

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230927022

基于能源桩的桥面融雪系统经济效益评估*

曹璇^{1,2}, 刘佳欣^{1,2}, 孔纲强³, 韩婵娟^{1,2}

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 上海市公共建筑与基础设施数字化运维重点实验室, 上海 200240; 3. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098)

摘要: 基于能源桩的桥面融雪系统, 利用清洁绿色的地热能作为道路融雪除冰, 从而降低碳排放, 与我国“双碳”战略发展趋势相契合。在技术落地过程中, 实现优化设计从而降低成本至关重要。通过数值模拟方法, 研究了该系统在中国不同气候区的产热量, 并计算了三级融雪目标下桥面融雪所需热量。同时, 建立了成本测算模型, 分析了各气候区代表城市最具经济效益的能源桩融雪方案, 并基于该模型开发了计算软件, 以简化应用流程。研究结果表明: 在短期运行中, 桥面建安费和热泵费用是对成本影响最大的因素。然而, 在长期运行中电价成为最关键因素; 当热通量需求变化时, 电力融雪系统的总成本增量约为能源桩融雪系统的2倍; 在恶劣气候环境和更严苛的融雪目标下, 能源桩融雪系统的相对节省曲线更陡峭, 优势显著; 此外, 国家政策的积极支持能弥补该系统初始投资成本高的短板, 增强其市场竞争力。

关键词: 岩土工程; 能源桩; 桥面除雪; 数值模拟; 成本测算; 计算软件开发

中图分类号: TK529 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)04-0881-12

Economic Benefit Evaluation of Energy Pile-based Bridge Deck Snow Melting System

CAO Xuan^{1,2}, LIU Jiaxin^{1,2}, KONG Gangqiang³, HAN Chanjuan^{1,2}

(1. School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Key Laboratory for Digital Maintenance of Buildings and Infrastructure, Shanghai 200240, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: The bridge deck snow melting system based on energy piles utilizes clean and green geothermal energy for snow melting and de-icing on roads, thereby reducing carbon emissions, which aligns with China's development direction under the "dual carbon" strategy. In the process of technological implementation, design optimization is crucial for cost reduction. Through numerical simulation methods, the paper studied the heat production of the system in different climate zones in China and calculated the heat required for snow melting on bridge decks under three different levels of snow melting targets. Additionally, a cost estimation model was established to analyze the most cost-effective energy pile-based snow melting scheme for representative cities in each climate zone. Based on this model,

* 收稿日期: 2023-10-15; 修回日期: 2023-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007233, 517788212)资助

作者简介: 曹璇(2000—), 女, 硕士研究生。主要从事能源桩融雪系统研究。E-mail: caoxuan@sjtu.edu.cn

通信作者: 韩婵娟(1988—), 副教授, 博导。主要从事能源岩土工程、岩土工程新材料研究。

E-mail: hanchanjuan@sjtu.edu.cn

calculation software was developed to simplify the application process. The results showed that the construction and installation costs of the bridge deck and heat pump costs had the greatest impact on the overall costs in short-term operations. However, in the long run, electricity prices became the most critical factor. With changes in heat flux demand, the total cost increase in electricity-based snow melting system was about twice that of energy pile-based system. In harsh climates and with more stringent snow melting targets, the relative saving curve of the energy pile-based snow melting system was steeper, showing significant advantages. Moreover, national policy support can offset the high initial investment cost of this system, enhancing its market competitiveness.

Keywords: geotechnical engineering; energy pile; bridge deck snow melting; numerical simulation; cost estimation; calculation software development

0 引言

在北方严寒地区,冬季积雪会影响道路交通,增加车辆行驶的危险性,造成交通堵塞、车祸和航班延误,还可能导致公共交通无法运营,影响居民的正常出行。传统的融雪方法,如机械除雪和使用化学除冰盐,虽然在一定程度上能够缓解积雪问题,但却存在人力成本高、道桥腐蚀^[1]、环境污染^[2]等缺陷,并且当环境温度低于 $-3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,化学除冰盐不能有效发挥作用^[3]。因此,近年来国内外学者致力于寻找高效、环保且经济可行的融雪方法,如电力加热法^[4-6]、太阳能融雪系统^[7]和地源热泵系统^[8-11]。其中能源桩作为地源热泵融雪系统的创新性改良技术引发关注。传统的地源热泵需要较大的地下空间布置埋管,而能源桩将地热换热管置于桩基础内,充分利用已有的空间资源,避免了对土地的占用和额外的钻孔费用^[12];能源桩埋管的回填材料为混凝土,接触热阻比普通回填材料小^[13],提升了循环流体与桩周土体的传热效率。基于能源桩的融雪方法能够持续利用地热能,减少对化石燃料的依赖,从而降低碳排放量,减轻对环境的不良影响,符合我国当前“双碳”背景下的发展趋势。

国内外已有关于利用能源桩技术进行道桥融雪的一系列研究。党政等^[14]开展现场实验,将水泥粉煤灰碎石(CFG)能源桩用于混凝土路面的除冰降温,发现在冬季工况下,单根、双根能源桩均能将混凝土路面温度维持在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,达到除冰要求。G. Kong等^[15]开展现场试验研究该系统在除冰过程

中的桥面结构响应,证明在不使用热泵的情况下该系统仍能达到明显的除冰效果,且除冰过程对桥面结构的变形作用可以忽略不计。陈鑫等^[16]进行了现场试验,探究不同桥面参数和降雪条件下能源桩系统的融雪效果,发现能源桩的供热比与环境条件和桥的板桩比有关,特定条件下能源桩供热可满足融雪需求。C. Han等^[17]和H. Liu等^[18]分别建立了基于能源桩的桥面融雪系统的数值模型,以研究该系统在美国和加拿大应用的可行性,结果表明,能源桩的重要设计参数如流速、桩径会影响桩的热转换效率,该系统是否可行取决于当地的气候和积雪条件。H. Liu等^[18]计算得出,基于能源桩的融雪系统比基于电力的融雪系统相对用电量更少。闫振国等^[19]基于北京大兴机场能源桩道面融雪试验,通过数值方法分析桩内回路对能源桩取热效率和增设储热水箱对系统融雪效果的影响,发现螺旋型回路能提供较多的地热能,实际应用中增设储热水箱可明显提升系统的融雪水平。以上研究基本可证明能源桩在道桥融雪方面具备技术可行性,但在工程应用中,还需要综合考虑成本投入和效益回报。目前关于能源桩融雪系统经济可行性的研究仍相对较少,成本与性能之间的平衡仍有待深入研究。

为此,本文根据中国气候区划标准,从5个不同气候区选择了13个具有代表性的城市(表1),建立基于能源桩的桥面融雪系统的数值模型,探究在不同地理和气候条件下的系统净能量提取量;建立融雪系统的成本测算模型,在满足融雪要求的前提下,通过对系统设计参数进行优化,为各个城市提供最具经济效益的能源桩融雪方案。

表1 选取的13个代表城市及气候分区

Table 1 Thirteen representative cities and their climate zones

| 气候区 | 城市 |
|-----|---------------|
| I | I A 漠河 |
| | I B 嫩江 |
| | I C 哈尔滨 长春 |
| | I D 沈阳 张家口 |
| II | II A 北京 |
| | II B 太原 |
| | III A 南京 |
| III | III B 合肥 |
| | III C |
| IV | IV A |
| | IV B |
| V | V A |
| | V B |
| VI | VI A 西宁 |
| | VI C 拉萨 |
| VII | VII B 乌鲁木齐 |

1 能源桩融雪系统的数值模拟方法

1.1 桥面融雪热通量需求分析

桥面融雪所需热通量的确定是系统设计优化的前提。本文采用C. Han等^[17]的融雪所需热通量的计算方法:

$$q_0 = q_s + q_m + A_r(q_h + q_e) \quad (1)$$

式中, q_0 为融雪表面所需的热通量; q_s 表示显热通量; q_m 代表潜热通量; q_h 表示无雪表面对流和辐射热通量; q_e 表示蒸发热通量; A_r 定义为无雪面积比, 其计算方法是无雪面积除以总面积。通常 A_r 设置为0、0.5、1三个值, $A_r=0$ 表示整个桥表面被一层积雪覆盖, 没有对流、辐射和蒸发热损失; $A_r=1$ 表示系统可以实现实时融雪; $A_r=0.5$ 介于二者之间。

本文以江苏省江阴市的某预制空心板筒支桥梁作为原型^[20]进行分析。该桥梁的具体参数见表2。由于降雪通常发生在冬季寒冷时期, 因此本文筛选出1980~2020年每个城市最冷月份的气候数据作为输入参数^[21]。

1.2 基于能源桩的桥面融雪系统的数值模型

基于能源桩的桥面融雪系统由能源桩、热泵、桥面水循环加热系统、水泵和相关控制传感器组成。如图1所示, 本文利用COMSOL Multiphysics[®]软件, 分别建立能源桩和桥面水循环加热系统的有限元模型, 采用简化热泵模型(式(2))实现二模型的耦合。已有研究表明, 热泵的COP在3~6^[22], 本文选取了COP=3的保守值。

$$Q_{\text{heat}} = \frac{\text{COP}}{\text{COP} - 1} N Q_{\text{pile}} \quad (2)$$

式中, Q_{heat} 表示热泵传递给桥面水循环加热系统的热量; N 是桥的桩基数, 设置为20^[20]; Q_{pile} 表示单根能源桩输出的热量。

考虑到管道中流体向桥面的传热过程复杂, 大部分热量并不能直接用于融雪, 因此建立桥面水循环加热系统的数值模型是必要的。模型采用非等温管流模块模拟循环流体的换热过程; 采用固体传热模块模拟桥体的传热过程; 将这两个物理过程耦合计算桥面提供的热流密度。模型参数设置见表2。为节省计算资源, 仅选择其中一跨进行建模分析。

对于非等温管流的传热过程, 做以下假设: (a) 管道为高密度聚乙烯(HDPE)管, 内径30 mm, 壁厚2 mm, 管道总长度442.5 m; (b) 相邻管道间距0.5 m; (c) 管道埋深为14 cm。由于管道的长径比较大, 径向传热过程与轴向传热过程相比可以忽略不计, 该模型将管道流动简化为一维流动。热泵转换的热量 Q_{heat} 作为热源, 对桥面水循环加热系统的循环流体进行加热, 入口温度 T_{ins} 可由下式计算:

$$T_{\text{ins}} = T_m + \frac{4Q_{\text{heat}}}{c_{p,w} \rho_w \pi d^2 u} \quad (3)$$

式中, T_m 为地表平均温度; $c_{p,w}$ 指水的比热容; ρ_w 是水的密度; d 为换热管的内径; u 是桥面系统循环流体的流速, 设为0.7 m/s。

应用牛顿流体模型, 通过求解动量方程、连续性方程和能量守恒方程, 可以计算出管道中不可压缩流体的压力和温度^[17]。

对于固体传热过程, 由于桥面的对称性, 将桥四周和底部设置为绝热边界; 桥面指定为对流边界, 外部环境温度为空气干球温度, 对流传热系数设为10 W/(m·K)。通过求解能量守恒方程可以得到桥面温度:

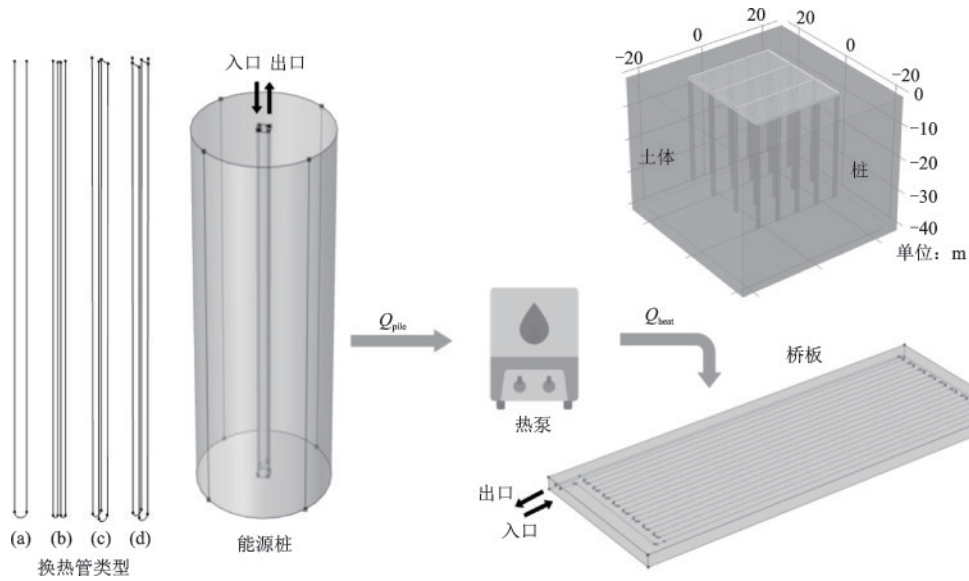


图1 基于能源桩的桥面融雪系统示意

Fig.1 Schematic diagram of energy pile-based bridge deck snow melting system

表2 桥面水循环加热系统尺寸及热物性参数

Table 2 Dimensions and thermophysical parameters of bridge deck water circulation heating system

| 参数 | 值 | 单位 |
|----------------|-------------|----------|
| 桥板长度 | 3 × 10 (三跨) | m |
| 桥板宽度 | 26 | m |
| 桥板厚度 | 0.8 | m |
| 混凝土导热系数 | 1.65 | W/(m·K) |
| 混凝土比热容 | 837 | J/(kg·K) |
| 水导热系数 | 0.56 | W/(m·K) |
| 水比热容 | 4 190 | J/(kg·K) |
| 管壁 (HDPE) 导热系数 | 0.46 | W/(m·K) |

$$\rho_c c_{p,c} \left(\frac{\delta T_{deck}}{\delta t} + u \cdot \nabla T_{deck} \right) - \nabla \cdot (k_c \nabla T_{deck}) = Q_{wall} \quad (4)$$

式中, ρ_c 是混凝土密度; $c_{p,c}$ 是混凝土比热容; T_{deck} 是桥面温度; k_c 是混凝土导热系数。桥面初始温度设置为环境温度, Q_{wall} 是通过管壁与桥面进行的热交换。

桥面产生的热通量 (q_{deck}) 可以通过以下方式计算:

$$q_{deck} = \rho_c c_{p,c} h \frac{T_{deck} - T_a}{t} \quad (5)$$

式中, h 是桥板厚度; T_a 是环境温度。

能源桩将低品位的地热能转化为高品位的热能, 其能量提取效率直接决定了可供给桥面融雪的能量。已有研究表明^[23-24], 能源桩的能量提取率与当地气候及设计参数如流速、换热管类型有关。本文建立有限元模型, 对能源桩的传热性能进行分

析, 模型参数见表3。采用非等温管流模块模拟换热管的换热过程; 循环流体为水和10%乙醇的混合液体, 避免低温下流体结冰导致系统瘫痪的问题。采用固体传热模块模拟换热管、桩、土的换热过程; 桩周土体计算域设为圆柱体。设土体边界为绝热边界, 地温为深度和时间的函数^[25]。

模型设置了4种换热管类型: (a) U型、(b) W型、(c) 双U型(串联)、(d) 双U型(并联)。换热管布置如图1所示, 长度分别为 (a) 60.5 m、(b) 116.8 m、(c) 121.0 m、(d) 121.6 m。

1.3 模拟结果与分析

以第22 h的数据作为热泵的输入值(各城市每小时变化率在5%以内)。以典型城市北京 (IIA区, 平均地温 13.9 °C)、漠河 (IA区, 平均地温 1.7 °C) 为例, 如图2所示, 地温越高, 能源桩的单桩

表3 能源桩设计参数

| 参数 | 值 | 单位 |
|----------|---------|----------|
| 桩埋深 | 30 | m |
| 桩直径 | 1.2 | m |
| 管道内径 | 30 | mm |
| 管道壁厚 | 2 | mm |
| 循环流体流速 | 0.3~0.9 | m/s |
| 桩周土体导热系数 | 2 | W/(m·K) |
| 桩周土体比热容 | 1 000 | J/(kg·K) |
| 混凝土导热系数 | 1.65 | W/(m·K) |
| 混凝土比热容 | 837 | J/(kg·K) |
| 水导热系数 | 0.56 | W/(m·K) |
| 水比热容 | 4 190 | J/(kg·K) |

取热量越多。随着循环液流速的增加,取热量亦随之增加,流速 0.9 m/s 时的取热量比流速 0.3 m/s 时提高了 8.8%(U 型)~17.7%(双 U 型)。换热管类型对取热效率的影响明显,U 型管取热效率最低;双 U 型管效率最高,比 U 型管取热效率高 80~89%,而串联或并联对取热量无明显影响;W 型管取热效率介于二者之间。考虑到 4 种类型换热管的长度不同,可认为有限时间内换热管的有效长度越长,换热流体与热源之间的换热面积越大,从热源中提取的热量越多。

假定 20 根桩全部作为能源桩提取地热能,且单桩取热量设置为最高水平(流速 0.9 m/s、双 U 型换热管)。如图 3 所示,在 $A_r=1$ 的融雪目标下,沈阳、北京等城市的融雪系统能够达到融雪热量需求,而漠河、哈尔滨等气候严寒多雪的城市仅凭能源桩提取的地热能不能够满足融雪需要,仍需辅以额外的电能才能投入实际工程使用;在 $A_r=0.5$ 的融雪目标下,漠河、嫩江的融雪系统仍不能达到热量需求;在 $A_r=0$ 的融雪目标下,所有城市的融雪系统均能满足融雪需要,但因系统提供的热量大于融雪需要的热量,将产生冗余能量,此时应适当减少能源桩数量或降低换热流体流速以避免能量浪费。

2 融雪系统的成本测算模型

不同的地区气候环境不同,融雪所需的能量不等,而基于能源桩的桥面融雪系统的热量提取量也会因能源桩的设计参数不同而存在差异,因此需要

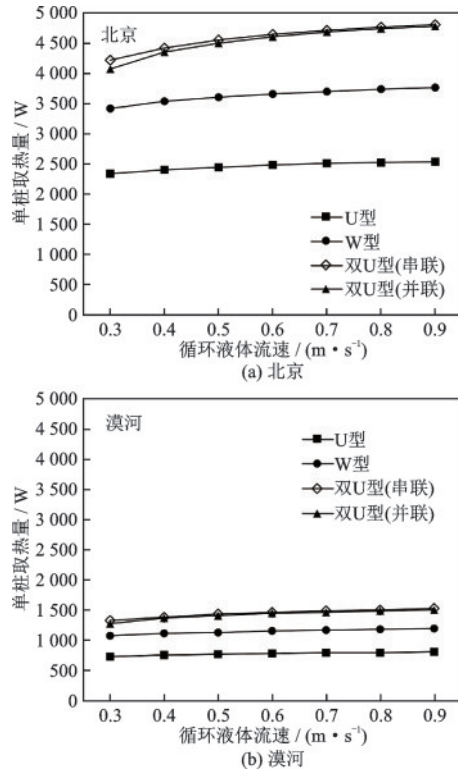


图2 不同流速、换热管类型下北京和漠河单桩取热量变化
Fig.2 Heat extraction variations per pile under different fluid velocity and heat exchange tube type in Beijing and Mohe

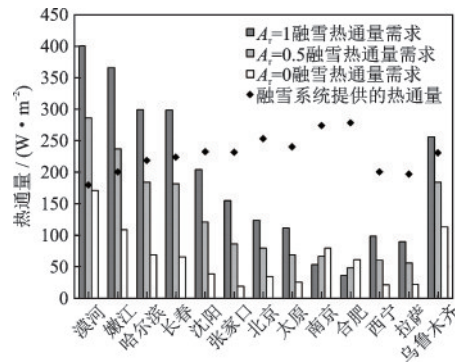


图3 不同城市能源桩融雪系统的融雪能力
Fig.3 Snow melting capacity of energy pile-based snow melting system in different cities

设定算法计算出最为科学的解决方案,既要避免能量浪费,还要与其他融雪方案进行对比,确保其经济效益。本文从成本角度出发建立测算模型,在满足融雪要求的前提下,通过对能源桩桩数和设计参数进行优化,为每个城市提供成本最低的能源桩融雪方案,并将其与基于电力的融雪系统进行成本对比,探讨其成本优势。

2.1 经济效益评估相关参数及基本假设

经调研,基于能源桩的桥面融雪系统在建设安装及后期检修过程中将产生建设安装费、热泵、水泵、防冻液、管道检修等必需费用。表4显示了本测算模型应用时使用的假定价格。本模型应用过程中使用的用电价格数据(表5)来自中国电力企业联合会的全国电价监测系统。

表4 融雪系统各项目及成本
Table 4 Snow melting system items and costs

| 项目 | 成本 | 单位 |
|--------|--------|-------|
| 热泵 | 16 800 | 元/台 |
| 水泵 | 1 200 | 元/台 |
| 防冻液 | 5 | 元/千克 |
| HDPE管 | 2.6 | 元/米 |
| 桩(安装) | 400 | 元/根 |
| 桥板(安装) | 100 | 元/平方米 |
| 管道检测 | 0.5 | 元/米/年 |
| 管道维修 | 10 | 元/米/年 |
| 热泵维修 | 200 | 元/台/年 |
| 水泵维修 | 100 | 元/台/年 |

表5 各代表城市用电价格

Table 5 Electricity prices for each city

| 城市 | 电价/元/(kW·h) |
|------|-------------|
| 漠河 | 0.717 |
| 嫩江 | 0.717 |
| 哈尔滨 | 0.717 |
| 长春 | 0.723 |
| 沈阳 | 0.529 |
| 张家口 | 0.564 |
| 北京 | 0.770 |
| 太原 | 0.511 |
| 南京 | 0.647 |
| 合肥 | 0.564 |
| 西宁 | 0.425 |
| 拉萨 | 0.650 |
| 乌鲁木齐 | 0.413 |

近年来国家对节能减碳的支持力度逐渐加大,各地区纷纷出台针对于地热建设项目的补贴政策。市场竞争中,政府补贴是企业发展新产品新技术的重要动力,也是企业降低成本、增强竞争力的关键因素,因此测算模型中考虑了该因素,设置两类补

贴形式,一是按初始投资额百分比进行补贴,补贴力度由10%到40%分4档,二是按建筑面积补贴,设50、55、60、65、70元/平方米5档。

2.2 融雪成本测算模型

通过数值模拟,已得到13个代表城市的不同参数下(流速0.3~0.9 m/s、4种换热管类型)能源桩单桩产热数据;数值模型中输入各城市达到三级融雪目标($A_r=1, 0, 0.5$)的热通量需求,可模拟得到桥面水循环加热系统需要的入水口温度,由式(3)可得:

$$Q'_{\text{heat}} = (T_{\text{ins}} - T_{\text{m}}) c_{\text{p,w}} \rho_{\text{w}} \frac{\pi d^2}{4} u \quad (6)$$

式中, Q'_{heat} 是满足融雪目标时热泵所需提供的热量。

当城市的气候温和、降雪较少、系统产生的热量能够满足融雪目标需求时,即:

$$\frac{\text{COP}}{\text{COP} - 1} N Q_{\text{pile}} > Q'_{\text{heat}} \quad (7)$$

能源桩的设置数量 N (向上取整)为:

$$N = \frac{Q'_{\text{heat}}}{Q_{\text{pile}}} \frac{\text{COP} - 1}{\text{COP}} \quad (8)$$

否则,所有桩基需全部安装换热管提取地热能,即 $N=20$,且桥面系统需要额外输入电能 Q_{extra} :

$$Q_{\text{extra}} = Q'_{\text{heat}} - \frac{\text{COP}}{\text{COP} - 1} N Q_{\text{pile}} \quad (9)$$

基于能源桩的桥面融雪系统的总成本(TC_{ep})由初始投资成本(C_i)、运营成本(C_o)和维护成本(C_m)三部分组成。

初始投资成本(C_i)包括能源桩和桥面水循环加热系统的建设安装费、水泵费用、热泵费用、HDPE管费用及防冻液的费用;运营成本(C_o)包括水泵和热泵运行费用以及额外输入的电能;维护成本(C_m)包括换热管的检修费和热泵、水泵等的修理费,具体计算方法见表6,其中水泵的功率 Q_{pump} 计算方法为:

$$Q_{\text{pump}} = \frac{\rho_{\text{w}} g Q' H}{\eta} \quad (10)$$

式中, Q' 为泵的流量; H 表示水泵的扬程,设为20 m; η 为水泵的效率(设为70%)。

当考虑政府补贴政策时,总成本计算方法为:

按初始投资额百分比($i\%$)补贴:

$$TC_{\text{ep}} = C_i \times i\% + C_o + C_m \quad (11)$$

表6 基于能源桩的桥面融雪系统的各项目成本计算公式

Table 6 Cost calculation formulae for project of energy pile-based bridge deck snow melting system

| 项目 | 计算公式 |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 初始投资成本 C_i | 建安费 C_{i1} 桥面积 \times 桥面建安费单价 $+ N \times$ 单桩建安费 |
| | 水泵 C_{i2} 水泵单价 $\times 3$ |
| | 热泵 C_{i3} 热泵单价 $\times 1$ |
| | HDPE管 C_{i4} (桥面系统管道长度 $+ N \times$ 单桩管道长度) \times HDPE管单价 |
| | 防冻液 C_{i5} (桥面系统管道长度 $+ N \times$ 单桩管道长度) \times 管道截面积 \times 防冻液密度 \times 防冻液单价 |
| 运营成本 C_o | 水泵 C_{o1} $Q_{pump} \times 3 \times$ 当地电价 \times 运行时长 |
| | 热泵 C_{o2} $N \times Q_{pile}/2 \times$ 当地电价 \times 运行时长 |
| | 额外电能 C_{o3} $Q_{extra} \times$ 当地电价 \times 运行时长 |
| 维护成本 C_m | 维修费 C_{m1} (换热管总长度 \times 维修单价 $+ 热泵维修单价 + 水泵维修单价) \times$ 运行时长 |
| | 检测费 C_{m2} 换热管总长度 \times 检测单价 \times 运行时长 |

按建筑面积补贴(j 元/平方米):

$$TC_{ep} = C_i + C_o + C_m - \text{桥面积} \times j \quad (12)$$

以系统连续运行30d的总成本为优化目标,可得到成本最低的最优设计参数。

基于电力的桥面融雪系统的总成本(TC_{elec})亦由初始投资成本(C'_i)、运营成本(C'_o)和维护成本(C'_m)三部分组成。与基于能源桩的融雪系统不同,其初始投资成本不需要能源桩的建设安装费和热泵费用,运营和维护成本也不需要热泵

耗能和管道的检修费,但运营过程中需要大量电力输入:

$$Q_{elec} = Q'_{heat} \quad (13)$$

基于电力的融雪系统的各项目费用计算见表7。对比基于能源桩和基于电力的桥面融雪系统的总成本,以相对节约(Relative savings, RS)来评估能源桩融雪系统的经济效益:

$$RS = \left(\frac{TC_{elec}}{TC_{ep}} - 1 \right) \times 100\% \quad (14)$$

表7 基于电力的桥面融雪系统的各项目成本计算公式

Table 7 Cost calculation formulae for each project of electricity-based bridge deck snow melting system

| 项目 | 计算公式 |
|---------------|---------------------------------------------------------------------|
| 初始投资成本 C'_i | 建安费 C'_{i1} 桥面积 \times 桥面建安费单价 |
| | 水泵 C'_{i2} 水泵单价 $\times 1$ |
| | HDPE管 C'_{i3} 桥面系统管道长度 \times HDPE管单价 |
| | 防冻液 C'_{i4} 桥面系统管道长度 \times 管道截面积 \times 防冻液密度 \times 防冻液单价 |
| 运营成本 C'_o | 水泵 C'_{o1} $Q_{pump} \times$ 当地电价 \times 运行时长 |
| | 电能 C'_{o2} $Q_{elec} \times$ 当地电价 \times 运行时长 |
| 维护成本 C'_m | 维修费 C'_{m1} (换热管总长度 \times 维修单价 $+ 水泵维修单价) \times$ 运行时长 |
| | 检测费 C'_{m2} 换热管总长度 \times 检测单价 \times 运行时长 |

3 能源桩融雪系统经济效益分析

本节对融雪成本测算模型进行了敏感性分析,对基于能源桩和基于电力的桥面融雪系统成本测算结果进行了对比分析,并基于此开发出计算软件。

3.1 经济效益评估基本假设的敏感性分析

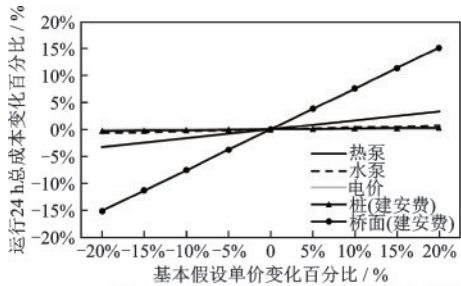
测算模型应用时的基本假设包括表4中的10个项目成本以及用电价格,将各项目单价按5%幅度上(下)调20%,运用单因素敏感性分析法,考察能源桩融雪系统的总成本和相对电力融雪系统的节省百分比对各项价格变动的敏感程度。

如图4所示(其他参数:防冻液费用、HDPE管费用和系统的检修费对能源桩融雪系统总成本的影响在0.1%以内,故不加以分析),系统运行24 h内,桥面(建安费)对经济效益的影响最为显著,热泵费用次之,水泵费用、电价和桩(建安费)的影响仅在5%以内;能源桩融雪系统的相对节省程度随热泵、水泵价格和桩建安费用的上升而增大,随桥面建安费用和电价的上升而减小。运行360 d,电价成为影响经济效益的最关键因素,电价上升20%,

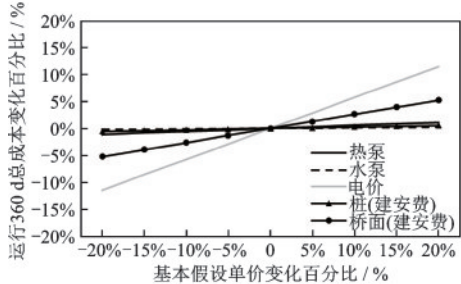
总成本将增加11%,相对节省增加10%;其他项目对总成本和相对节省的影响在5%以内,且随着这些项目价格的上升,能源桩系统的相对节省程度都有小幅度下降。

3.2 能源桩融雪系统和电力融雪系统成本对比

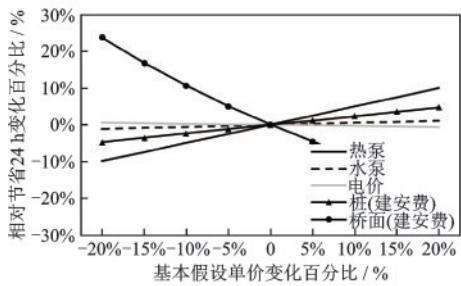
根据13个选定城市的成本测算结果,融雪系统运行360 d的总成本与所需热通量有一定线性关系。如图5所示,能源桩融雪系统的线性系数 $k_{EP}=412.9$ 元/W/m²,相关系数 $R_{EP}^2=0.89$;电力融雪系统的线性系数 $k_{ELEC}=841.6$ 元/W/m²,相关系数 $R_{ELEC}^2=0.84$,相同的热通量需求变化,电力融雪系统的总成本增量约为能源桩融雪系统的两倍。



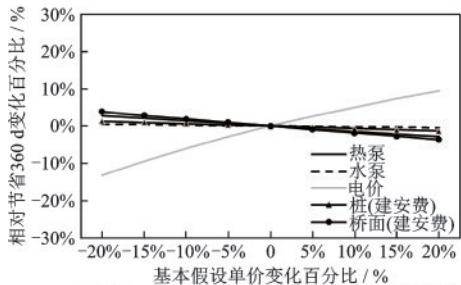
(a) 运行24 h不同基本假设对于总成本的敏感性



(b) 运行360 d不同基本假设对于总成本的敏感性



(c) 运行24 h不同基本假设对于相对节省的敏感性



(d) 运行360 d不同基本假设对于相对节省的敏感性

图4 不同基本假设对于总成本和相对节省的敏感性分析
Fig.4 Sensitivity analysis of total cost and relative savings under different basic assumptions

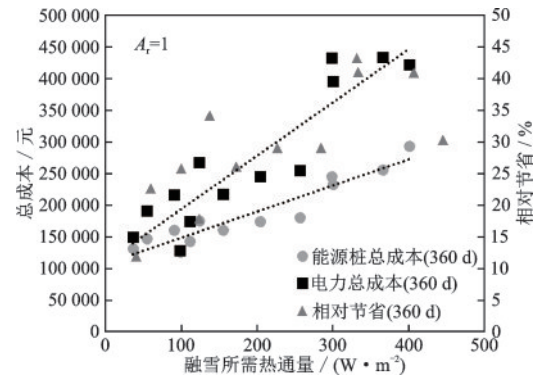


图5 融雪系统总成本与融雪所需热通量具有线性关系

Fig.5 Linear relationship between total cost of snow melting system and heat flux required for snow melting

运行前期,能源桩融雪系统因具有较高的桩建安费用和热泵费用而使总成本大于电力融雪系统,运行后期,随着运营电费逐渐增加,能源桩系统经济效益明显增强,远优于电力融雪系统。如图6、图7所示,不同融雪目标下,融雪所需的总成本差异明显,长期运行情况下, $A_r=1$ 的能源桩融雪系统的相对节省百分比大于 $A_r=0$ 和 $A_r=0.5$,且气候环境越恶劣,融雪目标越苛刻,能源桩系统相对节省曲线越陡峭,能够更快达到经济效益的逆转。以漠河为例,2022年漠河降雪天数共计27 d,假设年降雪天数即为融雪系统的年运行天数,则360 d的累计运行时长等同于系统投入使用13.3 a,当要求 $A_r=1$ 时,能源桩融雪系统累计运行76 d(即系统投入使用2.8 a)即可使总成本低于电力融雪系统; $A_r=0.5$ 时,

需要能源桩系统累计运行 130 d(即系统投入使用 4.8 a)达到成本逆转; $A_r=0$ 时,则需要能源桩系统

累计运行 550 d(即系统投入使用 20.4 a)后才能具备成本效益。

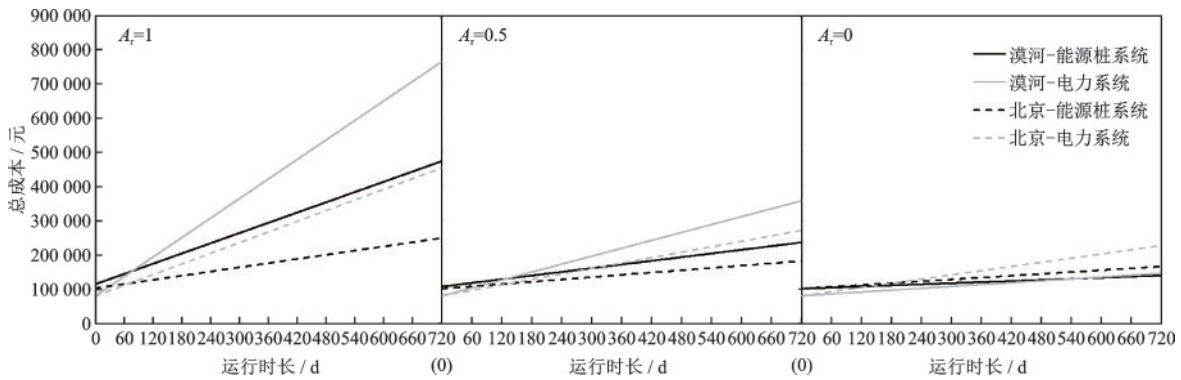


图6 能源桩融雪系统和电力融雪系统总成本对比(以漠河和北京为例)

Fig.6 Comparison of total cost between energy pile-based snow melting system and electricity-based snow melting system (examples from Mohe and Beijing)

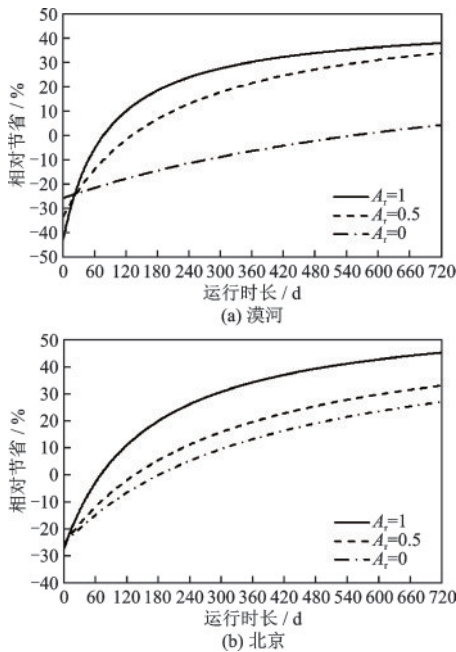


图7 能源桩融雪系统相对于电力融雪系统的成本节约百分比(以漠河和北京为例)

Fig.7 Cost saving percentage of energy pile-based snow melting system versus electricity-based snow melting system (examples from Mohe and Beijing)

以北京为例,探究两种融雪系统的成本组成情况,如图8所示,能源桩融雪系统的初始成本占比最大,电力融雪系统的运营成本占比最大,随着融雪目标要求的提高,运营后期的电力费用提高,二者的初始成本占比逐渐降低,运营成本占比逐渐上升。

3.3 能源桩融雪系统的政策补贴分析

政府补贴能够降低新技术的投入成本,是提升地热项目竞争力的重要来源。如图9所示,以融雪目标 $A_r=1$ 为例,按面积补贴会大幅降低初始投资成本,即使每平方米补贴 50 元,也能够使能源桩融雪系统的初始投资成本直接低于电力系统初始成本,从而使能源桩系统的经济效益从始至终优于电力系统。与无补贴情况相比,短期运行的相对节省曲线上升近 50%,长期运行的相对节省曲线上升 10%~35%,成本效果显著;按初始投资额百分比补贴会使总成本和相对节省情况呈现线性变化趋势,补贴力度每增加 10%,短期运行的相对节省曲线将上升 10%,长期运行的相对节省曲线将上升 2%~9%,按初始投资额 30%~50% 的补贴力度能基本达到按面积补贴的相对节省水平。

3.4 计算软件开发

此外,由于成本计算、方案比选过程繁琐,难以在工程中实现快速应用,基于以上方法和结果,本研究将数据封装,开发了基于 Python 的计算软件,方便用户快速、个性化地开展经济性效益评估。程序设计中主要调用了第三方库 PyQT5 和 PyQt-Graph 进行可视化图形界面设计。

程序界面如图 10 所示,政府补贴政策栏和基本

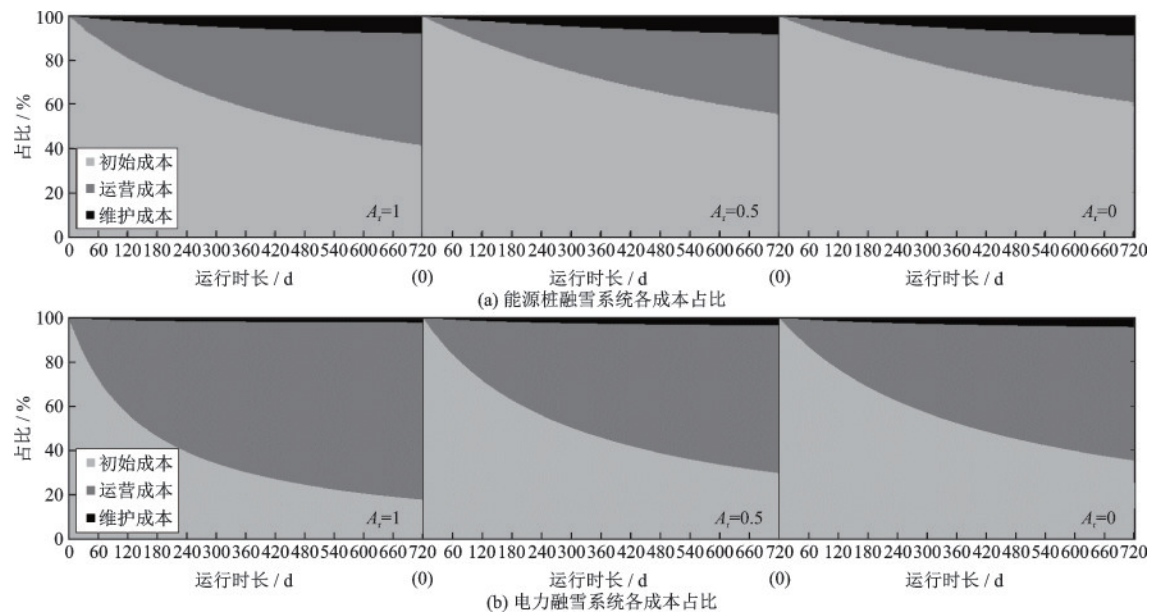


图8 不同融雪目标下能源桩融雪系统、电力融雪系统各成本占比(以北京为例)

Fig.8 Cost proportion of energy pile-based and electricity-based snow melting system under different snow melting targets (example from Beijing)

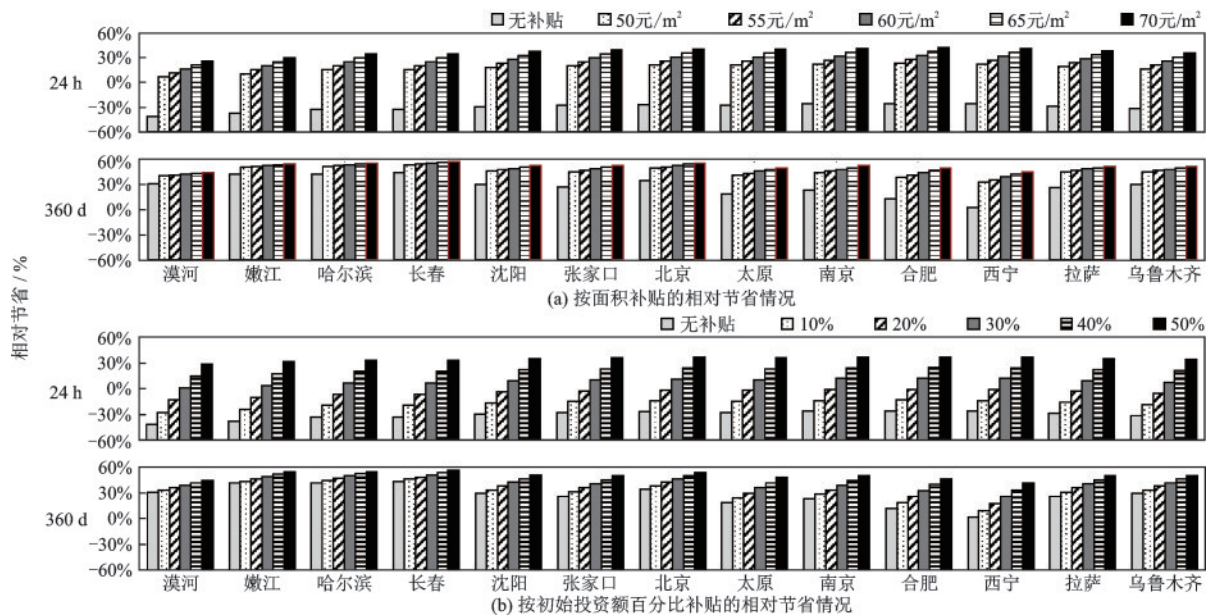


图9 融雪系统连续运行24 h/360 d、按面积/初始投资额百分比补贴的相对节省情况

Fig.9 Relative savings for continuous operation of snow melting system for 24 hours/360 days and subsidies by area/initial investment percentage

假设(成本)栏内的项目均为用户输入框,用户可以根据工程的实际情况进行修改,初始值设置为本文推荐值。计算后,用户将获得三级融雪目标下基于能源桩的桥面融雪系统的最优方案,并在二级页面获得不同运营时长的具体成本数额以及相同情况下电力融雪系统的可比数额。通过界面中的可视化图形,用户能够直观明了地得到融雪总成本趋势

和能源桩融雪系统的相对节约趋势。

4 结 语

(1)在融雪目标 $A_r=1$ 下,对于气候温和的城市(如沈阳、北京),基于能源桩的桥面融雪系统能够满足融雪热量需求,而在气候严寒多雪的城市(如漠河、哈尔滨),仅依靠能源桩提取的地热能并不能



图10 成本测算模型的应用程序界面

Fig.10 Application interface of cost estimation model

满足融雪所需,需要额外的电能补充;在融雪目标 $A_r=0$ 下,所有城市的能源桩融雪系统均能满足融雪需要,但会产生冗余能量,为避免能量浪费,需要减少能源桩数量或降低换热流体的流速。

(2)通过成本测算模型,可基于不同城市的融雪需求,制定经济高效的能源桩融雪方案。结果表明,系统运行 24 h 内,桥面建安费对成本的影响最为显著,其次是热泵费用;在系统运行 360 d 内,电价成为影响成本的关键因素。在进行经济效益评估时,应重点关注关键项目成本的调研和控制。

(3)相较于电力融雪系统,能源桩融雪系统具有显著的成本优势。尽管能源桩系统的初期投资较高,但在长期运行中,通过节省运营电费,其经济效益明显增强。在恶劣气候环境和严苛的融雪目标下,能源桩系统的成本优势更为明显。国家政策补贴能够弥补初期投资高的短板,提高其市场竞争力。随着“双碳”目标相关政策的推进,基于能源桩的融雪系统将迎来广阔的发展潜力。

本文仅针对一座桥梁进行分析测算,对于不同尺寸桥板和桩基布置条件下的融雪系统产热量和经济效益评估,有待进一步分析。

参考文献:

[1] Xu H, Wang D, Tan Y, et al. Investigation of design alternatives for hydronic snow melting pavement systems in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 170: 1413-1422.

[2] Habibzadeh-Bigdarvish O, Yu X, Lei G, et al. Life-cycle

cost-benefit analysis of bridge deck de-icing using geothermal heat pump system: a case study of North Texas [J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 47: 101492.

[3] Xu H, Tan Y. Modeling and operation strategy of pavement snow melting systems utilizing low-temperature heating fluids[J]. Energy, 2015, 80: 666-676.

[4] Sassani A, Ceylan H, Kim S, et al. Development of carbon fiber-modified electrically conductive concrete for implementation in Des Moines International Airport [J]. Case Studies in Construction Materials, 2018, 8: 277-291.

[5] Liu K, Fu C, Xie H, et al. Design of electric heat pipe embedding schemes for snow-melting pavement based on mechanical properties in cold regions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 165: 102806.

[6] Won J P, Kim C K, Lee S J, et al. Thermal characteristics of a conductive cement-based composite for a snow-melting heated pavement system [J]. Composite Structures, 2014, 118: 106-111.

[7] Kim S, Oh H J, Han S J, et al. Development of black-ice removal system with latent heat thermal energy storage and solar thermal collectors [J]. Energy, 2022, 244: 122721.

[8] 徐慧宁, 流体加热道路融雪系统温-湿耦合融雪模型及仿真分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

Xu H N. Development and simulation of a heat and mass coupled snow melting model for hydronic heated pavement [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)

[9] Hamada Y, Nakamura M, Kubota H. Field measurements and analyses for a hybrid system for snow storage/melting and air conditioning by using renewable energy [J]. Applied Energy, 2007, 84(2): 117-134.

[10] Balbay A, Esen M. Experimental investigation of using ground source heat pump system for snow melting on pavements and bridge decks [J]. Scientific Research and Essays, 2010, 5(24): 3955-3966.

[11] Zhao W, Zhang Y, Chen X, et al. Experimental heating performances of a ground source heat pump (GSHP) for heating road unit [J]. Energy Conversion and Management: X, 2020, 7: 100040.

[12] Dupray F, Li C, Laloui L. Heat-exchanger piles for the deicing of bridges [J]. Acta Geotechnica, 2014, 9: 413-423.

[13] 桂树强, 程晓辉, 张志鹏. 地源热泵桩基与钻孔埋管换

- 热器换热性能比较[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(3): 151-156.
- Gui S Q, Cheng X H, Zhang Z P. Comparative analysis of heat exchange performance of energy piles and borehole heat exchangers in GSHP system[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2013, 35(3): 151-156.(in Chinese)
- [14] 党政, 关文, 程晓辉, 等. CFG 能源桩用于混凝土路面除冰降温的试验研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(2): 19-30.
- Dang Z, Guan W, Cheng X H, et al. Experimental study on CFG energy pile for concrete pavement deicing and cooling[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(2): 19-30.(in Chinese)
- [15] Kong G, Wu D, Liu H, et al. Performance of a geothermal energy deicing system for bridge deck using a pile heat exchanger[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(1): 596-603.
- [16] 陈鑫, 孔纲强, 王忠涛, 等. 能量桩桥面除冰融雪的能源需求与供给能力案例分析[J]. 中国公路学报, 2023, 36(3): 202-210.
- Chen X, Kong G Q, Wang Z T, et al. Case studies on energy demand and capacity of bridge deck deicing and snow melting technology based on energy piles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(3): 202-210.(in Chinese)
- [17] Han C, Yu X B. Feasibility of geothermal heat exchanger pile-based bridge deck snow melting system: a simulation based analysis [J]. Renewable Energy, 2017, 101: 214-224.
- [18] Liu H, Maghoul P, Bahari A, et al. Feasibility study of snow melting system for bridge decks using geothermal energy piles integrated with heat pump in Canada [J]. Renewable Energy, 2019, 136: 1266-1280.
- [19] 闫振国, 曾姝, 杨军, 等. 用于机场道面融雪的能源桩系统优化研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(5): 881-887.
- Yan Z G, Zeng S, Yang J, et al. Study on optimization of energy pile system for snow melting on airport pavement[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(5): 881-887.(in Chinese)
- [20] Chen X, Kong G, Liu H, et al. Field tests on the prediction of heating power requirements for deicing in Jiangyin, China[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2022, 32: 100293.
- [21] Chapman W P, Katunich S. Heat requirements of snow melting systems[J]. ASHAE Transactions, 1956, 62: 359-372.
- [22] 杨铃, 靳玮, 苏庆宗, 等. 基于空气源热泵的新型低温蒸发浓缩系统的实验探究[J]. 现代化工, 2022, 42(增2): 359-364, 369.
- Yang Q, Jin W, Su Q Z, et al. Experimental research on a new low-temperature evaporation-concentration system based on air source heat pump [J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(Sup2): 359-364, 369.(in Chinese)
- [23] Li X, Chen Y, Chen Z, et al. Thermal performances of different types of underground heat exchangers[J]. Energy and Buildings, 2006, 38(5): 543-547.
- [24] Laloui L, Nuth M, Vulliet L. Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, 30(8): 763-781.
- [25] Doughty C. Seasonal thermal energy storage in unsaturated soils: Model development and field validation[R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1991.

(本文编辑:张艺)