

沥青路面表层温度场高精度数值仿真与参数反演

宋瑞利¹, 吴建良¹, 杨 军²

¹湖南理工学院土木建筑工程学院, 湖南 岳阳

²广州市市政工程试验检测有限公司, 广东 广州

收稿日期: 2024年3月23日; 录用日期: 2024年4月19日; 发布日期: 2024年4月26日

摘 要

沥青路面温度场对沥青路面性能影响显著, 是材料选择、性能评估的基础。太阳辐射、长波辐射、空气对流换热是沥青路面表面的主要热流项, 其表达式中包含温度的4次项, 温度场求解难度大。首先建立沥青路面表层温度场的精细化数值求解模型, 通过迭代法实现复杂边界条件的解答。提出基于梯度下降法, 对沥青路面温度场初始模型参数进行优化, 通过长时间序列、特征时间序列的验证对模型参数进行反算的方法。通过实测气象、路面温度数据下的路面温度场参数反演, 获得了路面典型的参数取值范围。

关键词

沥青路面, 温度场, 数值求解, 参数反算

High-Precision Numerical Simulation and Parameter Inversion of Asphalt Pavement Surface Temperature Field

Ruili Song¹, Jianliang Wu¹, Jun Yang²

¹School of Civil and Construction Engineering, Hunan University of Technology, Yueyang Hunan

²Guangzhou Municipal Engineering Testing Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: Mar. 23rd, 2024; accepted: Apr. 19th, 2024; published: Apr. 26th, 2024

Abstract

The temperature field of asphalt pavement has a significant impact on the performance of asphalt pavement and is the basis for material selection and performance evaluation. Solar radiation,

long-wave radiation, and air convection heat transfer are the main heat flow terms on the asphalt pavement surface. Their expressions contain the fourth-order term of temperature, making it difficult to solve the temperature field. First, a refined numerical solution model of the asphalt pavement surface temperature field is established, and the solution to complex boundary conditions is achieved through an iterative method. This paper proposes a method to optimize the initial model parameters of the asphalt pavement temperature field based on the gradient descent method, and back-calculate the model parameters through the verification of long-term series and characteristic time series. Through the inversion of pavement temperature field parameters under measured meteorological and road surface temperature data, the typical parameter value range of the road surface was obtained.

Keywords

Asphalt Pavement, Temperature Field, Numerical Solution, Parameter Back Calculation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

路面温度场是研究路面结构行为特征、路面材料性能演化的重要参数。目前我国沥青路面设计时，温度对沥青面层的影响通过一系列的温度修正系数来实现。沥青路面车辙、表面开裂都与路面温度直接相关，路面材料长期老化、疲劳损伤也与温度变化密切联系[1]。沥青路面温度场研究伴随着沥青路面设计方法演变的全过程，常见的思路有理论推导方法和回归方法。回归方法通过建立气象参数与路面温度的归纳法方程，可良好地应用于同类地区、同类路面结构的温度预测。解析方法以路面的一维热传导方程为依据，对温度场边值、初边值问题做了系列的探讨[2]。

理论推导方法采用解析求解时，为便于求解会对路面表面的边界条件做一定的简化。数值计算方法采取的不同离散方法也会影响求解精度。此外，温度场模型中众多的参数取值也会对温度预测有直接影响。因而为较为精确地估计路面温度，一方面需要较好地考虑路面表面的热流换热状况，另外一方面需要对路面的相关热物理、热交换参数进行恰当的界定。

沥青混合料导热系数可以通过室内试验获得，但不同的研究人员获得的参考区间有较大的波动范围[3][4][5]。

沥青路面热交换系数与路面温度相关的主要有：路面太阳辐射吸收系数、路面辐射系数、天空长波辐射系数、路面对流换热系数。以往的研究，这些参数多参考一些经验取值，未经过严格的验证。现有路面温度场预测难以面向具体路面结构，仅仅能够针对路面结构类型[6]。

路面表面热流的高精度模拟，通过实测数据验证以往路面热相关参数取值范围的可靠性，对提高路面温度场预测的针对性、准确性，为路面长期性能演化研究提供依据有重要支撑价值。

2. 温度场理论

路面表面温度与表面的热交换、路面内部热传导有关。

太阳辐射的计算方法为：

$$q_{sun} = a_s Q \quad (1)$$

其中： Q 为总太阳辐射， W/m^2 ；

a_s 为有效吸收系数，取值 0.8~0.9 [6];

q_{sun} 为有效太阳辐射， W/m^2 。

在绝对温标下，物质按温度的四次方向外辐射能量。道路在向外辐射的同时也接收来自大气的辐射。

$$q_{road} = \varepsilon_r \sigma (T_s + 273.15)^4 \tag{2}$$

$$q_{sky} = \varepsilon_a \sigma (T_{sky} + 273.15)^4 \tag{3}$$

其中： q_{road} 和 q_{sky} 分别为路表辐射和天空辐射， W/m^2 ； ε_r 为路面辐射系数，一般取 0.92； ε_a 为天空辐射系数，与天空云量和路面的视野相关，晴天取 0.7； σ 为斯忒藩 - 波尔兹曼常数 $5.68 \times 10^{-8} (Wm^{-2} \cdot K^{-4})$ 。

T_s 为路表温度， $^{\circ}C$ ； T_{sky} 为天空温度，在南方气候下晴天时近似比空气温度 T_{air} 高 $15^{\circ}C$ 。

路面空气对流计算方法为[6]:

$$q_c = B(T_s - T_{air}) \tag{4}$$

B 为对流换热系数， $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ 。

路面表面的对流系数按下式计算:

$$B = (2.5 \sim 6) + 4.2v$$

其中： v 为风速(m/s)。常数项反映了自然对流换热的影响，其值取决于路面与空气的温度差，温度差越大自然换热越显著，常数项取值越大。对流换热系数与风速相关，风速越大对流越明显。

将(1~4)热流累加得到路表边界的热流。

$$S = a_s Q - \varepsilon \sigma (T_s + 273.15)^4 + \varepsilon \sigma (T_{sky} + 273.15)^4 - (3 + 4.2v) * (T_s - T_{air}) \tag{5}$$

式中： λ_1 为表层导热系数， T_1 为表层温度。

3. 温度场建模

路面一维温度场为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \tag{6}$$

式中： α 为表层的导温系数。

对沥青路面表层温度场在时间、空间做如下图的离散，温度 T_{ij} 表示在节点 i 在时刻 j 的温度。图 1 中路面表面离散为 3 个节点， x_0 为路面表面， x_{-1} 位于路表空气层， x_{-1} 的引入是便于路表的导入导数边界条件。

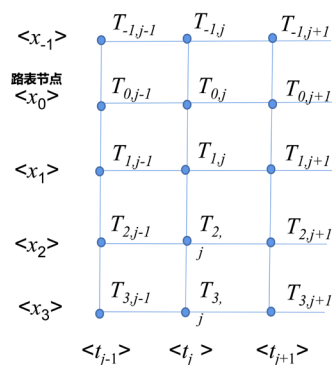


Figure 1. Discrete node graph
图 1. 离散节点图

在 $t_{i+1/2}$ 处用下式逼近时间导数:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \cong \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t} \quad (7)$$

对二阶导数做差分逼近式的平均:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{2} \left[\frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i+1,j+1} - 2T_{i,j+1} + T_{i-1,j+1}}{(\Delta x)^2} \right] \quad (8)$$

对导数边界条件可以离散数据表示为:

$$T_{-1,j} = T_{1,j} - 2\Delta x S(j) \quad (9)$$

$$\tau = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2}$$

对如图的节点离散, 可以获得如下的方程组:

$$\begin{aligned} -\tau T_{1,j+1} + 2\tau \Delta x S(j+1) + 2(1+\tau)T_{0,j+1} - \tau T_{1,j+1} &= \tau [T_{1,j} - 2\Delta x S(j)] + 2(1-\tau)T_{0,j} + \tau T_{1,j} \\ -\tau T_{0,j+1} + 2(1+\tau)T_{1,j+1} - \tau T_{2,j+1} &= \tau T_{0,j} + 2(1-\tau)T_{1,j} + \tau T_{2,j} \\ -\tau T_{1,j+1} + 2(1+\tau)T_{2,j+1} - \tau T_{3,j+1} &= \tau T_{1,j} + 2(1-\tau)T_{2,j} + \tau T_{3,j} \end{aligned}$$

为求解上述方程组, 需要已知初边值条件。若节点 3 温度、路表气温、太阳辐射为已知边界条件, 路面节点在 0 时刻温度已知, 上述方程组存在确定解。

若可以变换为线性方程, 联立方程, 就可以得到三对角方程组。 $S(j)$ 表达式为:

$$-\lambda_1 S(j) = a_s Q_j - \varepsilon_e \sigma (T_{0,j} + 273.15)^4 + \varepsilon_r \sigma (T_{sky,j} + 273.15)^4 - (3 + 4.2\nu_j)(T_s - T_{air,j}) \quad (10)$$

在 j 时刻向 $j+1$ 时刻推导时 $S(j)$ 不存在变量运算, 其计算值为数值计算。

而 $S(j+1)$ 表达式中四次方函数假定可以表示为待定线性函数, 可以表示为:

$$(aT_{0,j+1} + b) = (T_{0,j+1} + 273.15)^4$$

$$-\lambda_1 S(j+1) = a_s Q_{j+1} - \varepsilon_e \sigma (aT_{0,j+1} + b) + \varepsilon_r \sigma (T_{sky,j+1} + 273.15)^4 - (3 + 4.2\nu_{j+1}) * (T_{0,j+1} - T_{air,j+1}) \quad (11)$$

$S(j+1)$ 包括高次方运算可以由如下方法, 通过线性函数逼近获得。

- 1、 $j+1$ 时间步时: 将 $T_{0,j+1}$ 四次方函数由函数在 $T_{0,j}$ 处的切线方程(a,b 系数)代替。
- 2、据方程组(9)求解 $T_{0,j+1}^*$, 更新切线方程(更新 a,b)为四次方函数在 $T_{0,j+1}^*$ 处, 重新求解。
- 3、循环运算步骤 2, 计算 $T_{0,j+1}^*$ 的变化值。
- 4、当 $T_{0,j+1}^*$ 的变化值小于 0.1% 时停止迭代。

通过上述过程可以实现对的 $T_{0,j+1}$ 逐步逼近。线性化后, 路面温度场方程组求解变化为稀疏矩阵求解。

4. 参数取值范围估算

为验证最优解方法的数值稳定性, 依据现场实测数据, 选定气候晴朗时 72 h 内的气温、太阳辐射、风速、路面不同深度实测温度, 进行数值分析计算。数据来源于广东某试验路的路面传感器, 气象数据源于附近的气象站。

在沥青混合料层内的 2.5 cm、6.4 cm、10.0 cm 三处采集数据, 采用如下的网格建立 10 cm 厚度的沥青路面温度模型。模型中, 10 cm 深度采集路面温度作为已知边界条件, 0 h 时刻沥青路面 0 cm、2.5 cm、

6.4 cm、10.0 cm 的初始温度采用测试值。72 h 的实测数据，分为 2 段，0~23 h 数据用于最优化方法获取反分析参数；24~72 h 时段数据，用于模型参数验证。验证时，采用插值法获得 2.5 cm、6.4 cm 深度的路面推断温度，与该深度处的实测温度对比。

为反演温度场参数，采用梯度下降法联合局部蒙特卡洛方法[7]进行搜索，并与单纯采用蒙特卡洛、梯度下降方法进行对比。梯度下降法设定 1% 的单个参数游走步距，通过偏导值确定参数的优化方向。反演的目标函数为。

$$L(\lambda, \alpha, a_s, \varepsilon_r, \varepsilon_e) = \sum_{i=1}^n (T_{i,j} - T_{i,j}^*)^2$$

$T_{i,j}$ 为节点 i 在 j 时刻的实际温度； $T_{i,j}^*$ 为节点 i 在 j 时刻的推算温度。

不同反算策略下，参数反演的结果如表 1。

Table 1. Back analysis of parameters

表 1. 参数的反分析结果

反分析方法	λ	α	L 损失
梯度下降	1.14	3.92	0.8℃
蒙特卡洛	1.75	4.34	0.7℃
联合方法	1.85	4.59	0.2℃

可以看出采用梯度下降 + 蒙特卡洛综合方法获得的反演结果精度更高。

5. 结论

文章研究路面表面热流的高精度模拟，通过实测数据反分析路面热相关参数得出如下结论：

(1) 沥青路面表面热流复杂，存在对流、辐射等多个分量，特别是辐射换热热流中存在温度变量的 4 次方项。通过将 4 次分项替换为一次项的多次逼近，可实现沥青路面温度场矩阵形式的数值计算，加快运算速度。

(2) 沥青路面温度场求解需要多个热物理参数，根据文献检索调研发现，不同地区、材料、试验方法，得出的热物理参数差异较大。

(3) 基于快速运算温度场模型，本文提出了多种优化方法的温度场热物理参数反分析方法。基于道路温度场实测数据，验证了方法的有效性。

基金项目

湖南省教育厅项目(19C0841)。

参考文献

- [1] 贾璐. 沥青路面高温温度场数值分析和实验研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- [2] 秦健, 孙立军. 沥青路面温度场的分布规律[J]. 公路交通科技, 2006(8): 18-21.
- [3] Luca, J. and Mrawira, D. (2005) New Measurement of Thermal Properties of Superpave Asphalt Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **17**, 72-79. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:1\(72\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:1(72))
- [4] Ren, Z.S., Wang, H., et al. (2018) Computational Analysis of Thermal Conductivity of Asphalt Mixture Based on a Multiscale Mathematical Model. *Journal of Engineering Mechanics*, **144**, 04018064. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001493](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001493)
- [5] Zhang, L., et al. (2017) Computational Analysis of Thermal Conductivity of Asphalt Mixture Using Virtually Gener-

ated Three-Dimensional Microstructure. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **29**, 04017234.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002081](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002081)

- [6] 吴建良, 孙立军. 路面非周期一维温度场的傅里叶级数解[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 29-34+46.
- [7] 周礼洋. 典型有机化工厂污染地块氯代烃分布特征及基于蒙特卡洛模拟的风险评估[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(1): 98-111.