

城市轨道交通车站套管式地下换热器 换热性能影响参数分析*

肖飞知

(中国铁建大桥工程局集团有限公司, 300450, 天津//工程师)

摘 要 套管式地下换热器的换热性能是限制地源热泵技术在城市轨道交通车站环控系统推广应用的难点之一。通过与室内模型试验结果进行对比,验证了套管式地下换热器换热过程数值计算模型结果的准确性;选取多个影响参数,采用该数值计算模型,计算得到了各参数值对套管式地下换热器换热性能的影响。设计了正交试验,分析了各影响参数的显著性水平。结果表明:提高回填材料导热系数和进水温度,增加地下换热器直径,均可提高单位井深换热量;提高土体初始温度、增加地下换热器地埋管长度,单位井深换热量呈下降趋势。土体初始温度和进水温度对单位井深换热量的影响最为显著,回填材料导热系数和地下换热器直径对单位井深换热量影响较为显著,地下换热器地埋管长度对单位井深换热量的影响较小。

关键词 城市轨道交通;套管式地下换热器;换热性能;影响参数

中图分类号 U231.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.03.011

Analysis of Heat Transfer Performance Influencing Parameters for Casing Underground Heat Exchanger in Urban Rail Transit Station

XIAO Feizhi

Abstract The heat transfer performance of the casing underground heat exchanger is one of the technical difficulties limiting its application in urban rail transit station environmental control system. Compared with the indoor model test results, the accuracy of the numerical calculation model results of the heat transfer process for the casing underground heat exchanger is verified. Multiple influencing parameters are selected, and the numerical calculation model is used to calculate the influence of each parameter value on the heat transfer performance of the casing underground heat exchanger. Orthogonal tests are designed to analyze the significance level of each influencing parameter. The results show that the heat exchange per unit

well depth increases with the increase of thermal conductivity coefficient of backfilling material, inlet water temperature and exchanger diameter, while it decreases with the increase of initial soil temperature and the exchanger buried tube length. The initial soil temperature and the inlet water temperature have the most significant effect on the heat exchange per unit well depth, and the thermal conductivity coefficient of backfilling material and the exchanger diameter also have a relatively significant effect. However, the exchanger buried tube length has a relatively small influence.

Key words urban rail transit; casing underground heat exchanger; heat transfer performance; influencing parameter

Author's address China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., 300450, Tianjin, China

0 引言

地源热泵技术因其具有节能、高效、环保等特点,在我国得以快速发展^[1]。城市轨道交通车站环控系统耗能巨大^[2],在车站环控系统中引入地源热泵技术,不仅能够满足车站环控系统的使用要求,还可降低环控系统能耗,同时带来良好的环境效益^[3]。基于城市轨道交通车站的运行特点和环控要求,地下换热器的换热性能是限制地源热泵技术在城市轨道交通车站环控系统中推广应用的技术难点之一^[4]。地源热泵系统中,地下换热器通常布设在车站或其周边区域的浅层土体中,并通过集水器与设备房内的热泵机组相连接。在目前常用的垂直埋管地下换热器多个类型中,套管式地下换热器的热交换效率是最高的^[5]。因此,本文分析套管式地下换热器换热性能的影响参数,以期为其在城市轨道交通车站环控系统的应用提供可靠依据。

传热模型是套管式地下换热器换热性能影响

* 国家重点研发计划“先进轨道交通”项目(17YFB1201204)

参数研究的基础,主要包括线热源模型^[6]、柱热源模型^[7]及仿真数值解^[8]等。数值计算方法是利用上述传热模型分析套管式地下换热器换热性能多影响参数时普遍采用的方法。文献[9]利用ANSYS二维有限元模型,在制冷及制热工况下考虑了回填材料种类和周围土体温度等因素的影响,研究了地下换热器周围土体温度分布随时间的变化情况,试验结果证明了数值计算方法的精确性。文献[10]用数值分析手段,对增强型地热系统井下同轴换热器的设计参数进行优化,确定了最大输出净功率条件下的最佳地热质量流量和换热器最佳几何形状。文献[11]利用基于有限容积法的FLUENT软件,建立了地下换热器钻孔外岩土体分层条件下的三维非稳态传热模型,发现地下换热器周围岩土层具有热物性差异,使得流体沿程换热呈现非均匀的特点。

为分析套管式地下换热器换热性能的影响参数,将套管式地下换热器应用于城市轨道交通车站环控系统中。本文采用 FLUENT 软件建立了套管式地下换热器换热性能的数值计算模型,并对比分析了数值计算结果与室内模型试验结果。在此基础上,分析了多参数对套管式地下换热器换热性能的影响。最后通过正交试验,得到了各影响参数对单位井深换热量这一指标的显著性水平。

1 建立套管式地下换热器数值计算模型

地源热泵地下换热器流动和传热问题的研究有多种数值解法,目前常用的是有限体积法^[12]。有限体积法的基本思路是利用连续性方程、动量守恒及能量守恒控制微分方程,对计算区域内网格划分得到的控制容积进行积分,进而推导出离散方程,通过求解离散方程得到变量的近似解。

1.1 物理模型及假定

考虑地下换热器间的相互影响,其相邻间距通常设为4~6 m,故本文的数值模型设定土体的半径为3 m。为消除底部边界条件的影响,模型底部超出埋管深度10 m。套管式地下换热器物理模型如图1所示。

为便于从理论上分析套管式地下换热器的换热过程,本文对其物理模型进行了一定程度的简化:①假定套管式地下换热器的管材、回填材料及土体的热物性参数保持不变,且为各向同性的均质材料;②换热循环的介质为液态水,并认为该液态水是不可压缩流体;③热量在回填材料、周围土体

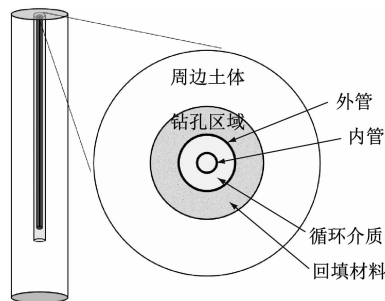


图1 套管式地下换热器物理模型示意图

Fig. 1 Diagram of the physics model of casing underground heat exchanger

中,以及在这二者间的传热均为纯导热过程;④基于GB 50366—2009《地源热泵系统工程技术规范》的要求,外管管壁与回填材料、回填材料与钻孔壁之间充分接触,忽略各部分之间的接触热阻。

1.2 网格划分

套管式地下换热器模型的网格划分如图2所示。地下换热器在径向上的温度变化比较剧烈,因此在网格划分时,模型在纵向上可适当稀疏,在径向上应适当加密。同时,在换热核心区域内应加密网格。对于温度场变化缓慢的土体区域,可适当减少网格数量,以提高计算效率。网格划分后,使用GAMBIT软件的网格检查工具进行检查,以确保网格划分良好,并导出网格划分文件。

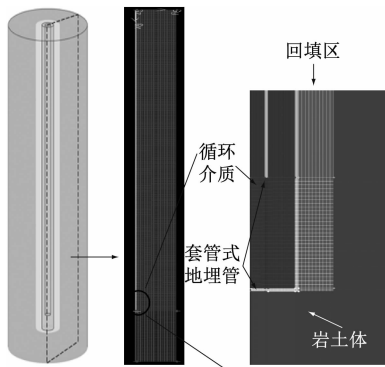


图2 套管式地下换热器模型的网格划分示意图

Fig. 2 Grid division diagram of casing underground heat exchanger model

1.3 边界条件与求解设置

在GAMBIT软件中对换热模型的部分分别设置对应的区域类型:①循环介质部分为流体,套管式地下换热器的内外管、回填材料和土体均为固体;②地下换热器入水口设置为速度进口条件,地下换热器出口处设置为充分发展的出流类型;③外管壁面、回填材料和土体的顶面设为壁面;④土体

四周及底部、管材与循环介质、管材与回填材料、回填材料与土体均设置为耦合壁面。

设定完毕后,导入 FLUENT 软件,设定其计算类型为基于压力的非稳态计算,并选择 $k-\varepsilon$ 湍流模型,设定各种材料所需的参数。

边界条件设置完成后进行求解初始化,求解方法采用 SIMPLE 算法,换热过程选择瞬态模式。

1.4 数值计算模型的验证

本文采用室内模型试验来验证数值计算方法的可靠性。试验装置现场布置如图 3 所示。室内模型试验中,土体的初始温度与环境温度均为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,进水温度为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。其温度测点布置如图 4 所示。

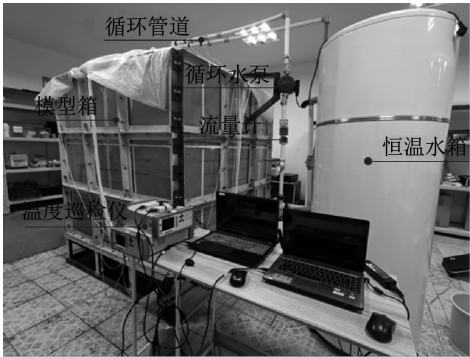


图 3 室内模型试验现场图
Fig. 3 Photo of indoor model test site

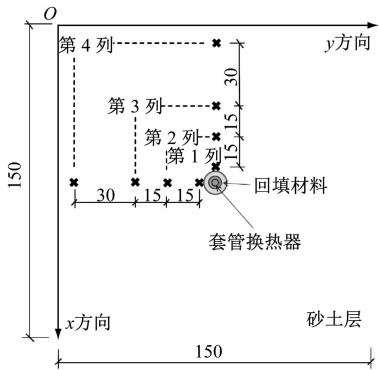
根据室内模型试验,建立相应的数值计算模型。将求解后得到数值计算结果与室内模型试验结果进行对比,其结果如图 5 所示。其中:试验平均值是指该列三层测点结果的平均值;数值模拟值是指对应测点数值计算所得结果的平均值。

由图 5 可知,室内模型试验得到各列测点实测温度平均值分别为 $28.21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $23.29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $21.39\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $20.33\text{ }^{\circ}\text{C}$,数值模拟计算得到相应测点温度平均值分别为 $28.63\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $22.99\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20.78\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $20.22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。二者间温度差的最大值为 $0.61\text{ }^{\circ}\text{C}$,这表明数值模拟计算得到的结果与室内模型试验得到的结果吻合程度较好,数值计算模型可用于套管式地下换热器换热性能参数分析。

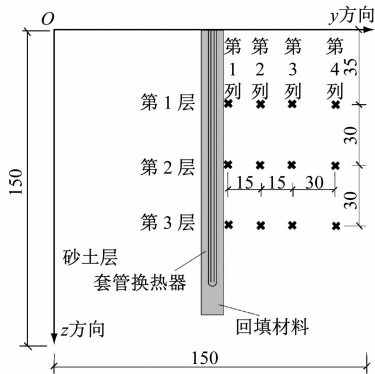
2 套管式地下换热器换热性能参数分析

2.1 单参数影响分析

选用单位井深换热量作为套筒式地下换热器换热性能的评估指标。在单参数影响分析中,保持其他参数不变,逐个改变土体初始温度、回填材料



a) 俯视图



b) 侧视图

注:数字单位为 cm;“x”为测点;x 方向平行于图 3 的循环管道,y 方向垂直于图 3 的循环管道,z 方向为模型试验中地下换热器长度方向。

图 4 室内模型试验的测点布置示意图
Fig. 4 Layout diagram of indoor model test measuring points

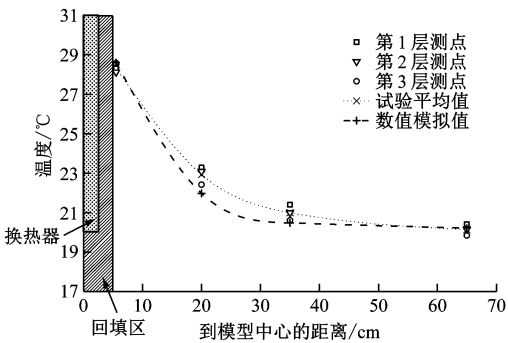


图 5 室内模型试验结果与数值计算结果对比
Fig. 5 Comparison between indoor model test results and numerical calculation results

导热系数、地下换热器直径、地下换热器地埋管长度及地下换热器进水温度的取值,分析单参数对单位井深换热量的影响。

2.1.1 土体初始温度

模拟地下换热器持续运行 48 h、土体初始温度值从 $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升至 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的工况,不同土体初始温度

下的单位井深换热量变化如图6所示。

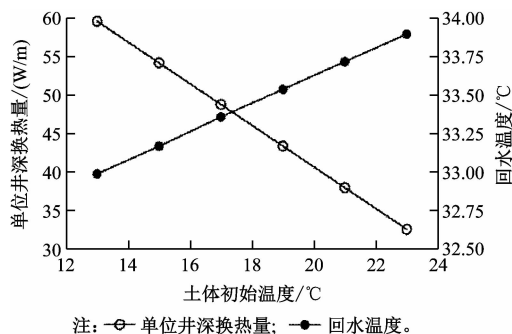


图6 换热性能随土体初始温度的变化情况

Fig. 6 Diagram of heat transfer performance changing with initial soil temperature

由图6可知:单位井深换热量随土体初始温度的升高呈线性下降。土体初始温度为13℃时,单位井深换热量为59.67 W/m;土体初始温度升至23℃后,单位井深换热量下降到32.59 W/m。由此可得到结论:对于蓄热工况而言,土体的初始温度越高,对套管式地下换热器的换热过程越不利。

2.1.2 回填材料导热系数

设置不同的回填材料导热系数,模拟蓄热工况持续运行48 h。不同回填材料导热系数下的单位井深换热量变化如图7所示。

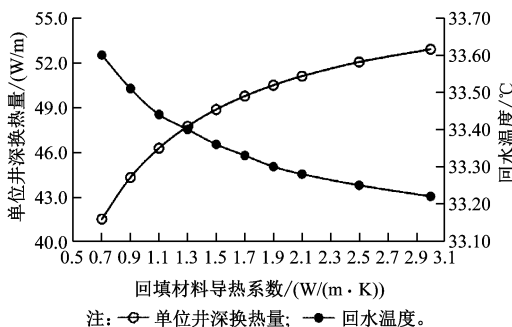


图7 换热性能随回填材料导热系数的变化情况

Fig. 7 Diagram of heat transfer performance changing with thermal conductivity coefficient of backfilling material

由图7可知:当回填材料的导热系数为0.7 W/(m·K)时,单位井深换热量为41.48 W/m;导热系数增至1.5 W/(m·K)时,单位井深换热量为48.84 W/m;导热系数增至3.0 W/(m·K)时,单位井深换热量为52.89 W/m。由此可得到结论:单位井深换热量随着回填材料导热系数的提高而提高。当回填材料的导热系数高于周围土体的导热系数时,对套管式地下换热器换热性能的影响显著性降低,其原因是当回填材料导热系数过大时,周

围土体导热系数对总热阻的影响很小。

2.1.3 地下换热器的直径

建立不同换热器外管直径的数值计算模型,模拟蓄热工况持续运行48 h。不同地下换热器外管直径下的单位井深换热量变化如图8所示。

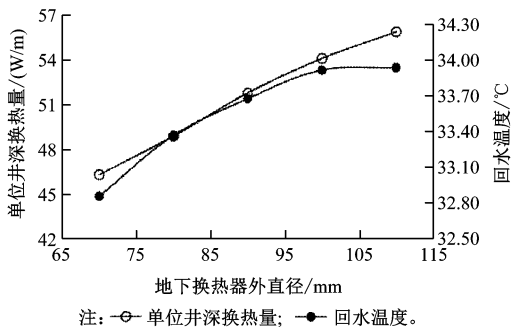


图8 换热性能随地下换热器外管直径的变化情况

Fig. 8 Diagram of heat transfer performance changing with underground heat exchanger outer tube diameter

由图8可知:当地下换热管的外管直径为70 mm时,单位井深换热量为46.25 W/m;外管直径增加至90 mm时,单位井深换热量为51.74 W/m,提高了11.87%;外管直径增加至110 mm时,单位井深换热量为55.85 W/m,与换热器外管管径为90 mm时相比,此时单位井深换热量提高了7.90%。由此可得到结论:地下换热管外管直径的增加,使得套管式地下换热器与周围土体的接触面积增大,其换热量随之增加。

2.1.4 地下换热器埋管长度

分别选取地下换热器埋管长度为50 m、60 m、70 m、80 m及90 m,模拟蓄热工况持续运行48 h。不同的地下换热器埋管长度下单位井深换热量的变化,如图9所示。

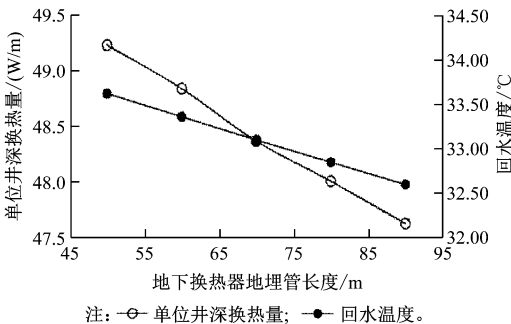


图9 换热性能随地下换热器埋管长度的变化情况

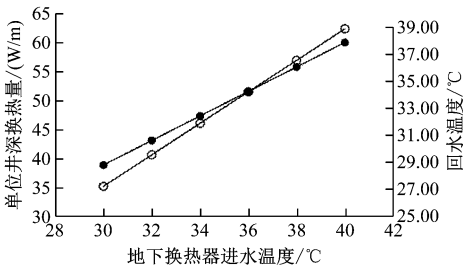
Fig. 9 Diagram of heat transfer performance changing with underground heat exchanger buried tube length

由图9可知:当地下换热器埋管长度为50 m

时,单位井深换热量为 49.23 W/m;管长增大至 60 m 时,单位井深换热热量降低到 48.84 W/m;管长进一步增加至 80 m 时,单位井深换热热量降低为 48.01 W/m。由此可得到结论:增加地下换热器的长度,会导致单位井深换热量的降低,其原因是随管长的增加,地下换热器下部循环介质与土体的温差减小,导致换热能力随之减弱,但换热能力降低幅度并不大。

2.1.5 地下换热器进水温度

地下换热器的进水温度取值设为 30℃、32℃、34℃、36℃、38℃及 40℃,模拟蓄热工况持续运行 48 h。不同地下换热器进水温度下单位井深换热量的变化如图 10 所示。



注:○—单位井深换热热量;●—回水温度。

图 10 换热性能随地下换热器进水温度的变化情况
Fig. 10 Diagram of heat transfer performance changing with the inlet water temperature of underground heat exchanger

由图 10 可知:当地下换热器进水温度为 30℃时,单位井深换热热量为 35.21 W/m;进水温度为 40

℃时,单位井深换热热量增加至 62.46 W/m。由此可得到结论:单位井深换热热量与进水温度呈线性增长关系,进水温度提高后,循环介质与周围土体的温差加大,换热能力得以增强。

2.2 各影响参数的主次分析

在上文各单参数对单位井深换热热量影响分析的基础上,进一步对各影响参数进行主次分析。每个参数均取 3 个不同的水平,如表 1 所示。

表 1 影响参数及因素水平
Tab. 1 Influencing parameters and factor levels

| 水平 | 土体初始温度/℃ | 回填材料导热系数/(W/(m·K)) | 地下换热器直径/mm | 地下换热器埋管长度/m | 地下换热器进水温度/℃ |
|----|----------|--------------------|------------|-------------|-------------|
| 1 | 17 | 1.0 | 80 | 70 | 32 |
| 2 | 19 | 1.5 | 90 | 80 | 34 |
| 3 | 21 | 2.0 | 100 | 90 | 36 |

基于表 1 采用正交试验方案进行数值计算,计算出极差 R、离差平方和 S_s 、自由度 d_f 、均方 M_s 及检验值 F 。进一步进行得到各参数的显著性水平 P ,其结果如表 2 所示。

由表 2 可知,对单位井深换热热量影响非常显著的因素有土体初始温度和地下换热器进水温度,影响显著的因素有回填材料导热系数和地下换热器直径。相比之下,地下换热器埋管长度对单位井深换热量的影响最小。

表 2 正交试验下各影响参数的显著性水平

Tab. 2 Significance level of each influencing parameter in orthogonal test

| 影响参数 | R | S_s | d_f | M_s | F | P |
|-----------|-------|-----------|-------|---------|---------|----------------|
| 土体初始温度 | 45.84 | 2 173.069 | 3 | 724.356 | 208.322 | $P \leq 0.001$ |
| 回填材料导热系数 | 12.86 | 293.590 | 3 | 97.863 | 28.145 | $P \leq 0.010$ |
| 地下换热器直径 | 18.20 | 361.516 | 3 | 120.505 | 34.657 | $P \leq 0.010$ |
| 地下换热器埋管长度 | 11.27 | 127.362 | 3 | 42.454 | 12.210 | $P \leq 0.050$ |
| 地下换热器进水温度 | 36.30 | 1 483.610 | 3 | 494.537 | 142.227 | $P \leq 0.001$ |

3 结语

套管式地下换热器的换热性能分析是地源热泵技术在城市轨道交通车站环控系统推广应用时必须解决的技术难点之一。本文通过建立室内试验模型,验证了套管式地下换热器数值计算方法的准确性,并通过该数值计算方法得到了多个参数对套管式地下换热器换热性能的影响。最后设计了正交试验,确定了各影响参数的主次顺序。

本文得到的主要结论如下:

- 1) 室内试验模型得到的结果与数值模拟计算得到的结果表明,数值计算模型可用于套管式地下换热器换热性能参数分析;
- 2) 随着土体初始温度及地下换热器埋管长度的增加,单位井深换热热量呈下降趋势;随着回填材料导热系数的提高、地下换热器直径的增大及地下换热器进水温度的提高,单位井深换热热量呈上升趋势;

3) 正交试验结果表明,土体初始温度和地下换热器进水温度对单位井深换热量影响非常显著,影响显著的参数有回填材料导热系数和地下换热器直径,地下换热器地理管长度对单位井深换热量的影响最小。

参考文献

- [1] 袁艳平,雷波,余南阳,等. 地源热泵埋管换热器传热研究(1):综述[J]. 暖通空调,2008,38(4):25.
YUAN Yanping, LEI Bo, YU Nanyang, et al. Heat transfer of ground heat exchanger for GSHP(1): a review[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008, 38(4): 25.
- [2] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通2021年度统计和分析报告[R]. 北京:中国城市轨道交通协会,2022.
China Association of Metros. Annual statistics and analysis report of urban rail transit in 2021[R]. Beijing: China Association of Metros, 2022.
- [3] 陈立齐. 地铁车站环控系统设计中的一些想法[J]. 铁道工程学报,2005,22(6):45.
CHEN Liqi. Some thinkings on the design of environment control system in the metro station[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2005, 22(6): 45.
- [4] 陈莹. 埋管地源热泵回填材料实验研究[D]. 北京:中国地质大学,2008.
CHEN Ying. Laboratory experiments research on backfill material for ground-source heat pump[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2008.
- [5] 刘婧,高科,孟祥瑞,等. 地下同轴套管式换热器取热工况热响应实验分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(10):53.

LIU Jing, GAO Ke, MENG Xiangrui, et al. Experimental research on thermal response of taking heat conditions of coaxial casing-shaped heat exchanger[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(10): 53.

- [6] ZENG H Y, DIAO N R, FANG Z H. A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers[J]. Heat Transfer-Asian Research, 2002, 31(7): 558.
- [7] DEGHAN B B, KUKRER E. A new 1D analytical model for investigating the long term heat transfer rate of a borehole ground heat exchanger by Green's function method[J]. Renewable Energy, 2017, 108: 615.
- [8] IRY S, RAFEE R. Transient numerical simulation of the coaxial borehole heat exchanger with the different diameters ratio[J]. Geothermics, 2019, 77: 158.
- [9] ESEN H, INALLI M, ESEN Y. Temperature distributions in boreholes of a vertical ground-coupled heat pump system[J]. Renewable Energy, 2009, 34(12): 2672.
- [10] YEKOLADIO P J, BELLO-OCHEDE T, MEYER J P. Design and optimization of a downhole coaxial heat exchanger for an enhanced geothermal system (EGS)[J]. Renewable Energy, 2013, 55: 128.
- [11] 王楠,杨小凤,庄春龙,等. 岩土分层对埋管换热器传热影响的数值模拟[J]. 兵器装备工程学报,2017,38(4):188.
WANG Nan, YANG Xiaofeng, ZHUANG Chunlong, et al. Numerical simulation analysis of borehole heat exchanger in layered rock-soil[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(4): 188.
- [12] SELAMAT S, MIYARA A, KARIYA K. Numerical study of horizontal ground heat exchangers for design optimization[J]. Renewable Energy, 2016, 95: 561.

(收稿日期:2022-08-16)

(上接第55页)

- LI Xingyi, LI Zheng, CUI Jie, et al. Contrastive analysis of bus bars of vehicles on urban rail transit[J]. Modern Urban Rail Transit, 2019(6): 55.
- [3] 张弛,韩丽,杨宏. 时间敏感网络关键技术与标准化现状[J]. 自动化仪表,2020,41(3):97.
ZHANG Chi, HAN Li, YANG Hong. Current situation on key technology and standardization of time sensitive networking[J]. Process Automation Instrumentation, 2020, 41(3): 97.
- [4] 工业互联网联盟. 时间敏感网络(TSN)产业白皮书[EB/OL]. (2020-08-01)[2021-01-25]. http://www.aii-alliance.org/upload/202009/0901_165010_961.pdf.
Alliance of Industrial Internet. Time sensitive network (TSN) industry white paper [EB/OL]. (2020-08-01)[2021-01-25]. http://aii-alliance.org/upload/202009/0901_165010_961.pdf.
- [5] 陈勇,黄湘勇,赵文志,等. 地铁车辆多网融合实时以太网技术研究[J]. 现代城市轨道交通,2019(7):40.
CHEN Yong, HUANG Xiangyong, ZHAO Wenzhi, et al. Re-

search on real-time Ethernet technology for metro vehicle multi-network integration[J]. Modern Urban Rail Transit, 2019(7): 40.

- [6] 高伟伟. IEEE 1588 Edition2 定时技术[C]//中国电工技术学会电器智能化系统及应用专业委员会2013年学术年会论文集. 济南:中国电工技术学会,2013:163.
GAO Weiwei. IEEE 1588 Edition2 time synchronization technology[C]//Proceedings of the 2013 Academic Annual Meeting of Electrical Intelligent System and Application Professional Committee of China Electrotechnical Society. Ji'nan: China Electrotechnical Society, 2013: 163.
- [7] 姜旭艳,严锦立,全巍,等. SSA:一种面向CQF模型的TSN资源调度算法[J]. 东北大学学报(自然科学版),2020,41(6):784.
JIANG Xuyan, YAN Jinli, QUAN Wei, et al. SSA: CQF-oriented scheduling algorithm in time-sensitive networking[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(6): 784.

(收稿日期:2021-01-26)