

基于贴体网格的埋地加热管道土壤温度场计算

朱婷婷 周恒 宋存永 刘兴豪

中国航空国际建设投资有限公司, 北京 100120

[摘要]埋地加热管道是指运输某种被加热介质的运输管道。这类管道在工程中非常常见,如热油管道、伴热管道、供热管道等。埋地加热管道的热力计算对于其优化设计和安全运行至关重要,而土壤温度场的计算是热力计算的关键,也是难点。此文基于贴体网格实现了埋地加热管道的土壤温度数值模拟,具体为:①构建了埋地加热管道土壤温度场的物理模型;②采用 Possion 方法生成了土壤区域贴体网格;③基于贴体网格,采用有限容积法实现了控制方程的离散;④采用 TDMA 块迭代方法对离散方程进行了求解,获得了温度场。测试算例表明,此文介绍的方法准确性高,健壮性好,对于加热管道的热力计算具有一定工程价值。

[关键词]埋地加热管道;贴体网格;土壤温度场;数值模拟

DOI: 10.33142/aem.v4i2.5416

中图分类号: TQ015

文献标识码: A

Calculation of Soil Temperature Field of Buried Heating Pipeline Based on Body Fitted Grid

ZHU Tingting, ZHOU Heng, SONG Cunyong, LIU Xinghao

China Aviation International Construction and Investment Co., Ltd., Beijing, 100120, China

Abstract: Buried heating pipeline refers to the transportation pipeline transporting some heated medium. This kind of pipeline is very common in engineering, such as hot oil pipeline, heat tracing pipeline, heating pipeline, etc. The thermal calculation of buried heating pipeline is very important for its optimal design and safe operation, and the calculation of soil temperature field is the key and difficult point of thermal calculation. In this paper, the numerical simulation of soil temperature of buried heating pipeline is realized based on body fitted grid. The details are as follows: ① The physical model of soil temperature field of buried heating pipeline is constructed; ② The Possion method is used to generate the body fitted grid in the soil area; ③ Based on the body fitted grid, the finite volume method is used to discretize the governing equations; ④ The discrete equation is solved by TDMA block iterative method, and the temperature field is obtained. The test example shows that the method introduced in this paper has high accuracy and good robustness, and has certain engineering value for the thermal calculation of heating pipeline.

Keywords: buried heating pipeline; body fitted grid; soil temperature field; numerical simulation

引言

埋地加热管道是指运输某种被加热介质的运输管道。这类管道在工程中非常常见,如热油管道、伴热管道、供热管道等。由于被加热介质的温度通常高于环境温度,因此随着流体在管内的向前流动其温度会逐渐降低,温度降低到一定程度就会产生不利的工程后果。如对于热油管道^[1],温度的降低,会导致流体的黏性迅速上升,从而耗费大量的泵功,对运输经济性产生影响;当温度降低至原油的凝点后,原油就会凝固,导致无法运输,产生凝管等安全风险。因此,为了避免上述问题,埋地加热管道在设计 and 运行中均需要进行准确的热力计算。

对于稳态情况下加热管道的热力计算,目前常用的是苏霍夫公式。该公式基于总传热系数,考虑摩擦生热后,可以计算得到稳态情况下管道沿线任意位置处介质的温度^[2]。通过工程经验,以及该公式与数值模拟方法的对比可知,其精度非常高。但该公式仅适用于稳态计算,无法在非稳态热力计算中推广。尽管文献中^[2]也推荐了其他相关公式,但在进行非稳态热力计算时,均存在使用不灵活、

精度低、部分参数难以获取等问题。

为了解决非稳态热力计算的问题,随着计算流体力学的发展,研究人员将其引入到这一问题的解决中。在该方法中,首先需要确定加热管道的热力影响区,从而确定数值模拟的求解区域。埋地管道热力影响区主要有两种,一是,^[3]认为管道周围存在一个热力影响半径,即认为管道只影响一定半径内的土壤温度场,将热力影响区视为圆形区域;二是^[4]认为纵向距管道一定深度和横向距管道一定宽度以外的区域不受管道的热力影响,从而将热力影响区域视为一个矩形区域。由于圆形区域不能很好地反映管道对横向和纵向热力影响的差异,矩形热力影响区域被越来越多地采用。

确定热力影响区后,则可以采用数值模拟的方法,对热力影响区域内(主要为土壤)的温度场进行离散、求解。求解过程通常采用有限元法^[5]、有限差分法^[6]和有限容积法^[7]。在求得土壤的温度场后,再耦合管内的传热方程以及实际的非稳态过程即可实现埋地加热管道的非稳态热力计算。也就是说,土壤温度场的数值模拟是实现埋地管道热力计算数值模拟的最关键步骤。本文在前人研究基础上,基于

贴体网格,采用有限容积法,通过编写程序实现了土壤温度场的非稳态变化过程的计算,对埋地加热管道的热力设计具有一定工程价值。

1 数理模型

图1给出了典型的埋地加热管道横截面的示意图,整个热力系统包含了管内的介质、土壤和大气构成,其中土壤温度场的数值模拟是整个问题的关键,进行其模拟的首项工作是建立合适的物理模型,为此做了如下假定:(1)管内输运介质具有统一的温度,即认为管内温度均匀;(2)土壤为各向同性的均匀物质;(3)引入热力影响区,加热管道影响的土壤区域在10m以内。

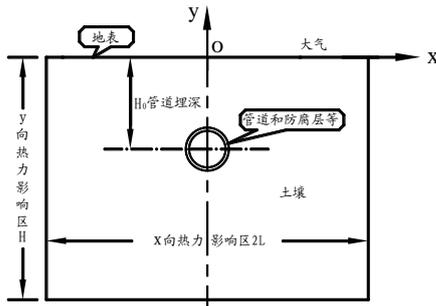


图1 埋地管道示意图

基于上述假设,考虑到图1所示区域的对称性,可得加热管道横截面的传热物理模型(见图2)。对于图2所示的求解域,本文拟采用贴体网格进行求解,因此需要图2所示的物理区域转换到贴体坐标下的计算区域上。

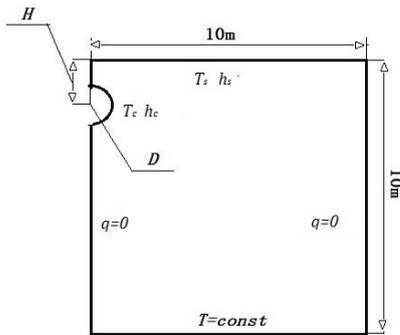


图2 简化后的土壤温度场物理模型

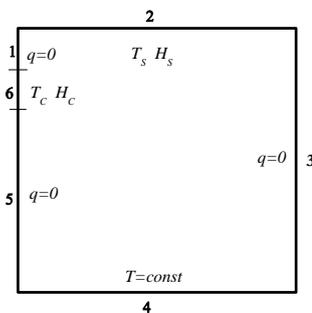


图3 贴体坐标下土壤温度场物理模型

图3给出了贴体坐标下的物理模型,图3求解域边界与图2中的边界存在一一映射关系,其中,边界1和5对应图2中左边界非圆弧处;边界6对应图2中左边界圆弧处;边界2、3、4分别对应图2中上、右和下边界。

贴体坐标下的控制方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\lambda}{J} (\alpha T_\xi - T \varphi_\eta) \right] + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\lambda}{J} (\gamma T_\eta - \beta T_\xi) \right] \quad (1)$$

其中:

$$\alpha = x_\eta^2 + y_\eta^2, \beta = x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta, \gamma = x_\xi^2 + y_\xi^2, J = x_\xi y_\eta - y_\xi x_\eta \quad (2)$$

贴体坐标下边界条件

$$\text{对于边界1和5} \quad -\lambda \frac{\alpha T_\xi - \beta T_\eta}{J \sqrt{\alpha}} = 0 \quad (3)$$

$$\text{对于边界2} \quad \lambda \frac{\gamma T_\eta - \beta T_\xi}{J \sqrt{\gamma}} = h_s (T_w - T_s) \quad (4)$$

$$\text{对于边界3} \quad \lambda \frac{\alpha T_\xi - \beta T_\eta}{J \sqrt{\alpha}} = 0 \quad (5)$$

$$\text{对于边界4} \quad T_w = T_n \quad (6)$$

$$\text{对于边界6} \quad -\lambda \frac{\alpha T_\xi - \beta T_\eta}{J \sqrt{\alpha}} = h_o (T_o - T_w) \quad (7)$$

上式中,其中, \$\rho\$ 为土壤密度, \$\text{kg/m}^3\$; \$c\$ 为土壤比热容, \$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{C})\$; \$T\$ 为土壤温度, \$\text{C}\$; \$\lambda\$ 为土壤导热系数, \$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{C})\$; \$\xi\$ 为贴体坐标系的横坐标, \$\eta\$ 为贴体坐标系的纵坐标; \$h_s\$ 为地表向大气的放热系数, \$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})\$; \$T_s\$ 为大气温度, \$\text{C}\$; \$h_o\$ 为大气与土壤的对流换热系数, \$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})\$; \$T_o\$ 为油流温度, \$\text{C}\$; \$h_c\$ 为油流和管壁之间的对流换热系数, \$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})\$; \$T_n\$ 表示土壤恒温层温度, \$\text{C}\$; \$\alpha, \beta, \gamma\$ 和 \$J\$ 是与图2区域向图3区域转换过程相关的几何量。

2 求解过程

采用数值模拟方法求解土壤温度场的主要思想是,把原来空间与时间坐标上连续的温度场,用一系列有限个离散点上的值的集合来代替,通过一定的原则建立起这些离散点上温度值之间关系的代数方程组,求解所建立起来的代数方程组获得各点温度的近似值。因此求解过程主要包含了网格生成、方程离散和离散方程求解三个主要步骤。

2.1 贴体网格生成

贴体网格生成主要有代数法和微分方程法[8]两种,其中前者通过将特殊函数规范边界和内部节点的插值来实现网格的划分。此种方法简单易行,但其应用范围窄,只适用于边界较规则的情况。为此本文选择了微分方程法,该方法把网格生成过程转化为求解椭圆型偏微分方程的过程。通常可采用式(8)所示的Poisson方程控制网格的生成。

$$\begin{aligned} \xi_{xx} + \xi_{yy} &= P(\xi, \eta) \\ \eta_{xx} + \eta_{yy} &= Q(\xi, \eta) \end{aligned} \quad (8)$$

其中 P, Q 为控制方程源函数,可调节网格局部疏密和正交性,其表达式为:

$$P(\xi, \eta) = -\sum_{m=1}^L a_m \frac{\xi - \xi_i}{|\xi - \xi_i|} e^{-b_m |\xi - \xi_m|} - \sum_{i=1}^L c_i \frac{\xi - \xi_i}{|\xi - \xi_i|} e^{-d_i [(\xi - \xi_i)^2 + (\eta - \eta_i)^2]^{1/2}}$$

$$Q(\xi, \eta) = -\sum_{n=1}^L a_n \frac{\xi - \xi_i}{|\xi - \xi_i|} e^{-b_n |\xi - \xi_n|} - \sum_{i=1}^L c_i \frac{\xi - \xi_i}{|\xi - \xi_i|} e^{-d_i [(\xi - \xi_i)^2 + (\eta - \eta_i)^2]^{1/2}} \quad (9)$$

式中, L, M 为网格在 (ξ, η) 方向需靠近的等值线数, L 为网格需靠近的节点数, (ξ, η) 为坐标, 系数 $a_m, b_m, a_n, b_n, c_i, d_i$ 为通过数值试验而确定的系数。

求解式 (8) 时, 首先根据物理区域和映射到的计算平面区域对应关系 (即图 2、图 3 之间的对应关系) 确定的边界条件, 然后采用有限差分法, 将式 (8) 离散求解, 求解得到 ξ 和 η 等值线, 这些等值线在物理平面上对应的曲线即为贴体网格线。图 4 给出了, 采用这一方法生成的埋地加热管道土壤温度场贴体网格。

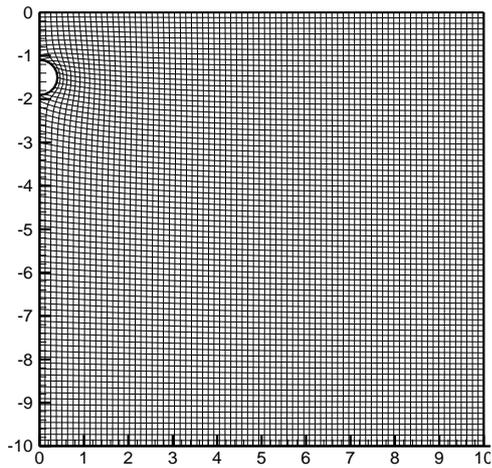


图 4 埋地加热管道土壤温度场贴体网格

2.2 方程离散

本文采用有限容积法进行控制方程的离散, 其基本思路是: 将计算区域划分为一系列不重复的控制体积; 将待解的微分方程对每一个控制体积分, 便得出一组离散方程。有限容积法具有离散过程物理意义明确和离散方程组守恒性好的优点。

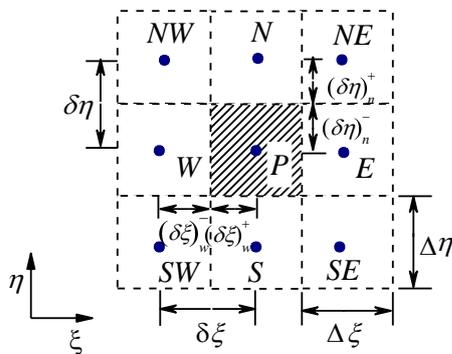


图 5 贴体网格计算平面示意图

图 5 给出了计算平面上控制容积示意图, 在图示某一微元控制容积中对式 (1) 积分可得:

$$\int_w^e \int_s^n \int_\tau^{\tau+\Delta\tau} \frac{\partial T}{\partial \tau} J \rho c d \tau d \xi d \eta = \int_w^e \int_s^n \int_\tau^{\tau+\Delta\tau} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\lambda}{J} (\alpha T_\xi - \beta T_\eta) \right] d \tau d \xi d \eta$$

$$+ \int_w^e \int_s^n \int_\tau^{\tau+\Delta\tau} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\lambda}{J} (\gamma T_\eta - \beta T_\xi) \right] d \tau d \xi d \eta \quad (10)$$

进一步推导,

$$\frac{(T^1 - T^0) J \Delta \xi \Delta \eta}{\Delta \tau} = \left[\frac{\lambda}{J} (\alpha T_\xi - \beta T_\eta) \right]_e^w \Delta \eta - \left[\frac{\lambda}{J} (\alpha T_\xi - \beta T_\eta) \right]_s^n \Delta \eta$$

$$+ \left[\frac{\lambda}{J} (\gamma T_\eta - \beta T_\xi) \right]_n^s \Delta \tau \Delta \xi - \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\lambda}{J} (\gamma T_\eta - \beta T_\xi) \right]_s \Delta \xi \quad (11)$$

将上式简写为:

$$A_p T_p = A_E T_E + A_W T_W + A_N T_N + A_S T_S + B$$

$$A_p = A_E + A_W + A_N + A_S + \rho c_p J \Delta \xi \Delta \eta / \Delta \tau \quad (12)$$

其中:

$$A_E = \left[\frac{\alpha \lambda \Delta \eta}{J \delta \xi} \right]_e, A_W = \left[\frac{\alpha \lambda \Delta \eta}{J \delta \xi} \right]_w, A_N = \left[\frac{\gamma \lambda \Delta \xi}{J \delta \eta} \right]_n, A_S = \left[\frac{\gamma \lambda \Delta \xi}{J \delta \eta} \right]_s$$

$$B = \rho c_p J \Delta \xi \Delta \eta / \Delta \tau T^0 - \left[\left(\frac{\beta \lambda}{J} T_\eta \Delta \eta \right)_w^e + \left(\frac{\beta \lambda}{J} T_\xi \Delta \xi \right)_s^n \right] \quad (13)$$

上式中上标 0 表示上一时层, 1 表示当前时层。通常情况下为了计算方便, 令计算平面网格尺寸 $\Delta \xi = \Delta \eta = 1$ 。

2.3 方程求解

将控制方程离散后会得到一个代数方程组 $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, 求解这个方程组是对物理过程进行数值模拟的最后一个重要环节, 常用的方法有 Jacobi 迭代、Gauss-Seidel 迭代、TDMA 等方式。针对本文中采用贴体网格的优势——贴体网格是一个结构化的网格, 选用了 TDMA 方法求解。TDMA 方法的求解过程具体见文献 [8]。

3 土壤温度场计算结果及验证

为了验证本文所采用方法和所编程序的准确性, 本节基于一个测试算例, 将本文计算结果与采用开源程序 OpenFOAM 计算结果进行了对比。二者的不同是, 本文采用的是贴体网格, OpenFOAM 采用的是非结构化网格。在计算时, 本文计算网格数目为 3556, OpenFOAM 采用的网格数目为 53456, 后者网格非常密, 认为其为达到网格无关解的准确解。

测试算例: 管道埋深 1.3m, 管径 0.513m, 土壤密度 1000 kg/m^3 , 土壤比热容 $2000 \text{ J/(kg} \cdot \text{C}^\circ)$, 地表向大气的放热系数 $15 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{C}^\circ)$, 大气温度 0°C , 油流和管壁之间的对流换热系数 $75 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{C}^\circ)$, 油流温度 50°C , 土壤恒温层温度 5°C , 土壤初始温度场 0°C 。

图 6 分给出了测试算例条件下, 管道运行 3 天、20 天、50 天、160 天时的土壤温度场和 OpenFOAM 计算结果的对比, 从对比中我们可以发现本研究在网格较稀疏的情

形下可以获得和 OpenFOAM 非结构化网格很稠密情况下完全相同的结果,充分说明了本文方法的准确性。

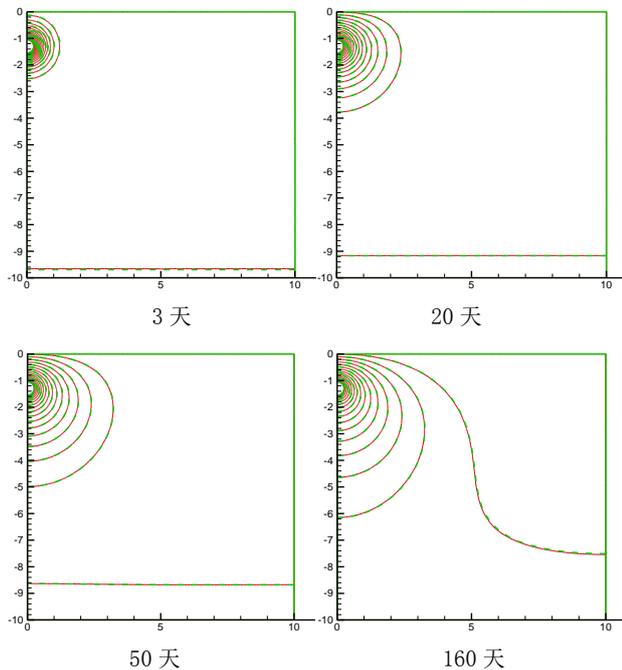


图6 测试算例一中土壤温度等温线分布(实线为 OpenFOAM 计算结果,虚线为本文计算结果)

4 结论

本文系统介绍了基于贴体网格实现埋地加热管道土壤温度场计算的过程,具体结论如下:(1)基于贴体网格实现埋地加热管道的主要过程为:首先,根据埋地加热管

道的情况,建立其物理模型,并通过坐标变换获得计算平面上的求解域;其次,生成贴体网格,并采用有限容积法,将控制方程离散为代数方程组;最后,求解代数方程组,获得土壤温度场的解。(2)通过测试算例可知,基于贴体网格实现埋地加热管道的土壤温度场的方法具有较高的准确性和健壮性,推荐采用该方法进行加热管道的热力计算。

【参考文献】

- [1]张劲军.易凝高粘原油管输技术及其发展[J].中国工程科学,2002,4(6):71-76.
- [2]杨筱蘅.输油管道设计与与管理[M].东营:中国石油大学出版社,2011.
- [3]张国忠.埋地热油管道停输降温过程的研究[J].油气储运,2004,23(12):33-37.
- [4]祖耀.埋地输油管道中热油温度场的数值模拟:(硕士学位论文)[D].南充:西南石油学院,2003.
- [5]张静,吴明.用有限元法计算埋地热油管道土壤温度场[J].辽宁石油化工大学学报,2004,24(2):38-41.
- [6]郑平,吴明,张国忠,等.埋地热油管道预热启输传热仿真研究[J].系统仿真技术,2009,5(3):192-195.
- [7]宇波,凌霄,张劲军,等.成品油管道与热原油管道同沟敷设技术研究[J].石油学报,2007,28(5):149-152.
- [8]陶文铨.数值传热学(第二版)[D].西安:西安交通大学出版社,2001.

作者简介:朱婷婷(1989.4-)女,职称:助理工程师,专业方向:油气储运专业。