

# 电力电缆安全监测中温度场和电场数值关系分析

罗涛<sup>1</sup>, 陈民铀<sup>1</sup>, 曾灿<sup>2</sup>

(1. 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; 2. 永川供电局, 重庆 402160)

**摘要:** 首先采用有限元法分别计算了 8.7/15 kV YJV 1×400 mm<sup>2</sup> 直埋式电缆的温度场以及电场分布, 在此基础上分析了二者之间的数值关系。计算结果表明电缆的温度场与电场之间呈近似的线性关系。从而在实际工程中, 可以通过在线监测电缆的温度场分布, 首先可以推算其负荷, 对电缆负荷进行监控。并根据电缆电场与温度场之间的线性关系, 推算其电场分布, 得出电缆绝缘介质内的电场分布规律, 判断内部电场是否超过安全限值, 可以更好地监测电缆的绝缘状态, 确保电缆的安全运行。

**关键词:** 地下电缆; 有限元; 温度场; 电场

## Study of numerical relationship between temperature and electric field in power cables safety monitoring

LUO Tao<sup>1</sup>, CHEN Min-you<sup>1</sup>, ZENG Can<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Yongchuan Power Supply Bureau, Chongqing 402160, China)

**Abstract:** In this paper, finite element method(FEM) is used to calculate the temperature field and electric field of 8.7/15 kV YJV 1×400 mm<sup>2</sup> straight buried cables separately and the relationship between the two fields is also analyzed based on this calculation. The calculation result shows that the temperature field and the electric field have an approximate linear relationship. Based on this analysis, in the practical application, the load of cables could be reckoned by the on-line monitoring of cables' temperature field, and therefore cables' load could be monitored. At the same time, the electric field's distribution regularity of cable insulation medium could be gotten by the calculation of the electric field's distribution based on the linear relationship between the temperature field and the electric field. Then the internal electric field could be judged whether it is under the safety limit. So the cable's insulation condition could be monitored preferably and the cable's safety operation could be guaranteed.

**Key words:** underground cable; FEM; temperature field; electric field

中图分类号: TM726.4 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)05-0020-05

## 0 引言

随着电气设备容量的扩大和社会对电力需求的日益增长, 对输电线路的可靠性要求也不断提高。电力电缆作为电能传输的主要载体, 对其运行状态的在线监测已成为关注的问题之一。关于电缆的在线监测系统研究较多, 很多已经投入运行。目前大多数电缆在线监测系统是使用温度传感器监测电缆表面或表皮温度, 根据电缆的温度判断电缆是否运行安全。这种监测方法能够直观判断电缆的运行安全性, 一个存在的问题就是当检测到电缆温度较高时, 可能有些内部故障已经产生并持续一段时间了, 虽然可以避免事故的发生, 但是对电缆的寿命带来不利的影响。

实际运行中的电缆内部的电场是均匀分布的<sup>[1]</sup>, 电缆故障中局部放电和绝缘老化等现象都会在电场分布上反映出来。所以, 我们可以根据电缆内部电场是否出现异变来对电缆的绝缘层进行监测。由于地下电缆电场的测量较为困难, 温度的测量相对较为简单。本文通过建立地下电缆温度场和电场模型, 对二者的关系进行了研究。

本文采用有限元法分别计算了 8.7/15 kV YJV 1×400 mm<sup>2</sup> 直埋式电缆的温度场以及电场分布, 在此基础上分析了二者之间的数值关系。

计算结果表明电缆的温度场与电场之间呈近似的线性关系。从而在实际工程中, 可以通过在线监测电缆的温度场分布, 首先可以推算其负荷, 对电缆负荷进行监控。并根据电缆电场与温度场之间的

线性关系, 推算其电场分布, 得出电缆绝缘介质内的电场分布规律, 判断内部电场是否超过安全限值, 可以更好地监测电缆的绝缘状态, 确保电缆的安全运行。

### 1 电缆温度场计算

当单芯电缆群直埋于土壤时, 电缆的长度远远大于电缆的截面, 因此可以认为此时的温度场为二维场, 且属于二维稳态导热问题。任何传热问题的边界条件均可归结为三类边界条件。第一类边界条件为已知边界温度; 第二类边界条件为已知边界法向热流密度; 第三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。

对于 8.7/15 kV YJV 1×400 mm<sup>2</sup> 直埋式电缆的温度场控制方程和边界条件由式 (1) 表示<sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_v = 0 \\ T(x, y)|_{\Gamma} = f(x, y)|_{\Gamma} \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_{\Gamma} + q_2 = 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_{\Gamma} = \alpha(T - T_f)|_{\Gamma} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $T$  为点  $(x, y)$  处的温度;  $q_v$  为体积发热率;  $\lambda$  为导热系数;  $q_2$  为热流密度;  $\alpha$  为对流换热系数;  $T_f$  为流体温度;  $\Gamma$  为积分边界。

土壤直埋电缆的温度场是一个半无限大平行平面场, 已知条件是土壤环境温度、地表空气温度以及热源的生热率。为了采用有限元法进行计算, 需确定计算区域的边界, 按有限场计算。文献[5]对地下电缆温度场的影响域进行了估算, 认为电缆对 1 m 外的土壤基本没有温度影响。考虑一个裕量, 取左右边界距离电缆外侧为 2 m, 下边界距离热源下侧为 2 m, 直埋电缆的无限大开域场可转化为如图 1 所示的有界边界进行分析。

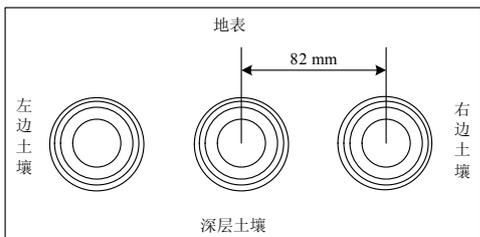


图 1 单回路土壤直埋电缆温度场模型

Fig.1 Temperature field model of single circuit loop buried cables

如图 1 所示, 左右土壤边界为第二类边界, 深层土壤边界为第一类边界。地表为第三类边界条件, 需要给出自然对流换热系数和空气温度。自然对流换热系数计算公式为:

$$G_r = \frac{\beta g \Delta t l^3}{\nu^2} \quad (2)$$

$$N_u = c(G_r P_r)^n \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{l} N_u \quad (4)$$

式中:  $G_r$  为格拉晓夫数;  $P_r$  为普朗特数;  $\beta$  为体积膨胀系数;  $g$  为重力加速度;  $\Delta t$  为温差;  $l$  为线性尺寸;  $\nu$  为运动粘度;  $N_u$  为努赛尔数;  $c, n$  为系数 (常数)。

对于 8.7/15 kV YJV 1×400 mm<sup>2</sup> 直埋式电缆, 其温度场的计算模型中的具体参数如表 2 所示。地下电缆及其周围区域温度分布如图 2 所示。

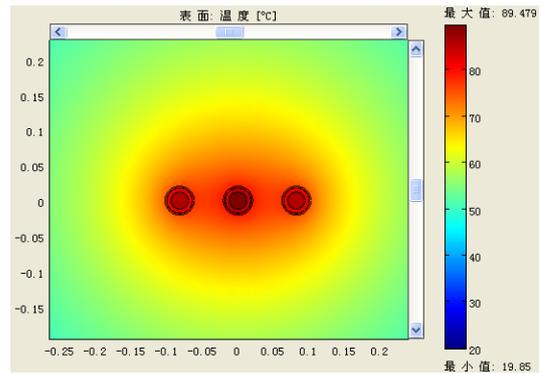


图 2 地下电缆温度场分布图

Fig.2 Distribution of temperature field underground cables

### 2 电缆电场计算原理

本文所讨论的电缆为中低压工频交流电缆, 由于频率较低, 可近似地把地下电缆的电场作为准静态场进行分析, 根据麦克斯韦方程组, 可以得出地下电缆静电场方程及其边界条件为<sup>[6]</sup>:

$$\begin{cases} \Omega: \nabla^2 \varphi = \frac{-\rho}{\epsilon} \\ \Gamma_D: \varphi = \bar{\varphi} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\varphi$  为电位;  $\rho$  为电荷密度,  $\epsilon$  为介电常数,  $\Omega$  为求解域;  $\Gamma_D$  为狄利克雷边界。边界条件为: 导体表面电位为 15 kV, 土壤电位为 0。

由于大地电位为 0, 各根电缆内部的电场强度分布相同, 故本文给出中间电缆的电场分布, 如图 3 所示。

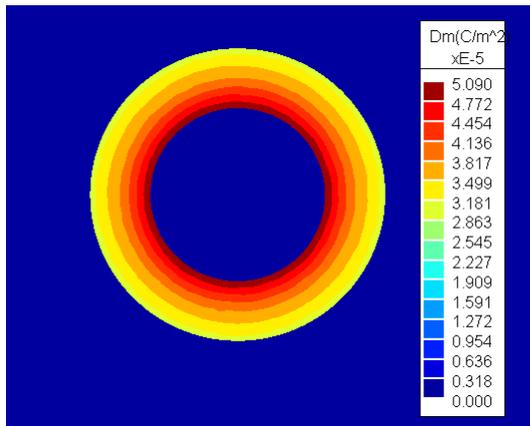


图3 地下电缆电场强度分布图

Fig.3 The distribution of electric field intensity underground cable

### 3 电缆温度与电场的数值关系分析

使用有限元法建立电缆温度场和电场模型后，我们可以得出电缆内部的温度分布和电场强度分布，通过比较，我们可以得出温度和电场的关系。

还是以 8.7/15 kV YJV 1×400 mm<sup>2</sup> 交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电力电缆为例，电缆参数和敷设环境条件如表 1、表 2 所示<sup>[7]</sup>。

表 1 电缆结构参数

Tab.1 Parameters of cable

结构名称	参数值
导体直径 / mm	23.8
绝缘层厚度 / mm	11.8
屏蔽层厚度 / mm	0.8
外护层厚度 / mm	4.6
电缆外径 / mm	41

表 2 电缆群敷设条件

Tab.2 Environment paraments of buried cables

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
导体热阻系数/(K·m·W <sup>-1</sup> )	400
绝缘层热阻系数/(K·m·W <sup>-1</sup> )	0.285 7
外护层热阻系数/(K·m·W <sup>-1</sup> )	0.166 7
空气温度/(°C)	40
土壤环境温度/(°C)	25
排列方式	水平排列

由所建立温度场模型可得，中间电缆外护层和绝缘层的温度分布如图 4、图 5 所示，中间电缆的导体温度比两边电缆的导体温度约高 5 °C，分布曲

线与中间电缆近似，且边上两根电缆的温度相对于中间电缆成对称分布。

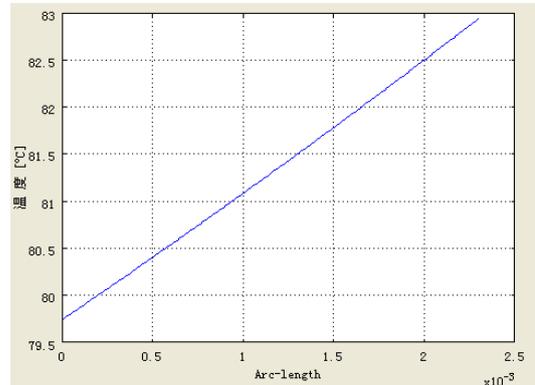


图 4 中间电缆外护层温度分布图

Fig.4 Temperature distribution of cable sheath

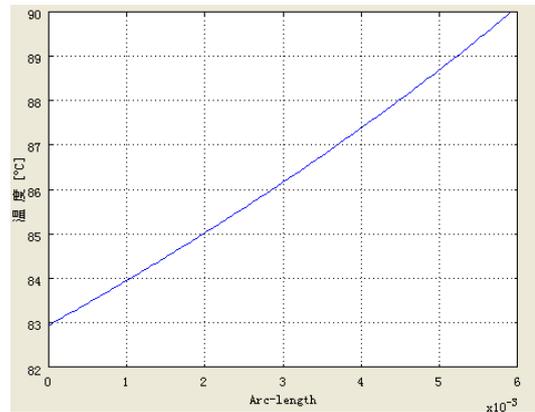


图 5 中间电缆绝缘层温度分布图

Fig.5 Temperature distribution of cable insulator layer

由温度场分布图可以看出，电缆内部温度是由外部到内部递增的。其中导体温度最高，为 90 °C（交联聚乙烯电缆）。从导体边缘到电缆外护层与土壤交接处温度降为 10 °C。

图 4 与图 5 所示的计算结果表明，电缆的绝缘层与保护层中的温度场近似呈线性分布关系。

由于电缆内由多层不同的材料组成，其结构属于轴对称结构，各层分界面满足电位移矢量  $D$  的法向方向分量  $D_n$  相等。而  $D=\epsilon E$ ，故分界面上  $E$  将突变，因此本文通过研究  $D$  与温度  $T$  的关系，进而研究  $T$  与  $E$  的关系。

同样，由电缆的电场模型可以得出电缆外护层和绝缘层的电位移矢量分布如图 6、图 7 所示。

从电位移矢量分布图中可以看出，电缆的电位移矢量从外护层到导体表面也是递增的。

综合图 4~7 的计算结果可以看出，电缆的绝缘层温度分布呈现的线性规律与电通量密度类似。为了更好地对数据进行分析，分析  $T$  与  $D$  之间的线性

关系, 对数据进行分析, 首先定义了如下物理量。

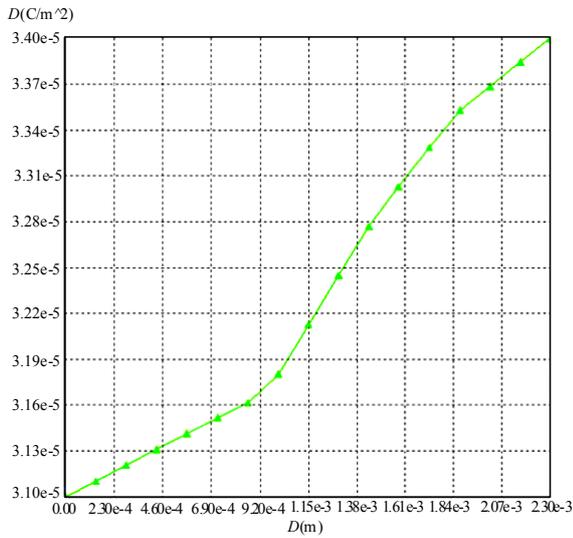


图 6 电缆外护层  $D$  的分布  
Fig.6  $D$  distribution of cable sheath

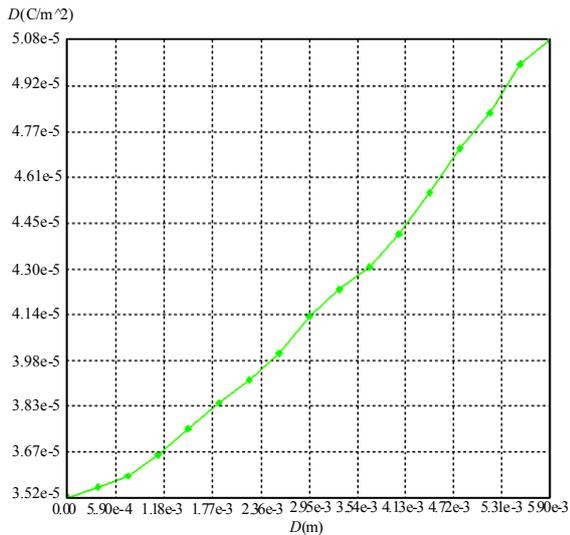


图 7 电缆绝缘层  $D$  的分布  
Fig.7  $D$  distribution of cable insulator layer

单点温度与电通量线性比:

$$k_i = T_i / D_i \quad (6)$$

平均线性比:

$$\bar{k} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N k_i \quad (7)$$

各点线性比之误差:

$$e_k = \frac{|k_i - \bar{k}|}{\bar{k}} \times 100\% \quad (8)$$

式中:  $k_i$  为第  $i$  个点的比例系数;  $\bar{k}$  为  $k_i$  的平均值;

$N$  为所取的点的个数;  $e_k$  为各点比例系数与平均值的误差。

结合温度场和电场分布图中的数据进行数据分析, 如表 3、表 4 所示。

表 3 外护层  $T$  与  $D$  关系分析

Tab.3 Numerical analysis of sheath

距离	温度 / (°C)	电位移矢量 10 <sup>-5</sup>	$k_i$ 10 <sup>5</sup>	$e_k$
0.00	79.7	3.10	25.7	2.19
0.25	80.0	3.12	25.6	1.18
0.50	80.3	3.14	25.6	1.18
0.75	80.7	3.16	25.5	1.39
1.00	81.0	3.18	25.5	1.39
1.25	81.3	3.23	25.1	0.02
1.50	81.7	3.28	24.9	1.00
1.75	82.1	3.33	24.6	2.19
2.00	82.4	3.36	24.5	1.00
2.25	82.7	3.38	24.5	1.00

表 4 绝缘层  $T$  与  $D$  数值关系分析

Tab.4 Numerical analysis of insulation layer

距离	温度 / (°C)	电位移矢量 10 <sup>-5</sup>	$k_i$ (10 <sup>5</sup> )	$e_k$
0	82.9	3.51	23.6	9.36
0.5	83.3	3.56	23.3	7.97
1.0	83.8	3.64	23.0	6.58
1.5	84.3	3.74	22.5	4.26
2.0	84.9	3.85	22.0	1.94
2.5	85.5	3.97	21.5	0.37
3.0	86.1	4.15	20.7	4.07
3.5	86.7	4.26	20.3	5.93
4.0	87.3	4.40	19.8	8.24
4.5	87.9	4.60	19.1	11.5

由地下电缆内部温度场和电场模型的数据分析, 我们可以得出结论: 地下电缆温度场中的温度分布与电场中电位移矢量分布在数值上有近似的线性关系。由电场的构造方程  $D = \epsilon E$ , 可以推导出电缆温度与电场强度在数值上也具有近似的线性关系。且可以估算出两者关系的比例系数  $k$  为 23.4。即

$$T = 23.4\epsilon E \quad (9)$$

其他情况下的电缆温度场和电场的关系可根据上述数据分析的方法求得。如果电缆发生异常, 并且异常部位的介电常数、电导率等参数呈现的是线性变化, 即材料的属性仍可近似看作线性同向材料, 则可把异常部位与正常部位电缆分开处理, 各部分的温度场与电场分别呈近似线性关系, 只是比例系

数不同。

### 4 结论

本文以土壤直埋的三根单芯电缆的温度场和电场的分析为例,通过对得到的数据进行分析,得出了地下电缆周围温度和电场强度之间具有近似的线性关系的结论。当测量出地下电缆运行状态下温度和电场强度中的一个,我们可以根据得出的关系估算出电缆的另外一个数值。可以很方便地估算电缆载流量的同时也兼顾到对电缆安全的检测,因此,本文的结论有较强的工程应用意义,应用前景非常广阔。为了使本文的研究结论更好地运用在电缆的在线监测工程中(包括安全监测与载流量监测),需要进行更多的现场试验,对计算结论进行更为深入的验证。

### 参考文献

[1] 王春江. 电线电缆手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.  
WANG Chun-jiang. The Manual of Wires and Cables[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.

[2] 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.  
KONG Xiang-qian. The Application of Finite Element Method in Heat Transfer[M]. Beijing: Science Press, 1998.

[3] Hanna M A, Chikhani A Y, Salama M M A. Thermal Analysis of Power Cables in Multi-layered Soil [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8 (3): 761-771.

[4] 赵镇南. 传热学(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.  
ZHAO Zhen-nan. Heat Transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.

[5] 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.

[6] 孙敏, 孙亲锡, 等. 工程电磁场基础[M]. 北京: 科学技术出版社, 2001.  
SUN Min, SUN Qin-xi, et al. The Basics of the Engineering Electromagnetic Fields [M]. Beijing: Science Press, 2001.

[7] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.  
MA Guo-dong. Ampacity of Wires and Cables[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.

收稿日期: 2009-04-07; 修回日期: 2009-06-07

### 作者简介:

罗 涛 (1982-), 男, 主要从事输配电设备的状态监测和故障诊断方面的研究; E-mail: lt0618@163.com

陈民铀 (1954-), 男, 主要从事电磁信号检测与智能信息处理的研究;

曾 灿 (1972-), 男, 主要从事配网及工程管理工作。

(上接第 19 页 continued from page 19)

[5] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统(第 3 版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.190-204.  
CHEN Bo-shi. Motor Control Systems[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.190-204.

[6] 吴学光, 张学成, 印永华. 异步发电系统动态稳定性分析的数学模型及其应用[J]. 电网技术, 1998, 22(6): 70-74.  
WU Xue-guang, ZHANG Xue-cheng, YIN Yong-hua. Application of Models of the Wind Turbine Induction Generators(WTIGS) to Wind Power System Dynamic Stability Analysis[J]. Power System Technology, 1998, 22(6): 70-74.

[7] Kim Jongbaeg, Bryant M D. Bond Graph Model of a Squirrel Cage Induction Motor with Direct Physical Correspondence[Z]. Ausin TX, 787 12-1063.

[8] Margolis D, Shim T. Bond Graph Modeling for Non-linear Hydro-mechanical Systems[A]. in: Proc. IMechE

Vol. 219 Part K: J. Multi-body Dynamics[C]. 2005.

[9] Sirivadhna K, Richards E F, Anderson M D. The Application of Bond Graphs to Electrical Machinery and Power Engineering[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(5).

[10] Sanghoon Lee, Bryant D M, Lalit Karlapalem. Model- and Information Theory-Based Diagnostic Method for Induction Motors[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2006, 12.

收稿日期: 2009-03-31; 修回日期: 2009-05-04

### 作者简介:

周 卫 (1984-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制; E-mail: lanyinglantian@163.com

张 尧 (1948-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统运行分析与控制、电压稳定性等方面的教学与科研工作;

夏成军 (1974-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、HVDC 及 FACTS。