

文章编号:1000-582X(2010)05-072-06

# 基于有限元法的 XLPE 电缆载流量计算及其影响因素分析

王有元,陈仁刚,陈伟根,杜林,袁园

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

**摘要:**根据传热学和有限元基本原理,利用土壤区域划分法,建立了一种基于有限元法的 XLPE 电缆载流量计算模型,能够按照土壤热阻系数的不同对 XLPE 电缆周围土壤区域进行划分。根据 XLPE 电缆的结构参数和周围敷设区域的物性参数分析了 XLPE 电缆内部各层的温度分布情况,并提出了一种基于二分法来计算电缆载流量的方法。对比分析结果表明,相对于 IEC60287 中的热路法,该模型不仅计算结果准确,而且能更方便地考虑外界环境因素对电缆载流量的影响。通过实例仿真得出了不同影响因素对电缆载流量的影响规律,为优化电缆敷设方式提供了重要的理论依据。

**关键词:**XLPE 电缆;有限元法;载流量;二分法;影响因素

**中图分类号:** TM247

**文献标志码:** A

## Calculation of the ampacity of XLPE power cable based on FEM and analysis of the influential factors

WANG You-yuan, CHEN Ren-gang, CHEN Wei-gen, DU Lin, YUAN Yuan

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Based on the principle of heat transfer theory and finite element method (FEM), a model for power cable thermal field and ampacity computation has been developed by adopting the soil region division method. The soil region around the cable is divided according to the difference of the soil thermal resistance. Based on the structural parameters of XLPE cable and the physical parameter of the laying area, different layers temperature distribution of XLPE cable is analyzed through the model, and the dichotomy is employed to calculate the cable ampacity. Comparing the calculated result by this method with the calculation by the standard, shows that compared to IEC60287 standard, the model has high-accuracy and is more convenient to the external environment. Through simulation example, the corresponding relationship between the influencing factors and the cable ampacity is obtained, which provides important theoretical basis for the optimization of the cable laying.

**Key words:** XLPE cable; finite element method; ampacity; dichotomy; influencing factors

地下电缆与架空线路相比,具有运行可靠、受外界影响小、不需架设电杆、不占地面、不影响市容等

优点。因此,随着城网和农网改造的逐步实施,交联聚乙烯电力电缆(XLPE)在电力系统中的应用越来越

**收稿日期:**2010-01-15

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB724506);重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2008BA3026)

**作者简介:**王有元(1971-),男,重庆大学副教授,主要从事高压电气设备在线监测与故障故障诊断的研究,(Tel)023-65111795-8222,(E-mail)y. wang@cqu. edu. cn。

越广泛<sup>[1-3]</sup>。

目前,国内外对电缆载流量的分析计算主要有 2 种方法。一种是热路分析法,它以敷设区域的地理位置、气象条件为基准确定的,当实际铺设电缆的环境状况不同于基准参数值时,需要通过大量试验来确定相应的校正系数,不利于工程实际应用<sup>[4]</sup>。另外一种数值算法,它是在给定电缆敷设、排列条件和负荷条件下用温度场分布来分析电缆周围的温度分布情况,是研究电缆传热问题的理想而有效的手段。目前常用的数值计算方法有边界元法,有限差分法,有限容积法以及有限元法等<sup>[5-12]</sup>。对于敷设环境和边界条件较为复杂的 XLPE 电缆,前 3 种方法在区域剖分上不易实现。文献<sup>[7-10]</sup>中采用了有限元法对电缆温度场及载流量进行了分析,该方法由于能任意布置结点和网格,可以方便地处理较为复杂的电缆敷设环境和边界条件。因此,它非常适合于对 XLPE 电缆载流量进行计算分析。

笔者根据传热学的基本原理,采用有限单元自动划分法,通过对因电缆过热而导致局部干燥,热阻系数不均的土壤区域采用区域划分方法进行处理,并根据外界环境和电缆敷设条件的变化,对不同敷设方式及敷设条件下的模型参数进行实时修改,建立了一种新的基于有限元法的 XLPE 电缆载流量计算模型,并通过与 IEC60287 计算结果的对比分析验证了该模型的有效性。

## 2 基于有限元法的电缆载流量计算模型

### 2.1 建立模型的基本假设

- 1) 稳态假设:当电缆发热与散热达到平衡时,电缆温度场分布不随时间改变;
- 2) 常物性假设:电缆各组成材料均为各向同性均匀介质,且各部分物性参数均为常数;
- 3) 电缆轴向方向上无温度梯度,只在径向上存在热量的传递;
- 4) 忽略电缆各组成部分间的接触电阻。

### 2.2 边界条件的确定

采用有限元法建立电缆载流量计算模型,需确定场域的边界条件。传热学中的边界条件有 3 类:第 1 类边界条件为已知边界温度;第 2 类边界条件为已知边界法向热流密度;第 3 类边界条件为对流边界条件,即已知对流换热系数和流体温度。对应的控制方程如式(1)-(3)<sup>[13]</sup>。

$$\theta(x, y) | \tau = f(x, y) | \tau, \quad (1)$$

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} | \tau + q_2 = 0, \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} | \tau = \alpha(\theta - \theta_f) | \tau. \quad (3)$$

对于直埋方式的 XLPE 电缆,其敷设情况如图 1 所示。图中,  $d_1$  为电缆的直径,  $d_2$  为电缆或热源表面到分析边界的距离。一般情况下,电缆水平方向温度梯度为 0,因此,左右边界属于第 2 类边界条件。上边界为地表,其中空气温度可通过测量获得。

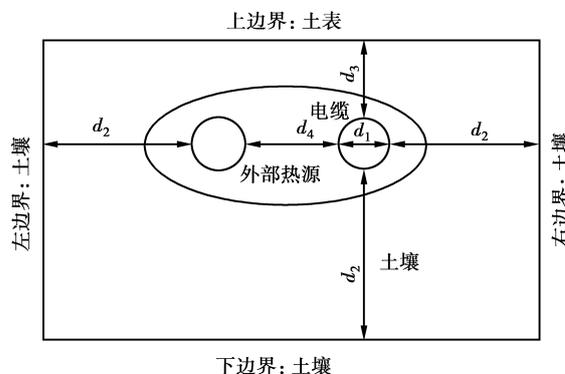


图 1 XLPE 电缆直埋敷设模型

因此,上边界属于第 3 类边界条件。下边界为土壤边界,假设与电缆或热源表面距离为  $d_2$  时,其温度与深层土壤温度一致,此时,下边界属于第 1 类边界条件。距离  $d_2$  可根据传热学中有关不同介质间温度降的计算公式加以确定<sup>[14]</sup>,其计算公式为

$$d_2 = d_1 e^{2\pi R}, \quad (4)$$

$$R = \frac{\Delta T}{Q}, \quad (5)$$

式中:  $Q$  为热流;  $R$  为热阻;  $\Delta T$  为不同介质间的温度降。

### 2.3 有限单元网格划分

在保证计算精度的前提下,为了节省计算时间,网格划分上,采用三角形单元划分法,对于形状复杂和温度变化剧烈的地方,例如电缆和土壤之间的边界区域以及电缆内部层与层之间的边界区域,网格划分得较为密集,而对于周围的敷设区域以及电缆内部各层区域划分的网格相对稀疏,符合有限元法网格划分的基本原则。

### 2.4 损耗计算

电缆区域的热源包括导体损耗,绝缘层介质损耗,以及金属套和屏蔽损耗等,这些参数可按照 IEC60287 标准进行计算<sup>[15-17]</sup>。

导体损耗为

$$W_c = I^2 R, \quad (6)$$

式中:  $I$  为电缆额定载流量;  $R$  为导体交流电阻。  $R$  受集肤效应和邻近效应的影响,其计算公式为

$$R = R_0(1 + Y_S + Y_P), \quad (7)$$

式中:  $Y_S, Y_P$  分别为集肤效应因数和邻近效应因数; 其具体计算可参照文献[15-17]。

单位长度绝缘损耗按下式计算

$$W_d = \omega \times c \times U_0^2 \times \tan\delta, \quad (8)$$

式中:  $\omega = 2\pi f$ ;  $U_0$  为对地电压;  $\tan\delta$  为绝缘损耗因数;  $c$  为单位长度电缆电容。

金属套或屏蔽损耗  $\lambda_1$  按式(9)计算

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1'', \quad (9)$$

式中:  $\lambda_1', \lambda_1''$  分别为环流损耗和涡流损耗, 两者都是以与导体总功率损耗之比表示<sup>[15-17]</sup>。

## 2.5 载流量计算

电缆载流量是由电缆导体温度确定的, 准确计算电缆导体温度具有重要意义。为求得电缆导体温度值, 需要给出一个初始值, 考虑到二分法在满足一定精度的基础上具有计算简单、快速的优点。笔者采用二分法求解电缆导体温度值, 进而求得载流量。

设电缆导体温度与通过其电流的关系为  $\theta = f(I)$ , 通过额定电流时的电缆导体温度为  $\theta_0$ , 则其求解步骤为:

1) 确定一个电流区间  $[I_1, I_2]$ , 验证  $[f(I_1) - \theta_0] \times [f(I_2) - \theta_0] < 0$ , 并给定精确度  $\epsilon$ 。

2) 计算  $f(\frac{I_1 + I_2}{2}) - \theta_0$  的值, 若  $|f(\frac{I_1 + I_2}{2}) - \theta_0| < \epsilon$ , 则  $\frac{I_1 + I_2}{2}$  即为所求载流量, 否则转入步骤 3)。

3) 当  $[f(\frac{I_1 + I_2}{2}) - \theta_0][f(I_1) - \theta_0] < 0$  时, 取  $I_3 = I_1, I_4 = \frac{I_1 + I_2}{2}$ ; 当  $[f(\frac{I_1 + I_2}{2}) - \theta_0][f(I_1) - \theta_0] > 0$  时, 取  $I_3 = \frac{I_1 + I_2}{2}, I_4 = I_2$ ; 此时, 计算  $f(\frac{I_3 + I_4}{2}) - \theta_0$  的值, 并检验是否满足精度要求, 若满足, 则取  $\frac{I_3 + I_4}{2}$  为所求载流量, 否则, 转入步骤 4)。

4) 按照步骤 3) 的方法不断对电缆导体温度进行迭代计算, 直到出现  $|f(\frac{I_k + I_{k+1}}{2}) - \theta_0| < \epsilon$  为止, 并取此时的  $\frac{I_k + I_{k+1}}{2}$  为所求载流量。

## 3 实例分析及模型验证

### 3.1 模型的建立

以型号为 8.7/15kV YJV1×400 的 XLPE 电缆为例, 计算电缆及其周围敷设区域的温度场分布。

电缆的结构参数如表 1 所示, 具体敷设参数如表 2 所示。

表 1 8.7/15kV YJV1×400 XLPE 电缆结构参数

mm	
物理量	参数值
导体直径	23.8
绝缘厚度	5.9
屏蔽层厚度	0.3
外护层厚度	2.3
电缆外径	41.0

表 2 8.7/15kV YJV1×400 XLPE 电缆敷设参数

敷设条件	参数值
埋深/m	0.7
土壤热阻系数/(K·m·W <sup>-1</sup> )	1.0
空气温度/K	313
对流换热系数/(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	12.5
深层土壤温度/K	298

对于表 2 所示直埋方式电缆的敷设情况, 根据式(4)和式(5)可知, 当土壤外径  $r_2 = 1.2$  m 且电缆外表面温度为 363K(通常情况下小于此值)时土壤温度为 298K, 与深层土壤温度基本相等, 此时电缆不会对土壤温度产生影响, 即满足边界温度已知的条件, 因此, 其下边界属于第 1 类边界条件; 左右边界水平方向温度梯度为 0, 属于第 2 类边界条件; 而上边界空气温度已知, 为 313K, 属于第 3 类边界条件。

采用三角形网格划分后的电缆区域几何模型如图 2 所示。

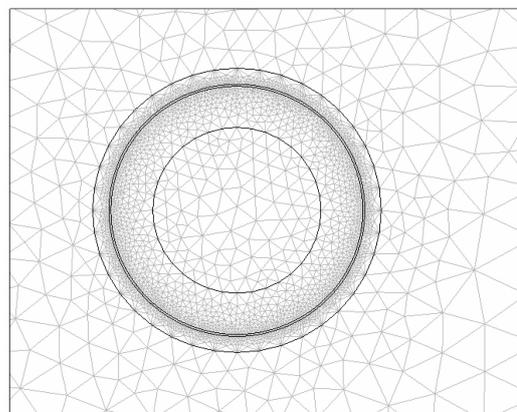


图 2 网格划分后电缆区域模型

### 3.2 电缆区域温度场分布情况

为了得到电缆在其额定载流量下的温度场分布情况, 首先需要得到电缆载流量, 因为 XLPE 电缆导体工作温度高达 363K, 如果运行时电缆表面温度超

过 323 K, 电缆周围邻接土壤因水分迁移将变得干枯且形成以电缆外径为中心的土壤干燥环(土壤热阻系数变大)<sup>[18]</sup>, 因此, 按照热阻系数的不同, 需要将电缆周围区域的土壤划分为 2 类, 在该模型中位于椭圆区域内的土壤温度大于 323 K, 其热阻系数随水分迁移而降低, 设为  $2.0(\text{K} \cdot \text{m})/\text{W}$ , 其他区域设为  $1.0(\text{K} \cdot \text{m})/\text{W}$ 。

按照 2.5 中的计算方法, 在 3.1 中的条件下, 所得的载流量为 580.1 A。将表 1 中电缆的相关参数带入式(6)-(9)可得出电缆的损耗参数, 将其代入由 COMSOL Multiphysics 软件所建的模型并求解, 得到电缆区域温度场的分布情况如图 3 所示。图 3 从整体上显示了整个电缆区域的温度场分布情况, 由图可知, 电缆区域温度场受模型中土壤温度影响随着敷设距离的增加而逐渐减小, 到达边界时基本可以忽略。

沿着图 3 中从电缆模型左边界到右边界的横向直线, 得其温度分布曲线如图 4 所示。

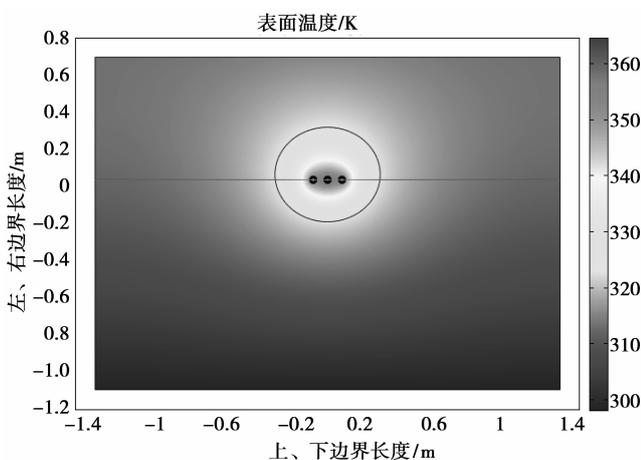


图 3 电缆区域温度场分布情况

从图 4 描述的温度曲线中可以看出, 中间电缆的导体温度比两侧电缆导体温度高 6.0 K, 两侧的电缆导体温度相对于中间电缆成对称分布。在电缆内部温度变化较快, 但这种变化趋势随着与电缆距离的增大而逐渐放缓, 最后趋于平稳, 在距电缆 1.2 m 处, 温度也基本稳定, 符合模型的假设。

### 3.3 对比分析

仍以型号为 8.7/15kV YJV1×400 的 XLPE 电缆为例, 应用本模型计算出的电缆载流量与基于 IEC60287 标准计算所得的载流量进行比较, 以验证笔者模型的正确性和有效性。

上述电缆情况下, 利用 IEC60287 中土壤发生局部干燥场合下直埋交流电缆载流量计算公式, 可得

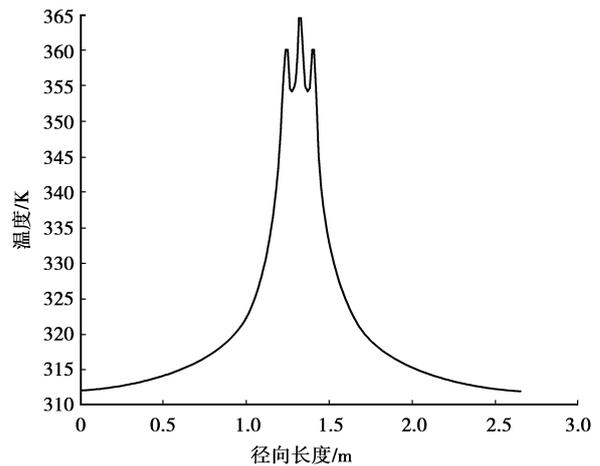


图 4 电缆模型左边界-右边界温度分布曲线

其载流量为 592.0 A, 若以此为基准, 则本模型求得的载流量误差为 2.01%, 由此可见, 所建的计算模型是正确有效的, 满足工程实际的需求。

## 4 载流量影响因素分析

影响 XLPE 电缆载流量的因素较多, 例如敷设条件以及外界环境条件等, 每种因素的变化都会使电缆载流量按照一定规律变化, 因此, 分析这些影响因素的变化并找出与之相应的载流量变化规律对于准确计算地下 XLPE 电缆载流量、充分利用电缆资源、优化电缆敷设方式等具有重要的实际意义。

下面仍以型号为 8.7/15kV YJV1×400 的单回路 XLPE 电缆为例, 在改变不同影响因素的条件下, 对电缆载流量进行计算, 并总结各个因素对载流量的影响规律。

### 4.1 土壤热阻系数的影响

土壤热阻系数直接影响埋地电缆散热, 是影响直埋电缆载流量的主要因素之一。当电缆周围土壤温度较高时, 其周围水分大部分发生迁移, 热阻系数急剧升高, 电缆向外散热的能力也变差, 从而使电缆导体温度降低, 载流量随之减小。图 5 为电缆敷设在不同导热系数的土壤中电缆载流量的分布曲线, 从图中可以看出, 随着土壤热阻系数的增大, 电缆载流量随之减小, 且减小的幅度随热阻系数的增大而减小。

### 4.2 环境温度的影响

环境温度主要是指电缆敷设场所周围介质的温度, 它是影响电缆载流量的一个重要因素。对于地下电缆来说, 环境温度的影响主要考虑的是空气温度的影响。空气温度越高, 土壤与空气的对流换热能力越差, 其散热能力越差, 电缆导体温度也随之升高, 反之降低。

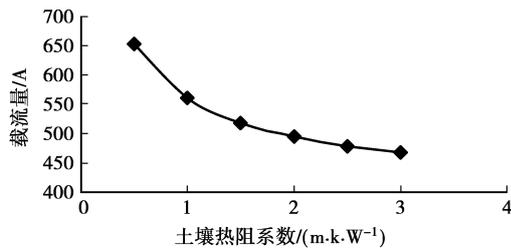


图 5 土壤热阻系数对电缆载流量的影响

图 6 为电缆载流量与空气温度间的关系曲线。图中所示的电缆载流量是在除空气温度外其他敷设条件完全相同的情况下求得的,由图可知,随着空气温度的升高,电缆载流量与空气温度呈近似线性规律变化,空气温度每升高 1 K,则载流量大约降低 4 A。

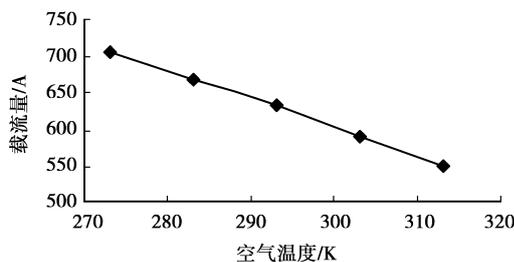


图 6 空气温度对电缆载流量的影响

#### 4.3 土壤温度的影响

电缆深层土壤温度越高,则散热能力越弱,从而导致电缆导体温度越高,载流量随之减小。

图 7 为不同土壤温度对电缆载流量的影响,从图中可以看出:当其他条件相同的情况下,电缆载流量随土壤温度呈近似线性规律变化,土壤温度每升高 1 K,电缆载流量相应减小 3.2 A。

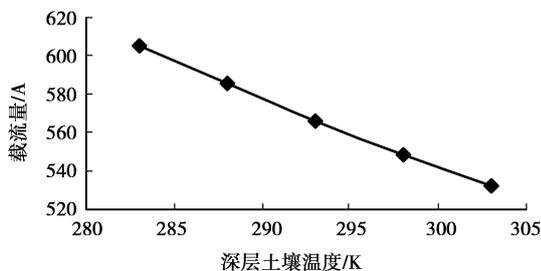


图 7 深层土壤温度对电缆载流量的影响

#### 4.4 相邻电缆间距的影响

电缆布置的间距是影响载流量的另一个重要因素。当电缆间距增加时,有利于电缆的散热,因此电缆导体温度会降低,从而使载流量增大。

图 8 显示了相邻电缆间距与载流量之间的关系。从图中可以看出,在其他条件相同的情况下,电

缆载流量随着缆间距离的增大而减小,且减小的幅度随着间距的增大而减小,当间距在 0.1~0.2 m 之间时,相邻电缆间距每增加 0.01 m,则载流量大约增加 4.5 A;在 0.2~0.4 m 之间时,间距每增加 0.01 m,载流量相应增加 2.6 A;当间距大于 0.4 m 后,随着电缆间距的增大,载流量所受的影响逐渐减弱。

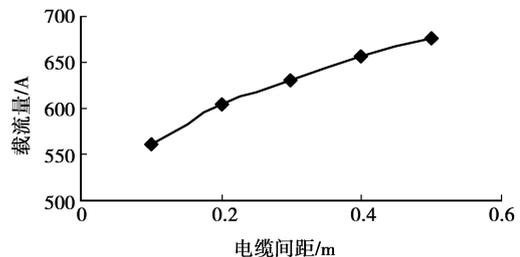


图 8 电缆间距对电缆载流量的影响

#### 4.5 外部热源的影响

外部热源(如热水管道或蒸汽管道等)对电缆载流量有重要影响。当电缆敷设区域周围存在其他热源时,一方面会使其周围敷设区域内土壤热阻系数增大,另一方面热源自身散发的热量会对电缆本身的温度场产生影响,使其散热性变差,从而使电缆导体温度升高,载流量减小。

图 9 显示了当电缆周围敷设一热源时,其他条件均与敷设热源前相同情况下,载流量大小随距热源距离的变化规律。通过图中曲线可以看出,当其他条件相同时,电缆载流量随着与热源距离的增大而增大,且这种增大的趋势随距离的增大而减弱。

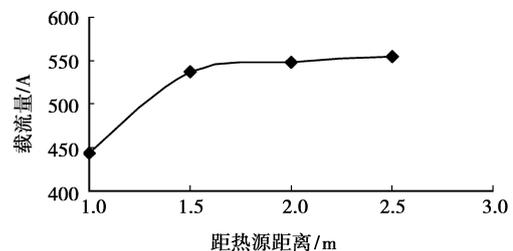


图 9 外部热源对电缆载流量的影响

## 5 结 论

1)根据传热学的基本原理,建立了基于有限元法的地下直埋 XLPE 电缆载流量计算模型,并给出了相关边界条件确定方法。该模型能够根据土壤热阻系数的不同对电缆区域进行划分,并针对不同敷设条件以及不同结构参数的 XLPE 电缆,对其温度场和载流量进行仿真分析。

2)以 8.7/15kV YJV1×400 XLPE 电缆为例,

分析了当电缆区域土壤热阻系数不同时电缆各层和周围区域的温度场分布状况。利用二分法快速计算出电缆载流量,通过与IEC60287标准计算值进行对比分析,验证了该模型对复杂敷设条件下电缆温度场及载流量的分析能力。

3)通过实例仿真,分析了土壤热阻系数、环境温度、土壤温度、相邻电缆间距、外部热源与电缆载流量的关系,得到了各因素对载流量的影响规律,对优化电缆敷设具有一定的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] DOWNES J, LEUNG H Y. Distributed temperature sensing worldwide power circuit monitoring application [C]// 2004 International Conference on Power System Technology, November 21-24, 2004, Singapore. Singapore [s. n.], 2004:1804-1809.
- [2] 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.  
ZHAO JIAN-HUA, YUAN HONG-YONG, FAN WEI-CHENG, et al. Surface temperature field based online diagnoses study for power cable's conductor temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(11): 52-54.
- [3] 刘英, 曹晓珑. 电力电缆在线测温及载流量监测的研究进展与应用[J]. 输配电技术, 2007, 23(4): 11-14.  
LIU YING, CAO XIAOLONG. Research and application of online temperature and load monitoring for power cables[J]. Transmission and Distribution Technology, 2007, 23(4): 11-14.
- [4] LI H J. Estimation of thermal parameters and prediction of temperature rise in crane power cables [M]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(3): 335-360.
- [5] ANDERS G J. Ration of electric power cables, ampacity computation for transmission, distribution, and industrial application[M]. [S. l.]: IEEE Press, 1997.
- [6] 范春利, 孙丰瑞, 杨立, 等. 电线电缆破损的定量热像检测与诊断方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 162-166.  
FAN CHUN-LI, SUN FFEN-GRUI, YANG LI, et al. Study on quantitative methods of inspection and breakage diagnoses of high voltage line and cable by thermography[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 162-166.
- [7] 梁永春, 李彦明, 柴进爱, 等. 地下电缆群稳态温度场和载流量计算新方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 185-189.  
LIANG YONG-CHUN, LI YAN-MING, CHAI JIN-AI, et al. 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): 185-189.
- [8] 梁永春, 柴进爱, 李彦明, 等. 基于FEM的直埋电缆载流量与外部环境关系的计算[J]. 电工电能新技术, 2007, 26(4):10-13.  
LIANG YONG-CHUN, CHAI JIN-AI, LI YAN-MING, et al. Calculation of ampacity reduction factors for buried cables with surroundings based on FEM[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2007, 26(4): 10-13.
- [9] 孟凡凤, 李香龙, 徐燕飞, 等. 地下直埋电缆温度场和载流量的数值计算[J]. 绝缘材料, 2006, 39(4): 59-61.  
MENG FAN-FENG, LI XIANG-LONG, XU YAN-FEI, et al. Numerical computation of temperature field and ampacity of underground cables [J]. Insulating Materials, 2006, 39(4): 59-61.
- [10] 孟凡凤, 张兵, 方晓明, 等. 影响直埋电缆载流量的因素的研究[J]. 绝缘材料, 2007, 40(3):64-66.  
MENG FAN-FENG, ZHANG BIN, FANG XIAO-MING, et al. Study of ampacity reduction factors for buried cables[J]. Insulating Materials, 2007, 40(3): 64-66.
- [11] 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.
- [12] MIYAGI D, WAKATSUKI T, TAKAHASHI N. 3-D finite element analysis of current distribution in hts power cable taking account of E-J power law characteristic [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 908-1001.
- [13] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [14] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [15] IHS. IEC 60287-1 Calculation of the current rating-part 1: current rating equations (100% load factor) and calculation of losses[S]. [S. l.]: HIS, 2001.
- [16] IHS. IEC 60287-2 Calculation of the current rating-part 2: thermal resistance[S]. [S. l.]: HIS, 2001.
- [17] HIS. IEC 60287-3 Calculation of the Current Rating-Part 3: Sections on Operating Conditions [S]. [S. l.]: HIS, 1999.
- [18] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

(编辑 王维朗)