DOI: 10. 3969/j. issn. 2097-0706. 2023. 04. 012

# 单井U型地埋管换热器传热特性与热渗 耦合特性分析

Analysis of heat transfer characteristics and thermal-permeability coupling characteristics of single U-tube borehole heat exchangers

刘媛媛<sup>1</sup>,耿直<sup>1,2,4\*</sup>,张元峰<sup>2</sup>,张良<sup>3</sup>,韩昭<sup>3</sup>,张斌<sup>1</sup> LIU Yuanyuan<sup>1</sup>,GENG Zhi<sup>1,2,4\*</sup>,ZHANG Yuanfeng<sup>2</sup>,ZHANG Liang<sup>3</sup>,HAN Zhao<sup>3</sup>,ZHANG Bin<sup>1</sup>

(1.华电郑州机械设计研究院有限公司,郑州 450046; 2.郑州航空工业管理学院 航空发动机学院,郑州 450046;
 3.石家庄华电供热集团有限公司,石家庄 050041; 4.清华大学 能源与动力工程系,北京 100084)
 (1.Huadian Zhengzhou Mechanical Design Institute Company Limited, Zhengzhou 450046, China; 2.School of Aero Engine, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China; 3.Shijiazhuang Huadian Heating Supply Group Company Limited, Shijiazhuang 050041, China; 4.Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘 要:在"双碳"目标下,浅层地热能供暖(冷)作为一种新型的清洁能源利用形式得到广泛使用。为提高浅层地 热能的利用效率,以我国北方某综合能源供暖(冷)项目土壤源热泵系统为研究对象,构建单井U型地埋管换热器 的三维非稳态传热模型,并利用Fluent软件分析其传热特性与热渗耦合特性。选取4.0,4.5,5.0 m等3个不同埋管 间距和106.0,113.0,120.0 m等3种不同埋管深度,对地埋管换热器的换热总量及单位井深换热量分别进行对比分 析。分析结果表明,埋管间距为4.0 m、埋管深度为106.0 m时,单井地埋管换热器的换热效果最佳。对无渗流和有 渗流及不同渗流速度下地埋管换热器温度场进行对比分析,结果表明,地下水渗流会对地埋管换热器换热效率带 来正向影响,并且随着渗流速度的增加,换热效果更好。上述分析为实际工程的地埋管方案设计提供参考依据。 关键词:地热能;土壤源热泵;地埋管换热器;传热特性;热渗耦合;清洁能源;双碳

中图分类号:TK 529 文献标志码:A 文章编号:2097-0706(2023)04-0081-08

Abstract: To achieve the "dual carbon" target, shallow geothermal energy heating(cooling), a new utilization form of clean energy, has been widely applied. To improve the efficiency of geothermal energy, taking the ground source heat pump of an integrated energy heating(cooling) system in northern China as the research object, a 3D unsteady-state heat transfer model of a single U-tube borehole heat exchanger (BHE) was constructed, and its heat transfer characteristics and coupling characteristics thermal conduction and groundwater seepage were analyzed by the software Fluent. Comparative analyses on the total transfer heat and transfer heat per unit length were made on the BHE with three different spacing distances (4.0, 4.5 and 5.0 m) and three different tube lengths (106.0, 113.0 and 120.0 m), respectively. The analysis results show that the BHE with 4.0 m spacing distance and 106.0 m tube length demonstrates the optimal performance. Comparing the temperature fields of the BHE with and without seepage flow, the results show that seepage flow exerts positive effect on the BHE heat transfer efficiency, and the faster the seepage flows, the higher the heat transfer efficiency is. The analyses above provide references for the design of practical examples of BHE projects.

基金项目:中国华电集团科技项目(CHDKJ22-01-23);河南 省青年人才托举工程计划项目(2022HYTP021);河南省住房 城乡建设科技计划资助项目(HNJS-2022-K57);河南省土木 建筑学会科技指导计划资助项目(202102)

Science and Technology Program of China Huadian Corporation (CHDKJ22-01-23); Young Elite Scientists Sponsorship Program of Henan Province (2022HYTP021); Henan Housing and Urban-Rural Construction Science and Technology Plan (HNJS-2022-K57); Henan Civil Engineering and Architecture Society Supported Program(202102) **Keywords:** geothermal energy; ground-source heat pump; borehole heat exchanger; heat transfer characteristics; coupling of thermal conduction and groundwater seepage; clean energy; dual carbon

# 0 引言

为实现"双碳"目标,即"力争2030年前实现碳 达峰、2060年前实现碳中和",我国能源行业正以 "构建清洁低碳、安全高效能源体系"为目标进行能源转型。根据《中国建筑能耗研究报告(2020年)》统计,2018年建筑运行阶段能耗约占全国总量的21.7%;建筑运行阶段碳排放达21.1亿tCO<sub>2</sub>,约占全国能源碳排放总量的21.9%<sup>[1]</sup>。按目前建筑物能源类型和能耗水平,我国城市建筑在2030年很难实现碳达峰<sup>[2]</sup>,而供暖和空调制冷能耗是建筑能源消耗的最大组成部分<sup>[3-5]</sup>。

地热能属于清洁低碳、分布广泛、资源丰富、安全优质的可再生能源<sup>[6-7]</sup>。通过地源热泵为民/商用 建筑供热(冷)是地热能的主要利用形式,约占其年 利用总量的51.7%<sup>[8-9]</sup>。我国336个地级以上城市, 80%的土地适宜开发浅层地热能,其中地埋管土壤 源热泵系统夏季可制冷面积为3.56×10<sup>10</sup> m<sup>2</sup>,冬季可 供暖面积达3.75×10<sup>10</sup> m<sup>2[10]</sup>。因此,在实现"双碳"目 标和建筑清洁供暖(冷)的过程中,土壤源热泵技术 将发挥巨大的作用。

在土壤源热泵系统研究中,地埋管换热器传热 一直倍受国内外学者关注。田信民等印采用线热 源理论,得到了地埋管换热器的传热系数和换热热 阻;乔卫来等<sup>[12]</sup>通过进行单U型及双U型垂直地埋 管换热器的热响应测试,验证相同埋管形式与管口 大小的换热器传热热阻相同,采用一维线热源理论 对测试数据进行严谨分析,得到不同埋管形式及循 环水流量下的单位井深换热量;司子辉[13]通过比对 不同模型的计算结果,验证了参数估计法在实际工 程中的准确性;高圆圆等[14]通过对土壤源热泵系统 长期的测试试验,发现冷/热负荷变动、土壤吸排热 量不平衡会导致土壤源热泵运行不稳定;刘文学[15] 研究了不同运行模式下地埋管换热器的传热特性, 提出地源热泵的间歇运行策略;于明志等[16]提出分 区运行供热法,在夏冬两季负荷不平衡时采用简单 分区运行可以适当提高地源热泵系统整体的运行 效率及可靠性。

国外对地埋管换热器的研究开始较早, Ingersoll等<sup>[17]</sup>提出了Kelvin线热源理论,该理论将地 下埋管作为恒定热流的无限长线热源;1985年, Kavanaugh<sup>[18]</sup>提出了圆柱热源模型,将U型管视为圆 柱体热源模型,得到地埋管及周围回填材料整体的 圆柱形温度场,换热结果比线热源模型更符合实 际;Wagner等<sup>[19]</sup>研究得出地下水渗流会直接影响到 换热器与周围土壤的热传递效率;Angelotti<sup>[20]</sup>研究 了地下水渗流速度对土壤传热性能以及热干扰的 影响,随着地下水渗流速度增大,地埋管周围土壤 的等温线沿渗流方向的偏移度越大。

国内外已对地埋管换热器的换热性能、地埋管

形式、运行效果等进行了大量理论研究,并为地埋 管换热器的埋深和间距设计提供了合适的范围。 然而,该范围并不适用于所有工程。在具体工程项 目中,选择最优的埋管间距和埋管深度(即地埋管 长度)对地埋管换热器的传热效率和土壤源热泵的 实际运行效果至关重要。鉴于此方面的研究较为 缺少,本文构建单井U型地埋管换热器的三维非稳 态传热模型,以我国北方某综合能源供暖(冷)项目 中的土壤源热系统为研究对象,采用数值分析法、 利用 Fluent 软件分析该换热器传热特性与热渗耦合 特性,为实际工程的地埋管方案设计提供参考。

## 1 系统建模

#### 1.1 模型建立

运用 3D 建模软件 SpaceCliam 按 1:1 的比例建 立了单井 U 型地埋管换热器的三维几何模型,不同 尺寸模型的几何参数见表 1。在 AnsysMesh 中划分 网格,并进行网格无关性验证。最后,运用 Fluent 软 件对模型进行数值模拟仿真。

表 1 不同埋管的几何参数 Table 1 Geometric parameters of different buried tubes

模型参数	数值
埋管深度(l)/m	106.0/113.0/120.0
埋管间距(s)/m	4.0/4.5/5.0
钻孔直径/mm	168
U型管进、出口管间距/mm	64
U型管内/外径/mm	26/32

地埋管换热器与周围土壤的换热是一个复杂 非稳态换热过程,在方便进行模拟运算但不影响仿 真结果的前提下,对模型作出如下简化假设条件: (1)土壤及回填材料区域的比热容、密度、导热系数 等热物性参数不变,忽略除热传导、热对流外之外 的换热过程;(2)无地下水渗流作用时,土壤为纯固 体导热;(3)土壤边界温度恒定,忽略天气因素对土 壤温度的影响;(4)忽略管壁与回填材料、回填材料 与钻孔壁之间的接触热阻;(5)U型管换热器底部为 直径96 mm的弯管,忽略底部换热量,简化模型。

U型管内换热流体为水,管道材料为PE100,回 填材料为中、粗砂,外围为土壤,模型各材料热物性 参数见表2。

### 1.2 网格无关性验证

在数值仿真过程中,为避免冗余的计算量,须 进行网格无关性验证。本文通过比对地埋管换热 器出口面温度来验证网格的无关性。在换热过程 中,出口温度随换热过程的进行一直变化,取运行一 段时间后基本稳定的最低出口温度为对比量,计算 增加网格数后出口温度的变化百分比,对比结果 见表3。

表 2 各材料热物性参数 Table 2 Thermal physical property parameters of each material

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	比热容/[J·(kg·K) <sup>-1</sup> ]	导热系数/[W・ (m・K) <sup>-1</sup> ]
水	1 000	4 182	0.60
PE100	950	2 300	0.45
回填材料	2 600	330	2.00
土壤	1 600	1 824	2.26

表 3 网格无关性验证 Table 3 Grid independence verification

项目	网格数量		
	2 412 542	2 449 066	2 744 906
出口温度/K	296.748	296.749	296.749
温度变化百分比/%	0	0.000 3	0.000 3

由表3可知,网格数为2449066和2744906时 的出口温度相较于网格数为2412542时的出口温 度上升0.0003%,增加网格数对出口温度影响不 大,因此确定以网格数2412542进行计算。

# 1.3 土壤特性分析

土壤的特性分析对地埋管换热器传热研究至 关重要。土壤是一种同时存在气、液、固三相的多 孔介质,其传热机理非常复杂,多种过程同时发生, 但起主要作用的是热传导和热对流。

土壤密度分为湿密度 $\rho_0$ 和干密度 $\rho$ ,

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V} , \qquad (1)$$

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + 0.01w} , \qquad (2)$$

式中: $m_0$ 为土壤质量,kg;V为土壤体积, $m^3$ ;w为土 壤含水率。

$$\lambda = -\frac{q}{\partial t / \partial x} , \qquad (3)$$

式中: $\lambda$ 为土壤导热系数,表示热量在土壤中的传导 能力, $W/(m\cdot K)$ ;q为土壤中热传导的热流密度,  $W/m^2$ ; $\partial t/\partial x$ 为沿x方向的温度变化率,K/m。

土壤比热容

$$c = c_{g}w_{g} + c_{s}w_{s} + c_{1}w_{1} , \qquad (4)$$

式中: $c_g$ , $c_s$ , $c_1$ 为土壤的三相比热容,J/(kg·K); $w_g$ ,  $w_s$ , $w_1$ 分别为单位质量土壤的三相质量分数。

土壤中热对流的热流密度

$$q = h\Delta T_0 , \qquad (5)$$

式中:h为表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ ; $\Delta T_0$ 为温差(约定永远为正值), $K_o$ 

#### 1.4 评价准则

单井U型地埋管换热器的传热特性及热渗耦合 特性分析以单位井深换热量(即每延米换热量)为U 型管换热器换热性能的评价标准。

单井U型地埋管换热器换热量

$$Q = \rho_{t} c_{t} v A \Delta T , \qquad (6)$$

式中: $\rho_1$ 为U型管内流体密度,kg/h; $c_1$ 为U型管内流体比热容,J/(kg·K);v为U型管内循环流体的入口 速度,m/s;A为U型管横截面面积,m<sup>2</sup>; $\Delta T$ 为U型管 内流体进、出口温差,K。

单位井深换热量

$$Q_1 = \frac{Q}{l} \circ \tag{7}$$

# 2 模拟结果分析

## 2.1 埋管间距对地埋管换热器的传热影响

对所搭建的单井U型地埋管换热器模型进行夏季工况下的换热分析,比较其在不同埋管间距时的传热性能。此次模拟的埋管深度为120.0m,管内流体密度、比热容等参数恒定。

图 1-3为U型地埋管换热器间距 s=4.0,4.5, 5.0 m时的温度及速度分布云图。

当 s=4.0 m时,换热器入口水温为 299.81 K,迭 代处理后得到出口水温为 296.75 K,根据式(6)计 算此换热温差的换热器换热总量为 8 640.828 J,根 据式(7)计算单位井深换热量为 72.01 W/m。

当 s=4.5 m 时,U型管换热器入口水温为299.81 K,迭代处理后得到出口水温为296.80 K,根据式(6)计算此换热温差的换热器换热总量为8499.638 J,根据式(7)计算单位井深换热量为70.83 W/m。

当 s=5.0 m 时,U 型管换热器入口水温为299.81 K,迭代处理后得到出口水温为296.86 K,根据式(6)计算此换热温差的换热器换热总量为8 330.21 J,根据式(7)计算单位井深换热量为69.42 W/m。

不同埋管间距下,U型管出口水温的计算均经 过了不同次数的迭代,图4为不同埋管间距下出口 温度随迭代次数变化的折线图。可以看出,随迭代 次数的增加,出口水温由振荡波动逐渐趋于稳定。

分析地埋管周围的温度场、速度场分布,了解 其传热特性。通过对比出口面的温度场与出口温 度,发现 s=4.0 m时换热器换热效率最高,其单位井 深换热量比4.5 m时高1.67%,比5.0 m时高 3.73%,分析汇总结果见表4。因此,选取埋管间距 为4.0 m更有利于提升换热效果。



© Editorial Department of Integrated Intelligent Energy. This is an open access article under the CC BY-NC-ND licen

图 5—7 为U型地埋管换热器埋管深度 *l*=106.0, 113.0,120.0 m时的温度及速度分布云图。当 *l*= 106.0 m时,U型管换热器入口水温为 299.81 K,迭 代处理后得到出口水温为 296.96 K,根据式(6)计 算此换热温差的换热器换热总量为 8 047.83 J,根 据式(7)计算单位井深换热量为 75.92 W/m。



图5 埋管深度106.0m时的温度及速度分布云图(截图)

Fig. 5 Temperature and velocity distribution nebulograms at *l*=106.0 m(screenshot)





Fig. 6 Temperature and velocity distribution nebulograms at *l*= 113.0 m(screenshot)





当 *l*=113.0 m时,U型管换热器入口水温为299.81 K,迭代处理后得到出口水温为296.87 K,根据式(6)计算此换热温差的换热器换热总量为8301.972 J,根据式(7)计算单位井深换热量为73.47 W/m。

当 *l*=120.0 m时,U型管换热器入口水温为 299.81 K,迭代处理后得到出口水温为296.75 K, 根据式(6)计算此换热温差的换热器换热总量为 8 640.828 J,根据式(7)计算单位井深换热量为 72.01 W/m。

不同埋管间距下U型管出口水温度的计算均经

过了不同次数迭代,图8为不同埋管间距下出口温 度随迭代次数变化的折线图。可以看出,随着迭代 次数的增加,出口水温度由振荡波动逐渐趋于稳定。

通过以上对不同埋深地埋管换热器的模拟研究,发现埋深为106.0m的换热器换热效果最好,其 单位井深换热量比113.0m的高3.33%,比120.0m 的高5.42%,分析汇总结果见表5。因此,埋管深度 选择106.0m更有利于提升换热器换热效率。

### 2.3 地下水渗流对地埋管换热器的影响

渗流现象常出现在地表以下的土壤或岩层中, 其为流体在孔隙介质中的运动,并且会带动热量的



图 8 不同埋管深度下出口温度随迭代次数的变化 Fig. 8 Outlet temperature varying with teration times under different buried tube lengths

转移,对地埋管换热器的传热性能产生影响。选取

表 5 不同埋管深度的地埋管换热器性能分析 Table 5 Performance analysis on the BHE with different buried

tube lengths	
--------------	--

项目	埋管深度/m		
	106.0	113.0	120.0
进口温度/K	299.81	299.81	299.81
出口温度/K	296.96	296.87	296.75
换热总量/J	8 047.830	8 301.972	8 640.828
单位井深换热量/(W·m <sup>-1</sup> )	75.92	73.47	72.01

4种渗流速度(即地下水单位时间因渗流而移动的距离):0 m/a,50 m/a(1.5855×10<sup>-6</sup> m/s),80 m/a(2.5368×10<sup>-6</sup> m/s)和120 m/a(3.4881×10<sup>-6</sup> m/s)。 在上述4种渗流条件下对运行一段时间后的换热器开展仿真模拟(以二维情况为基准),如图9所示。



图9 不同渗流条件下运行一段时间后的温度分布云图(截图)

Fig. 9 Temperature distribution nephograms of the tube running in steady state at different seepage flow velocities (screenshot)

渗流会导致温度场的偏移,致使地埋管换热器 在换热过程中损失一部分热量。通过对地下水渗 流在二维情况下的温度分布云图可以看出:(1)渗 流会影响温度场的分布,并且通过流体流经回填区 域及U型管,将周围热量聚集于此,高温区域面积减 小,致使此处温度场相较于无渗流下更加聚集; (2)随着渗流速度的增大,其带出的偏移区域减小, 即温度场更加聚集。这说明渗流会使地埋管换热 器的换热效果增强,并且渗流速度越大,这种正向 影响更强,换热效率越高。

# 3 结论

本文以我国北方某综合能源供暖(冷)项目中

的土壤源热系统为研究对象,构建单井地埋管换热器的三维非稳态传热模型,采用数值分析法进行分析并利用Fluent软件分析了单井地埋管换热器传热特性与热渗耦合特性。

(1)对4.0,4.5,5.0 m等3种不同埋管间距下的地埋管换热总量及单位井深换热量进行对比分析,结果表明,s=4.0 m时的地埋管换热效率最高, 其单位井深换热量比4.5 m的高1.67%,比5.0 m的高3.73%。

(2)对110.0,113.0和120.0m等3种不同埋管 深度下的地埋管换热总量及单位井深换热量进行 对比分析,结果表明,埋管深度为106.0m时的地埋 管换热效果最佳,其单位井深换热量比113.0m高 3.33%,比120.0m高5.42%。

(3)对0,50,80,120 m/a等4种流体渗流速度下的地埋管换热器温度场对比分析表明,地下水渗流 会对地埋管换热器换热效率带来正向影响,并且随 着渗流速度的增加,换热效果更好。

本文的研究成果将为实际工程项目的地埋管 方案设计提供参考依据,具有一定工程实践指导 意义。

## 参考文献:

[1]中国建筑能耗研究报告 2020[J].建筑节能, 2021, 49(2): 1-6.

China building energy consumption annual report 2020[J]. Building Energy Efficiency, 2021, 49(2):1-6.

[2]龙惟定,梁浩.我国城市建筑碳达峰与碳中和路径探讨 [J].暖通空调,2021,51(4):1-17.

LONG Weiding, LIANG Hao. Discussion on paths of carbon peak and carbon neutrality of urban buildings in China [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2021, 51(4):1-17.

[3]江亿.我国建筑能耗趋势与节能重点[J].建设科技,2006 (7):10-13,15.

JIANG Yi.The trend and important energy efficiency points in our country [J]. Construction Science and Technology, 2006(7):10-13,15.

[4]范时光,徐新华,陈焰华.夏热冬冷地区住宅建筑生活热 水系统不同热源能效、畑及碳排放分析[J].建筑节能, 2023,51(1):34-39.

FAN Shiguang, XU Xinhua, CHEN Yanhua. Analysis of energy efficiency, exergy and carbon emission of different heat sources for domestic hot water system in residential buildings in the hot summer and cold winter region [J]. Journal of Building Energy Efficiency, 2023, 51(1):34–39.

- [5]龙惟定,潘毅群,王皙.碳中和城市建筑能源系统(3):负荷篇[J].暖通空调,2022,52(9):1-14.
  LONG Weiding, PAN Yiqun, WANG Xi. Building energy system of carbon neutrality cities (3): Load [J]. Heating
- Ventilating & Air Conditioning, 2022, 52(9):1-14.
  [6]赵军,李扬,李浩,等.中低温能源在中国[J].太阳能学报,2022,43(2):250-260.
  ZHAO Jun, LI Yang, LI Hao, et al. Mid/low temperature energy in China[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2022, 43

(2): 250-260.

[7]姜曙,刘芳芳,刘媛媛,等."地热能+"在工程实践中的综合梯级应用[J].综合智慧能源,2022,44(9):59-64.
JIANG Shu, LIU Fangfang, LIU Yuanyuan, et al. Comprehensive cascade application of "geothermal energy +" in engineering practice [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(9):59-64. [8]董清明,朱启波,董谷雨.地源热泵技术在暖通空调节能中的应用[J].智能城市,2020,6(10):129-130.
DONG Mingqing, ZHU Qibo, DONG Guyu. Application of ground source heat pump technology in energy saving of HVAC[J]. Intelligent City, 2020,6(10):129-130.

[9] 刁乃仁,方肇洪.地源热泵——建筑节能新技术[J].建筑 热能通风空调,2004(3):18-23.
DIAO Nairen, FANG Zhaohong. Ground source heat pumps— A promising technology for energy conservation in buildings
[J].Building Energy & Environment, 2004(3):18-23.

- [10]王贵玲,杨轩,马凌,等.地热能供热技术的应用现状及 发展趋势[J].华电技术,2021,43(11):15-24.
  WANG Guilig, YANG Xuan, MA Ling, et al. Status quo and prospects of geothermal energy in heat supply [J].
- [11]田信民,于彦,唐永香.地埋管换热能力测试方法研究 [C]//地温资源与地源热泵技术应用论文集(第三集).地 质出版社,2009:142-147.

Huadian Technology, 2021, 43(11): 15-24.

- [12]乔卫来,陈九法,薛琴,等.地埋管热响应测试及数据分析方法[J].流体机械,2010,38(6):60-63,40.
  QIAO Weilai, CHEN Jiufa, XUE Qin, et al. In-situ thermal response test and data analysis [J]. Fluid Machinery, 2010,38(6):60-63,40.
- [13]司子辉.U型竖埋管式地源热泵热响应测试物性参数研究[J].安徽建筑,2017,24(3):197-199.
  SI Zihui. Research on physical property parameters of U-type ground source heat pump thermal response test [J]. Anhui Architecture, 2017,24(3):197-199.
- [14]高原原,高留花,赵军.土壤源热泵系统长期运行特性试验分析[J].华北电力大学学报(自然科学版),2012,39
   (1):105-108.

GAO Yuanyuan, GAO Liuhua, ZHAO Jun. GSHPS analysis of long-term operating characteristics [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2012, 39(1):105–108.

[15]刘文学.地源热泵地埋管的传热性能实验研究[D].北 京:北京工业大学,2007.

LIU Wenxue. Experiment study on heat transfer of underground heat exchanger for ground source heat pump [D]. Beijing:Beijing University of Technology, 2007.

[16]于明志,贺泽群,毛煜东,等.地埋管换热器分区运行对 地源热泵系统运行经济性影响的模拟研究[J].太阳能 学报,2022,43(1):205-212.

YU Mingzhi, HE Zequn, MAO Yudong, et al. Influence of ground heat exchanger zoning operation on operation economy of ground source heat pump systems [J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2022,43(1):205-212.

[17]INGERSOLL L R, ZOBEL O J, INGERSOLL A C. Heat conduction with engineering, geological, and other applications[J]. Physics Today, 2009, 8(3). DOI:10.1063/ 1.3061951.

- [18]KAVANAUGH S P. Simulation of vertical U-tube groundcoupled heat pump systems using the cylindrical heat source solution [J].ASHRAE Transactions, 1956, 97(1): 287-295.
- [19]WAGNER V , BLUM P , KUEBERT M , et al. Analytical approach to groundwater-influenced thermal response tests of grouted borehole heat exchangers [J]. Geothermics, 2013, 46:22-31.
- [20]ANGELOTTI A, ALBERTI L, LA LICATA I, et al. Energy performance and thermal impact of a borehole heat exchanger in a sandy aquifer influence of the groundwater

velocity [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 77:700-708.

(本文责编:陆华)

收稿日期:2023-03-24;修回日期:2023-04-04 上网日期:2023-04-25;附录网址:www.iienergy.cn

#### 作者简介:

刘媛媛(1989),女,工程师,硕士,从事地热能利用、综合 智慧能源系统研究,liuyuanyuan@chec.com.cn;

耿直\*(1991),男,讲师,博士后,博士,从事可再生能源 利用与研究,zhgz@zua.edu.cn。

\*为通信作者。

# "'双碳'目标下的新型电力系统"专刊征稿启事

能源绿色低碳转型是实现碳达峰、碳中和的关键举措,在能源转型进程中,电力供应保障难度大、电网安全控制难度增加 电力市场建设不完善等问题正成为当下的重大挑战。因此,在"双碳"目标愿景下,构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统 成为重要方向。新型电力系统将激发负荷侧灵活调节和新型储能技术等潜力,形成源网荷储协同消纳新能源的格局,适应大 规模高比例新能源的开发利用需求,促进可再生能源发电的消纳,降低用户用能成本,也符合未来灵活开放式电力市场体系的 高效率电力系统。

为此,《综合智慧能源》特推出"'双碳'目标下的新型电力系统"专刊,邀请华南理工大学朱继忠教授、新加坡南洋理工大学 董朝阳教授、美国GE公司Kwok Cheung博士担任特约主编,共同探讨"双碳"目标下新型电力系统的最新学术动态、发展趋势 及研究成果,推动我国能源转型取得切实成效,欢迎业内同仁踊跃投稿!

#### 一、征稿范围(包括但不限于)

(1)"双碳"目标下新型电力系统发展战略;

(2)"双碳"目标下新型电力系统规划;

(3)面向"双碳"目标的新型电力系统建模;

(4)新型电力系统调度运行和控制;

(5)新型电力系统"源荷"预测与协同控制;

(6)新型电力系统市场机制与交易模式;

(7)新型电力系统能量管理与市场调度;

(8)低碳技术与碳中和发展路径;

- (9)新能源发电与并网;
- (10)低碳与综合能源技术;
- (11)电动汽车充放电策略;

(12)能源互联网与新能源消纳模式;

(13)碳监测、碳追踪及电碳协同技术。

#### 二、时间进度

专刊拟于2023年5月31日截稿,择期优先出版。

#### 三、征稿要求

(1)专刊只收录未公开发表的论文,拒绝一稿多投。作者对论文内容的真实性和客观性负责。

(2)按照《综合智慧能源》论文格式要求使用 Word 软件排版,请登录《综合智慧能源》在线采编系统(www.hdpower.net 或 www.iienergy.cn)下载中心下载论文模板。

(3)请保留论文图片、曲线和表格原始文件,并在投稿时按规定提交。

(4)论文作者应遵守相关学术不端规定。

#### 四、投稿方式

(1) 在线投稿(推荐):登录在线采编系统(www.hdpower.net或www.iienergy.cn)完成在线全文投稿,欢迎投稿时推荐审稿人。

(2)邮箱投稿:zhujz@scut.edu.cn(朱教授);hdjs-chd@vip.163.com(编辑部)。

(3) 咨询联系: 刘芳 0371-58501060, 13838002988; 杨满成 010-63918755, 13801175292。