



寒区路基热负荷时序特性及区域统计分析

胡田飞 王力 刘济华 岳祖润 袁一飞

TIME-SEQUENCE CHARACTERISTICS AND REGIONAL STATISTICAL ANALYSIS OF HEATING LOAD OF EMBANKMENT IN COLD REGIONS

HU Tian-fei, WANG Li, LIU Ji-hua, YUE Zu-run, YUAN Yi-fei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2022.11.0929>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

鼓式制动器动态应变和温度特性试验研究与分析

EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND ANALYSIS ON DYNAMIC STRAIN AND TEMPERATURE OF DRUM BRAKE

工程力学. 2018, 35(10): 222-228,237 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2017.06.0486>

温度荷载下CRTS II型轨道板与CA砂浆界面剪切破坏机理

MECHANISM OF INTERFACIAL SHEAR FAILURE BETWEEN CRTS II SLAB AND CA MORTAR UNDER TEMPERATURE LOADING

工程力学. 2018, 35(2): 230-238 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2016.09.0753>

不同跨受火混凝土连续双向板火灾试验及数值分析

EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL ANALYSIS ON THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE CONTINUOUS TWO-WAY SLABS SUBJECTED TO DIFFERENT SPAN FIRES

工程力学. 2020, 37(8): 55-72 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.08.0440>

单向面内约束混凝土双向板火灾试验及承载力分析

FIRE TEST AND LIMIT CARRYING CAPACITY ANALYSIS OF TWO-WAY CONCRETE SLABS WITH UNILATERAL IN-PLANE RESTRAINTS

工程力学. 2017, 34(11): 145-157 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2016.07.0533>

单向面内约束混凝土双向板抗火性能试验研究及数值分析

EXPERIMENT AND NUMERICAL ANALYSIS ON THE FIRE-RESISTANT PERFORMANCE OF TWO-WAY CONCRETE SLABS WITH UNILATERAL IN-PLANE RESTRAINTS

工程力学. 2018, 35(3): 65-78 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2016.11.0845>

火灾蔓延作用下混凝土连续板力学行为试验研究与模拟

EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL ANALYSIS OF CONCRETE CONTINUOUS SLABS SUBJECT TO TRAVELING FIRE

工程力学. 2020, 37(3): 202-216 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.04.0238>



订阅号：面向读者



订阅号：面向作者

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1000-4750(2025)02-0098-10

寒区路基热负荷时序特性及区域统计分析

胡田飞^{1,2}, 王 力³, 刘济华³, 岳祖润^{1,2}, 袁一飞³

(1. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北, 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学河北省交通工程结构力学行为演变与控制重点实验室, 河北, 石家庄 050043;

3. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北, 石家庄 050043)

摘 要: 为保证路基供热防冻胀系统的合理设计和节能运行控制, 发展一种基于建筑热环境设计模拟工具包 DeST(designer's simulation toolkit) 的寒区路基动态热负荷预测方法。在 DeST 软件中建立由一系列“路基微元”构成的计算模型, 利用软件内置的气象模型、遮挡模型、光照模型模拟路基所处的气候环境、太阳辐照和地形条件; 应用建筑分析模拟模块 BAS(building analysis simulation module), 通过状态空间法求解路基微元基础温度, 通过预测值与实测值的校核保证计算精度; 设置路基目标温度, 完成热负荷的逐时计算。依托哈齐高铁 DK221+150 监测断面实测数据, 对所述方法进行验证, 结果表明, 路基温度场计算值与实测值一致。案例路基的最大热负荷为 945 W/m, 冻结期平均热负荷为 335 W/m。热负荷可以反映路基阴阳坡效应和沿深度的传热滞后效应。基于中国严寒和寒冷气候区 23 个城市的典型气象年数据, 对高铁路基的热负荷进行区域统计分析, 结果表明, 最大热负荷范围为 531 W/m~1338 W/m, 并与纬度呈线性正相关关系。研究成果可为寒区路基冻害评价和供热方案设计提供参考。

关键词: 冻土路基; 人工供热; DeST 软件; 温度; 热负荷; 纬度

中图分类号: TK52 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.11.0929

TIME-SEQUENCE CHARACTERISTICS AND REGIONAL STATISTICAL ANALYSIS OF HEATING LOAD OF EMBANKMENT IN COLD REGIONS

HU Tian-fei^{1,2}, WANG Li³, LIU Ji-hua³, YUE Zu-run^{1,2}, YUAN Yi-fei³

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures,

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

2. Key Laboratory of Mechanical Behavior Evolution and Control of Traffic Engineering Structures in Hebei,

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: Based on the Designer's Simulation Toolkit (DeST), a method for predicting the dynamic embankment heating load in cold regions are proposed. A model composed of a series of 'micro elements' is first established, and the meteorological, shielding, and illumination models are used to simulate the climatic environment, topographic conditions, and solar radiation of the embankment, respectively. The state space method in the Building Analysis Simulation (BAS) module is then used to determine the initial temperature. The accuracy of the calculation is increased by setting the similarity threshold between the predicted value and the model training data. The heating load is identified by setting the target temperature. As a case study, the method is applied to the DK221+150 section of the Harbin-Qiqihar high speed railway. The results show consistency

收稿日期: 2022-11-04; 修改日期: 2023-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(42001059, 52172347); 中央引导地方科技发展资金项目(226Z5402G); 河北省自然科学基金项目(E2020210044)

通信作者: 岳祖润(1962—), 男, 山东青岛人, 教授, 博士, 博导, 主要从事地基变形控制与特殊土路基研究工作 (E-mail: yzr1898@qq.com).

作者简介: 胡田飞(1988—), 男, 河北石家庄人, 副教授, 博士, 主要从事冻土力学和寒区路基工程研究 (E-mail: hutianfei@stdu.edu.cn);

王 力(1997—), 男, 江苏徐州人, 硕士生, 主要从事寒区路基工程研究 (E-mail: 792036041@qq.com);

刘济华(1997—), 男, 山东莱西人, 硕士生, 主要从事寒区路基工程研究 (E-mail: jhl12138@qq.com);

袁一飞(1998—), 男, 山西大同人, 硕士生, 主要从事寒区路基工程研究 (E-mail: a1747087177@163.com).

between the calculated and measured temperatures. The maximum and average heating loads are 945 W/m and 335 W/m, respectively. The method reflect the effects of both slope exposure to solar radiation and the lag in heat transfer inside the embankment. The data for typical meteorological years of 23 cities positioned in cold and severely cold climate zones in China are selected for a regional statistical analysis of the heating load of a high-speed railway embankment. The results show a maximum heating load of 531~1,338 W/m and a linear positive correlation between heating load and latitude. The results of this study can guide the evaluation of embankment frost state and the design of heating schemes in cold regions.

Key words: frozen soil embankment; artificial heating; DeST software; temperature; heating load; latitude

在寒冷与严寒气候区铁路、公路建设与运营中,路基冻胀是最为频繁和严重的病害之一^[1-3]。以沈阳铁路局为例,每年冬季冻害整修需投入70%~80%的人力,占据50%的天窗时间^[4]。近年来,主动温度控制技术在交通基础设施领域兴起,能源桩^[5]、能源隧道^[6-7]、能源管廊^[8]、能源地下连续墙^[9]等热能转化式结构开始示范推广,起到冻害整治、地下环境调控等功能。针对公路、桥梁及机场跑道路面的积雪结冰问题,业界发展了电加热、流体热媒管、热管等多种形式的能源路面^[10]。上述研究与应用为路基人工供热防冻胀方法提供了借鉴。

路基冻胀受到气候、地质、工程因素的多重控制,具有突发性、长期性和广泛性。胡田飞等^[11-13]提出一种路基专用地源热泵装置及分布式供热方案,并从设计原理及结构组成、制热影响因素及其敏感性、换热温度相关性 & 运行模式优化、供热性能及热作用半径等角度论证了这一装置的可靠性。而从实用性和经济性角度,还需进一步确定路基所需供热量,才能合理设计热泵输出容量和运行模式,以此降低投资规模和长期运行能耗。目前路基热量收支状况的主要分析指标是热通量,张松等^[14]根据哈齐高铁实测数据,指出冻胀期路基表面的最大热通量约为13 W/m²,当热通量降低至约5 W/m²后冻结深度基本稳定。热通量反映的是路基与大气环境之间的实时换热量,但在气候和人工供热双重作用下,路基传热量是一个动态值,岩土热传递也具有滞后性,热通量无法准确反映路基所需的实际供热量。

在建筑环境与设备工程学科领域,供热系统设计与运行控制的主要依据是热负荷。热负荷指为维持供热对象的目标温度,供热设备在单位时间内需要供给的热量^[15]。热负荷无法直接测量,只能通过模型计算得到,分为稳态法和动态法。稳态法是目前《民用建筑供暖通风与空气调节设

计规范》(GB 50736—2012)^[16]等规范建议的主要算法,通过围护结构稳态传热量及其他因素附加系数来计算热负荷。动态法是多因素耦合的逐时热特性分析,精度较高,计算原理包括反应系数法、热平衡法、状态空间法等^[17]。此外,为简化计算过程和提高负荷预测效率,业界还发展基于历史数据统计分析的经验预测模型,但是建模需要的负荷历史数据多,历史数据依赖较强^[18]。

热负荷可以用来反映冻害路基对人工供热量的终端需求,并作为供热系统设计与运行控制的主要参考指标,因此有必要将热负荷指标引入路基工程。胡田飞等^[12]采用稳态法计算得出某单线铁路路基的平均热负荷约为20 W/m,但无法准确预测逐时热负荷,并且稳态法没有区分得热量和热负荷,容易导致负荷偏小。而DeST中内置中国各地的气象数据库,可以实现不同工况的路基动态热负荷计算,适用于分析短时间尺度内构筑物热负荷的时序特性^[19]。但是,DeST软件主要面向建筑物热负荷计算和环境控制系统设计,尚无针对路基工况的应用研究。

本文基于DeST能耗模拟软件,结合路基工程特殊的设计方案及赋存环境,提出一种路基动态热负荷计算方法。该方法能够考虑大气温度、太阳辐射等外界环境的逐时变化,及地形遮挡等因素对路基热状态的影响。结合哈齐高铁某路基监测断面的实测数据,增加路基温度场验算校核,保证热负荷计算结果的准确性。并筛选我国寒冷和严寒气候区23个城市的典型气象数据库,对不同地域高铁路基的热负荷进行统计分析,以期为寒区路基供热应用提供参考。

1 路基热负荷预测方法

1.1 基于DeST软件的路基热负荷计算方法

DeST软件在计算建(构)筑物热负荷时,首先分析建(构)筑物本身传热性能和外界被动性热扰

动的影响；然后以求解的自然温度为桥梁，通过和环境控制系统的解耦计算，进行热负荷计算、温控系统的设计与运行优化。本文类比建筑房间，提出“路基微元”概念，其是由壁面和内部极小空腔组成的空间体。通过模拟微元基础温度和供热目标温度，计算路基温度场和热负荷。步骤为：第一，在 DeST 软件中建立路基计算模型，输入工程参数值；第二，根据地理坐标，调用气象模型，并通过遮挡模型设置外界地形条件，计算微元基础温度的预测值；第三，对比预测值与实测值的相似度阈值，直至满足阈值条件；第四，设置路基冻胀防控的目标温度，计算各个微元的热负荷，通过代数求和，分析路基热负荷的空间分布特性和时序特性。在此基础上，根据最大热负荷，设计供热系统；根据热负荷的空间分布特性，设计供热末端在路基内部的布置方案；根据热负荷的时序特性，设计供热系统的运行控制方案。计算流程如图 1 所示。

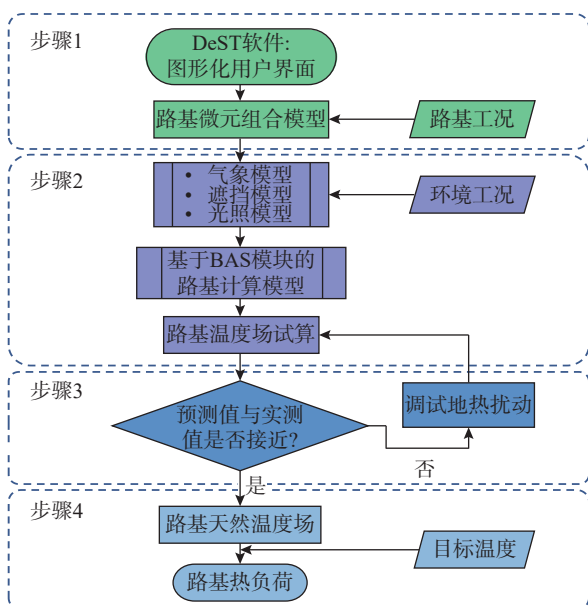


图 1 基于 DeST 软件的路基热负荷计算流程

Fig. 1 Calculation flowchart of embankment heating load based on DeST software

1.2 温度计算

DeST 软件的 BAS 热特性模块采用基于状态空间法的多区热质平衡算法来求解传热过程。在计算模型中，将路基微元壁土体视为各向均质材料，通过密度、导热系数和比热容等热物性参数来反映填料土质、含水率、压实度等指标的影响。根据状态空间法，路基微元基础温度的计算方法为^[19]：

$$T_{l,\text{base}}(t) = \int_{-\infty}^t \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} \cdot e^{\lambda_j(t-\chi)} \cdot q_j(\chi) \cdot d\chi \quad (1)$$

式中： T 为微元温度； l 为微元编号； t 为时间； χ 为时间步，本文取 1 h； q 为热扰； m 为热扰数量，包括太阳辐射、相邻微元、供热系统； λ 为状态空间法中各个微元的空间特征值向量； n 为热扰特征值的维数； φ 为热扰对微元温度的影响系数。

计算微元基础温度时，不考虑人工供热影响，所有热扰已知。风速（热对流）对路基微元壁的影响通过第三类边界条件施加。公路和铁路的路基及上部路面或轨道结构不同，各层结构的材料属性及几何尺寸也有所差异，因此需要针对公路、铁路路基的上表面热边界进行区分量化。路基上表面热边界条件的设置方法主要分为两种，第一是对公路路面和铁路轨道结构的材料及厚度进行实体建模，第二是采用附面层理论进行等效设定^[20-21]。本文采用基于附面层理论的边界设置方法。将大气温度、风速和相邻路基微元的热扰简化为对微元壁的一维非稳态传热，方程为^[22]：

$$\rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

式中： ρ 为土体密度； c 为比热容； k 为导热系数； x 为厚度。

路基的太阳辐射得热量受到线路走向和周围地形遮挡的影响。路基表面阴影是在太阳光矢量下斜平行投影的并集，调用遮挡模型，描述相关地形和地面构造物的几何信息并作为投影源面，通过几何变换投影法，计算路基表面的阴影面积。再结合太阳辐射数据，即可求解各表面的太阳辐射得热量：

$$Q = Q_{\text{dn}} \times \cos i + Q_{\text{f,H}} \times \cos^2 \frac{\theta}{2} + \eta \times Q_{\text{t,H}} \left(1 - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (3)$$

式中： Q_{dn} 为法向直射辐射强度； i 为太阳直射的入射角； $Q_{\text{f,H}}$ 为水平面太阳散射强度； θ 为表面倾角； $Q_{\text{t,H}}$ 为水平面太阳总反射强度； η 为地面反射率。

1.3 热负荷计算

采用阶跃差值，得到供热作用下路基微元温度的计算公式：

$$T_i(t) = T_{l,\text{base}}(t) + \sum_i e^{\lambda_i \Delta t} W_i(t - \Delta t) + \psi \cdot q(t) \quad (4)$$

式中：右侧第一项和第二项之和表征在 t 时刻没有人工输热量时路基微元将出现的温度，记为 $T'_i(t)$ ； $q(t)$ 为 t 时刻的人工输热量； ψ 为路基供热系统对路基微元的影响系数。其中， $W_i(t - \Delta t)$ 的计算公式为：

$$W_i(t - \Delta t) = \int_{-\infty}^t \varphi_i \cdot e^{\lambda_i(t - \Delta t - \chi)} \cdot q(\chi) d(\chi) \quad (5)$$

ψ 的计算公式为:

$$\psi = \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i (e^{\lambda_i \Delta t} - 1)}{\lambda_i} \quad (6)$$

路基供热的目标温度为 T_s 。 T_s 一般取填料冻结温度, 粗粒土时取 0°C , 当细颗粒含量较多时, 则通过冻结温度试验确定。假设某微元当前负荷为 0, 计算出该微元温度的预测值 T_p (即 $T'_i(t)$)。若 $T_p \geq T_s$, 路基微元的热负荷为 0。若 $T_p < T_s$, 热负荷为:

$$q(t) = [T_s - T'_i(t)] / \psi \quad (7)$$

2 哈齐客专路基热负荷模型

2.1 DK221+150 路基温度监测断面及测试分析

哈尔滨-齐齐哈尔高速铁路是我国目前最靠北的高寒地区运营高铁。在 DK221+150 里程建立监测断面, 路堤顶部宽度为 13.4 m, 路堤高度为 3.97 m, 两侧坡度 1:1.7, 保温护道高度 3.42 m, 宽度 2.0 m, 基床表层为 0.55 m 厚的级配碎石, 表层以下为非冻胀性 A、B 组填料。左侧边坡为阳坡和迎风坡, 右侧边坡为阴坡和背风坡。该路段走向为近东向西^[23-24]。监测方案如图 2 所示, 监测断面的路肩、坡脚、路基中心和天然地面共布置 6 个测温孔, 深度均为 3.6 m, 每孔布置 10 个温度传感器。

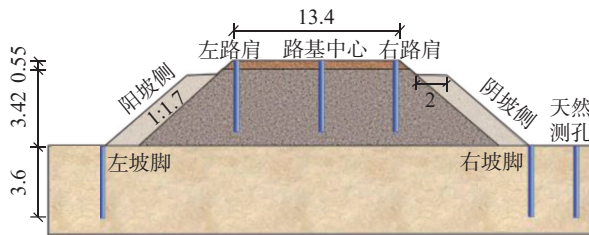
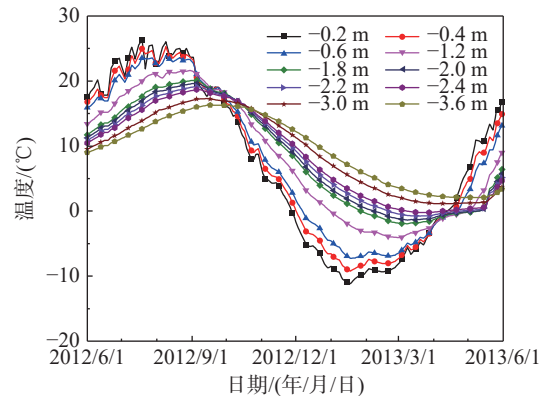


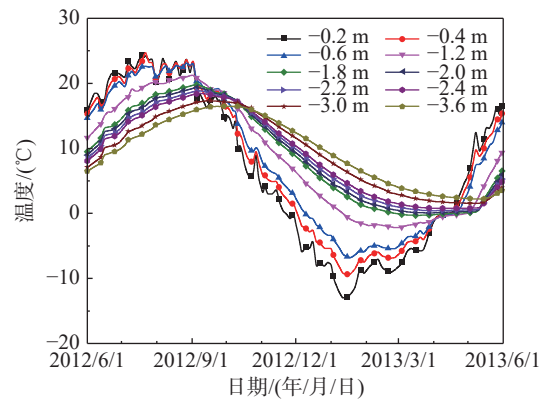
图 2 哈齐高铁 DK221+150 监测断面 /m
Fig. 2 DK221+150 monitoring section of Harbin-Qiqihar high speed railway

图 3 为路基中心和路肩在 2012 年 6 月 1 日至 2013 年 6 月 1 日的温度变化规律。由图 3(a) 可以看出, 路基不同深度处温度随时间近似呈正弦函数分布, 路基中心深度 0.2 m 处土体在 8 月 27 日开始降温, 而深度 3.6 m 处土体在 9 月 21 日才开始降温, 可见温度相位随深度而滞后, 振幅也逐渐减小。对比图 3(a)、图 3(b)、图 3(c) 可见, 路基中心、左路肩和右路肩的温度极值分别为 -11.2°C 、 -13.0°C 和 -10.0°C 。原因在于, 路肩毗邻边坡, 且左路肩为迎风坡, 受外界环境影响较路基中心

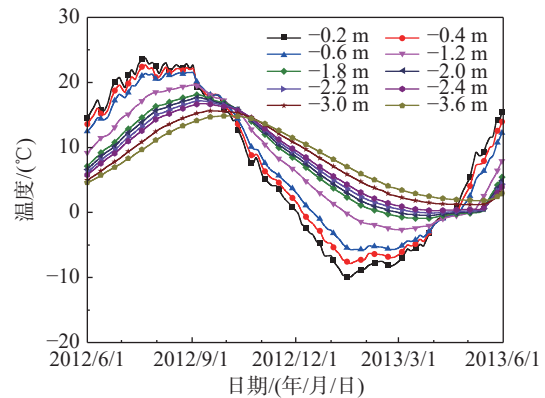
明显; 而右路肩为背风坡, 且由护道保温, 因此温度极值最高。



(a) 路基中心



(b) 左路肩



(c) 右路肩

图 3 路基不同深度处温度的变化规律
Fig. 3 Variation of temperature at different depths of the embankment

2.2 路基热负荷模型建立与验证

依据 DK221+150 断面工况, 建立高速铁路双线路基微元模型, 方法为: 第一, 在图形化工作界面, 通过直墙绘制、斜墙修改等功能, 建立路基微元模型; 第二, 在全局设定菜单, 设置路基走向和地理位置; 第三, 在建筑构件菜单, 设置路基不同部位的热特性参数; 第四, 在属性界面, 通过调整热扰, 设置路基初始温度, 通过编

辑缺省大地, 设置地基初始温度; 第五, 调用气象模型和遮挡模型, 设置路基顶面、边坡面和地基表面的边界条件。

路基微元模型如图 4 所示, 微元尺寸为长×宽×高=100 cm×100 cm×20 cm, 内部空腔尺寸为长×宽×高=5 mm×5 mm×5 mm, 共计 1344 个微元。不同部位土体的热学参数取值如表 1 所示。模型底部设置为恒温边界, 取值为 7 °C。路基前后横截面设置为绝热边界。路基顶面及两侧边坡设置为第一类边界条件, 以 1 月 1 日的气象参数作为初始值。

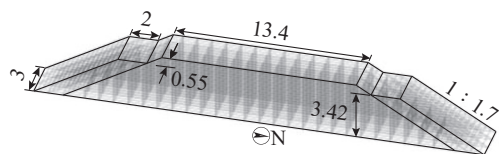


图 4 路基微元模型 /m

Fig. 4 Micro element model of the embankment

表 1 路基土体的热物性参数取值

Table 1 Values of thermophysical parameters of soils

材料	密度/(kg/m ³)	导热系数/(W/m·K)	比热容/(J/kg·K)
级配碎石	1980	1.61	1830
A/B组土	1500	0.93	1160
护道填土	1600	1.23	1520

图 5 为路基中心冻结深度实测值与预测值随时间的变化规律。可以看出, 路基中心 0.2 m 深度处土体在 11 月 28 日出现负温, 并且自上而下单向冻结, 次年 3 月 9 日达到最大冻结深度-2.4 m。之后随着春融期温度回升, 受大气环境和冻结层下方地温能的共同影响, 冻结层开始双向融化, 至 5 月 9 日完全融化, 冻结期长达 165 天。相比实测值, 路基中心最大冻结深度预测值为-2.5 m, 误差仅为 4%。考虑到模型采用的土体热物性参数与实际存在误差, 模型具有合理性。

进一步的, 验证路基中心、左路肩和右路肩-0.6 m 深度处温度预测值与实测值随时间的变化规律, 如图 6 所示。可以看出, 预测值与实测值随时间变化的相位和幅度基本吻合。由于软件内置的典型气象年数据与实际气象条件存在差异, 导致实测值与预测值仍存在差异, 冻结期路基中心、左路肩和右路肩的平均温度误差分别为 0.72 °C、2.7 °C 和 3.1 °C, 但模型的 Pearson 相关系数大于 93%, 均方根误差小于 2.71。总体而言, 本文提出的路基热负荷预测模型具有较高的可靠性。

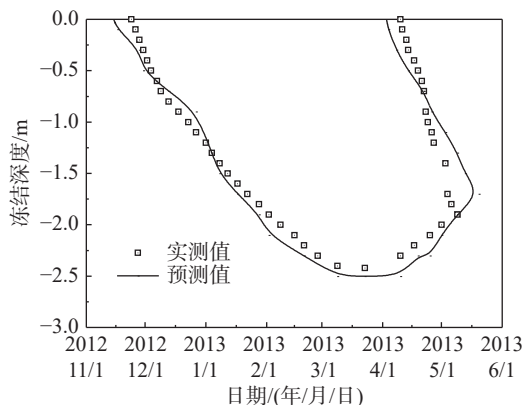
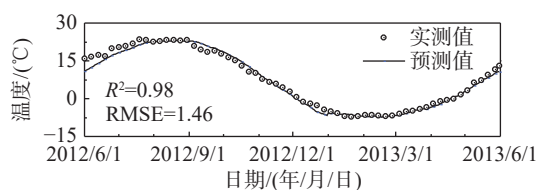
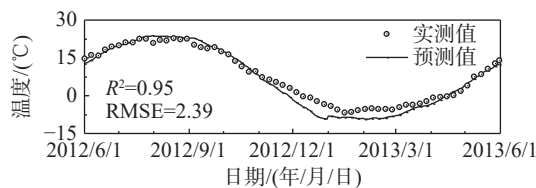


图 5 路基冻结深度实测值与预测值对比

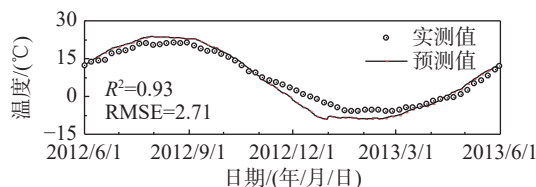
Fig. 5 Comparison between predicted and measured freezing depth of embankment



(a) 路基中心



(b) 左路肩



(c) 右路肩

图 6 温度预测值与实测值对比 (路基中心-0.6 m)

Fig. 6 Comparison between predicted and measured temperature values (embankment center -0.6 m)

3 路基热负荷计算结果分析

3.1 路基热负荷特性分析

图 7 为路基热负荷在一个昼夜的变化规律。可以看出, 热负荷与大气温度整体上呈负相关关系。原因在于, 大气温度越低, 路基表面散失的热量越多、降温幅度越大, 为了维持目标温度所需的供热量越多。12:00 左右大气温度出现波动, 热负荷并未相应波动, 原因在于路基与大气间的热交换存在滞后性, 表现为路基热负荷对大气温度的逐时波动不敏感。实际设计供热系统运行控制方法时, 应合理控制启停时间比例, 避免热量

浪费。此外,昼间 10:00~11:00 时间段的热负荷变化速率为 46 W/h,明显高于夜间 22:00~23:00 的 26 W/h。原因在于,白天路基表面受到太阳辐射和大气对流两种传热形式的叠加作用,热负荷变化速度加快。

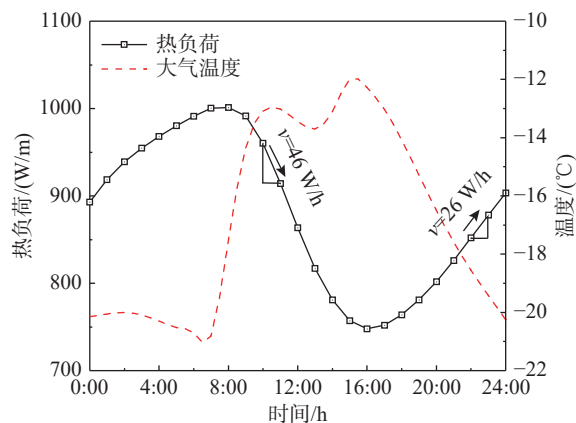


图 7 热负荷的日变化规律 (2013-01-15)

Fig. 7 Variation of the heating load (January 15, 2013)

图 8 为热负荷沿深度的变化规律。可以看出,热负荷随深度的增加而逐渐减小,这一规律与地温梯度分布规律一致。同时,热负荷集中在冻结范围以内,1.5 m 深度以下每延米长度路基的热负荷小于 10 W/m。冻结期内,基床表层热负荷占路基总热负荷的 65% 以上,并随时间逐渐降低。在第一次寒潮来临的 12 月中旬,基床表层热负荷为 655 W/m,约占总热负荷的 74%。在路基冻害整治中,一般允许一定深度的浅层冻结区[25],因此可以根据允许冻结深度和热负荷沿深度的分布比例,对热负荷折减后进行供热方案设计。

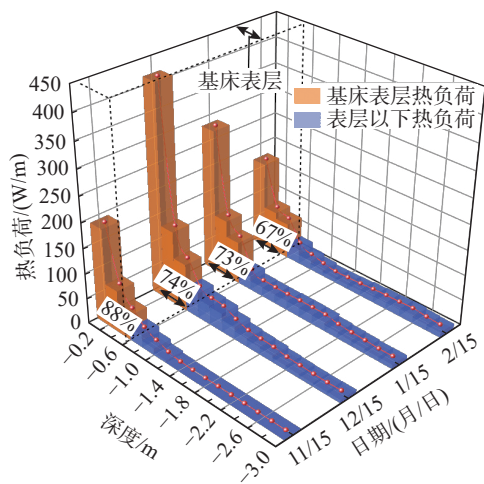


图 8 热负荷沿深度的分布规律

Fig. 8 Distribution of the heating load along depth

图 9 为路基热负荷的逐时变化规律。可以看出,在整个冻结期,热负荷呈先增大、后减小的

趋势,与大气温度变化规律相符。最大热负荷为 1397 W/m,冻结期平均热负荷为 465 W/m。而在不计护道的情况下,最大热负荷为 945 W/m,平均热负荷为 335 W/m,护道保温效果明显。

实际应用时,应结合路基型式和冻害发育特征,对供热系统进行设计。例如,假设案例高速铁路双线路基有害冻结深度为 0.4 m,结合图 9 所示结果,路基对应的最大热负荷为 452 W/m,平均热负荷为 160 W/m。当面向冻胀灾后快速处置时,供热系统按照有害冻结范围的最大热负荷设计,布设间距建议取 2.0 m~3.0 m,供热容量宜取 900 W~1360 W。当面向冻胀预防时,按照冻结期平均热负荷设计,布设间距建议取 3.0 m~5.0 m,供热容量宜取 480 W~800 W。

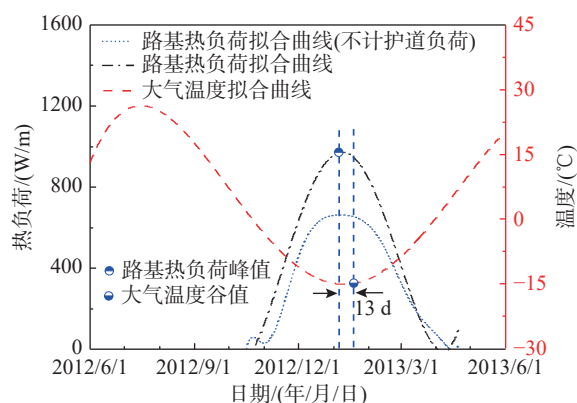


图 9 热负荷的时序特性

Fig. 9 Daily variation characteristics of the heating load

此外,热负荷峰值的日期先于大气温度谷值,提前 13 d。原因在于,DeST 软件在热负荷计算时,会综合考虑供热系统与土体热惰性对传热过程的影响。在气温谷值来临前,供热系统需要提前向路基输入热量,以抵消大气剧烈降温时的快速热量损失。在供热系统的实际运行管理时,应密切关注寒潮和强降温天气,根据热负荷在寒潮来临前的变化规律,及时调节运行模式和供热量。

3.2 路基阴阳坡效应

图 10 为路基左路肩和右路肩在不同季节沿深度的地温分布特征。可以看出,在夏季,路基温度变化受太阳辐照控制,左路肩不同深度处温度均高于右路肩,即“阴阳坡”效应。入秋后,太阳辐照强度和空气温度逐渐减小,风速逐渐增大,路基表面的热辐射随之减弱,而对流换热增大,表层土体温度变化转而受空气对流控制,迎风坡降温幅度大于背风坡,左路肩浅表温度转

而低于右路肩,至10月15日,左路肩 -0.6 m 范围内温度均低于右路肩。入冬后,“迎风坡”效应加剧,温度高低相反的深度界限逐渐向下推移,至1月15日,深度 1.2 m 以下土体温度仍保持阴阳坡效应。

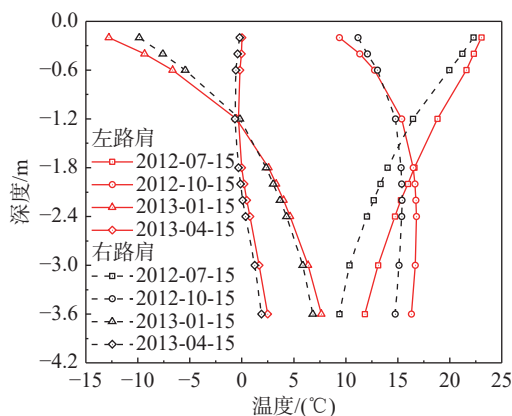


图 10 路基左路肩与右路肩的温度差异

Fig. 10 Temperature difference between left shoulder and right shoulder of the embankment

图 11 为路基左侧半幅路基(阳坡、迎风坡)和右侧半幅路基(阴坡、背风坡)的逐月累积热负荷。可以看出,左半幅路基的月累积热负荷低于右半幅路基。原因在于,路基呈梯形剖面,由于凸起形态引起的遮挡效应和局地风场效应,路基两侧的微气候存在差异,导致换热量不同。在10月、11月、12月份和次年1月、2月、3月份,右侧半幅路基的热负荷相比左侧分别高出15.95%、11.22%、4.83%、5.14%、7.03%、16.48%,与太阳总辐射量的月变化规律相同,呈先减小、后增大的趋势,如图12所示。可见,太阳总辐射量越大,阳坡与阴坡的太阳辐照得热量差值越大,阴阳坡效应引起的热负荷差异越明显。

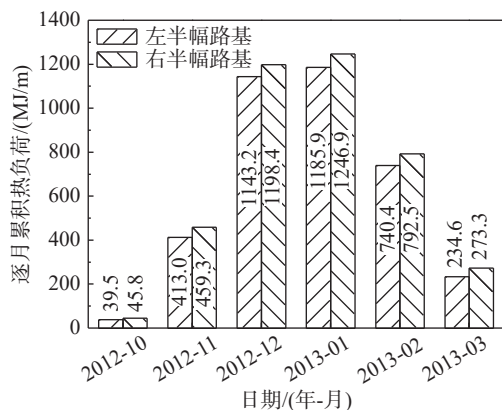


图 11 左、右半幅路基热负荷的阴阳坡效应

Fig. 11 Sunny-shady slope effect of heating load of the left and right half embankment

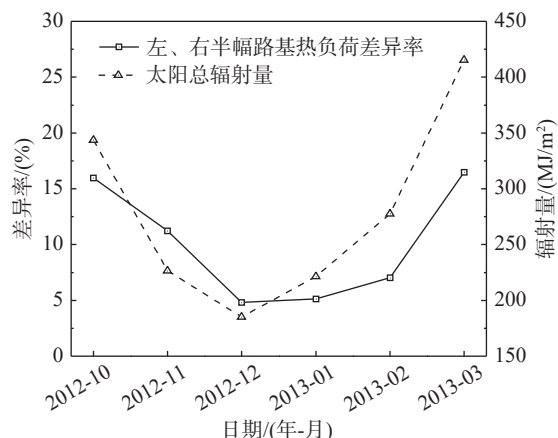


图 12 左、右半幅路基热负荷差异率和太阳总辐射量的月变化规律

Fig. 12 Monthly variation of heating load difference rate of the left and right half embankment and total solar radiation

3.3 路基热负荷与走向的敏感性分析

路基走向是导致边坡和地表太阳辐射得热量变化的主要因素。路基供热目标温度设置为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,规定自西向东方向为 0° 走向,自南向北为 90° 走向,以走向为变量,取 0° 、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° ,分析路基热负荷与走向之间的关系。图13为路基阳坡侧半幅路基和阴坡侧半幅路基热负荷年累计值随线路走向的变化规律。可以看出,当路基为 0° (东西)走向时,左右半幅路基的热负荷差异最为明显,相差6.9%。随着走向角度的增大,左右半幅路基的热负荷差值逐渐减小。在 90° (南北)走向时,左右半幅路基的热负荷差值最小,仅相差1.7%。之后,随着走向角度的继续增大,路基阴阳坡位置对换,相对差异规律一致。因此,在太阳辐照强烈、路基冻害存在显著阴阳坡效应的路段,应尽量按照南北走向进行选线设计。

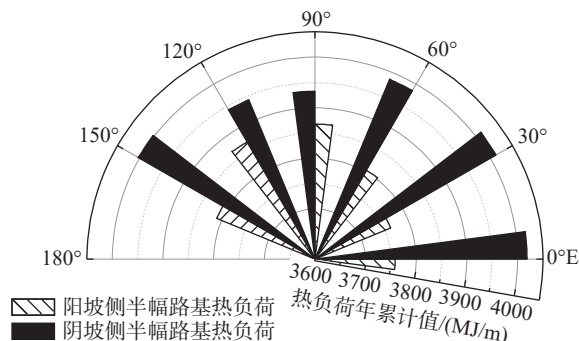


图 13 热负荷的阴阳坡效应与线路走向的关系

Fig. 13 Relationship between the sunny-shady slope effect of heating heat and the embankment trend

图 14 为路基总热负荷年累计值随线路走向的变化规律。可以看出,线路走向对路基总热负荷

具有显著影响,其中 30° 走向时的总热负荷最小,为 7775 MJ/m ; 而 150° 走向时的总热负荷最大,为 7812 MJ/m 。可见,对于同一地区、同一位置的线路:一方面,路基两侧的热负荷会出现显著差异;另一方面,当线路的走向不同时,总热负荷也会有所区别。因此在实际应用中,应根据路基热负荷时序特性和空间分布特性,合理调整路基两侧供热系统的设计容量和运行控制方案,以平衡路基两侧热负荷差异,节省初始投资和长期运行能耗。

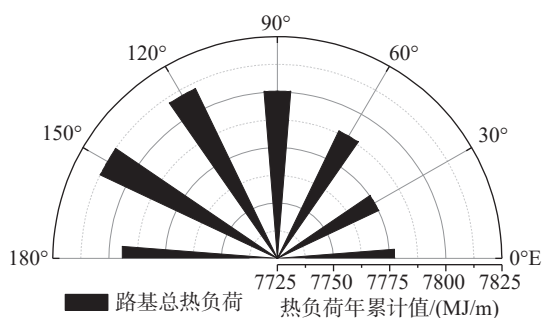


图 14 总热负荷与线路走向的关系
Fig. 14 Relationship between the total heating load and the embankment trend

4 不同气候区高速铁路路基热负荷统计

DeST 软件的气象模型包括我国 194 个气象站约 50 年的实测逐日数据。选择中国不同气候分区的 23 个城市^[26],包括严寒地区 A 区:东北(齐齐哈尔、哈尔滨、牡丹江、佳木斯),西北(克拉玛依),华北(海拉尔、满洲里);严寒地区 B 区:东北(长春、沈阳),西北(酒泉、乌鲁木齐、哈密、西宁、伊宁),华北(呼和浩特、大同);寒冷地区:东北(丹东、大连),西北(兰州、喀什、银川),华北(太原、张家口)。利用 DeST 软件对不同气候区的高速铁路双线路基热负荷进行计算,路基结构型式(不设保温护道)及走向参照哈齐高铁 DK221+150 里程路基断面。大气温度和太阳辐射条件选择 DeST 软件内置的典型气象年,利用各气象参数的日变化规律,生成逐时空气温度、太阳直射与散射辐射,作为预测的基础数据。

不同气候分区的高速铁路路基热负荷计算结果如表 2。可以看出,不同气候分区的路基热负荷相对关系为:严寒地区 A 区>严寒地区 B 区>寒冷地区。最大热负荷范围为 $531 \text{ W/m} \sim 1338 \text{ W/m}$,冻结期平均热负荷范围为 $167 \text{ W/m} \sim 645 \text{ W/m}$ 。其中,严寒地区 A 区的最大热负荷普遍在 1000 W/m

以上。总体而言,路基热负荷呈现北高、南低,内陆高、沿海低的地理分布特点。

表 2 不同气候分区的高铁路路基热负荷
Table 2 Heat loads of highspeed railway embankment in different climatic zones

序号	城市	位置	海拔/m	最大负荷/(W/m)	平均负荷/(W/m)
1	齐齐哈尔	N47.20°	145.90	1144.92	475.82
2	哈尔滨	N45.44°	142.30	1076.33	498.95
3	牡丹江	N44.35°	241.40	1014.85	446.73
4	佳木斯	N46.47°	81.20	1145.45	499.69
5	克拉玛依	N45.59°	427.30	973.46	385.22
6	海拉尔	N49.12°	610.20	1338.39	644.84
7	满洲里	N49.35°	661.70	1286.83	616.91
8	长春	N43.54°	236.80	1050.49	419.61
9	沈阳	N41.48°	42.80	809.30	315.59
10	酒泉	N39.77°	1477.20	886.34	277.13
11	乌鲁木齐	N43.50°	917.90	935.16	365.36
12	哈密	N42.78°	737.20	778.21	291.14
13	西宁	N36.62°	2261.20	612.37	218.64
14	伊宁	N43.55°	662.50	862.92	214.67
15	呼和浩特	N40.83°	1063.00	844.27	338.47
16	大同	N40.08°	1067.20	1007.00	320.37
17	丹东	N40.07°	15.10	569.22	205.41
18	大连	N39.02°	91.50	535.53	166.58
19	兰州	N36.04°	1517.20	586.31	168.13
20	喀什	N39.28°	1288.70	530.60	180.20
21	银川	N38.48°	1110.90	556.05	198.21
22	太原	N37.54°	778.30	589.01	167.51
23	张家口	N40.40°	724.20	675.94	228.40

纬度和海拔是影响气候的重要因素。图 15 为路基最大热负荷与纬度的关系。可以看出,热负荷与纬度呈正相关关系。原因在于,太阳辐射和大气温度主要通过热辐射和热对流影响路基热负荷,纬度越高,路基的太阳辐射得热量越小,大气温度越低,热负荷越大。同时,在相同纬度上,随着海拔的增加,大气温度逐渐降低,而太

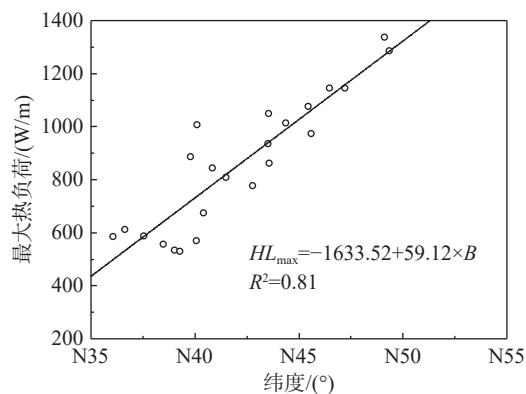


图 15 高铁路基最大热负荷与纬度的相关性
Fig. 15 Relationship between maximum heating load of high-speed railway embankment and latitude

阳辐照强度却逐渐增大,且两者之间的影响权重随纬度和海拔的变化而变化,因此相比纬度,热负荷与海拔的相关性较弱。对于本文高铁路基热负荷模型而言,最大热负荷的预测公式为:

$$HL_{\max} = -1633.52 + 59.12 \times B \quad (8)$$

式中: $HL_{\max}$ 为最大热负荷; B 为纬度。

实际应用中,可以根据线路所处的气候分区和纬度,参照图 15 所示结果,对路基热负荷进行初步评估,并考虑线路走向、附近地形条件及局地微气候等因素,对热负荷进行修正。在设计阶段,根据冻胀灾后处置和提前预防的应用需求,分别按照最大热负荷和平均热负荷来设计供热系统;在运行阶段,根据热负荷的动态变化规律,优化调整供热系统的运行模式,实现按需供热,减少能耗。

5 结论

本文首先介绍了基于 DeST 软件的路基热负荷计算方法,并依托哈齐客专工程实例验证了模型准确性,其次从时间和空间维度研究了路基热负荷特性、阴阳坡效应和随走向的敏感性,最后对不同气候区高铁路基热负荷进行统计,得到了如下结论:

(1) DeST 能耗模拟软件可以实现对路基热负荷的准确预测。计算流程为首先建立由“路基微元”构成的热负荷计算模型,然后利用 BAS 热特性模块求解微元基础温度,最后设置目标温度,通过和供热系统的解耦计算,获取逐时动态热负荷。哈齐高铁 DK221+150 路基的实例验证表明,路基温度的预测值和实测值一致,热负荷可以反映路基的竖向传热滞后效应和阴阳坡现象;

(2) 案例路基热负荷在冻结期呈先增大、后减小的规律,最大热负荷为 945 W/m,平均热负荷为 335 W/m。热负荷受到大气温度和太阳辐射的综合影响,热负荷峰值先于气温谷值出现,昼间热负荷的变化速率大于夜间。热负荷沿深度逐渐减小,实际设计时建议按照有害冻结深度对热负荷进行折减。线路走向对热负荷有显著影响,东西走向时阴阳坡效应最明显,两侧路基热负荷年累积值相差 6.9%,而 30°走向时总热负荷最小;

(3) 中国寒冷和严寒气候区 23 个城市高速铁路路基的热负荷计算结果表明,最大热负荷范围为 531 W/m~1338 W/m,平均热负荷范围为 167 W/m~

645 W/m。热负荷与纬度呈正相关关系,纬度每增加 1°,最大热负荷约增大 59 W/m。实际应用时热负荷的预测还应结合海拔和具体工况进行修正。

参考文献:

- [1] 叶阳升,蔡德钧,张千里,等.高速铁路路基结构设计方法现状与发展趋势[J].中国铁道科学,2021,42(3):1—12.
YE Yangsheng, CAI Degou, ZHANG Qianli, et al. Current status and development trend of design method for high-speed railway subgrade bed structure [J]. China Railway Science, 2021, 42(3): 1—12. (in Chinese)
- [2] 闫宏业.寒区铁路路基冻害微型盾构靶向置换整治技术[J].铁道建筑,2019,59(6):93—96.
YAN Hongye. Target replacement remediation technology for railway subgrade frost-heaving by micro-shield in cold region [J]. Railway Engineering, 2019, 59(6): 93—96. (in Chinese)
- [3] 朱梦杰,任亮,李宏男,等.基于iBeam3单元逆有限元法的冻土区管道变形研究[J].工程力学,2022,39(10):61—67.
ZHU Mengjie, REN Liang, LI Hongnan, et al. Research on pipeline deformation in permafrost region using inverse finite element method based on iBeam3 element [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(10): 61—67. (in Chinese)
- [4] 陈先华,马丽莉,杨国涛,等.寒区高铁沥青混凝土基床表层的温度场特性[J].西南交通大学学报,2019,54(6):1196—1202.
CHEN Xianhua, MA Lili, YANG Guotao, et al. Temperature field characteristics of high-speed railway subgrade surface with asphalt concrete layer in cold regions [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(6): 1196—1202. (in Chinese)
- [5] XIONG Z Y, LI X Z, ZHAO P, et al. An in-situ experimental investigate of thermo-mechanical behavior of a large diameter over length energy pile [J]. Energy and Buildings, 2021, 252: 111474.
- [6] 张国柱,张玉强,夏才初,等.利用地温能的隧道加热系统及其施工方法[J].现代隧道技术,2015,52(6):170—176.
ZHANG Guozhu, ZHANG Yuqiang, XIA Caichu, et al. The construction of a geothermal energy based tunnel heating system [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(6): 170—176. (in Chinese)
- [7] LORIA A F R, DI DONNA A, ZHANG M L. Stresses and deformations induced by geothermal operations of energy tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 124: 104438.
- [8] 李思茹,袁艳平,曹晓玲,等.综合管廊地埋管换热系统传热特性的数值模拟[J].太阳能学报,2021,42(5):24—31.
LI Siru, YUAN Yanping, CAO Xiaoling, et al. Numerical simulation on heat transfer characteristics of ground-source heat pump system in utility tunnel [J]. Acta

- Energiae Solaris Sinica*, 2021, 42(5): 24 — 31. (in Chinese)
- [9] BARLA M, DI DONNA A, SANTI A. Energy and mechanical aspects on the thermal activation of diaphragm walls for heating and cooling [J]. *Renewable Energy*, 2020, 147: 2654 — 2663.
- [10] TAN Y Q, ZHANG C, LV H J, et al. Experimental and numerical analysis of the critical heating strategy for hydronic heated snow melting airfield runway [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 178: 115508.
- [11] 胡田飞. 制冷与集热技术在寒区路基工程中的应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
HU Tianfei. Application of refrigeration and heat-collect technology to subgrade engineering in cold regions[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [12] 胡田飞, 徐丽霞, 张宗凯. 寒区路基直膨式热泵制热性能与防冻胀效果研究[J]. *制冷与空调*, 2021, 21(9): 67 — 74.
HU Tianfei, XU Lixia, ZHANG Zongkai. Study on heating performance and anti-frost effect of a new direct-expansion heat pump for embankment in cold regions [J]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2021, 21(9): 67 — 74. (in Chinese)
- [13] 胡田飞, 岳祖润, 闫晓夏, 等. 季节性冻土区路基专用地源热泵供热装置研究[J]. *中国铁道科学*, 2021, 42(6): 39 — 49.
HU Tianfei, YUE Zurun, YAN Xiaoxia, et al. Study on heating device for subgrade in seasonally frozen soil regions based on ground-source heat pump [J]. *China Railway Science*, 2021, 42(6): 39 — 49. (in Chinese)
- [14] 张松, 岳祖润, 孙铁成, 等. 季节性冻土地区铁路路基冻结深度变化规律研究[J]. *铁道建筑*, 2020, 60(1): 72 — 76.
ZHANG Song, YUE Zurun, SUN Tiecheng, et al. Study on evolution law of frost depth in railway subgrade at seasonal frozen soil region [J]. *Railway Engineering*, 2020, 60(1): 72 — 76. (in Chinese)
- [15] 刘廷章, 邵敏, 李占培, 等. 建筑空间负荷预测方法[J]. *暖通空调*, 2016, 46(10): 45 — 54.
LIU Tingzhang, TAI Min, LI Zhanpei, et al. Building load prediction methods [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2016, 46(10): 45 — 54. (in Chinese)
- [16] GB 50736—2012, 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
GB 50736—2012, Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [17] 周欣, 燕达, 洪天真, 等. 建筑能耗模拟软件空调系统模拟对比研究[J]. *暖通空调*, 2014, 44(4): 113 — 122, 131.
ZHOU Xin, YAN Da, HONG Tianzhen, et al. Comparison and research on HVAC system simulation part for different building energy modeling programs [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2014, 44(4): 113 — 122, 131. (in Chinese)
- [18] YUN K, LUCK R, MAGO P J, et al. Building hourly thermal load prediction using an indexed ARX model [J]. *Energy and Buildings*, 2012, 54: 225 — 233.
- [19] 谢晓娜, 宋芳婷, 燕达, 等. 建筑环境设计模拟分析软件 DeST第2讲建筑动态热过程模型[J]. *暖通空调*, 2004, 34(8): 35 — 47.
XIE Xiaona, SONG Fangting, YAN Da, et al. Building environment design simulation software DeST (2): Dynamic thermal process of buildings [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2004, 34(8): 35 — 47. (in Chinese)
- [20] 李海飞, 何书勇, 刘庆宽. 坡度及防雪栅对路堤周边流场影响的数值研究[J]. *工程力学*, 2021, 38(增刊 1): 21 — 25.
LI Haifei, HE Shuyong, LIU Qingkuan. Numerical study on the influence of slope and snow-fence on the flow field around embankment [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(Suppl 1): 21 — 25. (in Chinese)
- [21] 白青波, 李旭, 田亚护. 路基温度场长期模拟中的地表热边界条件研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(6): 1142 — 1149.
BAI Qingbo, LI Xu, TIAN Yahu. Upper boundary conditions in long-term thermal simulation of subgrade [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(6): 1142 — 1149. (in Chinese)
- [22] 陶文铨. 传热学[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
TAO Wenquan. Heat transfer [M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2019. (in Chinese)
- [23] 岳祖润, 程佳. 季节性冻土地区保温护道路基温度场数值模拟[J]. *石家庄铁道大学学报(自然科学版)*, 2015, 28(3): 25 — 29.
YUE Zurun, CHENG Jia. A numerical simulation of temperature field of insulating berm roadbed in seasonally frozen regions [J]. *Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science)*, 2015, 28(3): 25 — 29. (in Chinese)
- [24] 邵博文, 岳祖润, 刘建坤, 等. 严寒地区客专路堤阴阳面地温及变形差异分析[J]. *铁道学报*, 2017, 39(3): 82 — 89.
TAI Bowen, YUE Zurun, LIU Jiankun, et al. Analysis on difference of ground temperature and deformation between southern and northern sides of high-speed railway embankment in cold regions [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2017, 39(3): 82 — 89. (in Chinese)
- [25] 全睿, 宋二祥, 赵志宏, 等. 某铁路路基冻胀过程实测及“时变覆盖效应”分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(8): 1949 — 1956.
TONG Rui, SONG Erxiang, ZHAO Zhihong, et al. Measurement of frost heave process of a railway subgrade and analysis of "time-varying canopy effect" [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2020, 17(8): 1949 — 1956. (in Chinese)
- [26] 刘玉莲, 陈莉, 康恒元, 等. 中国建筑气候分区和采暖气候条件变化研究[J]. *气象与环境学报*, 2020, 36(5): 97 — 104.
LIU Yulian, CHEN Li, KANG Hengyuan, et al. A study on the variation of building climate zones and heating climate conditions in China [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2020, 36(5): 97 — 104. (in Chinese)