Vol.33 No.1 Jan. 2013

考虑空气流场影响的电缆散热研究 及其影响因素与经济性分析

杨永明¹,程 鹏¹,陈 俊²,杨 帆¹,刘行谋¹ (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. 重庆市电力公司电网检修分公司,重庆 400015)

摘要:根据传热学理论建立了考虑流场影响的电缆温度场计算模型,给定了电缆沟敷设电缆的温度场边界条件,并以电缆沟敷设6回路电缆为例验证了模型的正确性,该模型也可用于通风电缆沟(隧道)敷设电缆的温度场计算。研究了沟深和电缆层间距对电缆允许载流量的影响规律,并结合土建成本对电缆沟敷设方案进行 了经济性分析。计算结果表明,在通过改善电缆散热效果来提高电缆载流量方面,电缆层间距优化比电缆沟 深度优化能获得更佳效果;适当的电缆沟深度优化具有土建投资成本回收时间短的优点;实际电缆沟敷设方 案选取时,应先考虑电缆层间距优化,再考虑电缆层间距和电缆沟深度的综合优化。

关键词: 电缆; 电缆沟; 流场; 温度场; 载流量; 土建成本; 模型

中图分类号: TM 247 文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.01.010

0 引言

随着经济建设的飞速发展,城市供电网络越来越 多地采用地下电缆。在电缆各种敷设方式中,电缆 沟敷设方式具有投资省、占地少、走向灵活且能容纳 较多电缆、不需要工井、电缆进出方便等优点,因此 被广泛使用^[1-2]。

电缆载流量是地下电缆运行中的重要参数之一,而其与缆芯温度有关。因此,准确计算地下电缆的温度场分布,对提高电缆利用率和确保电缆安全、可靠、经济运行具有重要意义^[3-5]。电缆温度场的计算方法主要有2种:一种是根据IEC60287标准的解析法;另一种是数值计算法,主要包括边界元法^[6]、有限差分法^[7]、有限容积法^[8]以及有限元法^[9-10]等。相比解析法,数值法具有运算灵活、模拟复杂工况、拓宽实验研究的范围、减少实验的工作量等优点。因此,数值法成为了研究电缆散热问题的有效手段^[11]。

电缆沟内电缆的散热包括热传导、电缆表面与沟 壁表面间的辐射和空气受热而形成的自然对流 3 种 方式,其中主要是自然对流散热。而电缆沟尺寸和电 缆层间距参数对沟内空气流场具有重要影响,因此, 本文首先根据传热学理论^[12-13],建立了考虑流场影响 的电缆温度场计算模型,分析确定了其边界条件,并 以电缆沟敷设 6 回路电缆为例验证了考虑空气自然 对流(初始速度 u=0)影响模型的准确性,该模型可 以用于将来可能安装通风装置的电缆沟(隧道)敷设 电缆的温度场计算,此时初始速度 u>0。根据求得 的电缆温度场分布,利用数值迭代法可得电缆允许 载流量。此外,本文还对电缆载流量影响因素与考 虑土建成本情况下电缆沟敷设电缆的经济性进行了 分析。

1 温度场计算模型的建立

1.1 物理模型的建立

由传热学理论^[12-13]中相关的知识可知,电缆沟敷 设电缆的散热方式包括热传导、热对流、热辐射3种, 其中自然对流散热能力要比传导和辐射大,且它们 之间是流场与温度场相互耦合的过程。由于电缆沟 线路与其截面尺寸相比可认为无限大,因此电缆沟内 流场和温度场可以按二维进行分析和计算。本文以 6回路电力电缆敷设于截面为1m×1m的电缆沟内 为例,对电缆区域建立了一个闭域场模型,见图1。



图16回路电缆的电缆沟敷设示意图

Fig.1 Laying map of six-loop cable trench

1.2 温度场数学模型的建立

a. 对流微分方程。

任何流体的流动要受物理守恒定律的支配,流

收稿日期:2011-10-18;修回日期:2012-10-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51007096);中央高校自 主课题资助项目(CDJZR10150001)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51007096) and Funds for the Central Universities (CDJZR10150001)

动过程可以用微元体内的质量守恒定律、动量守恒定 律及能量守恒定律描述^[1213]。这些守恒定律的控制方 程可以写成如下形式:

$$\nabla(\rho \boldsymbol{u}) = 0 \tag{1}$$

$$\rho(\boldsymbol{u}\nabla\boldsymbol{u}) = \boldsymbol{F} - \nabla p + \mu \nabla^2 \boldsymbol{u}$$
(2)

$$\rho c_p \boldsymbol{u} \nabla T_{\rm f} = \lambda \nabla^2 T_{\rm f} \tag{3}$$

其中, ∇ 为矢量微分算子符号; ρ 为流体密度(kg/m³); u为流体的绝对速度矢量(m/s);F为流体单位体积 所受的体积力矢量(N/m³);p为流场的压力(Pa); μ 为 流体动力粘度(Pa·s); T_f 为流体温度(K); λ 为流体 的导热系数(W/(m·K)); c_a 为流体比热容(J/(kg·K))。

对于自然对流散热方式,空气流体所受的外力仅 为重力和浮力,它们为空气流动的动力,则动量守恒 方程式(2)中的 F 在 x,y 方向上的分量分别为:

$$F_x = 0 \tag{4}$$

$$F_{y} = \rho g \beta (T_{f} - T_{r}) \tag{5}$$

其中,g为重力加速度 (m/s^2) ; β 为体积膨胀系数 (K^{-1}) ;T,为流体参考温度(K)。

b. 导热微分方程。

导热微分方程是根据传热学中傅里叶基本定律 和能量守恒定律确定的^[13]。二维导热微分方程为:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T_{\rm s}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{\rm s}}{\partial y^2} \right) + Q = 0 \tag{6}$$

其中, λ 为介质导热系数($W/(m \cdot K)$); T_s 为介质温度 (K);Q 为介质单位体积发热率(J/m^3)。

c. 辐射换热计算。

电缆外表面和电缆沟内壁之间存在辐射换热, 其计算公式为:

$$Q_{12} = \sigma_0 X_{12} A_1 (\varepsilon_1 T_1^4 - \varepsilon_2 T_2^4) \tag{7}$$

其中, Q_{12} 为表面 1 和 2 之间的净换热量(W); σ_0 为 斯蒂芬-玻尔兹曼常数(W/(m²·K⁴)); ε_1 和 ε_2 分别为 表面 1 和 2 的发射率; X_{12} 为角系数,其值计算见文献 [13-14]; A_1 为表面 1 的面积(m²); T_1 和 T_2 为表面 1和 2 的绝对温度值(K)。

2 电缆温度场及载流量计算

以型号为 8.7/15 kV YJV 1×400 的 XLPE 电力电 缆为例,当电缆按图 1 敷设时,利用有限元法计算电 缆及其周围敷设区域的温度场分布,并利用数值迭代 法计算电缆相应的允许载流量。

2.1 电缆结构参数及敷设条件

8.7/15 kV YJV 1×400 XLPE 电力电缆的结构参数如表 1 所示,具体的敷设参数见表 2。

2.2 损耗计算

由式(6)可以看出:要计算电缆的温度场分布, 还需获得场域内热源的单位体积发热率。对于整个

表 1 电缆结构参数 Tab.1 Structural parameters of cable

结构名称	参数值/mm
导体直径	23.8
绝缘层厚度	5.9
金属屏蔽层厚度	0.3
外护层厚度	2.3
电缆外径	41.0

表 2 电缆敷设参数

Tab.2 Laying	parameters of cable
敷设条件	参数值
土壤导热系数	$1.0 \text{ W/(m \cdot K)}$
空气温度	313 K
沟内空气初始温度	303 K
对流换热系数	$12.5 \text{ W/(m^2 \cdot K)}$
沟壁表面发射率	0.5
电缆表面发射率	0.6
深层土壤温度	298 K

电缆温度场域,只有电缆包含热源,而电缆的热源包括导体损耗、绝缘层介质损耗以及金属屏蔽层损耗和 铠装层损耗等,这些参数可以根据 IEC60287 标准进 行计算^[15-17]。

2.3 边界条件

a. 流场边界条件。

电缆沟内自然对流形成的流场的边界条件为: 电缆沟内壁和电缆外表面为无滑移边界条件,即速度 为0m/s。

b. 温度场边界条件。

传热问题中常见边界条件的控制方程为:

$$T(x,y)\Big|_{w_1} = f(x,y)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{n}}\Big|_{w_2} = q_n$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{n}}\Big|_{w_3} = h(T - T_f)$$
(8)

其中,T(x,y)为位于边界 w_1 上的点(x,y)的温度(K); f(x,y)为已知边界面上随位置变化的温度函数; λ 为 导热系数($W/(m\cdot K)$);n 为边界法向量; q_n 为热流密 度(W/m^2);h 为对流换热系数($W/(m^2\cdot K)$); T_f 为流体 温度(K); w_1,w_2,w_3 分别为第 1、第 2 和第 3 类积分 边界。

现有研究成果^[4-18]表明,电缆对 1.2 m 外土壤的 温度基本没有影响。因此,取距离电缆沟下侧 1.2 m 的水平直线为下边界,其边界条件为土壤深层温度, 符合第 1 类边界条件;取距离电缆沟外侧 1.2 m 的 2 条垂直直线为左右边界,其边界条件的水平温度梯度 为 0,符合第 2 类边界条件;取地表为上边界,其边界条 件的对流换热系数和空气温度已知,符合第 3 类边界 条件。

2.4 温度场计算

用 COMSOL Multiphysics 软件建立电缆沟敷设

电缆的几何模型,并根据计算得到的损耗参数及相关 参数设置好各求解域控制方程和相应的边界条件, 采用三角形单元自动网格划分法对整个求解区域进 行剖分,网格剖分图如图2所示。



图 2 求解域剖分图 Fig.2 Mesh of solution region

当电缆负载电流 *i*=250 A 时,整个电缆区域温度 场分布如图 3 所示。由图可知,此时电缆的最高运 行温度为 342.501 K。



图 3 电缆温度场分布 Fig.3 Temperature field distribution of cables

2.5 载流量计算

电缆载流量是由电缆缆芯温度确定的,准确计算 电缆缆芯温度具有重要意义。当电缆缆芯温度达到 363 K 时的电流值即为在规定敷设条件下此种电缆 的允许载流量。采用双点弦截法^[18-19]得到电缆缆芯 温度为 90 ℃ 时的允许载流量为 319.7 A。

3 载流量影响因素分析

地下电缆温度场分布的影响因素很多,敷设条件和外界环境等因素的改变都会使得电缆温度场分 布发生变化。对于电缆沟敷设电缆,温度场分布受 沟内空气流场的影响,而电缆沟尺寸和电缆层间距又 会对沟内流场产生影响,现仍以电缆沟敷设6回路型 号为 8.7/15 kV YJV 1×400 的 XLPE 电力电缆为例,分 析电缆沟深度和电缆层间距2个因素对电缆载流量 的影响规律。

3.1 电缆沟深度的影响

电缆沟深度对电缆沟内空气流场和电缆温度场 具有重要影响。当电缆沟宽度和电缆层间距一定 时,电缆沟深度越深,电缆沟的空间越大,电缆沟内 空气的自然对流能力越强,电缆的散热能力也越强, 缆芯温度降低,电缆载流量随之增大。保持电缆沟 宽度为1m和电缆层间距为0.2m不变,电缆沟深度 与电缆载流量的对应关系曲线如图 4 所示。由图可知,在其他敷设参数不变的情况下,电缆载流量随着电缆沟深度的增加而增大,且增大的幅度变大。当电缆沟深度由 0.8 m 增加到 0.9 m 时,电缆载流量由 318 A 增大到 318.8 A;当电缆沟深度由 1.1 m 增加到 1.2 m 时,电缆载流量由 320.7 A 增大到 321.9 A。



图 4 电缆沟深度与电缆载流量的关系 Fig.4 Relationship between trench depth and cable current carrying capacity

3.2 电缆层间距的影响

电缆层间距对电缆沟内空气流场和电缆温度场 也具有重要影响。在电缆沟尺寸一定的条件下,当 电缆层间距增加时,电缆之间的相互热效应减弱,同 时电缆层间空气的自然对流能力增强,电缆散热能力 增强,缆芯温度随之降低,从而电缆的载流量增大。 保持电缆沟截面尺寸为1m×1m不变,电缆层间距 与电缆载流量的对应关系曲线如图5所示。图5显 示了在电缆沟尺寸一定的情况下,电缆载流量随电 缆层间距增加的变化趋势。可以得出以下结论:在 其他敷设参数不变的情况下,电缆载流量随着电缆 层间距的增加而增大,且增大的幅度减小。当电缆 层间距由 0.2 m增加到 0.25 m时,电缆载流量由 321.9 A增大到 324.9 A;当电缆层间距由 0.35 m增加 到 0.4 m时,电缆载流量由 329.7 A增大到 331.8 A。



图 5 电缆层间距与电缆载流量的关系



3.3 层间距变化的电缆沟深度的影响

当上层电缆到电缆沟盖板距离和下层电缆到电缆沟底距离一定时,电缆沟深度变大,电缆层间距随 之增大,电缆沟内空气自然对流散热能力越强,使缆 芯温度降低,电缆载流量增大。保持上层电缆到电 缆沟盖板距离和下层电缆到电缆沟底距离为 0.2 m 不变,电缆层间距变化的电缆沟深度与电缆载流量 的对应关系曲线如图 6 所示。由图 6 可知,此时的 电缆载流量随电缆沟深度增加而增大,且增大的幅 度减小。当电缆沟深度由 0.8 m 增加到 0.9 m 时,电

62

缆载流量由 318 A 增大到 322.1 A;当电缆沟深度由 1.1 m 增大到 1.2 m 时,电缆载流量由 328.8 A 增大 到 331.8 A。图 6 和图 4 对比也可以验证电缆层间距 的增加有利于增大电缆载流量。



图 6 电缆层间距变化的电缆沟深度与电缆 载流量的关系

Fig.6 Relationship between trench depth and cable current carrying capacity when cable layer spacing varies

对上述载流量影响规律进行综合分析可知,电 缆沟深度和电缆层间距的增加均能够增大电缆允许 载流量,但载流量相对增量的大小有所不同。将电 缆沟深度、电缆层间距和电缆层间距变化的电缆沟深 度与电缆载流量的关系按载流量的相对增量进行折 算,即分别计算此3种不同优化类别下电缆沟深度或 电缆层间距每增加10 cm 对应的电缆载流量增量。 得到对应于电缆沟深度类别、电缆层间距类别、电缆 层间距变化的电缆沟深度类别的载流量相对增量分 别为1、5、3.5 A/dm。

可见,在改善电缆沟敷设电缆的散热效果和提高 电缆载流量方面,增加电缆层间距比增大电缆沟深度 能获得更加理想的效果。

4 经济性分析

随着电力工程造价的日益攀升,如何有效地控制 工程造价,逐渐成为各电力企业不得不面临的问题。 因此,在满足提高电缆输送容量要求的基础上,必须 通过经济性分析选择最优敷设方案,最大限度地降低 成本、节约资源。

虽然电缆沟深度的加深会增加电缆载流量,提高电缆利用率,但同时也会增加电缆沟的土建成本。本文根据重庆地区的挖沟土建成本情况,以1000m、2000m和5000m长度的电缆沟为例分别对其经济性进行分析。根据重庆电网建设成本,重庆地区挖沟土建成本取为70元/m³,功率因数取为0.8,并取售电利润为0.1元/(kW·h),下面以电缆沟敷设6回路型号为8.7/15 kVYJV1×400的XLPE电力电缆为例,当电缆沟宽度为1m保持不变,电缆沟深度由0.8m增加到1.2m时,分析了3种不同长度电缆沟增加的土建成本的回收情况,结果如表3所示。

由表 3 可以看出,对于 5 000 m 长的线路 1 a 内就 可以回收建设成本,因此这种方式的经济性适合现场 应用。在实际的电缆增容改造工程中,需要根据电

表	3	不同	司长度	下电缆	沟成	本回收情况
	Та	ab.3	Cost	recover	y for	different
cable trench lengths						

沟长/m	土建成本增加/万元	回收速度/(元·d-1)	回收时间/d
1000	2.8	401	70
2000	5.6	401	140
5000	14	401	350

缆线路的长度以及不同地区电缆运行维护成本,选择 相应的提高载流量的方式。

5 结语

a. 电缆沟深度和电缆层间距增大,电缆允许载流 量也随之增加,但电缆层间距下的电缆载流量相对增 量比电缆沟深度下的值大,即在改善电缆散热效果和 提高电缆载流量方面,电缆层间距优化比电缆沟深度 的优化效果更佳。

b. 通过电缆沟深度的优化来提高电缆载流量, 虽然会使得电缆沟的土建成本增加,但是资本回收时 间短,经济效益高。

c. 对电缆沟敷设方案的选取应遵循的原则为: 首先考虑通过电缆层间距的优化来提高电缆允许载 流量,其次再考虑电缆层间距与电缆沟深度的综合 优化。这对实际电缆沟敷设电缆的优化具有理论指 导意义。

 d.本文考虑电缆沟内空气自然对流(初始速度 u=0)的电缆温度场计算模型可用于将来可能安装通
 风装置(初始速度 u>0)的电缆沟(隧道)的温度场及
 电缆允许载流量的计算。

参考文献:

[1]周华东.电缆沟敷设方式下电缆温度场计算模型[J].四川电力技术,2010,33(4):43-45.

ZHOU Huadong. Calculation model of cable temperature field under cable trench laying[J]. Sichuan Electric Power Technology,2010,33(4):43-45.

- [2] 董小兵,蔡军,江秀臣,等. 10~35 kV XLPE 电缆在线监测技术
 [J]. 电力自动化设备,2005,25(9):20-24.
 DONG Xiaobing,CAI Jun,JIANG Xiuchen,et al. On-line monitoring techniques for 10~35 kV XLPE cable[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(9):20-24.
- [3] 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):42-46. 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):42-46.
- [4] 王有元,陈仁刚,陈伟根,等. 电缆沟敷设方式下电缆载流量计算 及其影响因素分析[J]. 电力自动化设备,2010,30(11):24-29.
 WANG Youyuan,CHEN Rengang,CHEN Weigen, et al. Calculation of trench laying cable ampacity and its influencing factors [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(11):24-29.
- [5] 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,2007,4(11):11-14.

LIU Ying, CAO Xiaolong. Research and application of online temperature and load monitoring for power cables [J]. Transmission and Distribution Technology, 2007, 4(11): 11-14.

- [6] GELA G, DAI J J. Calculation of thermal fields of underground cables using the boundary element method [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 5(3):1341-1347.
- [7] 梁永春,孟凡凤,王正刚,等. 土壤直埋电缆群额定载流量的计算
 [J]. 高压电器,2006,42(4):244-246.
 LIANG Yongchun,MENG Fanfeng,WANG Zhenggang,et al. Capacity calculation for groups of buried cable[J]. High Voltage Apparatus,2006,42(4):244-246.
 [8] 周秧,周晓虎,谭春力,等. 场路结合法求解地下高压电缆载流量
- [8] 向秧,向吃虎,罩春刀,等. 场路结合法水解地下高压电缆软流重 [J]. 现代电力,2008,2(1):49-52.

ZHOU Yang,ZHOU Xiaohu,TAN Chunli,et al. Computation of ampacity of underground high voltage cables based on combination of temperature field and heat circuit[J]. Modern Electric Power,2008,2(1):49-52.

- [9] ANDERS G J, CHAABAN M, BEDARD N, et al. New approach to ampacity evaluation of cables in ducts using finite element technique[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2(3): 969-975.
- [10] 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 Fanfeng,LI Xianglong,XU Yanfei,et al. Numerical computation of temperature field and ampacity of underground

cables[J]. Insulating Materials,2006,39(4):59-61.
[11] 孟庆民. 地下电缆温度场的场路结合算法[J]. 电网技术,2009,33 (20):193-196.

MENG Qingmin. A temperature field and heat circuit integrated numerical calculation method for underground cable temperature field[J]. Power System Technology, 2009, 33 (20): 193-196.

[12] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001: 1-10.

[13] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,

2006:41-45,205-206,395-404.

- [14] 梁永春,王忠杰,刘建业,等. 排管敷设电缆群温度场和载流量数值计算[J]. 高电压技术,2010,36(3):763-768.
 LIANG Yongchun,WANG Zhongjie,LIU Jianye, et al. Numerical calculation of temperature field and ampacity of cables in ducts[J]. High Voltage Engineering,2010,36(3):763-768.
- [15] International Electrotechnical Commission. IEC60287-1 Calculation of the current rating-part 1:current rating equations(100% load factor) and calculation of losses[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2006.
- [16] International Electrotechnical Commission. IEC60287-2 Calculation of the current rating-part 2:thermal resistance[S]. Geneva,Switzerland:IEC,2001.
- [17] International Electrotechnical Commission. IEC60287-3 Calculation of the current rating-part 3:sections on operating conditions[S]. Geneva, Switzerland; IEC, 1999.
- [18] 付永长,张文斌,陈涛,等. 不规则排列电缆温度场及载流量计 算[J]. 电网技术,2010,34(4):173-176.
 FU Yongchang,ZHANG Wenbin,CHEN Tao, et al. Calculation on temperature field and current-carrying capacity of irregularly arranged cables[J]. Power System Technology,2010,34(4): 173-176.
- [19] 苏慧娟,吴开谡,江新华. 牛顿弦截法预估校正迭代格式的收敛 阶[J]. 数学的实践与认识,2006,36(4):164-168.
 SU Huijuan,WU Kaisu,JIANG Xinhua. The convergence order of Newton secant method predictor-corrector iterative form[J]. Mathematics in Practice and Theory,2006,36(4):164-168.

作者简介:

杨永明(1958-),女,重庆人,教授,博士研究生导师,主要 研究方向为电气设备监测及故障诊断(E-mail:yangyym@cqu. edu.cn);

程 鹏(1987-),男,湖北麻城人,硕士研究生,主要研究 方向为电气设备故障诊断(E-mail:chengpeng19870825@163. com)。

Cable heat dissipation considering air flow field, its influencing factors and economical efficiency

YANG Yongming¹, CHENG Peng¹, CHEN Jun², YANG Fan¹, LIU Xingmou¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,

Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Grid Maintenance Branch Company

of Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 400015, China)

Abstract: The calculation model of cable temperature field considering the influence of flow field is established according to the theories of heat transfer and the temperature field boundary conditions of cable in trench are determined. Its accuracy is verified by an example of six-loop cables in trench. The model can also be used for the temperature field calculation of cable in tunnel. The influences of trench depth and cable layer spacing on the cable permissible current carrying capacity are studied and the economical efficiency of cable trench laying schemes is analyzed combined with the construction cost. Calculated results show that, in increasing the current carrying capacity of cable by improving its heat dissipation, the optimization of cable layer spacing has better effect than the optimization of cable trench depth, and proper optimization of cable trench laying scheme, the optimization of cable layer spacing is superior to the integrated optimization of cable layer spacing and cable trench depth.

Key words: electric cables; trench; flow fields; temperature field; current carrying capacity; construction cost; models