

文章编号: 1671-6612 (2022) 04-570-08

# 地铁隧道围岩简化模型研究

刘俊<sup>1</sup> 刘俊媛<sup>2</sup> 车轮飞<sup>1</sup> 徐新华<sup>2</sup>

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司 武汉 430064;

2. 华中科技大学建筑环境与能源应用工程系 武汉 430074)

**【摘要】** 建立一种地铁隧道围岩简化 RC 传热模型, 模型参数直接根据围岩的物理参数及热物性参数进行计算。并采用围岩的频域有限元模型作为基准模型对简化模型进行验证。结果表明, 在核心层采用将隧道周围土壤分为左右相同的两个部分进行并联, 隧道空腔部分等效成中间面积相等的矩形空腔的方法确定热容热阻参数可以获得准确的围岩简化 RC 传热模型, 该模型与围岩的频域有限元模型(基准模型)在中低频区域( $<10^{-4}$ rad/s)吻合很好。该简化 RC 模型容易与 TRNSYS 等热湿模拟软件包集成, 能够更方便快捷地进行热特性计算与分析, 并用于工程设计指导与参考。

**【关键词】** 地铁隧道; 简化 RC 模型; 围岩传热; 频域热特性

中图分类号 U293.6.1 文献标识码 A

## A Study of the Simplified Model of the Surrounding Rock of Subway Tunnels

Liu Jun<sup>1</sup> Liu Junyuan<sup>2</sup> Che Lunfei<sup>1</sup> Xu Xinhua<sup>2</sup>

(1.China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd, Wuhan, 430064;

2.Department of Building Environment & Energy Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, 430074 )

**【Abstract】** This paper proposes a simplified RC heat transfer model for the surrounding rock of metro tunnel, and the model parameters can be calculated directly based on the physical configuration and the thermal physical parameters of the surroundings. The frequency domain finite element model of the surrounding rock is used as the benchmark for validating the simplified model. The results show that an accurate simplified RC heat transfer model of the surrounding rock can be obtained by determining the heat capacity and thermal resistance parameters in the core layer using the method of dividing the soil around the tunnel into two parts of the same left and right in parallel, and the tunnel cavity part is equal to a rectangular cavity of equal area in the middle. This model agrees well with the benchmark model in the low and medium frequency region ( $<10^{-4}$  rad/s). This simplified RC model can be easily integrated with thermal and moist simulation packages such as TRNSYS for thermal characteristics calculation and analysis more easily and quickly. It can also be used for design guidance and reference.

**【Keywords】** Subway tunnel; Simplified RC model; Surrounding rock; Frequency domain thermal characteristics

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFC0605105); 国家自然科学基金项目(51678263)

作者简介: 刘俊(1982.12-), 男, 博士, 正高, E-mail: 461465120@qq.com

通讯作者: 徐新华(1972.01-), 男, 博士, 教授, E-mail: bexhuxu@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2022-05-25

## 0 引言

地铁隧道一般浅埋在土壤变温层中, 有着独特的热特性, 在传热过程、传热范围、边界条件等方面都与其他结构传热, 如巷道围岩的传热<sup>[1,2]</sup>、

埋地管道传热<sup>[3-6]</sup>等不一样。长期来看, 地铁隧道围岩传热可能改变地下土壤温度, 影响地铁系统的远期运营环境, 威胁地铁的稳定运行<sup>[7]</sup>。因此研究地铁隧道围岩传热非常有必要。在地铁隧道传热方

面,部分学者建立利用数值模拟研究隧道围岩传热。胡文斌<sup>[8]</sup>建立 CFD 地铁隧道模型对活塞风进行模拟,分析了隧道区间的热平衡情况并估算了围岩传热散热量,提出了变风量通风的优化方案。邓昌黎<sup>[9]</sup>基于 BIM 技术搭建车站隧道模型进行数值模拟,在模拟隧道围岩温度场远期分布时,分别采用周期性变化的空气温度场和周期性通过的列车热源两种边界条件,模拟结果比较接近。胡增辉<sup>[10]</sup>利用 FLAC3D 模拟隧道围岩传热,研究了某区间隧道断面围岩传热能力与温度场的演化规律。于连广等<sup>[11]</sup>建立地铁土壤温度预测模型,利用有限差分法进行数值模拟,利用高频热扰观察模型的温度热响应,结果表明高频热扰对隧道空间的温度影响很大,但是对土壤内部温度的分布影响有限。

有的学者从换热器的角度研究地铁隧道围岩的传热。刘政轩<sup>[12]</sup>提出了一种基于 U 型的垂直埋管土壤-空气换热器 VEAHE (Vertical Earth-to-Air Heat Exchanger, VEAHE) 系统,该数学模型考虑了垂直方向土壤温度及导热系数的分层。Rotta 等<sup>[13]</sup>将地下隧道视为地下热交换器,研究其热能储存潜力,表明利用地下结构作为热能储存手段有希望建立可持续的能源系统。有的学者提出将毛细管换热器作为热泵前端取热部分置于隧道衬砌内,通过毛细管内的循环介质与隧道围岩换热<sup>[14]</sup>。该文献进一步采用数值模拟对毛细管换热器在不同气候类型下冬夏季的传热过程进行分析。

刘伊江<sup>[15]</sup>对隧道周围土壤热沉积效应机理及规律进行研究,提出热沉积作用的计算方法,表明热沉积效应主要影响因素为大气与深层土壤的温度差与以列车散热为主的隧道内热源。还研究了土壤含水量对隧道围岩传热的影响<sup>[16]</sup>,结果表明土壤含水量对隧道周围土壤热物性以及蓄热能力有显著影响。上述研究都是采用地铁隧道围岩传热的相关内容做了研究,建立不同的模型进行数值计算以及简化为不同的换热器模型等。但在现有的研究隧道土壤传热的方法上,进行远期分析时往往需要的工作量大,效率低。本文建立一种简化模型,与常用热湿软件包结合可以大大增加实用性与提高计算效率。

## 1 地铁隧道围岩原型及简化

地铁隧道主要分为区间隧道和车站隧道。地铁区间隧道通常是指地铁车站站点与站点之间的隧道,一般在同一轨道中隧道的结构形式较为单一且长度较长。地铁车站隧道通常指的是车站范围部分包含的隧道,位于各个地铁站点,长度较短。本文区间隧道围岩为研究对象,参考实际情况,取两车站之间区间隧道长度为 1000m,隧道截面图见图 1。

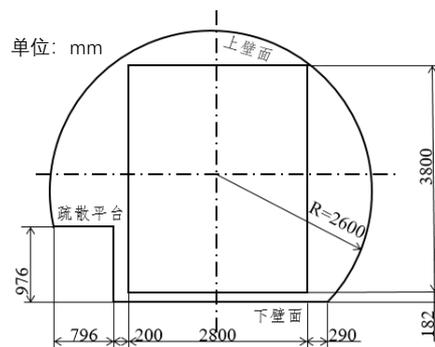


图 1 区间隧道截面

Fig.1 Cross-section of the running tunnel

参考武汉某地铁区间隧道实际尺寸,其隧道上壁面至地面的高度为 13.1m,隧道直径为 5.2m,隧道中心至地面高度为 15.7m。隧道围岩侧土壤物性参数如表 1 所示<sup>[17]</sup>。

表 1 土壤物性参数

Table 1 Physical properties of the soil

土样描述	密度 kg/m <sup>3</sup>	热导率 W/(m·°C)	热容 kJ/(kg·°C)
粉质黏土	2.04×10 <sup>-3</sup>	1.830	2.85×10 <sup>-6</sup>
粉土	2.01×10 <sup>-3</sup>	2.108	2.69×10 <sup>-6</sup>
粉细砂	1.88×10 <sup>-3</sup>	1.610	2.04×10 <sup>-6</sup>

实际情况下隧道内部情况较为复杂,为方便建立简化热网模型本节将进行一些简化。视表 1 中不同深度土壤物性参数在土样一致时物性参数也保持一致性。将实际区间隧道断面简化为半径为 2.6m 的规则圆形,隧道壁面管片的尺寸相对于围岩土壤尺寸小,采用粉土物性参数。

隧道围岩物理模型如图 2 所示。通过恒温层分

析以及地铁隧道表面热响应频域特性分析,进行模型尺度的选择,结果表明以下尺寸的设定是合理的:隧道中心到地面参考实际物理模型尺寸即 15.7m,隧道中心至土壤底部尺寸、隧道中心离土壤模型左右两端尺寸均为 10m。在物理模型简化的基础上,提出一种简化热网模型(RC 模型),RC 模型中只要确定其热阻和热容就可以得到其对应传热系统的传热特性。

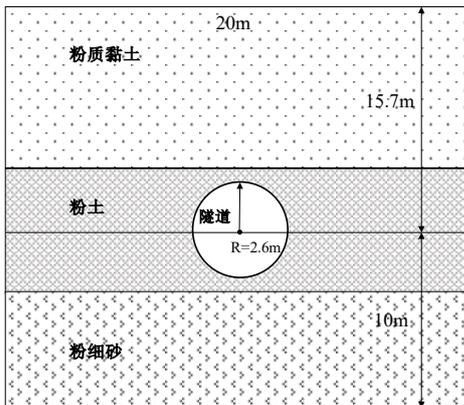


图 2 隧道围岩物理模型

Fig.2 Physical model of the tunnel surrounding rock

## 2 围岩简化 RC 模型与核心层参数确定

### 2.1 模型概述

简化物理模型按隧道顶和底为界限分为三个

部分,分别命名为上结构层、核心层、下结构层。按此划分方式建立 RC 简化热网模型,如图 3 所示。其中,  $T_{top}$  为地面的温度,  $T_{pipe}$  为隧道内壁的内表面温度。  $R_1 \sim R_9$  均为模型不同位置的土壤热阻,  $C_1 \sim C_6$  为对应土壤热容。对隧道所处核心层作进一步简化,其中两侧土壤部分与中间隧道与其周边土壤部分视为并联关系,具体 RC 阶数划分与并联关系如图 3 中间段核心层所示。

上结构物理模型简化为 3 阶 RC 模型。上结构中总热阻与热容值计算如式 (1) 与 (2)。

$$R_1 + R_2 + R_3 = \frac{L}{\lambda \delta} = \frac{13}{1.83 \times 20} = 0.355 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (1)$$

$$C_1 + C_2 = \rho c V = 5807790 \times 20 \times 13 = 1.5 \times 10^9 \text{ J}/^\circ\text{C} \quad (2)$$

式中,  $L$  为与传热方向相同的深度, m;  $\lambda$  为土壤热导率  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\delta$  为垂直传热方向的宽度, m;  $\rho$  为土壤密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c$  为热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $V$  为面积,  $\text{m}^2$ 。在计算式中由于计算的是对应部分的总热阻值,所以需要考虑  $\delta$  的影响。

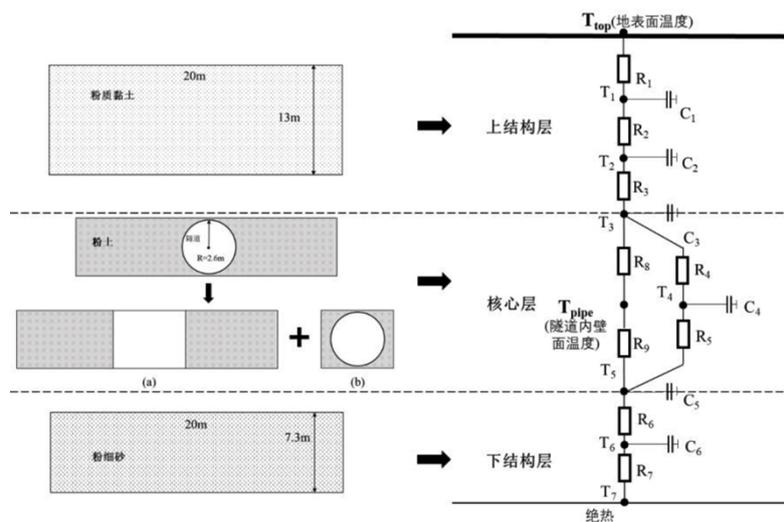


图 3 简化 RC 模型

Fig.3 Simplified RC model

$R$ 、 $C$  具体数值的计算需要对此部分进行比例分割,为使地面温度响应更为准确,进行了参数的

试算分析。靠近地面的部分划分比例将远小于较深土壤部分,剩余  $R_2$ 、 $R_3$  部分平分,令  $R_1:R_2:R_3=$

1:350:350, 则有  $C_1:C_2=1:700$ 。该分配方式可获得较理想计算结果。

下结构其物理模型及该部分 RC 结构示意图如图 3 所示。下结构中总热阻与热容值计算如式 (3)、(4)。

$$R_6 + R_7 = \frac{L}{\lambda\delta} = \frac{7.3}{1.61 \times 20} = 0.227 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (3)$$

$$C_6 = \rho cV = 3832720 \times 7.3 \times 20 = 5.6 \times 10^8 \text{ J/}^\circ\text{C} \quad (4)$$

本层采用 2R1C 形式的 RC 结构, 考虑到土壤底部为绝热, 所以  $R_7$  数值意义不大, 将此部分热阻绝大部分分给  $R_6$ ,  $R_6$  取值为  $0.227^\circ\text{C/W}$ ,  $R_7$  取值为 0。

## 2.2 核心层参数确定方法

简化模型中隧道所在的层命名为核心层, 该层的物理模型与 RC 结构示意图分别如图 3 所示。核心层可分为两个部分, 其中 a 部分代表图中 RC 模型中  $R_4$ 、 $R_5$ 、 $C_4$  所组成的 2R1C 结构, b 部分代表其余 2R2C 部分, a、b 两部分为并联关系。对 b 部分宽度尺寸进行试算, 对 b 部分不同尺寸模型的热

$$R_8 + R_9 = \frac{L}{\lambda\delta} = \frac{1}{2} \times \frac{5.4}{2.108 \times 0.5(5.4 \times 8 - \pi 2.6^2) / 5.4} = 0.630 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (5)$$

$$C_3 + C_5 = \rho c v = 5404920 \times (5.4 \times 8 - \pi 2.6^2) = 1.188 \times 10^8 \text{ J/}^\circ\text{C} \quad (6)$$

上述只是给出了核心层中 b 的热阻热容划分与计算的一种方法 (方法 A)。本研究还采用另外两种方法进行简化, 方法 B 与方法 C。方法 B 将隧道周围土壤分为上下两个部分, 隧道空腔部分等效成中间面积相等的矩形空腔。方法 C 将隧道周围土壤等效为围绕在隧道周围面积相同的圆环, 隧道部分形状域面积均不变。经计算, 利用不同的划分方法, 虽然土壤部分热容均通过相同面积的等效方法没有变化, 但不同计算方法得到的  $R$  值区别很大。方法 B 计算出的热阻值为  $0.163^\circ\text{C/W}$ , 方法 C 计算出的热阻值为  $0.0536^\circ\text{C/W}$ 。

## 3 简化模型的频域表示

在确定区间隧道简化 RC 模型各部分参数后, 可以得到系统在边界条件下的节点温度随时间的

流响应结果进行分析, 比较选择后取 b 为厚度与宽度分别为 5.4m 与 8m 的二维矩形。

a 部分的参数计算较为简单, 参考上文中上、下结构参数计算方法, 并划分相应比例。其中  $R_4:R_5$  的比例需要确定, 尝试采用不同的比例并将热流结果与理论模型对比。结果表明  $R_4:R_5=1:10$  时 RC 模型计算结果与理论模型更加接近。 $R_4$  取值  $0.019^\circ\text{C/W}$ ,  $R_5$  取值  $0.194^\circ\text{C/W}$ ,  $C_4$  计算结果为  $3.5 \times 10^8 \text{ J/}^\circ\text{C}$ 。

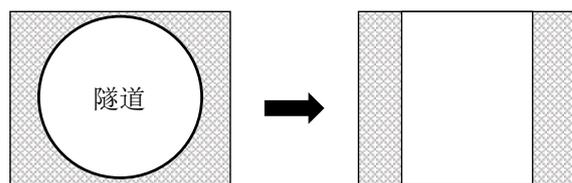


图 4 b 部分简化

Fig.4 Simplification of Part b

将隧道周围土壤分为左右相同的两个部分, 隧道空腔部分等效成中间面积相等的矩形空腔, 如图 4 所示。 $R_8+R_9$  的总热阻值可视为左右两部分并联值, 由于面积相同, 因此总热阻值为单边阻值的一半, 总热阻与热容值计算如式 (5)、(6)。

变化, 隧道围岩模型各节点传热方程如 (7) ~ (12)。当系统处于准稳态时, 系统温度可以表示为频域下的复指数形式, 如式 (13), 通过拉普拉斯变换, 节点传热方程组可表示为矩阵形式, 如式 (14) 所示。

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = \frac{T_{top} - T_1}{R_1} + \frac{T_2 - T_1}{R_2} \quad (7)$$

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} = \frac{T_1 - T_2}{R_2} + \frac{T_3 - T_2}{R_3} \quad (8)$$

$$C_3 \frac{dT_3}{dt} = \frac{T_2 - T_3}{R_3} + \frac{T_4 - T_3}{R_4} + \frac{T_{pipe} - T_3}{R_8} \quad (9)$$

$$C_4 \frac{dT_4}{dt} = \frac{T_3 - T_4}{R_4} + \frac{T_5 - T_4}{R_5} \quad (10)$$

$$C_5 \frac{dT_5}{dt} = \frac{T_4 - T_5}{R_5} + \frac{T_{pipe} - T_5}{R_9} + \frac{T_6 - T_5}{R_6} \quad (11)$$

$$C_6 \frac{dT_6}{dt} = \frac{T_5 - T_6}{R_6} + \frac{T_7 - T_6}{R_7} \quad (12)$$

$$T = (u + iv)e^{i\omega t} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} & -C_1\omega & -\frac{1}{R_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_1\omega & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} & 0 & -\frac{1}{R_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R_2} & 0 & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} & -C_2\omega & -\frac{1}{R_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2} & C_2\omega & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} & 0 & -\frac{1}{R_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_3} & 0 & \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_8} & -C_3\omega & -\frac{1}{R_4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_3} & C_3\omega & \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_8} & 0 & -\frac{1}{R_4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_4} & 0 & \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} & -C_4\omega & -\frac{1}{R_5} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_4} & C_4\omega & \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} & 0 & -\frac{1}{R_5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_5} & 0 & \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_6} & -C_5\omega & -\frac{1}{R_6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_6} & -C_5\omega & -\frac{1}{R_6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_5} & C_5\omega & \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_9} + \frac{1}{R_6} & 0 & -\frac{1}{R_6} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_6} & 0 & \frac{1}{R_6} & -C_6\omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_6} & C_6\omega & \frac{1}{R_6} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \\ u_5 \\ v_5 \\ u_6 \\ v_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_{top}}{R_1} \\ \frac{v_{top}}{R_1} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{u_{pipe}}{R_8} \\ \frac{v_{pipe}}{R_8} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{u_{pipe}}{R_9} \\ \frac{v_{pipe}}{R_9} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中： $R_i$  ( $i$  取值 1~9) 为系统内各部分热阻， $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ； $C_i$  ( $i$  取值 1~6) 系统内各部分热容， $\text{J}/^{\circ}\text{C}$ ； $T_i$  ( $i$  取值 1~7) 为系统中节点温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $t$  为时间， $\text{s}$ ； $\omega$  为频率， $\text{s}^{-1}$ ； $u$  为温度实部； $v$  为温度虚部。

确定 RC 模型各部分热阻与热容值之后，加载温度外扰的边界条件，通过式 (14) 矩阵计算求解即可获得各温度节点温度谐波的实部与虚部即  $u$  和  $v$ ，结合式 (15)、(16)，从而可以分析出整个系统在不同外扰作用下的频域特性。

$$u = T_i \sin \varphi, v = T_i \cos \varphi \quad (15)$$

$$A = \sqrt{u^2 + v^2}, \varphi = \arctan\left(\frac{v}{u}\right) \quad (16)$$

式中， $T_i$  为时域节点温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $\varphi$  为相角， $\text{rad}$ ； $A$  为幅值， $^{\circ}\text{C}$ 。

### 4 简化模型验证

以相同物理模型为基准建立频域有限元模型作为基准模型，频域有限元模型与简化热网模型所参考的物理模型与物性参数等具有一致性。因此可以利用频域有限元模型的热响应为基准，与 RC 简化模型的热响应结果作对比。判定 RC 简化模型准确性的依据为：与频域热特性结果更为接近的计算结果视为更加可靠，即模型更加准确。

### 4.1 频域有限元模型介绍

有限元法是用离散模型来近似连续函数的一种系统方法。它将问题域离散成有限个节点和子域，不重叠的子域叫做有限单元，单元和单元通过节点进行连接。利用有限元方法进行数值计算一般会分为时域有限元和频域有限元两类。时域模型的模拟往往需要同时考虑到初始条件与模拟周期时间长短的影响，频域模型可以在不考虑初始条件的基础上大大减少计算量，并且同时获得周期性条件下的准稳态传热特性。

图 2 的隧道围岩物理模型的传热过程可用二维传热偏微分方程如式 (17) 进行描述。

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_v - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (17)$$

式中， $T$  为求解域的温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $q_v$  为内热源，取 0；其他各参数如前所述。利用有限元法将二维模型离散成一系列网格，建立围岩传热的离散模型，如图 5 所示。

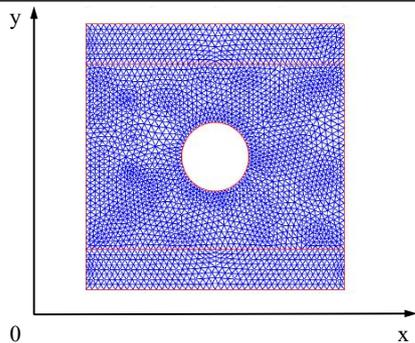


图 5 隧道围岩网格模型

Fig.5 Meshing model of the tunnel surrounding rock

温度场离散成若干个温度节点  $T_1、T_2、T_3 \cdots T_n$  (在简化模型中,也采用这样的方式表示温度节点,只是更为宏观),并在计算域中对它们进行逐一偏导,可得矩阵形式,如式(18),简写为式(19)。

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & L & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & L & k_{2n} \\ M & M & L & M \\ k_{n1} & k_{n2} & L & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ M \\ T_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & L & n_{1n} \\ n_{21} & n_{22} & L & n_{2n} \\ M & M & L & M \\ n_{n1} & n_{n2} & L & n_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial T_1 / \partial t \\ \partial T_2 / \partial t \\ M \\ \partial T_n / \partial t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ M \\ p_n \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$K^D T^D + N^D \dot{T}^D = P^D \quad (19)$$

其中,  $K^D$  为总体刚度矩阵;  $N^D$  为总体变温矩阵;  $P^D$  为总体温度载荷向量或者热流载荷向量。

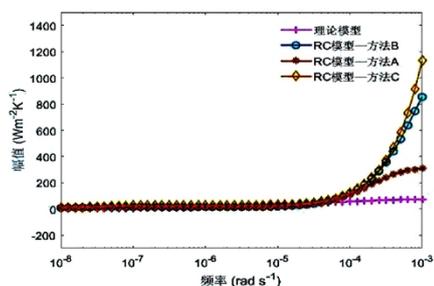
$\dot{T}^D$  为总体温度向量对时间  $T^D$  的偏导。

当不考虑系统的初始条件且只受到单一谐波热扰的作用时,可认为该系统处于准稳态,此时的系统温度可以表示为频域下的复指数形式,由实部与虚部共同组成,如式(15),式(16)。对方程(18)直接求解就可以得到在任意频率  $\omega$  下各个节点的频域温度响应(即各点频率相同、振幅和相位不同的温度谐波)。详细细节可参考文献[18,19]。

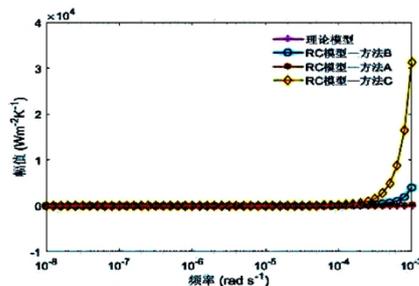
#### 4.2 简化模型验证

当系统受到隧道热扰作用时,采用三种计算方法得到的简化模型进行热流幅值的预测,同时采用

基准模型对热流幅值进行计算,结果对比如图6所示。当系统受到地面热扰作用时上述四种模型热流幅值的对比图如图7所示。由图6可以看出,三个简化模型与基准模型均在低频区拟合情况较好,但在高频区表现出很大差异。方法A的简化模型计算得到的热流幅值与基准模型的热流幅值相差最小。在高频区差异最大为方法C的简化模型计算得到的幅值曲线,方法B的简化模型次之。图7(a)显示三种方法获得的简化模型与基准模型均差别不大,表现出一致性。图7(b)中,方法B的简化模型计算所得幅值曲线,与基准模型的幅值相差最大。方法A的简化模型计算得到的幅值曲线与方法C的简化模型计算得到的幅值曲线相差不大,在高频区都偏离基准模型的幅值曲线。



(a) 隧道热扰下隧道温度热响应幅值



(b) 隧道热扰下地面温度热响应幅值

图 6 简化模型与理论模型在隧道热扰下隧道与地面温度热响应幅值

Fig.6 Amplitudes of the temperature thermal responses of the tunnel surface and the ground surface of the simplified model and the theoretical model under the tunnel thermal disturbance

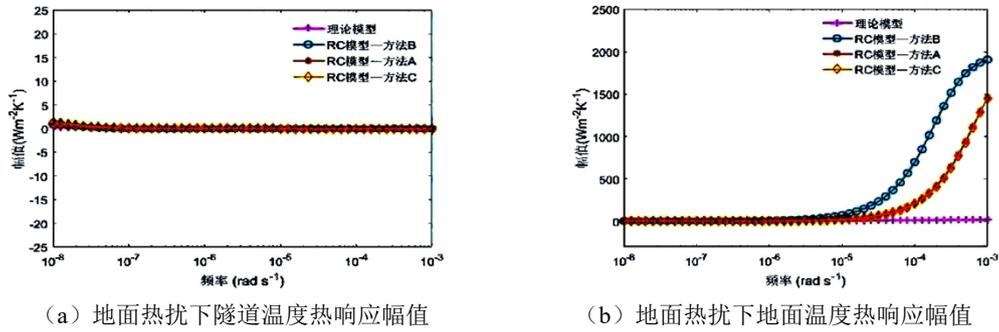


图 7 简化模型与理论模型在地面热扰下隧道与地面温度热响应幅值

Fig.7 Amplitudes of the temperature thermal responses of the tunnel surface and the ground surface of the simplified model and the theoretical model under the ground surface thermal disturbance

三种方法计算得到的简化模型的相角与基准模型的相角的对比如图 8、图 9 所示。三个简化模型在相角值上没有表现出明显的差异性,在整体上与基准模型的相角接近。

三种方法确定的简化模型计算出的相角相差不大,但幅值表现出较大的差别。采用热流响应结

果中的热流幅值进行比较,选择方法 A 得到的简化模型。总的来说,通过方法 A 计算得到的简化模型在计算得到的热流响应曲线上与基准模型吻合较好。可以认为该模型在不同的外扰作用下得到的热流响应结果即热流幅值与相角均表现出很好合理性,该模型可用于隧道围岩传热的计算分析。

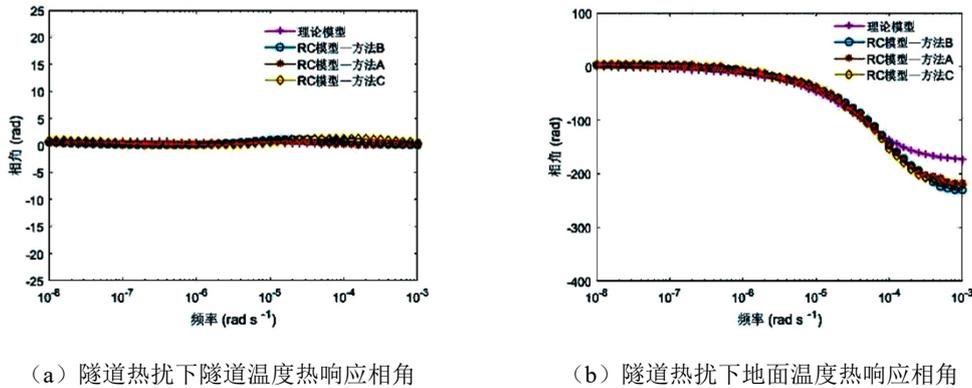


图 8 简化模型与理论模型在隧道热扰下隧道与地面温度热响应相角

Fig.8 Phase angles of the temperature thermal responses of the tunnel surface and the ground surface of the simplified model and the theoretical model under the tunnel thermal disturbance

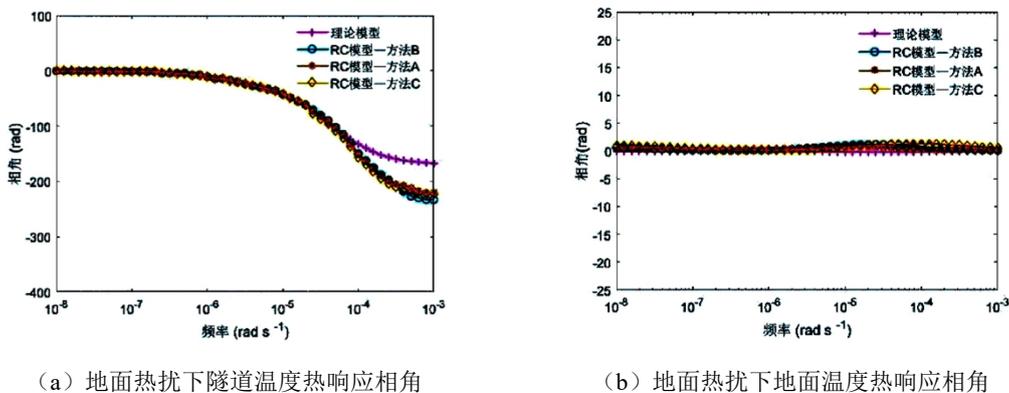


图 9 简化模型与理论模型在地面热扰下隧道与地面温度热响应相角

Fig.9 Phase angles of the temperature thermal responses of the tunnel surface and the ground surface of the simplified

## 5 结论

本文以实际地铁隧道物理模型为基础建立了隧道围岩简化 RC 模型。确定模型中的 RC 参数对模型的准确性十分关键,本文对模型中上层结构与下层结构各个热阻值的比例分配进行了分析选取,对核心层的参数确定不同的方法进行测算,其中采用方法 A (即将隧道周围土壤分为左右相同的两个部分进行并联,隧道空腔部分等效成中间面积相等的矩形空腔)计算出的热阻值最为合理。进一步采用频域有限元模型做为基准模型,并采用特征外扰获取基准模型的频域热响应特性。对简化模型方程组进行拉普拉斯变换得到围岩简化模型的频域传热计算矩阵,进一步获得特征外扰下的频域热响应特性。比较基准模型的频域热响应特性与简化模型的频域热响应特性表明,采用方法 A 获取的简化模型的频域热特性与基准模型的频域热特性中低频区域 ( $<10^{-4}\text{rad/s}$ ) 吻合很好。

### 参考文献:

- [1] 秦跃平,党海政,刘爱明.用边界单元法求解巷道围岩的散热量[J].中国矿业大学学报,2000,(4):63-66.
- [2] Liu V, Apel D, Bindiganavile V. Cylindrical models of heat flow and thermo-elastic stresses in underground tunnels[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2016,26(7):2139-2159.
- [3] 吴暄,路子业,刘卫,等.蓄热过程中竖直U型埋管周围土壤传热规律[J].土壤通报,2017,48(6):1338-1346.
- [4] 王梦.埋地管道空气-土壤传热特性研究[D].秦皇岛:燕山大学,2019.
- [5] 张渊博.土壤源热泵埋管群动态负荷模拟换热性能分析[J].制冷与空调,2022,36(2):227-231.
- [6] 王俊清,袁艳平,曹晓玲,等.埋管井群全年非稳态换热特性研究[J].制冷与空调,2017,31(3):317-323.
- [7] 王泽宇.浅谈地铁环控的特点及设计[J].制冷与空调,2008,(2):111-114.
- [8] 胡文斌.西安地铁运行区间热环境理论研究及通风优化策略[D].西安:西安建筑科技大学,2019.
- [9] 邓昌黎.地铁车站热环境及隧道围岩热变化规律研究[D].北京:北京交通大学,2017.
- [10] 胡增辉,李晓昭,赵晓豹,等.隧道围岩温度场分布的数值分析及预测[J].地下空间与工程学报,2009,5(5):867-872.
- [11] 于连广,吴喜平,于赫男.高频热扰对地铁隧道土壤温度的影响[J].土木建筑与环境工程,2011,33(5):95-101.
- [12] 刘政轩.垂直埋管土壤-空气换热器与相变蓄能耦合系统的研究[D].长沙:湖南大学,2019.
- [13] Rotta A. The thermal energy storage potential of underground tunnels used as heat exchangers[J]. Renewable Energy, 2021,176:214-227.
- [14] 任明月.地铁区间隧道毛细管换热系统性能研究[D].成都:西南交通大学,2019.
- [15] 刘伊江.地铁隧道热沉积研究——气温周期性变化[J].铁道工程学报,2018,35(4):92-96.
- [16] 刘伊江.围岩水文地质条件对地铁隧道热沉积的影响[J].暖通空调,2017,47(5):30-35.
- [17] 张三定,王小波.武汉地铁二号线土体热参数研究[J].南水北调与水利科技,2009,7(1):86-88.
- [18] 李安邦,徐新华.利用频域有限元法分析内嵌管式辐射地板频域热特性[J].重庆大学学报,2015,38(4):55-60.
- [19] 李安邦.基于频域分析的埋管式辐射地板热特性及其优化控制研究[D].武汉:华中科技大学,2017.