

基于有限元的综合管廊电缆温度场分布研究

刘永莉¹,熊豪文¹,肖衡林¹,武明虎²

(1.湖北工业大学土木建筑与环境学院,湖北 武汉 430068;2.湖北工业大学电气与电子工程学院,湖北 武汉 430068)

摘要:针对综合管廊中电缆运行时存在温度较高导致灾害的问题,开展综合管廊电缆运行时温度场分布及影响因素研究。通过 ANSYS 建立有限元数值模型,研究管廊电缆温度场分布规律,分析电缆缆芯层间距、支架层间距以及电流对电缆温度场分布的影响。研究表明:当电缆、支架层间距大于 0.6 m 时,对电缆温度场分布影响较小,电缆布置间距建议取为 0.2 m,支架层间距亦为 0.2 m;管廊电缆温度场影响半径为 0.83 m,与电缆电流、电缆间距和支架层间距无关;电缆电通量与电缆运行时温度、电缆缆芯间距呈 ExpAssoc 函数关系,可通过在线监测电缆温度场分布推算电缆载流量大小,对电缆负荷进行监控,确保电缆安全运行。

关键词:综合管廊;电缆;有限元;温度场;影响范围;载流量

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.06.009 中图分类号:TM75 文章编号:1673-9140(2022)06-0082-09

Study on temperature field distribution of pipe gallery cable based on finite element method

LIU Yongli¹, XIONG Haowen¹, XIAO Henglin¹, WU Minghu²

(1.School of Civil Engineering, Architecture & the Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2.School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to solve the problem that high temperature of cables in comprehensive pipe gallery leads to disaster, the temperature field distribution and influencing factors of cables in comprehensive pipe gallery during operation are studied in this paper. Based on the finite element numerical model established by ANSYS, the distribution rule of temperature field of cable in pipe gallery is studied, and the influence of the distance between cable core layers, the distance between support layers and the current on the distribution of temperature field of cable is analyzed. The results show that when the distance between cables and support layers is greater than 0.6 m, the influence on the temperature distribution of cables is small. The cable spacing is suggested to be 0.2 m, and the distance between support layers is suggested to be 0.2 m. The main influence radius of cable temperature field in pipe gallery is 0.83 m, which is independent of cable current, cable spacing and support layer spacing. The electric flux of the cable is an ExpAssoc function related to the temperature of the cable during operation and the distance between the cable cores. The distribution of temperature field of the cable can be monitored online to calculate the size of the cable flow and monitor the load to ensure the safe operation of the cable.

Key words: comprehensive pipe gallery; cable; finite element; temperature field; influence scope; carrying capacity

收稿日期:2021-01-26;修回日期:2021-07-26

基金项目:湖北省技术创新专项(重大项目)(2018ACA134);国家自然科学基金(51808203)

通信作者:肖衡林(1977—),男,博士后,教授,主要从事分布式光纤传感技术的应用等研究;E-mail: xiao-henglin@163.com

综合管廊对改善城市环境和确保道路功能充分发挥等方面具有显著作用,得到越来越广泛的应用。管廊电力舱(电缆沟)中电缆在运行过程中会产生一定热量,这部分热量如果不及时散出很容易在管廊中聚集,导致管廊内温度过高,严重的会导致火灾等重大事故^[1]。综合管廊中还敷设有通信、燃气、供热等各种管线,温度升高也不利于各种管线安全稳定运行,甚至会导致各个管线运行瘫痪^[2]。

研究综合管廊电缆温度场分布规律对保证电缆线路及其他市政设施安全运行至关重要。国内外学者通过试验和数值模拟对电缆温度场分布进行了研究。文献[3]分析了温度场分布与电缆在土壤中排列深度和土壤热导率的关系;文献[4-5]通过研究电缆敷设方式对温度场分布和载流量的影响,得到电缆敷设方式对电缆温度场分布影响很大、敷设电缆密度越高电缆工作温度越大等结论;文献[6-9]对如何计算地下电缆稳态温度场进行了研究,研究表明,采用有限元法计算地下电缆温度场是比较准确可靠的;文献[10]对城市管廊中电缆运行热环境进行研究,研究表明,正常情况下电缆缆芯温度是低于允许工作温度的,并且随着电缆沟深和电缆层距离增大,电缆沟散热能力增强,电缆载流量增大;文献[11]针对 110 kV 电缆进行仿真分析,得到电缆载流量与电缆间距对电缆导体温度的影响规律;文献[12]采用有限元法计算了直埋式电缆温度场以及电场分布,得到电缆温度场与电场之间呈近似线性关系的结论。

综上所述,目前针对管廊电缆相关研究主要集中于计算电缆温度场的方法、电缆载流量计算、电缆温度场分布及单一变量影响因素分析等,对管廊电缆运行时多因素下温度场分布和电缆运行安全控制研究较少。通过管廊电缆有限元计算可以确定管廊电缆温度场分布及普遍规律,对管廊电缆布置和电缆温度监控设计有重要意义^[13-17]。目前,管廊电缆温度场研究方法主要有数值模拟、实验以及理论分析,实验影响因素难控制、周期长且实验资源损耗巨大,理论分析任务量大且问题不能太复杂,所以应用相对较少。数值模拟是目前研究管廊电缆温度场分布应用较为有效的方法,它不仅可以节约资源,而且还能排除实验的外界干扰,轻松实现实验工况变化,得到较为精确的结果^[18]。因此,本文拟采用 AN-

SYS 大型有限元软件建立电缆沟模型,研究电缆缆芯层间距、支架层间距、电流等参数对电缆温度场分布的影响,为综合管廊电缆的布置、支架层设计和电缆温度监控设计提供基础依据。

1 有限元模型介绍

1.1 基本原理

本文采用 ANSYS 大型有限元软件研究管廊电缆温度场分布,其中,热-电耦合模块能够描述由电缆运行时产生温度场分布问题,可以很好地解决温度场分布随电缆间距、支架层间距、电流变化问题。

1.1.1 控制方程

1) ANSYS 的基本思想是根据质量、动量和能量守恒定律建立相应的基本方程。对应的方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} = -\nabla \rho + \nabla \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} \quad (2)$$

$$\rho \frac{dh}{dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho S_h \quad (3)$$

式(1)~(3)中 ρ 为气体密度, kg/m^3 ; ∇ 为矢量微分算子符号; \mathbf{u} 为速度矢量, m/s ; \mathbf{g} 为重力加速度, m/s^2 ; \mathbf{f} 为流体单位质量所受的体积力矢量; $\boldsymbol{\tau}$ 为流体粘性应力张量, N ; h 为比焓, J/kg ; T 为温度, K ; ρS_h 为包含黏性耗散项的发热项; k 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

2) 导热方程。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{\rho c} \quad (4)$$

式中 α 为热扩散率, m^2/s ; T 为介质温度, K ; q_v 为微元体内单位时间、单位体积的发热量, W/m^3 ; ρ 为流体的密度, kg/m^3 ; c 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

1.1.2 边界条件

根据边界上热流的平衡,导出边界上的边界条件。边界条件主要有 3 类:恒壁温、恒热流和对于物体与周围流体换热的条件。这里,取边界的垂直方向为 x 轴, $x=0$ 为边界,各自边界的控制方程为

$$T_{x=0} = T_s(t) \quad (5)$$

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = q(t) \quad (6)$$

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = h \{ T - T_s(t) \} \quad (7)$$

式(5)~(7)中 k 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T 为边界上点的温度, K ; q 为热流密度, W/m^2 ; h 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_s 为流体温度, K 。

由以上条件结合已建立的管廊电缆敷设模型可以确定计算模型的边界条件, 此次计算以管廊电缆沟左、右两侧和上、下两侧为边界条件。

1.2 参数选取

1.2.1 管廊电缆物理和环境参数

以 8.7 kV/10 kV YJV 1×400 单芯交联聚乙烯(XLPE)低压电缆为研究对象^[10], 允许工作温度为 90 °C (363 K)。电缆结构和电缆沟环境参数如表 1 所示。

表 1 电缆结构、电缆沟环境参数

Table 1 Cable structure, cable trench environmental parameters

导体直径/mm	绝缘层厚度/mm	保护层厚度/mm	电缆外径/mm	沟内空气温度/K	对流换热系数/ $(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}))$
23.8	5.9	2.3	40.2	293	11

1.2.2 模型基本参数

根据文献[19-20]等相关规范对综合管廊电力舱室设计参数的基本规定, 本文选取电缆沟截面积为 1.7 m×2.7 m, 电缆沟壁厚为 0.15 m, 沟盖厚为 0.15 m; 双根电缆的缆芯间距为 0.1 m, 电缆电流值为 250 A^[10], 小于电缆载流量; 在稳态运行中, 沿电缆轴几乎没有温度梯度, 电缆沟壁长度对电缆温度场分布无影响^[4], 此次计算取电缆沟长为 2 m。模型涉及到混凝土(沟壁)、电缆(缆芯、绝缘层、保护层)、空气 5 种材料, 其物性参数如表 2 所示。

表 2 材料物性参数

Table 2 Physical properties of the material

材料	密度/ (kg/m^3)	比热容/ $(\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$	导热系数/ $(\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$	电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$
混凝土	2 300	970	1	—
铜合金	8 300	385	401	1.694×10^{-8}
交联聚乙烯	950	2 300	0.28	—
聚氯乙烯	1 380	900	0.16	—
空气	1.225	1 006.4	0.024 2	—

1.3 模型建立

1.3.1 假设条件

为求解方便, 忽略次要因素, 本文作出如下假设^[4]: ①电缆和电缆沟环境材料性质都是各向同性的均匀介质, 材料物理性质是恒定的; ②仅考虑电缆

的平衡运行, 且多根电缆运行时通过电流相同; ③电缆金属屏蔽层或护套层单点接地, 不考虑屏蔽层环流损耗; ④地下综合管廊埋深较浅, 壁面受气温影响较大, 假设管廊电缆沟壁温为空气温度, 电缆沟内部电缆均匀散热; ⑤仅模拟管廊电缆温度场稳态分布。

1.3.2 几何模型

管廊电缆沟支架层上并排布置双根或多根电缆时, 相较于单根电缆, 多根电缆温度场相互影响, 情况更为复杂。本文分别建立单根、双根电缆模型, 分析电缆温度场分布。电缆沟中电缆是引起温度场变化的主要原因, 其他因素影响较小, 为方便计算和规律研究选取电缆在管廊中心布置, 由于角钢支架影响较小, 在三维模型中被忽略。如图 1、2 所示(管廊尺寸为 2 m×2 m×3 m), 管廊电缆沟三维模型看起来像是电缆漂浮在空中。

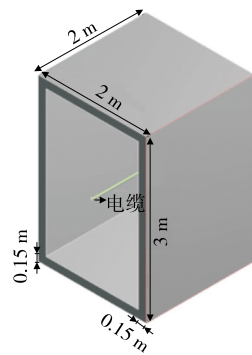


图 1 单根电缆铺设几何模型

Figure 1 Geometric model of single cable laying

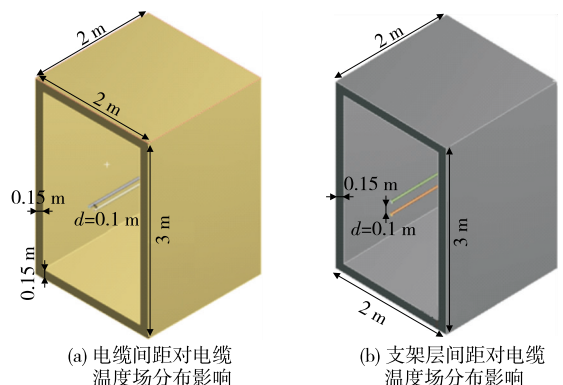


图 2 双根电缆铺设几何模型

Figure 2 Double cable laying geometric model

1.3.3 网格划分

ANSYS 大型有限元软件支持的网格单元形状包括自由三角形、四边形、六边形等, 并支持扫掠划分等特殊网格划分方式。由于电缆沟模型很规则,

因此,本文选用扫掠和尺寸划分网格建立有限元模型。电缆沟网格划分结果如图 3 所示。

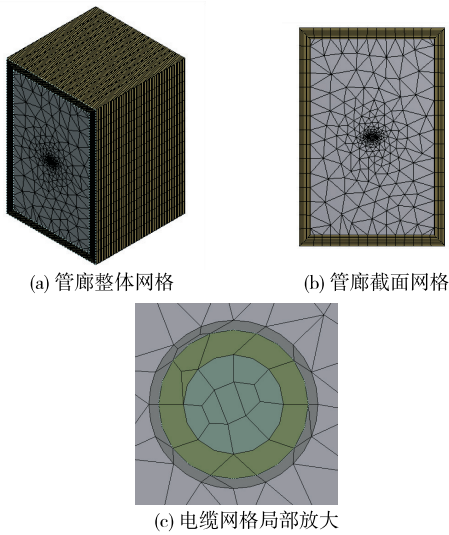


图 3 模型网格划分

Figure 3 Model meshing diagram

1.4 计算工况

为了研究电缆缆芯间距(d)、管廊电缆电流(I)和支架层间距(s)对电缆温度场分布的影响,设计不同种工况,如表 3 所示。

表 3 设计工况

Table 3 Simulation working conditions

序号	d/m	s/m	I/A	序号	d/m	s/m	I/A
1	0.1	—	250	20	0.1	—	240
2	0.2	—	250	21	0.1	—	260
3	0.3	—	250	22	0.1	—	270
4	0.4	—	250	23	0.1	—	280
5	0.5	—	250	24	0.1	—	290
6	0.6	—	250	25	0.2	—	240
7	0.7	—	250	26	0.3	—	240
8	0.8	—	250	27	0.4	—	240
9	—	0.1	250	28	0.5	—	240
10	—	0.2	250	29	0.6	—	240
11	—	0.3	250	30	0.7	—	240
12	—	0.4	250	31	0.8	—	240
13	—	0.5	250	32	0.2	—	230
14	—	0.6	250	33	0.3	—	230
15	—	0.7	250	34	0.4	—	230
16	—	0.8	250	35	0.5	—	230
17	0.1	—	210	36	0.6	—	230
18	0.1	—	220	37	0.7	—	230
19	0.1	—	230	38	0.8	—	230

2 计算结果及分析

2.1 单根电缆温度场分布

如图 4 所示,电缆在缆芯层的温度最高可达到 $64.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ (338.02 K),随着电缆缆芯层向外传递,温度逐渐减小。由计算可知,单根电缆温度场分布近似圆周向四周传递,愈接近温度场影响范围,临界处呈椭圆形分布。为了探究单根电缆温度场的影响范围和分布规律,故在管廊电缆沟截面 $Y=1.5\text{ m}$ 处沿电缆缆芯层取一路径,如图 5 所示。

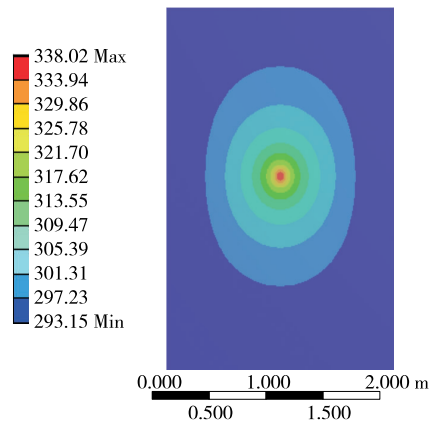


图 4 单根电缆温度场分布云

Figure 4 Temperature field distribution cloud map of single cable

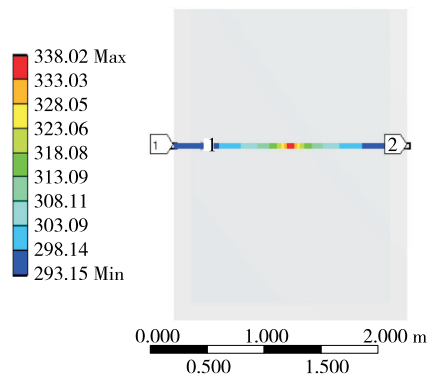


图 5 单根电缆温度场随路径分布云

Figure 5 Cloud image of single cable temperature field distribution along the path

如图 6 所示,以电缆缆芯层为中心,电缆温度场对称分布,在 L 为 1 m 时温度最高达到 $64.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ (本文中 L 为管廊截面纵向 $Y=1.5\text{ m}$ 处与管廊截面边界的水平距离)温度场逐渐向两端传递;随着与缆芯层距离的增大,单根电缆温度场分布图的斜率

逐渐减小,说明在电缆运行时,电缆温度场分布对靠近电缆区域影响较大,对逐渐远离电缆的区域,影响逐渐减小。图6中 $L \leq 0.17$ m、 $L \geq 1.83$ m处这两段曲线温度梯度非常小,且在 $L = 0.17$ 、 1.83 m两处温度接近环境温度,此时管廊电缆温度场对周围环境无影响,故可推断出管廊单根电缆运行时温度场的影响半径^[21]为0.83 m(本文将电缆温度影响范围临界半径也定义为影响半径)。

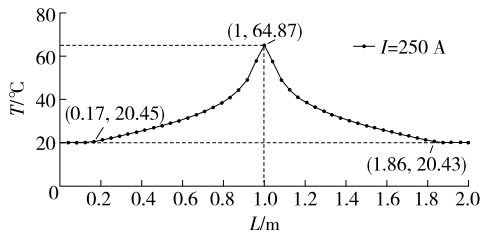


图6 单根电缆温度场分布

Figure 6 Temperature distribution diagram of single cable

2.2 双根电缆温度场分布

第1组工况计算结果如图7所示,双根电缆温度场分布以双根电缆为中心,向四周传递,温度逐渐减小。双根电缆与单根电缆温度场分布不同的是电缆间温度场相互影响,主要表现在电缆缆芯间温度比其他分布区域温度高;另外双根电缆运行温度最高为82.15 °C(355.30 K),且电缆周围分布温度场较单根电缆温度高,究其原因主要是双根与单根电缆相比增加了电缆之间的热交互。在管廊截面 $Y = 1.5$ m处沿双根电缆缆芯取一路径,如图8所示,双根电缆温度最高达到82.15 °C,在缆芯层间达到77.98 °C。

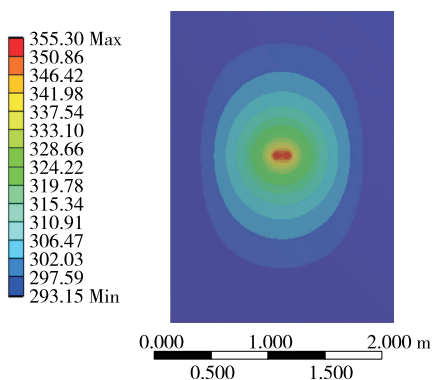


图7 双根电缆温度场分布云

Figure 7 Double cables temperature field distribution cloud map

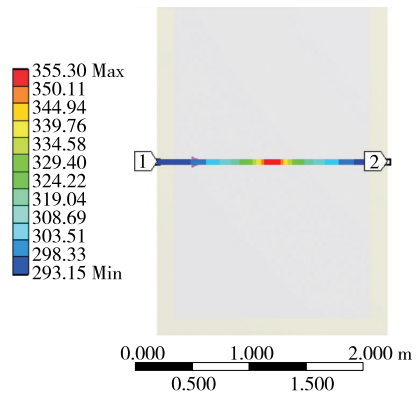


图8 双根电缆温度场随路径分布云

Figure 8 Cloud image of temperature field distribution of two cables along the path

以双根电缆缆芯层为中心,温度场对称分布,如图9所示。双根电缆温度场分布规律同单根电缆温度场分布类似,不同的是, $L \leq 0.125$ m、 $L \geq 1.875$ m处这两段温度接近环境温度,此时温度场对周围环境无影响,可推断出双根电缆运行时温度的影响半径为0.875 m。由于双根电缆温度场之间的热交互,致使电缆温度场的温度升高,综合管廊电缆温度场的影响半径基本不变。

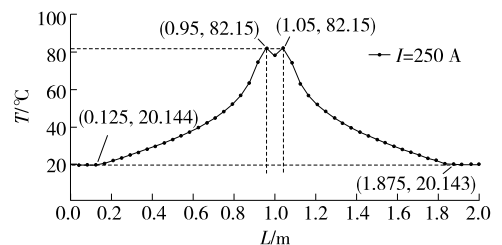


图9 双根电缆温度场分布

Figure 9 Temperature field distribution diagram of two cables

3 管廊电缆温度场分布影响因素分析

3.1 电流大小对电缆温度场分布影响

第17~24组工况中以双根电缆并排布置为例,在电缆间距 $d = 0.1$ m不变的前提下,沿管廊沟壁 $Y = 1.5$ m处取一路径,分析电流对电缆温度场分布影响。电流对电缆温度场分布的影响规律如图10所示,离缆芯层距离愈远,温度传递值逐渐降低,当 $L = 0.17$ 、 1.83 m时,温度接近环境温度,影响半径最大为0.83 m。电流对双根电缆运行时温度场最高温度 T_{\max} 的影响曲线如图11所示。

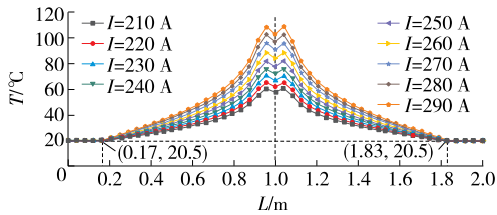


图 10 电流对电缆温度场分布的影响

Figure 10 Influence of current on cable temperature field distribution

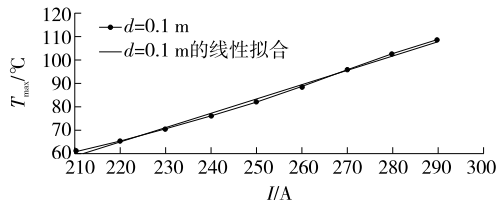


图 11 电流对电缆运行最大温度 T_{max} 的影响

Figure 11 Influence diagram of current on the maximum temperature of cable operation T_{max}

计算结果表明,电流和电缆运行最大温度 T_{max}

之间呈线性分布关系($I \geq 130$ A):

$$T_{max} = -73 + 0.6I \quad (8)$$

式中 T_{max} 为电缆运行时最大温度, $^{\circ}\text{C}$; I 为通过电缆电流, A。电流每增加 10 A, 电缆运行温度增加 6°C 。

3.2 电缆间距对温度场分布影响

在电流值不变的前提下,分析第 1~8 组工况中电缆间距对电缆温度场分布的影响。双根电缆缆芯层间距对温度场分布的影响规律如图 12 所示。 $L=1$ m 处发现随着电缆间距增大,温度梯度逐渐减小,说明缆芯层间热交互减小;当 $L=0.125$ 、 1.875 m 时,温度几乎为环境温度,说明此时温度场对周围环境无影响,双根电缆温度场影响半径最大为 0.875 m,与电缆间距无关。

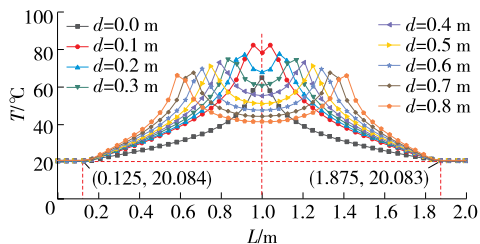


图 12 双根电缆缆芯间距对温度场分布的影响

Figure 1 Influence diagram of distance between two cable cores d on temperature field distribution

如图 13 所示,随着电缆缆芯间距的增大,曲线斜率逐渐减小,最大温度变化梯度逐渐减小。当 $d=0.6$ 、 0.7 、 0.8 m 时, $T_{max} = 69.62$ 、 68.08 、 66.61°C ,说明间距 $d \geq 0.6$ m 时温度梯度变化范围小于 1.6°C ,对电缆运行时的最大温度 T_{max} 影响不大。当电缆间距为 0.1 、 0.2 m 时,电缆运行最高温度分别为 82.15 、 77.86°C ,随着电缆间距的增大,电缆运行最高温度逐渐减小^[11]。由于电缆运行时温度限值为 90°C ,为了保证电缆有足够的空间,故布置电缆时电缆间距 d 宜为 $0.2 \sim 0.6$ m。

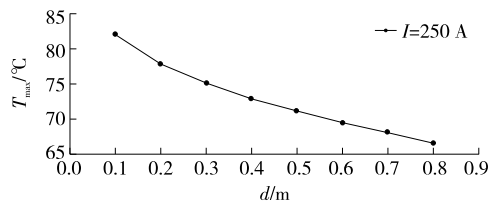


图 13 双根电缆缆芯间距对电缆运行时最大温度 T_{max} 的影响

Figure 13 Influence diagram of double cable wire spacing on maximum temperature of cable operation T_{max}

在第 1~8、25~38 组设计工况中,分析电缆缆芯间距与电流复合因素作用下对电缆温度场分布的影响规律。如图 14 所示,为了探究电缆缆芯间距、电流与电缆运行时最大温度 T_{max} 的关系,取不同电流下双根电缆运行时最大温度随缆芯间距变化的数据进行非线性拟合,得到电缆缆芯间距、电流与电缆运行时最高温度之间关系。

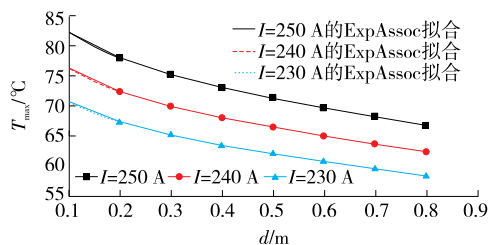


图 14 双根电缆缆芯间距对电缆运行最大温度 T_{max} 影响的拟合曲线

Figure 14 Fitting curve of the relationship between cable core spacing and maximum operating temperature T_{max}

如表 4 所示,用 ExpAssoc 函数拟合曲线几乎与原点线图重合,相关度 R^2 近似为 1,可高度表达电缆运行时电缆缆芯间距和电缆运行时最大温度 T_{max} 之间的关系,以通过电缆电流 $I=250$ A 时为

例,关系式为

$$y = y_0 + A_1 \cdot (1 - \exp(-\frac{x}{t_1})) + A_2 \cdot (1 - \exp(-\frac{x}{t_2})) \quad (9)$$

式中 x 为电缆缆芯间距, m, y 为电缆运行最高温度, $^{\circ}\text{C}$; $y_0 = 90.53$ 、 $A_1 = -9$ 、 $t_1 = 0.24$ 、 $A_2 = -26.76$ 、 $t_2 = 3$ 。

表 4 电缆缆芯间距与电缆运行最大温度 T_{\max} 关系

Table 4 The relationship between cable core spacing d and the maximum cable operating temperature T_{\max}

I/A	y_0	A_1	t_1
250	89.880 51±0.651 87	-9.736 46±0.704 94	0.112 71±0.019 12
240	83.319 01±0.425 98	-9.089 8±0.374 93	0.109 72±0.012 14
230	76.213 06±0.139 41	-1.788 6×10 ⁸ ±...	1.549 01×10 ⁷ ±...
I/A	A_2	t_2	R^2
250	-40.592 90±13.836 83	1.973 62±1.036 76	0.999 98
240	-42.534 53±13.057 34	2.416 70±1.036 05	0.999 99
230	-8.774 52±0.089 31	0.140 03±0.004 26	0.999 99

根据图 14,由式(9)计算得出,不同电流下电缆缆芯间距与最大温度之间关系的分布规律显著,电流每增加 10 A,相应间距下电缆运行时最大温度上升 5~6 $^{\circ}\text{C}$,反之,电流每减小 10 A,相应间距下电缆运行时最大温度下降 5~6 $^{\circ}\text{C}$,与电流大小对电缆温度场分布影响的研究结论基本吻合。

综上所述,电缆间距对电缆温度场分布影响较大,间距过小会引起电缆温度过高,超过安全温度控制限值,间距过大则造成支架层上电缆布置空间的资源浪费,故对于 10 kV 及以下电缆(XLPE),电缆间布置间距宜为 0.2 m。在实际施工过程中,若支架层可利用空间达不到预期电缆的布置要求,则可根据本文研究结论、电缆间距与运行时最大温度关系公式,适当调整电缆布置间距,但不得小于 0.1 m。并且在实际工程中,当测量出管廊电缆运行状态下的温度以及电缆电流中的任何一个参数,即可根据以上研究成果估算出电缆的另外一个参数,估算电缆载流量同时也兼顾到对电缆安全的检测。

3.3 支架层间距对温度场分布影响

在第 9~16 组工况中,忽略电缆间距的影响,对电缆温度场分布进行定量分析。为了更好地获取电缆温度场的分布,在管廊电缆沟截面 $X=1$ m 处沿

电缆缆芯层取一路径。当电缆电流 $I=250$ A 时,支架层间距对电缆温度场分布的影响规律如图 15 所示,结果显示:在 $L=1.5$ m 处,随着支架层间距增大,温度梯度逐渐减小,说明缆芯间热交互逐渐减小。当 L 分别取 0.19、2.81 m 时,区域温度均为 20.5 $^{\circ}\text{C}$,接近环境温度,说明此时温度场分布对周围环境无影响,故电缆温度影响半径为 1.3 m,与支架层间距无关。

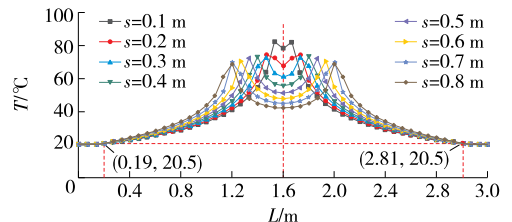


图 15 支架层间距对电缆温度场分布影响

Figure 15 Influence diagram of bracket spacing s on cable temperature field distribution

支架层间距对电缆运行时 T_{\max} 的影响如图 16 所示,随着支架层间距增大,电缆运行时最高温度逐渐减小, $s=0.2$ m 时电缆运行最高温度为 78.32 $^{\circ}\text{C}$, $s=0.3$ m 时电缆运行最高温度为 75.46 $^{\circ}\text{C}$;从整条曲线特征得到,支架层间距增大到 0.6 m 时对电缆温度场分布几乎无影响。综上所述,考虑到电缆运行时安全控制限值和最大限度利用管廊电缆沟空间,支架层间距为 0.2 m 最为适宜。

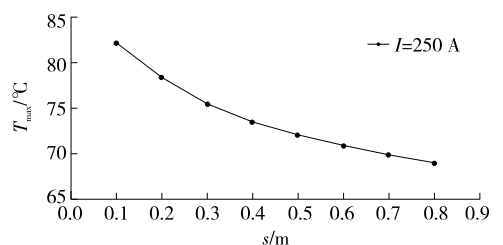


图 16 支架层间距对双根电缆运行最大温度 T_{\max} 的影响

Figure 16 Influence diagram of bracket spacing on the maximum operating temperature T_{\max} of two cables

4 结语

本文采用 ANSYS 大型有限元软件,建立综合管廊电缆模型,对管廊电缆温度场进行全尺寸模拟,通过设定不同工况,研究不同间距以及电流的取值对管廊电缆温度场分布的影响。

1)管廊 XLPE 电缆运行时温度场对靠近电缆

缆芯层范围内的区域影响较大,对远离电缆缆芯层区域影响较小;综合各因素作用下的电缆温度场影响半径,电缆监测设计中建议温度传感器布置在半径为 0.83 m 的影响范围内。

2)管廊电缆运行时温度随电缆间距的增大而逐渐减小,为了保证电缆运行安全,在管廊中 XLPE 电缆并排平行布置且数量不多时,建议多根电缆间距为 0.2 m。

3)随着支架层间距增大,对电缆温度场的影响越来越小。支架层间距为 0.2 m 时电缆有足够温度安全空间,在管廊中敷设 10 kV 及以下的 XLPE 电缆时,建议电缆支架层的间距取 0.2 m。

4)对于所选的 10 kV 单芯 XLPE 电缆,敷设环境温度为 20 °C,得到了电缆运行温度与载流量定量关系式 $T_{\max} = -73 + 0.6I$ ($I \geq 130$ A)。当测量出管廊电缆运行状态下温度和电缆电流中的任何一个参数时,可根据定量关系式估算出电缆另外一个参数值,估算电缆载流量的同时也兼顾到对电缆安全的检测。

在实际应用中,管廊电缆日常运行时需要对电缆的运行信息进行监测,保证其安全稳定运行。光纤温度传感技术可以对电缆运行时温度进行实时监测^[13-17],根据其关系获取电缆载流量,及时对电缆负荷和运行温度进行监控,避免事故发生。光纤布置对故障点温度检测显得尤为重要^[22-23]。本文对管廊电缆温度影响半径进行分析,为基于光纤测温管廊电缆监测系统设计中光纤传感器布置提供参考和计算依据。

参考文献:

- [1] 郭佳奇,钱源,王珍珍,等.城市地下综合管廊常见运维灾害及对策研究[J].灾害学,2019,34(1):27-33.
GUO Jiaqi, QIAN Yuan, WANG Zhenzhen, et al. The common operational disasters and countermeasures of utility tunnel in Urban[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 27-33.
- [2] 李德强.综合管沟设计与施工[M].北京:中国建筑工业出版社,2009:10-15.
- [3] TYKOCKI J, YUE Y, JORDAN A. Analysis of thermal field in 110 kV cable systems[J]. Przeglad Elektrotechniczny, 2012, 88(6): 142-145.
- [4] XIONG L, CHEN Y H, JIAO Y, et al. Study on the effect of cable group laying mode on temperature field distribution and cable ampacity[J]. Energies, 2019, 12(17): 3397.
- [5] 王雅妮,张洪亮,吴建东,等.不同敷设方式下高压直流电缆温度场与电场仿真计算研究[J].绝缘材料,2017,50(7):71-78.
WANG Yani, ZHANG Hongliang, WU Jiandong, et al. Simulation and calculation of temperature field and electric field distribution of HVDC cable under different laying modes[J]. Insulating Materials, 2017, 50(7): 71-78.
- [6] 陈玉,孙冠姝,张靖雯,等.基于有限元分析的光纤复合低压电缆热场仿真和结构优化[J].智慧电力,2021,49(10):1-7.
CHEN Yu, SUN Guanshu, ZHANG Jingwen, et al. Thermal field simulation and structure optimization of optical fiber composite low voltage cable based on finite element analysis[J]. Smart Power, 2021, 49(10): 1-7.
- [7] 梁正波,李丽君,彭超,等.暂态负荷下高压直流海底电缆热传递过程[J].中国电力,2020,53(9):133-140.
LIANG Zhengbo, LI Lijun, PENG Chao, et al. Heat transfer process of HVDC submarine cables under transient load[J]. Electric Power, 2020, 53(9): 133-140.
- [8] 王巧玲,杨玉平,梁永春.基于热耦合的 10 kV XLPE 地下电缆群温度场数值计算[J].电工电能新技术,2012,31(2):27-30.
WANG Qiaoling, YANG Yuping, LIANG Yongchun. Electro-thermal coupling computation of underground power cables[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2012, 31(2): 27-30.
- [9] 陈振新,徐蓓蓓,乐彦杰,等.XLPE 交流电缆线路改为直流运行的载流量设计与分析[J].高压电器,2020,56(4):165-171.
CHEN Zhenxin, XU Beibei, LE Yanjie, et al. Design and analysis of current ratings of XLPE cable AC lines transformed into DC operation[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 165-171.
- [10] 李红雷,俞瑾华,蒋晓娟,等.城市管廊中电缆线路运行热环境研究[J].电网与清洁能源,2017,33(7):85-89.
LI Honglei, YU Jinhua, JIANG Xiaojuan, et al. Study on the thermal environment of cable operation in urban corridors[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(7): 85-89.

- [11] 茅大钧,肖礼,刘国建.基于有限元分析的埋地电缆温升影响因素研究[J].电力科学与技术学报,2016,31(4):136-142.
MAO Dajun, XIAO Li, LIU Guojian. Study on the influence factors of temperature rise in underground cable based on finite element analysis[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4): 136-142.
- [12] 魏建华,赵文彬,李敏,等.基于有限元的低风压导线发热分析[J].电力系统保护与控制,2021,49(19):56-64.
WEI Jianhua, ZHAO Wenbin, LI Min, et al. Heating analysis of a low-wind-pressure conductor based on finite elements[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 56-64.
- [13] 彭超,赵健康,苗付贵.分布式光纤测温技术在线监测电缆温度[J].高电压技术,2006,8(8):43-45.
PENG Chao, ZHAO Jiankang, MIAO Fugui. Distributed temperature system applied in cable temperature measurement[J]. High Voltage Engineering, 2006, 8(8): 43-45.
- [14] 郭旭,王青山,何星躲,等.配电网电缆导体温度趋势仿真与系统设计[J].供用电,2020,37(10):83-88.
GUO Xu, WANG Qingshan, HE Xingduo, et al. Simulation and system design of cable conductor temperature in distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(10): 83-88.
- [15] 刘贺晨,张铭嘉,刘云鹏,等. ± 160 kV交联聚乙烯直流海底电缆动态载流特性试验及仿真研究[J].电测与仪表,2020,57(14):19-27.
LIU Hechen, ZHANG Mingjia, LIU Yunpeng, et al. Experimental and simulation study of dynamic ampacity characteristics for ± 160 kV XLPE DC submarine cable[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14): 19-27.
- [16] 张振宇,程诺,罗翔,等.10 kV配电网高温超导电缆电热耦合模型仿真分析[J].高压电器,2020,56(11):203-209.
ZHANG Zhenyu, CHENG Nuo, LUO Xiang, et al. Electrical-thermal coupling model analysis of high temperature superconducting power cable utilized in 10 kV power distribution system[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 203-209.
- [17] 蒲路,段玮,孙骥,等.基于有限元法的单芯电缆接头线芯温度计算[J].电网与清洁能源,2021,37(2):57-63.
PU Lu, DUAN Wei, SUN Ji, et al. Core temperature calculation of single-core cable joints based on FEM[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(2): 57-63.
- [18] 王方舜.城市综合管廊电缆火灾CFD数值模拟研究[J].武警学院学报,2017,33(8):14-18.
WANG Fangshun. Effect of utility tunnel fire compartment on the timing of smoke exhaust & servicemen evacuation in cable fires[J]. Journal of the Armed Police Academy, 2017, 33(8): 14-18.
- [19] GB 50838—2012.综合管廊工程技术规范[S].
- [20] GB 50217—2007.电力工程电缆设计规范[S].
- [21] 刘永莉,黄思璐,肖衡林,等.DTS检测灌注桩完整性的光纤布设优化研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(S2):3841-3848.
LIU Yongli, HUANG Silu, XIAO Henglin, et al. Study on optical fiber layout optimization of DTS for detecting the integrity of cast-in-place piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S2): 3841-3848.
- [22] 徐红,郑锐,韦锦,等.分布式光纤温度传感技术的光缆敷设方法研究[J].光纤与电缆及其应用技术,2020(3):35-39.
XU Hong, ZHENG Rui, WEI Jin, et al. Research on the laying method of distributed optical fiber temperature sensing technology[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2020(3): 35-39.
- [23] 莫徽忠.基于遗传算法的光纤传感器网络优化布置研究[J].科技通报,2016,32(6):172-176.
MO Huizhong. Research on optimization of optical fiber sensor network based on genetic algorithm[J]. Bulletin of Science and Technology, 2016, 32(6): 172-176.