

10 kV城网电缆沟敷设方式与载流量数值计算

电缆广泛应用于现代城市配电网中,其运行可靠性与电缆的载流量与温升关系密切,精确计算电缆的载流量和温度场分布对于电网的可靠、经济运行具有重要意义。本文结合电缆的损耗对电缆沟的生热、散热过程进行了分析。采用COMSOL有限元多物理场分析软件,模拟了8.7/15 kV YJV 1×400的XLPE三回路电力电缆沟正常敷设与不规则敷设情况下的载流量与温度场分布。数据证明,电缆敷设的位置与密集程度影响着电缆的载流量,密集程度越高,载流量越低。因此,电缆集群不宜集中敷设于底部,按照规程要求分层敷设电缆束才能降低电缆的工作温度及延长寿命。

胡国辉¹ 赵轶¹ 焦阳² 邵建祥² 熊兰² 杨子康² / 1. 重庆市计量质量检测研究院
2. 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

0 引言

电缆的载流量是评估电力电缆工作负荷与温升的重要参量。电缆载流量的定义为一条电缆在运行中输送的电流值,且该电流值满足:电缆达到热稳态,缆芯温度达到该电缆规定的长期允许工作最大温度值。因此,在工程中使用电缆时,除了考虑电缆的成本、机械特性,亦需分析电缆与工作环境的温度场分布,保证电缆在最大负荷下不超过电缆长期工作容许温度。过大的载流量易造成电缆温度长时间超出允许温度值,导致电缆绝缘较快老化、损坏,威胁电网安全^[1]。

电缆温度分布和载流量的分析方法主要有2种:一种是根据IEC-60287标

准提供的解析法^[2],这种方法主要对运行环境较为单一的直埋电缆载流量具有较准确的结果。IEC标准对直埋电缆载流量和温度分布计算做了许多理想的假设,如地表视为恒温边界,视电缆结构中每一层为恒温的,然而实际运行电缆状态很少满足该假设,故IEC标准计算方法较为保守。另一种方法是数值分析法,主要包括边界元法、有限差分法、有限容积法^[3]以及有限元法等。相比解析法,数值算法具有运算适应性强、模拟工程实际能力强、多物理场耦合分析等优点。因此,近年来数值算法成为了研究电缆热问题的有效手段。

文献[4-10]利用数值方法通过对不同敷设环境设定不同边界条件和改变电缆结构参数等方法,对规则的电缆稳态温度场进行分析。然而,在运行的城网电缆沟中,电缆未置于角钢支架上,电缆全部、部分凌乱敷设于电缆沟底部的情况在电网中十分普遍,其温度场分布及载流量大小的研究却鲜有触及。

本文根据传热学、流体力学原理,建立了考虑空气流体的电缆沟温度场计算模型,采用有限元计算方法对多种敷设方式的集群电缆温度场进行了分析,着重研究了三回电缆整体敷设于电缆沟底部,不同层电缆分别敷设于电缆沟底部的不规则敷设方式,同时利用割线法计算了相应电缆载流量值,分析了载流量与敷设方式的关系,对电缆长期安全耐久运行、电缆敷设工程实际具有指导意义。



胡国辉/教授级高工

关键词/Keywords

XLPE ·
电缆 ·
载流量 ·
温度场 ·
有限元法 ·
COMSOL软件 ·

重庆市电器检测工程技术研究中心 (cstc2011pt-gc70009) 国家自然科学基金资助项目。

1 计算模型与计算原理

由于电缆的长度相对其截面积可认为无限长,采用二维电缆沟横截面模型足够反映电缆沟内温度分布,因此建立二维模型分析计算,模型如下图1所示。

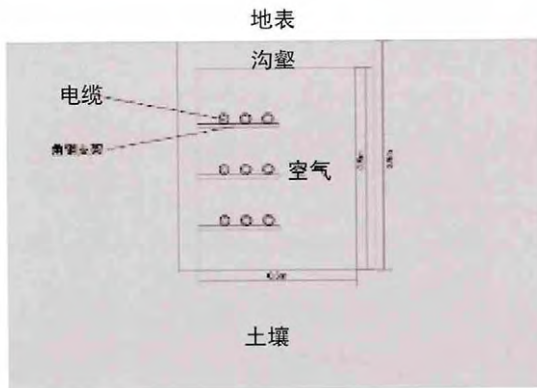


图1 三回路电缆沟二维几何模型

图1电缆沟各部分尺寸:电缆沟截面积为 $0.6\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ (不包括电缆沟壁),电缆沟壁尺寸分别为 0.075 m (左右)、 0.1 m (上部),土壤尺寸为 $3.15\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ 。支架厚度为 4 mm ,支架间距为 0.2 m 。

本文的研究做以下假设:研究电缆沟的稳态温度场,因此控制方程不包含时间项;电缆各层、电缆沟环境的材料属性为各向同性均匀介质,且材料的物理特性参数恒为常数;每相电缆流过的电流相同,即忽略电缆的相间不平衡运行状态。

1.1 温度场控制方程

电缆沟的稳态温度场属于二维稳态传热问题,控制方程包括两个部分:

①包含热源的区域(包括电缆线芯、绝缘介质层、屏蔽层)的热传递微分方程为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{qv}{\lambda} = 0 \quad (1)$$

式中, T 为求解域内点 (x,y) 处的温度, $^{\circ}\text{C}$
 qv 为单位体积发热率, W/m^3
 λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

②不包含热源的区域(包括电缆其他层结构、土壤、电缆沟壁等)的热传递微分方程为

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

整个求解域为一个半无限大开区域。由于有限元法对开区域不易求解,故需将其转换为等价的易于计算的闭区域。由热传递经验可知,整个区域中明显的温度变化仅出现在电缆周围,对于距离电缆较远的土壤部分,几乎不存在温度梯度。对于直埋电缆,通常认为电缆产热对电缆 2 m 外的土壤温度没有贡献。而对于电缆沟敷设来说,电缆沟壁外 1 m 的土壤已不受影响。因此本文矩形求解域取距离最近电缆沟壁 1.2 m 的直线,另外,由于上边界取对流边界条件因此可直接设置为电缆沟顶盖线(地表)。如图1所示。

传热问题的边界条件主要有三种。包括:①边界温度恒定的恒温条件;

②边界法向热流密度恒定的法向热流条件;

③固体与流体相交面,即已知流体温度与流体对流散热系数的对流换热条件。

$$\text{恒温条件} \begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \\ T(x,y)|_{\Gamma} = f(x,y)|_{\Gamma} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{法相热流条件} \begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} + q_2 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{对流换热条件} \begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} + \alpha(T - T_f)|_{\Gamma} \end{cases} \quad (5)$$

式中, λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

q^2 为热流密度, W/m^2

α 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$

T_f 为流体温度, $^{\circ}\text{C}$

Γ 为积分边界。

根据电缆沟实际环境,可确定电缆沟模型温度场边界条件如下:

对于图1中的电缆沟模型,在距离电缆沟 1.2 m 的边界水平方向温度无变化,因此,模型左右边界为法相热流条件;上边界为地平面,直接与空气流体接触,符合对流换热条件,其中空气温度取室温 25°C 。下边界为深层土壤边界,一般认为,深层土壤为恒定温度边界条件,符合恒温条件。

1.2 载流量计算方法

为求得电缆导体温度值,本文采用割线法求

解，割线法具有超线性收敛性，需要两个初始解才能启动。其求解公式为

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k) - f(x_{k-1})}{f'(x_k) - f'(x_{k-1})} \quad (6)$$

割线法的计算步骤如下：

①根据运行状况估计可能的电流大小，取该估计值为电流试探值 x_{k-1} ，计算得到 $f(x_{k-1})$ ，若 $f(x_{k-1})$ 符合条件，则 x_{k-1} 是电缆载流量，否则转入步骤②。

②再根据估计值选择与估计值相差不大的值为试探值二 x_k ，计算得 $f(x_k)$ ，若 $f(x_k)$ 符合条件，则 x_k 是电缆载流量，否则转入步骤③。

③根据式(6)将①②中得到的 $f(x_{k-1})$ 、 $f(x_k)$ 带入得到 x_{k+1} ，计算 $f(x_{k+1})$ ，若 $f(x_{k+1})$ 符合条件，则 x_{k+1} 是电缆载流量，否则转入步骤④。

④ $x_{k-1} = x_k$ ， $f(x_{k-1}) = f(x_k)$ ， $x_k = x_{k+1}$ ， $f(x_k) = f(x_{k+1})$ ，转入步骤③。

由于交联聚乙烯(XLPE)电缆长期允许工作温度为90℃，上述 $f(x_{k-1})$ 、 $f(x_k)$ 、 $f(x_{k+1})$ 分别为根据电流 x_{k-1} 、 x_k 、 x_{k+1} 且利用有限元计算所得电缆运行温度，算法结束的条件为温度函数 $|f(x_k) - 90| < k$ ， k 为设置的阈值，本文取为1℃。

1.3 电缆沟热过程分析

生热：整个求解区域中只有电缆产热，电缆生热来源于电缆的焦耳热、介质损耗与感生损耗。多回路单芯电缆的交流电阻、感生损耗根据IEC60287标准通过解析法计算。

散热：电缆沟热过程包含热传导、热对流、热辐射三个方面。具体而言，电缆体内部、角钢支架以及电缆沟壁与土壤部分主要通过热传导方式传递热量；电缆沟内部固体与空气之间热量传递主要依靠自然热对流和热辐射方式；电缆沟上部盖板与大地表面空气主要通过强制热对流与热辐射方式传热。

2 物性参数与环境参数

本文以型号为8.7/15kV YJV 1×400的XLPE电力电缆作为研究对象，首先分析讨论了正常敷设状况下的温度场和载流量，之后着重计算分析了两种不规则敷设条件下的温度场和载流量。电

缆结构参数与环境参数如表1、表2所示。

表1 某省级电网节点度分布数据统计结果

电缆结构	参数值/mm
电缆导体半径	11.9
绝缘层宽度	5.9
金属屏蔽层宽度	0.3
外护层宽度	2.3
电缆整体半径	42

表2 电缆群环境参数

敷设环境	参数值
土壤热阻/K·m·W-1	23.8
空气温度/K	313
深层土壤温度/K	293
沟壁导热系数/W/m·K	1.73
支架导热系数/W/m·K	44.5

3 计算结果与分析

3.1 规则敷设下的电缆沟

以3回路型号为8.7/15kV YJV 1×400的XLPE电力电缆为研究对象，通过COMSOL Multiphysics有限元多物理场分析软件进行仿真计算。为了对比一般负荷条件（电流小于载流量）与载流量负荷下电缆沟温度场差异，计算得到了分层规则敷设电缆沟流过电流为200 A时的温度场分布，如图2所示，沟内空气流场速度分布如图3所示。

从图2可以看出，电缆沟的最热部分分布在三回路电缆上，说明电缆沟热源为电缆导体及电缆损耗。电缆沟内环境温度与室温(298 K)相差不大，约为300 K，较大的空气热阻和电缆沟较密封的环境使得热量不易扩散到外界。电缆

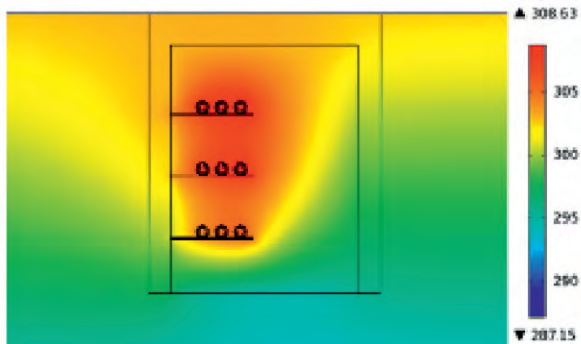
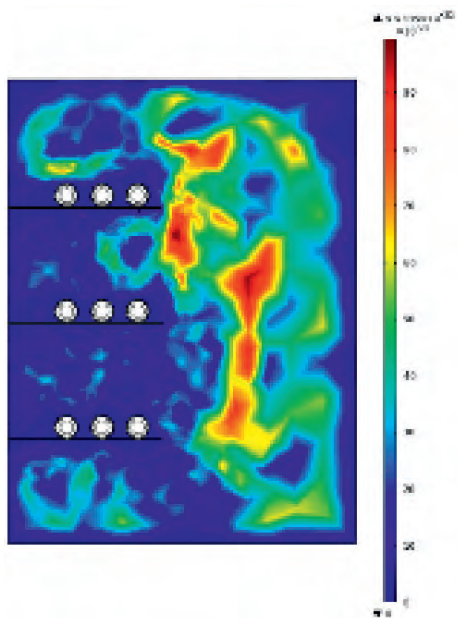


图2 流过电流为200 A时电缆群温度场分布(单位: K)

沟系统的最热点出现在中间层电缆导体处, 最高温度为308.63 K。

图3 流过电流为200 A时电缆沟内空气流场速度分布
(单位: m/s)

从图3可以看出, 电缆沟内空气的流速很慢, 为10~22数量级, 基本可认为电缆沟内空气为静止不动, 空气自然对流散热对于热量传递几乎没有贡献, 热量主要通过空气热传导方式。同时, 从结果中可见电缆沟右侧的空气流速稍稍快于电缆沟中其他位置, 原因可能为电缆沟右侧没有电缆与角钢架的阻挡, 空气受热流通较为顺畅。

经公式(6)计算得三回路电缆沟分层规则敷设时电缆载流量为481 A, 此时的电缆沟温度场分布如下图4所示, 对应的电缆沟内空气速度场分

布如图5所示。此时, 电缆线芯的温度为354 K, 为XLPE类电缆允许长期工作的温度。在该电流下的电缆沟温度场与空气速度场分布状态与前述200 A时相比, 481 A电流下电缆沟温度分布更加集中于电缆线缆处。

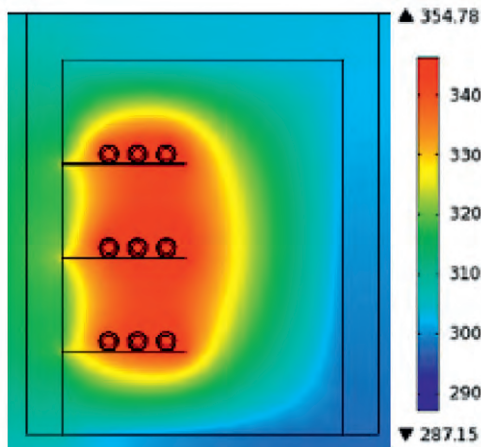
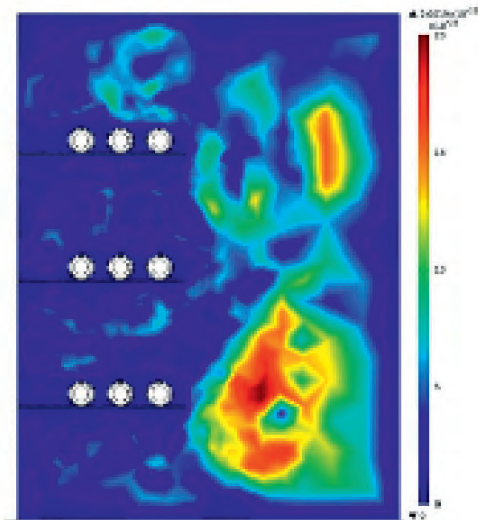


图4 载流量为481 A时电缆群温度场分布(单位: K)

图5 流过载流量481 A电流时的电缆沟空气流场速度分布
(单位: m/s)

3.2 不规则敷设下的电缆沟

然而, 在实际运行的电缆沟现场, 存在没有按照规定敷设的电缆, 如直接敷设于电缆沟底部地面情况等。敷设形式的改变将直接影响电缆沟温度场分布和电缆载流量大小。依然选取型号为8.7/15kV YJV 1×400电缆作研究对象, 仿真得到将三回路电缆全部敷设于电缆沟底部的载流量为420 A时对应的电缆沟温度场如图6所示, 电缆

沟空气场速度分布如图7所示。

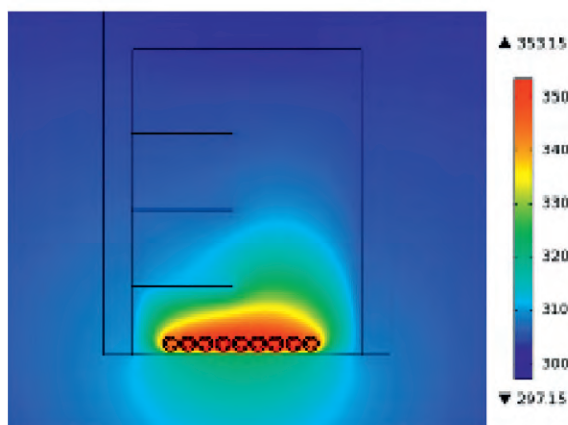


图6 载流量为420 A时电缆群温度场分布(单位: K)

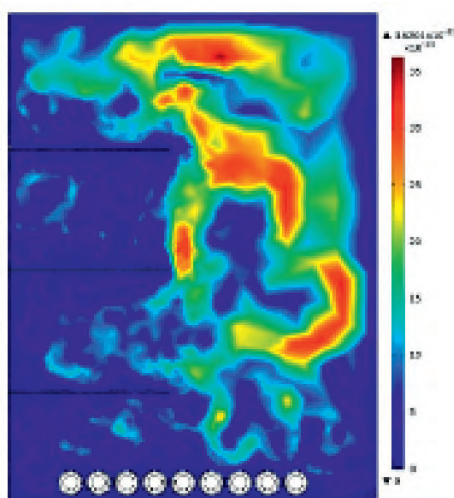


图7 载流量为420 A时电缆沟内空气场速度分布
(单位: m/s)

在其他条件不变, 仅改变电缆敷设方式为直接敷设于电缆沟底部时, 电缆的载流量显著下降至420 A, 为规则敷设的87.5%。分析原因可能在于: (1) 电缆热源集中敷设于电缆沟底部, 密集排布使电缆与空气对流换热强度降低, 不利于电缆的热量传递; (2) 电缆密集敷设使电缆相间感应作用增强, 导致电缆产热增加, 温升升高, 载流量变小。对于空气流场, 在角钢处空气流速较慢, 无角钢处空气流速相对较快, 但依旧可视为静止不动, 自然对流的散热作用很弱。

为进一步讨论电缆敷设方式对电缆沟温度场

与电缆载流量的影响, 本文考虑了分别将电缆角钢架上第一层、第二层、第三层电缆敷设于电缆沟底部的情况, 这在实际运行的电缆沟中时有出现。假设在以下三种敷设状况下电缆所处外界环境相同, 且三种情况下敷设于底部的电缆位置相同, 以比较结果差异。第一层电缆敷设于电缆沟底部温度场分布图(单位: K)如下图8所示。计算结果如下表3所示。

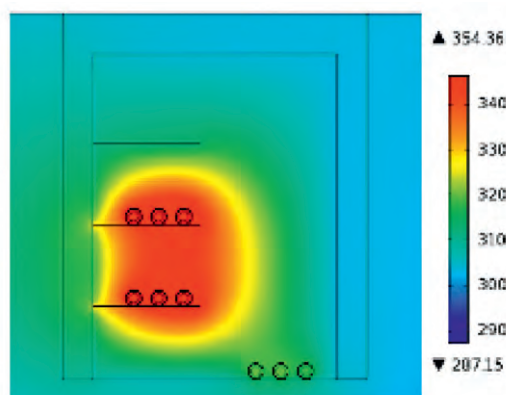


图8 第一层电缆敷设于电缆沟底部温度场分布(单位: K)

表3 敷设于电缆沟底部电缆与载流量关系表

敷设于底层的层数	载流量/A
第一层	517
第二层	542
第三层	513

从表3可以得到: 当第一、三层电缆敷设于电缆沟底部时电缆载流量相差不大, 分别为517 A、513 A。此外, 第二层电缆敷设于电缆沟底部时载流量增大为542 A, 为第一层的105%。从电缆敷设密集程度来看, 第一层、第三层在电缆沟底部的方式时电缆密集程度较高, 而第二层敷于底部的情况下电缆密集程度较低, 这是导致第二层敷于底部时载流量较大的主要原因。因此, 施工方应尽量按照规程要求敷设电缆, 并尽可能降低电缆的密集程度, 才能降低电缆的温升, 获得较长的使用寿命。

4 结束语

本文建立了三回路电缆沟二维热-流体耦合场分析模型, 仿真计算得出考虑了热传导、热对流、热辐射三种传热过程下的电缆沟温度场分布与载流量大小。另外, 着重分析了在电缆不同敷设状态下的温度场分布和载流量与电缆敷设方式的关系。得出如下结论:

(1) 电缆敷设方式较大地影响电缆的载流量。当电缆集群敷设于底部时, 电缆载流量小于分层敷设载流量, 说明按照规程分层敷设电缆才能降低电缆的工作温度及延长寿命。

(2) 电缆敷设的密集程度影响着电缆的载流量, 密集程度越高, 载流量越低。

(3) 在封闭的电缆沟内温度达到稳态后, 沟内的空气流速很慢可认为空气静止不动, 由此可以推断, 在电缆沟中增设强制对流通风设备将有利于提高电缆的载流量。

参考文献

- [1] 罗涛. 电力电缆温度场及载流量计算方法研究[D]. 重庆大学, 2009.
- [2] International Electrotechnical Commission. IEC 60287-1. Calculation of current rating part 1. (100% load factor) and calculation of losses[S]. 2001.
- [3] 郑良华, 于建立, 周晓虎, 鲁志伟. 直埋电缆群载流量和稳态温度场计算新方法[J]. 高电压技术, 2010, 11: 2833-2837.
- [4] 梁永春, 李彦明, 李延沐, 王正刚, 李忠魁. 地下电缆群暂态温度场和短时载流量数值计算方法[J]. 电工技术学报, 2009, 08: 34-38.
- [5] 王有元, 陈仁刚, 陈伟根, 田劲, 袁园. 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, 2009, 12: 3086-3092.
- [6] 梁永春, 闫彩红, 赵静, 孙克军, 刘建业. 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, 04: 1002-1007.
- [7] 张洪麟. 基于有限元法的地下电缆温度场和载流量的计算及仿真[D]. 重庆大学, 2009.
- [8] 梁永春, 李彦明, 柴进爱, 王正刚, 李忠魁. 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, 08: 185-190.

- [9] 程子霞, 薛文彬, 周远翔, 刘睿, 岳振国, 金金元. 电气化铁路27.5kV单相单芯交联聚乙烯电缆载流量计算[J]. 高电压技术, 2012, 11: 3067-3073.
- [10] 杨延明. 基于有限元法的电力电缆载流量计算[D]. 哈尔滨理工大学, 2012.
- [11] Carlos Gaggido, Antonio F. Otero, and Jose cidras. Theoretical model to calculate steady state, and transient ampacity and temperature in buried cables[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(3): 667~677.
- [12] 胡倩楠. 计算10kV三芯电缆导体温度的热路模型及应用研究[D]. 华南理工大学, 2013.
- [13] 陈诚. 电缆沟敷设10kV三芯电缆温度场计算及试验研究[D]. 华南理工大学, 2012.
- [14] 周闯. 利用多场耦合计算电力电缆的载流量[D]. 哈尔滨理工大学, 2013.
- [15] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [16] 郑雁翎, 王宁, 李洪杰, 张冠军. 电力电缆载流量计算的方法与发展[J]. 电气应用, 2010, 03: 26-31.
- [17] 赵健康, 雷清泉, 王晓兵, 樊友兵, 刘松华. 复杂运行条件下交联电缆载流量研究[J]. 高电压技术, 2009, 12: 3123-3128.

(收稿日期: 2015-5-21) EA

作者简介

胡国辉 (1975-), 男, 博士研究生, 正高级工程师, 主要研究方向为电子电气设备故障检测与分析、计算机测量控制。

赵轶 (1981-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电子电器产品的检测方法和检测技术研究。