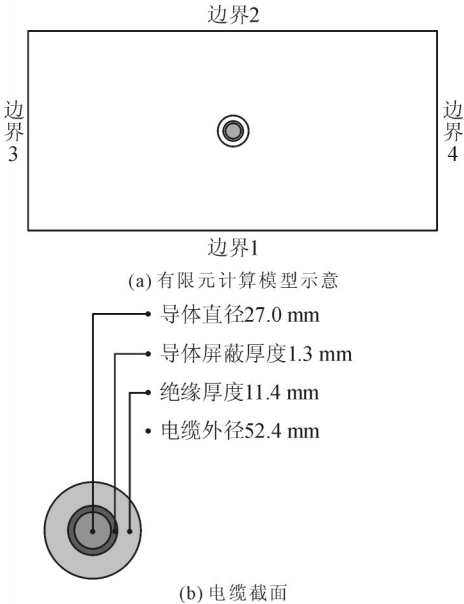


图 2 有限元计算模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of finite element calculating model

暂态计算完成后,利用该有限元模型计算稳态温升,可得电缆线芯温升为 31.34 K,电缆热流量(损耗)为 36.92 W。

表1 电缆参数

Table 1 Parameters of single-core cable

材料	尺寸/mm	导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]	比热容/ [J·(kg·K) ⁻¹]	密度/ (kg·m ⁻³)
铜导体	外径 27.0	380.0	400	8 900
屏蔽层	外径 29.6	0.3	2 000	1 200
XLPE 绝缘	外径 52.4	0.2	2 200	1 400
土壤	4 000×2 000	1.0	840	2 700

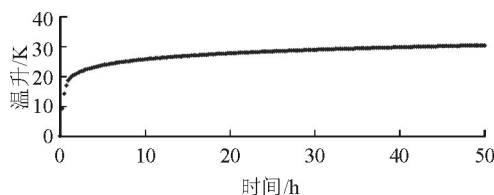


图3 有限元计算结果

Fig. 3 Calculation results by finite element method

需要指出,由于模型关注于断面的热学特性,为便捷起见,模型建立过程中设定热流为恒定,暂不考虑电缆交流电阻的温度影响。实际应用中,根据初始 t 时刻的电缆温度与电流值,可得到此刻的热流(损耗)。将该热流(损耗)输入模型,就能算得 $t+\Delta t$ 时刻的电缆温升。按此刻的线芯温度进行折算修正后得到新的热流(损耗),再将其输入模型,即可得到 $t+2\times\Delta t$ 时刻的温升数值。如此循环直至计算结束,即可获得整个线芯的暂态温升。

2.1.2 集总模型参数的提取

图1所示模型中各参数的求解分别采用解析法与遗传算法来实现。

1) 电缆线芯对环境的等效热阻 R_2 。根据图1所示模型可知,稳态温升时,电缆自身等效热容、断面等效热容、断面等效热阻的平衡热感均已平衡,因此可得 R_2 =电缆线芯温升/电缆热流量=31.34/36.92=0.891(K·m/W)。

2) 电缆自身等效热容 C_1 、断面等效热容 C_2 、断面等效热容的平衡热阻 R_1 、断面等效热阻的平衡热感 L_1 等参数反映了断面热传递的过渡过程,可采用遗传算法求取,过程如下。其中,根据热学特性,可令 $R_1\times C_2=L_1/R_2$ 。

设置参数范围。根据试算经验,取 $C_1\in(0.01, 50)$, $C_2\in(0.01, 500)$, $R_1\in(0.01, 5)$, 二进制编码,初始种群数量为100,最大遗传代数为500,交叉概率0.75,变异概率0.2。

设置适应度函数。选取图1所示模型暂态温升响应 $m(i)$ 与图3所示计算暂态温升 $fem(i)$ 2条曲线的偏差之和作为适应度函数,取

$$fitness = \sum_{i=1}^{96} [m(i) - fem(i)]^2 \quad (1)$$

设置收敛判据:考虑热响应的吻合性,取(0~96)×0.25 h时间段内各离散点平均偏差不大于0.2 K,则适应度函数值应小于 $96\times0.2\times0.2\approx4$ 。如遗传代数达到最大遗传代数,而不能满足适应度函数值小于4,则认为计算失败。

遗传算法的进化过程见图4。计算结果为: $C_1=7.129 \text{ W}\cdot\text{s}/(\text{K}\cdot\text{m})$, $C_2=112.179 \text{ W}\cdot\text{s}/(\text{K}\cdot\text{m})$, $R_2=0.381 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$, $L_1=26.024 \text{ K}\cdot\text{s}\cdot\text{m}/\text{W}$ 。

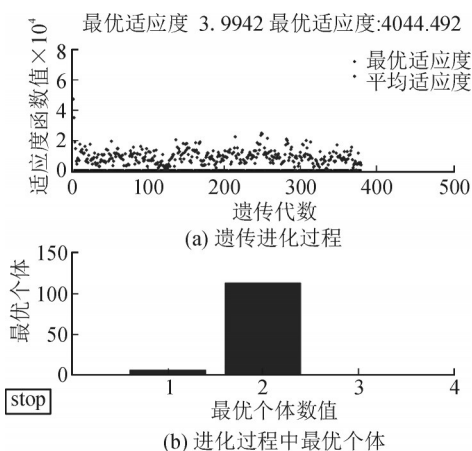


图4 参数提取的遗传算法进化过程

Fig. 4 Parameter extraction program based on genetic evolution algorithm

2.2 模型的验证

为了对文中所提出模型进行验证,分别利用所建立的集总参数模型、有限元模型以及通用软件Cymcap对文2.1节中所述工况下的电缆暂态温升进行计算。3种方法的计算结果见图5与表2。从集中参数模型计算得到的温升与有限元模型及通用软件Cymcap的偏差绝对值(取两者的最大值)可以发现,集总参数模型结果与有限元方法、Cymcap计算结果基本吻合,最大偏差仅为1.42 K。

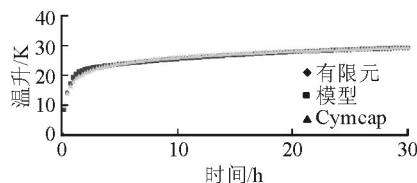


图5 计算结果的比较

Fig. 5 Comparison of calculation results

为进一步验证模型的有效性,选取典型工况,首先利用通用软件Cymcap进行了计算,结果见图6。将图6结果与集总参数模型及有限元模型计算结果相比较,见图7。工况设置为:0~24 h, 500 A; 24~48 h, 1 000 A; 48~72 h, 1 500 A; 72~96 h, 750 A; 96~120 h, 0 A; 120~144 h, 1 000 A; 140~168 h, 0 A; 168~192 h, 500 A。计算已考虑了温度对损耗的影响。比较结果表明,集总参数模型可以很好地模拟电缆暂态温

升过程,其中平衡热阻与平衡热感很好的适应了热扩散过程中热阻与热容的时变特性。

表2 计算结果比较
Table 2 Comparison of calculation results

时间/h	电缆线芯温升/K			
	有限元	模型	Cymcap	最大偏差
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.25	9.19	8.68	9.77	1.09
0.50	14.20	13.74	14.04	0.46
0.75	16.92	17.04	16.36	0.68
1.00	18.47	19.03	17.82	1.21
1.25	19.43	20.25	18.83	1.42
1.50	20.10	21.01	19.59	1.42
1.75	20.60	21.51	20.20	1.31
2.00	21.00	21.84	20.69	1.15
2.25	21.35	22.08	21.12	0.96
2.50	21.65	22.27	21.49	0.78
2.75	21.92	22.43	21.82	0.61
3.00	22.17	22.56	22.11	0.45
3.25	22.49	22.69	22.38	0.31
3.59	22.61	22.80	22.62	0.19
3.75	22.81	22.91	22.85	0.10
4.00	22.99	23.02	23.06	0.04
4.25	23.17	23.12	23.25	0.13
4.59	23.33	23.22	23.44	0.22
4.75	23.49	23.32	23.61	0.29
5.00	23.64	23.42	23.77	0.35

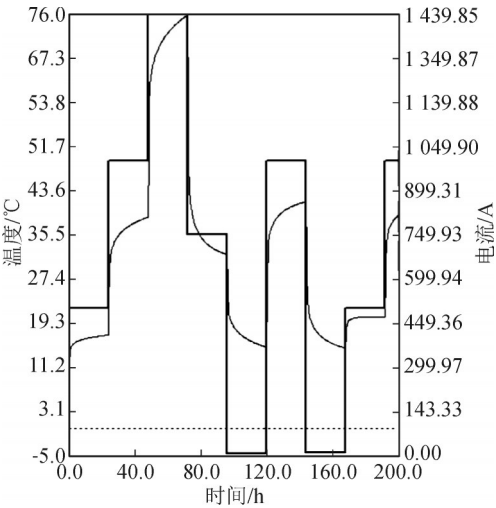


图6 Cymcap计算结果
Fig. 6 Calculation results by Cymcap

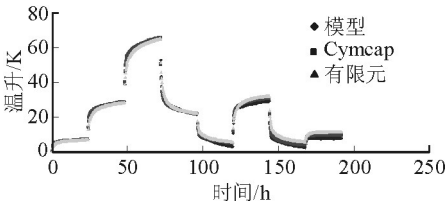


图7 计算结果的比较
Fig. 7 Comparison of calculation results

3 考虑环境温度变化时模型的改进

3.1 上述模型存在的不足

考虑到实际运行中环境温度的变化,特别是大气环境温度变化的影响,图1所示模型在适应多种热边界条件方面仍存在不足,主要表现为:针对不同的边界条件设置,模型建立确定的参数较多,求解过程繁琐,效率较低。以2种环境温度为例,需建立的模型见图8。

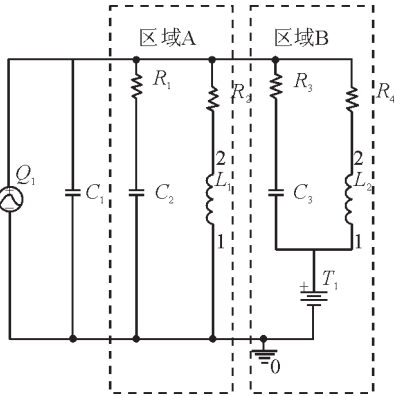


图8 适应两种环境温度的单芯电缆集总参数暂态模型
Fig. 8 Transient lumped parameter model adapting different environmental temperature for single-core cable

图8中: C_1 为电缆自身等效热容; Q_1 为电缆热载荷; T_1 为2种环温的差值;区域A对应向第1种环温的散热, C_2 为对应断面等效热容, R_1 为对应断面等效热容的平衡热阻, R_2 为电缆线芯对对应环温的等效热阻, L_1 为对应断面等效热阻的平衡热感;区域B对应向第2种环温的散热, C_3 为对应断面等效热容, R_3 为对应断面等效热容的平衡热阻, R_4 为电缆线芯对对应环温的等效热阻, L_2 为对应断面等效热阻的平衡热感。

以上还仅为2种环境温度均保持不变的情况,此时需要求解的参数多达9个,其中仅 R_2 、 R_4 可由解析求解,其他参数不仅求解过程繁琐,而且单一参数的偏差均可能导致模型整体的失效。

3.2 模型的优化改进

3.2.1 优化后的模型

根据热传导场叠加的原理,文中对图1所示模型进行了优化,将电缆自身发热影响与环境温度变化影响区分开来,分别建立分散模型,再通过线芯节点的耦合来求取线芯的综合温升。整体模型见图9(以对应2种环境温度为例)。分散模型具有计算简单,扩展性强,并为多回电缆暂态温升的计算创造条件的优点。

电缆自身模型参数同图2所示。其中 R_3 为对应

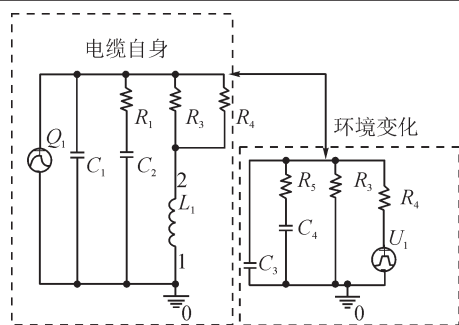


图9 整体集总参数暂态热路模型

Fig. 9 Overall transient thermal circuit model with lumped parameter

环境温度1的等效热阻, R_4 为对应环境温度2的等效热阻。环境变化模型中 R_3 、 R_4 同电缆自身模型, U_1 为环温差值, C_3 、 C_4 与 R_5 无明确物理意义,用于模拟过渡过程。

需要说明的是,环境变化模型原理上应与图8中去除“ Q_1 ”后的部分一致,但考虑到参数求取的便捷,利用电路降阶的思路对其进行了简化,如图9中所示。

实际应用中,环境温度1可选为大气温度,其变化较为显著;环境温度2可选为土壤温度,其变化速率远小于气温变化,可视为基本不变。模型建立后,施加热载荷 Q_1 与 U_1 (均为可变载荷),可得到2个分散模型中线芯温升的数值,将线芯温升对应节点数值相加后,即可得到线芯的综合温度。利用此温度对损耗进行修正,形成新的热载荷 Q_1' ,即可体现出环境变化对线芯温升的影响。然后,将 Q_1' 代入热路模型,进行下一时刻的计算,得到新的温升。如此循环直至计算结束,即可得到线芯暂态温升过程。

3.2.2 参数求取

1)工况设置。工况设置为:①边界环温均一致,阶跃热载荷36.92 W。选取:边界环温1、2、3、4设为温度10℃。②边界环温有差异,阶跃热载荷36.92 W。选取:边界环温2设为温度20℃;边界环温1、3、4设为温度10℃。需要说明的是,环温、热载荷的具体数值对模型参数提取的结果无明显影响。工况1、工况2的暂态温升过程计算结果见图10。

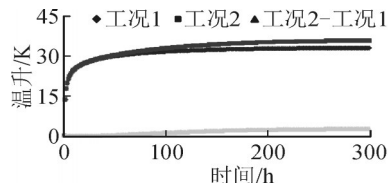


图10 有限元计算结果

Fig. 10 Calculation results by FEM

2)模型参数的提取。①电缆线芯对环温的等效热阻 R_3 、 R_4 在300 h时间后,热过程趋于稳定。对应

边界一致的条件,则有: $U_1=0$,由图9可得: R_3 与 R_4 的并联值=电缆线芯温升/ $Q_1=33.25/36.92=0.901 \text{ K} \cdot \text{m/W}$ 。

对应边界有差的条件,则有 $U_1=10$,由图9可得: R_3 与 R_4 的并联值=电缆线芯温升/ $(Q_1+U_1/R_4)=36.11/(36.92+10/R_4)=0.901 \text{ K} \cdot \text{m/W}$ 。

以上联立,可得到: $R_3=1.715 \text{ K} \cdot \text{m/W}$, $R_4=3.149 \text{ K} \cdot \text{m/W}$ 。②过渡参数 C_1 、 C_2 、 R_2 、 L_1 。如图10所示,“工况1”对应为边界环温一致,上述参数采用文3.1节所述方法求解,结果为: $C_1=2.220 \text{ W} \cdot \text{S}/(\text{K} \cdot \text{m})$, $C_2=55.682 \text{ W} \cdot \text{S}/(\text{K} \cdot \text{m})$, $R_2=0.653 \text{ K} \cdot \text{m/W}$, $L_1=32.760 \text{ K} \cdot \text{m/W}$ 。③过渡参数 C_3 、 C_4 与 R_5 。如图10所示,“工况2-工况1”对应为边界环温2变化的影响,上述参数采用3.1节所述方法求解,结果为: $C_3=46.347 \text{ W} \cdot \text{S}/(\text{K} \cdot \text{m})$, $C_4=181.458 \text{ W} \cdot \text{S}/(\text{K} \cdot \text{m})$, $R_5=0.0126 \text{ K} \cdot \text{m/W}$ 。

3.3 优化模型的验证

为验证模型的有效性,进行了新工况的计算,并与有限元计算相比较。其中环境温度模拟一天内气温的变化,边界1为空气环温,变化范围为15~35 K;边界2、3、4为土壤温度,基本保持不变。工况选择为:0~6 h,750 A,边界1环温15℃;6~12 h,1250 A,边界1环温35℃;12~18 h,500 A,边界1环温25℃;18~24 h,300 A,边界1环温10℃;整体过程中边界2、3、4环温为10℃。比较结果见图11。该模拟计算已考虑了温度对损耗的影响。

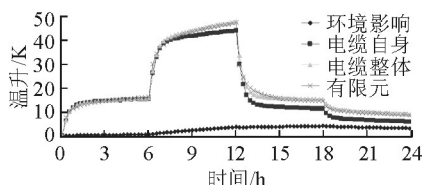


图11 集总参数模型与有限元方法的计算结果比较

Fig. 11 Comparison of calculation results by the lumped parameter model and FEM

由图11的比较可见,图9所示集总参数模型可以很好的模拟环境温度变化条件下的电缆暂态温升过程。

4 结论

文中主要围绕土壤直埋单芯电缆暂态温升快速计算模型展开研究,主要得到以下结论:

1)平衡热阻和平衡热感可用于模拟热扩散的时间特性,以克服散热动态特征的傅里叶数和毕渥数不能满足集总参数的问题。

2)文中所述方法与有限元方法、通用软件 Cymcap 计算结果具有很好的可比性,说明集总参数模型可以很好的模拟电缆暂态温升过程。

3)将电缆自身发热与环境温度的影响分别建立模型,使得快速算法很好的适应环境温度的变化,也为多回电缆暂态温升的快速计算创造了条件。

参考文献:

- [1] 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 Industry Press,2012.
- [2] 黄雄峰,徐彬昭,张宇娇,等. 基于参数拟合技术直埋电缆的缆芯暂态温度计算[J]. 中国电力,2016,49(10):60-66.
HUANG Xiong feng, XU Binshao, ZHANG Yujiao, et al. Transient temperature calculation of buried cable core based on parameter fitting of thermal circuit[J]. Electric Power, 2016,49(10):60-66.
- [3] Calculation of the current rating-current rating equations (100% load factor)and calculation of losses: IEC 60287-1—2001[S]. 2001.
- [4] Calculation of the current rating thermal resistance: IEC 60287-2—2001[S]. 2001.
- [5] Calculation of the current rating-sections on operating conditions: IEC 60287-3—1999[S]. 1999.
- [6] 电缆载流量计算:JB/T 10181—2014[S]. 2014.
Calculation of the current rating of cables:JB/T 10181—2014[S]. 2014.
- [7] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京:中国电力出版社, 2013.
MA Guodong. Electric wire and cable capacity[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [8] 罗涛. 电力电缆温度场及载流量计算方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2009.
LUO Tao. The study on the temperature field and ampacity calculation of power cables[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [9] 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.
- [10] 段佳冰,尹成群,吕安强,等. 基于 IEC60287 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, LYU Anqiang, et al. Analysis method for high voltage submarine cable based on IEC60287 and finite method[J]. High Voltage Apparatus, 2014,50(1):1-6.
- [11] 梁永春,闫彩虹. 排管敷设电缆群暂态温度场和短时载流量数值计算[J]. 高电压技术,2011,37(4):1002-1007.
LIANU Yongchun, YAN Caihong. Numerical calculation of transient temperature field and short term ampacity of group of cables in ducts[J]. High Voltage Engineering, 2011,37(4): 1002-1007.
- [12] 梁永春,李彦明. 地下电缆群温度场和载流量计算新算法[J]. 电工技术学报,2007,22(8):185-190.
LIANG Yongchun, LI Yanming. 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.
- [13] 赵建华,袁宏永. 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.
ZHAO Jianhua, YUAN Hongyong. Surface temperature field based online diagnoses study for electric cable's conductor temperature[J]. Proceedings of the CSEE,1999,19(11):52-54.
- [14] 周芸,杨奖利,路青起. 基于分布式光纤温度传感器的高压电力电缆温度在线监测系统[J]. 高压电器,2009,45(4): 74-76.
ZHOU Yun, YANG Jiangli, LU Qingqi. Online temperature monitoring system for high voltage power cable based on distributed optical fiber temperature sensors[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(4):74-76.
- [15] 雷鸣,刘刚. 采用 Laplace 方法的单芯电缆线芯温度动态计算[J]. 高电压技术,2010,36(5):1150-1154.
LEI Ming, LIU Gang. Dynamic calculation of core temperature of single core cables using Laplace method[J]. High Voltage Engineering,2010,36(5):1150-1154.
- [16] 雷成华,刘刚. BP 神经网络模型用于单芯电缆导体温度的动态计算[J]. 高电压技术,2011,37(1):184-189.
LEI Chenghua, LIU Gang. Dynamic calculation of conductor temperature of single-core cable using BP neural network[J]. High Voltage Engineering,2011,37(1):184-189.
- [17] 刘刚,雷成华. 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. Analysis on transient error of simplified thermal circuit model for calculating conductor temperature by cable surface temperature[J]. Power System Technology,2011,35(4):212-217.
- [18] 雷鸣. 依据电缆表皮温度准确计算单芯高压电缆线芯温度的理论及实验研究[D]. 广州:华南理工大学,2011.
LEI Ming. Theoretical and experimental study on accurate calculation of single-core high-voltage cable core temperature based on skin temperature[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [19] 杜伯学,马宗乐,霍振星,等. 电力电缆技术的发展与研究动向[J]. 高压电器,2010,46(7):100-104.
DU Boxue, MA Zongle, HUO Zhenxing, et al. Recent research status of techniques for power cables[J]. High Voltage Appa-

(下转第 169 页)

- desert environmental conditions on the flashover voltage of insulators[J]. *Energy Conversion and Management*, 2002, 43(17):2437-2442.
- [13] KARADY G. The effect of fog parameters on the testing of artificially contaminated insulators in a fog chamber[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1975, PAS-94(2):378-387.
- [14] NAITO K, KAWAGUCHI T, ITO M, et al. Influence of fog parameters on withstand voltage of contaminated insulators[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1982, PAS-102(3):729-736.
- [15] ISHII M, AKBAR M, KAWAMURA T. Effect of ambient temperature on the performance of contamination DC insulators[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1984, EI-19(2):129-134.
- [16] 郑晓静, 黄宁, 周又和. 风沙运动的沙粒带电机制及其影响的研究进展[J]. *力学进展*, 2004, 34(1):77-86.
ZHENG Xiaojing, HUANG Ning, ZOU Youhe. The effects on the sand charged mechanism of sand movement[J]. *Mechanical Progress*, 2001, 34(1):77-86.
- [17] 屈建军, 言穆弘, 董光荣. 沙尘暴起电的风洞模拟实验研究[J]. *中国科学*, 2003, 33(6):593-601.
QU Jianjun, YAN Muhong, DONG Guangrong. Research on the wind tunnel experiment of sandstorm electrification[J]. *Chinese Science*, 2003, 33(6):593-601.
- [18] 李芳, 屈建军. 风沙电研究的现状及展望[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(4):572-575.
LI Fang, QU Jianjun. The status quo and the prospect of the electrification of wind-blown sands[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 17(4):572-575.
- [19] 屈建军, 俎瑞平. 扬沙和沙尘暴对导线电位影响的风洞模拟实验[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(5):534-538.
QU Jianjun, ZU Ruiping. The tunnel simulation experiment of blowing sand and sandstorms' impact on wire potential[J]. *Chinese Desert*, 2004, 24(5):534-538.
- [20] 吴亮. 沙尘环境下空气间隙和平板模型沿面放电特性的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
WU Liang. Study on model discharge characteristics of flat and air gap under sand dust environment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [21] 胡文文. 风沙流中沙粒带电机理及荷质比研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
HU Wenwen. A study on charging mechanism of sand grains and charge-to-mass ratio in wind-blown saltation[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [22] 贺博, 张刚, 陈邦发, 等. 沙尘环境对板—板电极气隙放电特性影响的模拟试验研究[J]. *中国科学*, 2010, 40(3):296-302.
HE Bo, ZHANG Gang, CHEN Bangfa, et al. Research on the influence of airgap discharge characteristics on plane-plane electrode[J]. *Chinese Science*, 2010, 40(3):296-302.
- [23] 姚刚, 文习山, 蓝磊. 湿润污秽绝缘表面电场及针板电极下的沿面放电[J]. *高电压技术*, 2010, 36(6):1407-1414.
YAO Gang, WEN Xishan, LAN Lei. Electric field of wet contamination on dielectric surface and creeping discharge in needle-board electrodes[J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(6):1407-1414.

曹桂(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事过电压与绝缘配合方面的研究。

曹保江(1970—), 男, 硕士, 副教授, 硕导, 主要从事高电压与绝缘技术及电气化铁路方面的教学和研究。

吴广宁(1969—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事高电压与绝缘技术及电气化铁路方面的教学和研究。

(上接第163页)

- ratus, 2010, 46(7):100-104.
- [20] 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.
- [21] 刘刚, 雷成华. 提高单芯电缆短时负荷电流的试验分析[J]. *高电压技术*, 2011, 37(5):1288-1293.
LIU Gang, LEI Chenghua. Experimental analysis on increasing temporary ampacity of single-core cable[J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(5):1288-1293.
- [22] DIAZ A M, DE L 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(12):21-30.
- [23] MALMEDAL K, BATES C, CAIN D. On the use of the law of times in calculating soil thermal stability and underground cable ampacity[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, 52(2):1215-1220.
- [24] MAXIMOV S, VENEGAS V, GUARDADO J L, et al. Analysis of underground cable ampacity considering non-uniform soil temperature distributions[J]. *Electric Power Systems Research*, 2016, 132(11):22-29.

傅晨钊(1975—), 男, 工学博士, 高工, 主要从事电力设备运行技术研究。