

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.07.017

# 地下电缆排管涡流损耗及经济性分析\*

张 博<sup>1</sup>, 麻 坚<sup>2</sup>, 应 健<sup>2</sup>, 杨仕友<sup>1\*</sup>

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省金华市电力设计院, 浙江 金华 321000)

**摘要:**为解决传输线电流在传统钢筋混凝土地下电缆排管中产生涡流损耗而造成电能浪费的问题,将有限元数值分析技术应用于地下复杂环境涡流-温度场的分析和计算。提出了地下电缆排管涡流-温度耦合场的三维有限元模型,兼顾求解速度和计算精度需求的剖分方法以及多物理耦合场的迭代求解方法。通过对典型钢筋混凝土结构地下电缆排管的涡流场和温度场的数值分析,得到了典型钢筋混凝土结构地下电缆排管中金属构件的涡流分布,整个场域的温度场分布和谐态工况下的电缆线芯的温度;并据此提出了玻璃纤维代替传统钢筋的解决方案,对比分析了两种结构电缆排管的技术特点和经济性能。数值分析结果表明,使用玻璃纤维筋电缆排管的替代方案在能够降低涡流损耗的同时具有更好的经济效益。

**关键词:** 涡流损耗;排管;有限元法;温度场;玻璃纤维;电磁场

中图分类号:TM247;TK121

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)07-0778-05

## Analysis of the eddy current loss and economy study in underground cable duct

ZHANG Bo<sup>1</sup>, MA Jian<sup>2</sup>, YING Jian<sup>2</sup>, YANG Shi-you<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Jinhua Electric Power Design Institute Co., Ltd., Jinhua 321000, China)

**Abstract:** In order to solve the issue of the electrical energy loss which is generated by the eddy current in traditional underground steel reinforced duct model, a finite element model and method was proposed to analyze the eddy current field and temperature field in the complex environment underground model and a scheme of using the glass fiber reinforced polymer (GFRP) instead of the steel in the underground duct was proposed. Moreover, the three-dimension eddy current-temperature coupled field was computed by adopting a fast convergence, high accuracy mesh technique and an iteration solver for coupled multi-physics field; The eddy current distribution of the metal component, temperature field distribution of the whole model were obtained; also the temperature of the cable cores under a harmonic current condition was analyzed. The technical and economic performances of the traditional and proposed model were compared. The results indicate that the scheme of using GFRP instead of steel can reduce the loss, and possess better economic performance at the same time.

**Key words:** eddy current loss, duct; finite element method; temperature field; glass fiber reinforced polymer(GFRP); electromagnetic field

## 0 引 言

敷设在排管中的电缆,特别是大电流单芯电缆,在实际运行过程中将会在排管金属构件上产生涡流损耗。相对于电缆本身涡流损耗,虽然这部分损耗较小,但伴随着入地电缆公里数的增加,再加上长年累月的滴水效应,其产生的电能损耗将十分可观。而电缆本身的损耗以及金属构件的损耗,都将影响电缆和排管

的温度变化,进而影响电缆绝缘寿命和电缆载流量。

为此,研究人员提出了用新型 GFRP 材料的混凝土排管以取代传统金属排。尽管 GFRP 材料排管不存在金属结构件的涡流损耗,但是它的造价相对昂贵。此外,由于散热条件等的变化,新排管工况下电缆输送容量的分析和计算亦须综合考虑涡流-温度场的相互耦合和相互影响。

为研究不同排管的技术、经济问题,本研究提出

收稿日期:2016-12-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677163)

作者简介:张博(1993-),男,河南商丘人,硕士研究生,主要从事电磁场数值计算方面的研究. E-mail:21410069@zju.edu.cn

通信联系人:杨仕友,男,教授,博士生导师. E-mail:eesyong@zju.edu.cn

110 kV 电缆涡流场和温度场计算的有限元模型。在此基础上,基于 Magnet 有限元分析软件,计算典型排管的涡流损耗与温度场分布,并根据计算结果提出使用 GFRP 材料代替钢筋的优化方案。

## 1 涡流-温度耦合场计算模型和算法

由于地下电缆排管结构极其复杂,其三维涡流-温度耦合场不能通过解析的方法进行分析与计算。为此,应采用有限元法计算电缆排管中的三维涡流-温度耦合场。

### 1.1 控制方程和边界条件

本研究采用磁矢量位  $\mathbf{A}$  和标量电位  $V$  的位函数对,计算对象的涡流区包括电缆和排管中金属构件。根据该项目计算对象的特点,计算中尚假定:激励源与各场量均按正弦规律变化,忽略高次谐波分量;忽略位移电流;材料的特性参数呈各向同性特。由 Maxwell 方程组可得场域涡流区的控制方程为:

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla (\nu \nabla \cdot \mathbf{A}) + j\omega \mathbf{A} + \sigma \nabla V - \mathbf{J}_s = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (-j\omega \sigma \mathbf{A} - \sigma \nabla V) = 0 \quad (2)$$

非涡流区的控制方程为:

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla (\nu \nabla \cdot \mathbf{A}) = \mathbf{J}_s \quad (3)$$

内部交界面条件为:

$$\begin{cases} \vec{n}_{12} \cdot (\nabla \times \dot{\mathbf{A}}_1) = \vec{n}_{12} \cdot (\nabla \times \dot{\mathbf{A}}_2) \\ \frac{\nabla \times \dot{\mathbf{A}}_1}{\mu_1} \times \vec{n}_{12} = \frac{\nabla \times \dot{\mathbf{A}}_2}{\mu_2} \times \vec{n}_{12} \end{cases} \quad (4)$$

由于电缆排管直埋于地下,该问题为开域多物理场计算问题。为进行有限元分析和计算,必须将开域截断成有限。为此,本研究在涡流-温度场建模中通过设置特定的区域边界,将开域问题转化为有界问题。具体而言模型中在距离排管 3 m,其对应的涡流场边界条件为:

$$\mathbf{A} = 0 \quad (5)$$

而在电缆轴向方向上, $\mathbf{A}$ 、 $V$  是在轴向截面上周期对称的,周期为 0.5 m。

设深层土壤对应的截面边界设为恒温边界条件 25 °C,为:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \\ T(x, y) \Big|_{\Gamma_1} = f(x, y) \Big|_{\Gamma_1} \end{cases} \quad (6)$$

设排管两侧 3 m 处土壤对应的截面边界条件也为恒温边界条件 25 °C,为:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q_n \end{cases} \quad (7)$$

由于排管内温度沿电缆轴向周期变化,排管沿电缆轴向方向截面边界条件为:

$$\frac{dt}{dz} = 0 \quad (8)$$

土壤表层以对流形式与空气换热。不考虑地表风速影响时,对流换热系数  $h = N_u \lambda / l$  (其中: $N_u$ ,  $\lambda$ ,  $l$ —努塞尔数、热导率、特征长度);考虑风速影响且空气温度为 293 K 时,对流换热系数  $h = (7.371 + 6.43 v_g^{0.75}) \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  (其中: $v_g$ —地表风速<sup>[6]</sup>)。对应的边界条件为:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = h(T - T_f) \Big|_{\Gamma_3} \end{cases} \quad (9)$$

### 1.2 数值计算模型

本研究以 110 kV 柳青输变电工程地下电缆为例建立其对应的多物理场数值模型。直埋电缆排管结构示意图如图 1 所示。

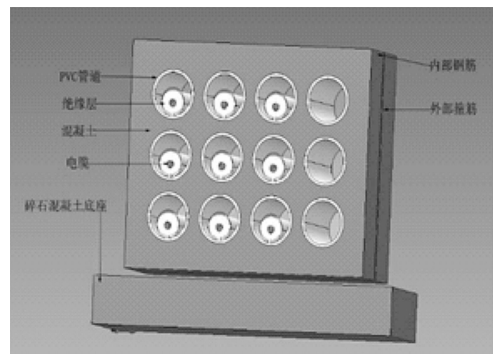


图1 电缆排管工程模型示意图

其对应的三维涡流-温度场仿真计算的有限元模型如图 2 所示。

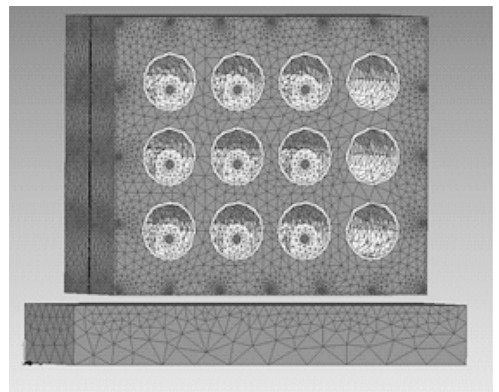


图2 电缆排管有限元剖分

考虑到趋肤效应的影响,电缆及钢筋上的电流大多集中于表层一个透入深度的范围内,故对钢筋和电缆做了精细剖分,电缆表面精细剖分示意图如图 3 所示。

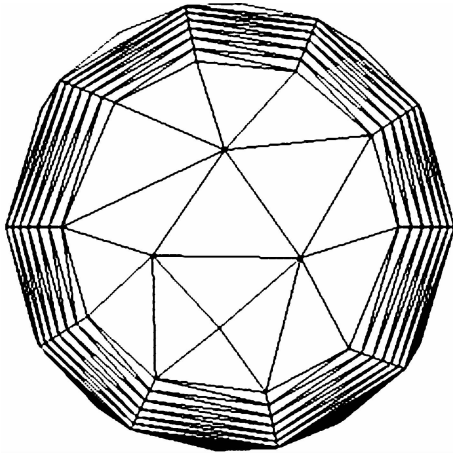


图 3 电缆表面精细剖分示意图

计算时电缆电流有效值取 1 000 A, 频率为工频 50 Hz, 电缆规格为 800 m。钢筋取 12 规格, 模型轴向单位长度取 0.5 m。

传统上一般采用顺序耦合方法来求解磁热耦合问题。然而在该问题中, 导电金属材料的物性参数随温度的变化而变化。为了精确求解稳态涡流-温度场及损耗分布规律, 本研究提出了一种简单的非线性耦合多物理场的迭代计算方法, 即采用二分法进行迭代搜索, 其流程图如图 4 所示。

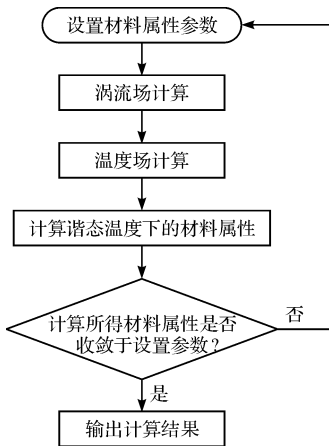


图 4 涡流-温度耦合场迭代流程示意图

稳态涡流场-温度耦合场的典型数值计算结果如图 5 所示。

## 2 涡流温度场域数值分析

为进行钢筋和玻璃纤维两种不同材料排管结构技术、经济分析, 笔者建立了两种数值计算模型。实例计算中, 排管共有 12 根管道, 其中 9 根作为正常工作管道, 组成三回路, 通三相 800 A 电流。为了降低计算量, 根据周期对称性, 仿真计算模型轴向按 0.5 m 规格进行建模, 并通过设置周期性的边界条件模拟无限长

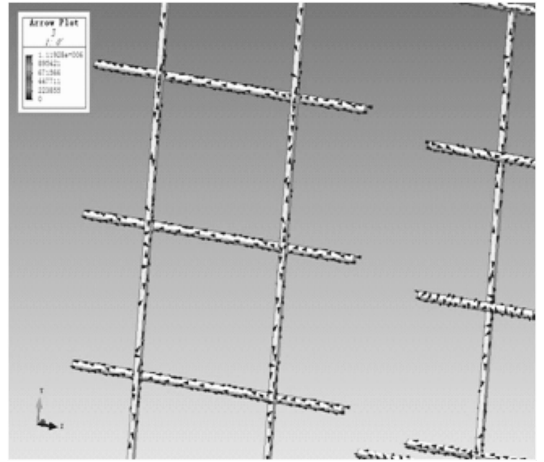


图 5 钢筋内谐波涡流场典型分布结果示意图

地下电缆排管。

### 2.1 电缆排管涡流损耗分布

由于玻璃纤维为非导电材料, 其上并无涡流损耗。而钢筋混凝土排管中由于电缆电流三相对称、总和为零, 故它们在钢筋结构上产生的磁场叠加后相互抵消, 相对值较小。但考虑到滴水作用, 其长期效应将不可忽略。典型工况下涡流分布的计算结果如图 6 所示。

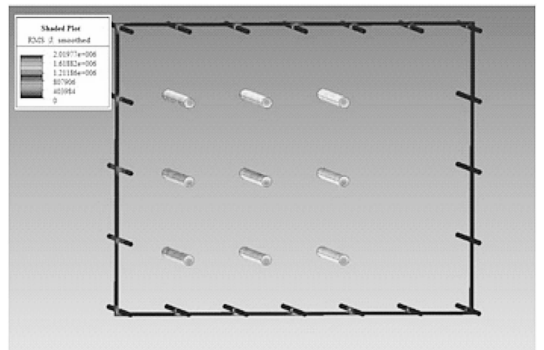


图 6 典型工况下钢筋混凝土排管涡流场分布

显然, 该涡流并不能完全忽略不计。

精确计算各钢筋构件上的涡流损耗后得到的钢筋构件涡流损耗数值分布图如图 7 所示。

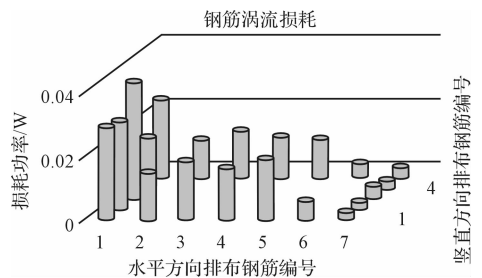


图 7 钢筋构件上的涡流损耗值

每个圆柱高度为对应位置钢筋功率损耗值, 箍筋上的涡流损耗为 0.45 W, 显著大于各钢筋上损耗。由

由此可见,每米排管的总损耗约在 1.28 W 左右,各个钢筋上涡流损耗与位置相关性很大。在钢筋上,各个钢筋损耗的大小分布也与各输电线叠加的增强或削弱效果一致。

## 2.2 电缆排管内稳态温度场分布

钢筋混凝土结构电缆排管中各电缆上的温度场分布如图 8 所示。

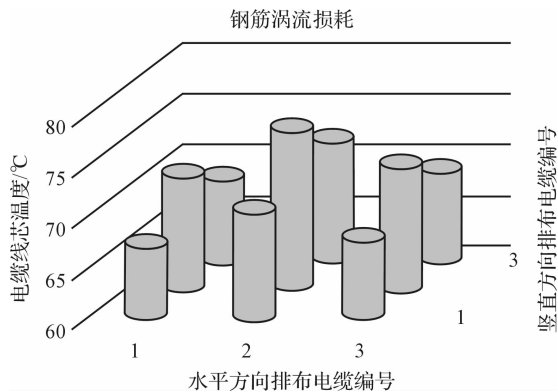


图 8 电缆温度示意图

在排管内部,由于散热条件的不同,各电缆上的温度不尽相同,大致呈现出越靠近边缘温度越低的特征。各个电缆上平均温度为 70.02 °C,而最高温度为 76 °C,钢筋结构上最高温度在 50 °C 左右,其温度场分布仅与到热源距离有关。理论上无论是钢筋结构还是玻璃纤维筋结构,它们距离发热源均相对较远,而且体积、质量也不大。所以,尽管钢筋的导热性能优于玻璃纤维,但是它们的温度场分布也大致相当。两种不同排管结构下的温度场分布分别如图 9、图 10 所示。

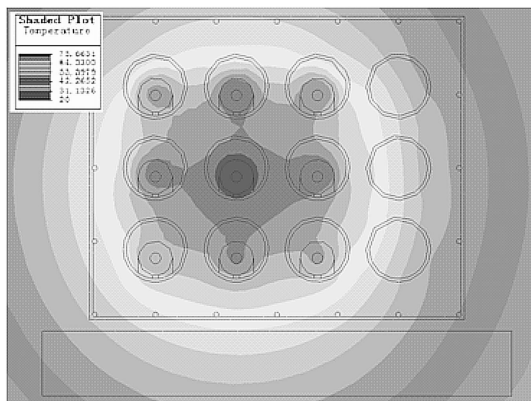


图 9 钢筋电缆排管温度场分布

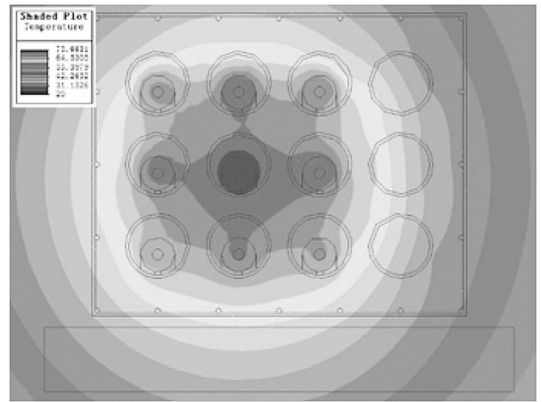


图 10 玻璃纤维筋电缆排管温度场分布

计算结果验证了上述结论。

## 3 技术、经济性分析

目前 GFRP 筋由于其所具有的轻质高强、疲劳性能好、应力松弛小、耐腐蚀性能好、非磁性等优点,而成为腐蚀环境下替代钢筋,解决钢筋锈蚀问题的最佳选择之一。GFRP 筋在同尺寸的前提下,抗剪抗弯性能要明显优于钢,从技术角度而言,使用玻璃纤维筋混凝土电缆排管代替钢筋混凝土电缆排管是可行的。因此,下面进一步分析基于 GFRP 筋无欧姆损耗后的技术、经济性能。

不考虑参数变化,钢筋混凝土结构正常工况下平均每米损耗为 1.28 W;即:每年每公里造成的损耗为 11 213 kW·h,考虑到工程中埋地电缆排管总长度 2 094 m,则全线路段涡流损耗大致为:全线正常工况下 2.348 kW。按年最大利用小时数 3 500 h 计算,则全年损耗分别为 8 218 kW·h,按电价 0.45 元/kW·h,则用玻璃纤维筋(GFRP)替换钢筋结构后每年可减少经济损失 3 698.1 元。按全寿命周期 40 年计算,则正常工况全寿命周期内可节约电能约 32.87 万度,约合 14.79 万元。

模型对应的案例工程中全长 2.094 km 的排管,若采用普通  $\phi 12$  钢筋费用为 36.11 万元。而采用相同强度、长度的 G10 玻璃纤维筋材所需的费用 432 432.4 元,采用玻璃纤维筋材产生的价差为 71 376.4 元。在

(下转第 811 页)

### 本文引用格式:

张博,麻坚,应健,等. 地下电缆排管涡流损耗及经济性分析[J]. 机电工程,2017,34(7):778-781,811.

ZHANG Bo, MA Jian, YING Jian, et al. Analysis of the eddy current loss and economy study in underground cable duct[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(7):778-781,811.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>