

文章编号:0253-4339(2025)05-0133-09

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.05.133

跨季节储热水体数值模型开发及验证

周超辉¹ 刘育策¹ 胡跃¹ 章继成^{2,3} 田志勇⁴ 阮宇^{2,3} 罗惠恒¹ 罗勇强⁴ 许国治⁴

(1 中国长江三峡集团有限公司 武汉 430010; 2 中国长江电力股份有限公司 武汉 430010;
3 三峡电能有限公司 武汉 430022; 4 华中科技大学环境科学与工程学院 武汉 430074)

摘要 跨季节储热可有效缓解太阳能在冬夏季的供需矛盾。大规模水池蓄热系统需要高效准确的计算模拟以避免投资浪费。研究提出了一个简化的数值分析方法,建立了总体积为 11 304 m³ 的圆柱形地下水池模型用于描述季节性蓄热系统的运行。该模型分别建立水体一维传热模型和土壤二维传热模型,求解水体和土壤温度场,通过水池壁温度边界连接两者以实现对整个系统的模拟。为全方位验证数值仿真模型的正确性,分别在待机工况、充能工况和放能工况进行了验证,结果表明:所开发模型具有较好的准确性和可靠性。在待机工况下,砂箱实验台 5 个水体分层温度误差均低于 10%,中层和中下层水体温度准确性最高,平均绝对误差分别为 1.75% 和 1.24%。在充能工况下,平均相对误差仅为 1.57%,平均误差温度为 0.44 °C。在放能工况下,平均相对误差仅为 0.46%,平均误差温度为 0.24 °C。

关键词 太阳能;跨季节储热;大规模水池蓄热系统;数值模型

中图分类号:TK512;TU833

文献标识码:A

Development and Validation of the Water Pit Numerical Model for Seasonal Thermal Energy Storage

Zhou Chaohui¹ Liu Yuce¹ Hu Yue¹ Zhang Jicheng^{2,3} Tian Zhiyong⁴ Ruan Yu^{2,3}
Luo Huiheng¹ Luo Yongqiang⁴ Xu Guozhi⁴

(1. China Three Gorges Corporation, Wuhan, 430010, China; 2. China Yangtze Power Co., Ltd., Wuhan, 430010, China; 3. Three Gorges Electric Energy Co., Ltd., Wuhan, 430022, China; 4. School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074, China)

Abstract Seasonal thermal energy storage (STES) can effectively mitigate the supply and demand imbalance of solar energy between winter and summer. Large-scale water pit thermal storage systems require efficient and accurate computational simulations to avoid investment waste. This study proposes a simplified numerical analysis method and establishes a cylindrical underground pit with a total volume of 11 304 m³ to describe the operation of a STES system. The model establishes a one-dimensional heat transfer model for the water body and a two-dimensional heat transfer model for the soil, separately solving for the water and the soil temperature field. The two models are connected through the temperature boundary at the pool wall to simulate the entire system. To comprehensively verify the accuracy of the numerical simulation model, validation was conducted under standby, charging, and discharging modes. The results indicate that the developed model has good accuracy and reliability. Under the standby mode, the temperature error of the five water layers in the sandbox test is less than 10%, with the highest accuracy in the middle and lower-middle water layers, with an average absolute error of 1.75% and 1.24%, respectively. Under the charging mode, the average relative error is 1.57%, and the average temperature error is 0.44 °C. Under the discharging mode, the average relative error is 0.46%, and the average temperature error is 0.24 °C.

Keywords solar energy; seasonal thermal energy storage; large-scale water pit thermal energy storage system; numerical model

建筑能耗约占总能源消费总量的 40%,其中大部分用于夏季制冷和冬季供暖^[1]。使用季节性蓄热(seasonal thermal energy storage, STES)的可再生能源区域供暖可以更好地为建筑提供低碳空间供暖,因为它们提供了可调度性和灵活性^[2-3]。根据存储介质的不同,STES 可分为显热存储、潜热存储和化学能存

储^[4-5]。其中,显热存储是最常用的 STES 类型。关于太阳能区域供暖(solar district heating, SDH)系统的 STES,商业应用中存在 4 种主要类型,包括储罐蓄热系统(tank thermal energy storage, TTES)、水池蓄热系统(pit thermal energy storage, PTES)、钻孔蓄热系统(borehole thermal energy storage, BTES)和含水层

蓄热系统 (aquifer thermal energy storage, ATEs)^[6-7]。

在这些显热类型的 STES 中, PTES 是目前最可靠、使用最广泛的季节性储热系统^[8], 可将热水储存在带有隔热盖的大型挖掘水池中, 其侧面、底部通常由聚合物衬里覆盖。然而, 如此大规模的系统需仔细规划以避免高昂的投资成本。因此, 建立高效准确的计算模型越来越重要。

当前的 STES 仿真工具可分为 3 类: 1) 用于部件级建模的计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD); 2) 用于系统级建模的简化 2D/3D 数值方法; 3) 使用 TRNSYS 等软件对 STES 系统进行的长时间多系统耦合研究。该类数值模型中通常也考虑了诸多因素, 包括储存介质的热性质、设计和几何结构、周围土壤条件以及传热和传质机制^[9]。

周喜超等^[10]基于 TRNSYS 模拟对张家口某太阳能储热、供热综合能源实验系统的性能和运行策略进行了研究。贾鹏琦等^[11]同样基于 TRNSYS 建模对城市中水余热跨季节储热系统的长期运行性能进行了分析, 并对该系统的经济性进行了研究。王春林等^[12]结合 TRNSYS 模拟软件以及 Hooke-Jeeves 算法^[13]对太阳能跨季节储热系统进行数值模拟以及优化分析。此外, J. Fan 等^[14]利用 CFD 软件对 Marstal 75 000 m³ 水池储热系统的热特性进行了实验和数值研究, 监测分析了储热水池中不同蓄水层的温度和水池周围的地面不同深度的温度。A. Dahash 等^[15]建立了大型储罐和水池的数值有限元模型, 考虑 2 个能效指标和 2 个分层质量指标来评估系统性能。Pan Xinyu 等^[16]基于 TRNSYS 中的 XST (seasonal ground heat storage, 跨季节埋管储热) 模块, 提出了一种改进的二维模型以研究 PTES 中温度、热流和热分层情况。S. Raab 等^[17]基于 TRNSYS 建立了跨季节储热系统模型, 并根据德国汉诺威的项目数据进行了模型验证, 偏差在 5% 以内。类似的, Xie Zichan 等^[18]基于 TRNSYS 开发的仿真模型依据丹麦储热水体项目进行了模型验证。

考虑到 STES 和整个太阳能区域供热系统的动态特征, 进行长期耦合模拟并不容易。且由于只有少数大型 PTES 正在运行, 实验数据有限, 很难验证和修改现有模型^[19]。相关研究多对 STES 模型中土壤区域或水体的计算进行简化以实现快速分析, 但这种简化一般偏离实际。此外, 当使用计算流体动力学软件 (如 CFD/COMSOL) 进行模拟时, 大时间尺度的模拟耗时较长且需要专业的建模。且由于组件的复杂性, TRNSYS 软件在运行和分析 STES 时也需要仔细控制和大量时间^[15]。

因此, 本研究提出了一个简化的数值模型-跨季节储热水体系统级耦合数值模型, 可用于描述 STES 的运行状况, 考虑了太阳能集热器组件、水域和周围土壤区域以及加热组件的运行。该模型的待机工况根据缩尺砂箱实验台的实测数据进行了验证, 充能工况和放能工况基于中国黄帝城项目的实验数据进行了验证。该研究对模型应用和系统分析具有指导意义, 也同时为圆柱形 PTES 的规模设计和操作优化提供了参考。

1 数值解模型建立

由于 PTES 中水与周围土壤之间的热传递属于不同领域, 因此应分别求解其温度场的解。2 个部件的控制方程和边界条件不同, 一旦获得这 2 个部件的分析结果, 就可以通过水池壁温度边界连接水和土壤的传热来执行 PTES 系统的整体模拟, 计算原理具体如图 1 所示。在模型建立和计算中, PTES 中的水体模型采用一维传热模型, 土壤传热则采用二维传热模型。

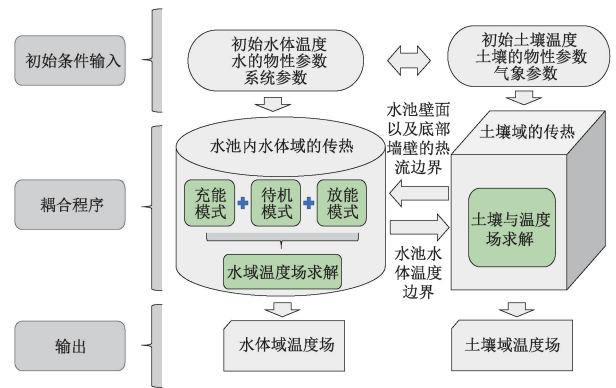


图 1 STES 的建模过程和数值模型内部计算原理

Fig.1 Modeling process and internal logical of numerical model for STES

目前水体一维传热存在的问题是: 水体各层之间的纯一维传热具有不一致的散热率, 容易导致下部水体比上部水体更热, 这不符合实际情况。考虑到水池内部水体的传热, 本研究中所用的处理反温跃层的方法是在一个步骤内计算每一层水的温度序列。对于底层温度高于上层水的地方, 将 2 层水融合成一个等温层, 并在一个时间步骤中从水池底层进行检查和计算。这在实践中是合理的, 理论上, 当下层的水温高于上层时, 它们会在重力作用下混合, 直至温度相同。需要注意的是, 这种混合需要时间, 因此对计算的时间步长和计算的水层体积有一定的要求。

对于土壤传热温度场的求解, 此时 STES 水池的热流是土壤升温的热源, 并作为土壤温度场求解的边

界条件,通过时间步长模拟,可更新土壤温度。对于跨季节储热水体池内水体的传热,更新后的土壤温度可作为水传热的重要热边界,通过时间步长模拟,则可以进一步更新水体温度。应注意的是,在每个时间步长内,流体的稳态传热模型均会得到求解,池壁温度会通过瞬态土壤传热模型进行更新,因为时间步长通常为1 h,这足以使流体在该时间间隔内达到稳态。

1.1 数值分析

基于以下假设,为快速计算,开发了一个半径为15 m、深度为16 m、总体积为11 304 m³的圆柱形地下水池的简化数值模型:

- 1) 水池表面无降低传热率的水垢或杂质。
- 2) 土壤是均质的,未考虑地下水渗透和其他因素对传热的影响。
- 3) 未考虑温度对水的物理参数的影响。
- 4) 每个高度水池内的水具有相同的温度,且在径向方向上无温度梯度^[8]。
- 5) 盖板具有相同的温度,且在径向上无温度梯度。
- 6) 盖子和水面之间有一层空气。由于密封,水蒸发的潜热很小,空气几乎不流动,类似于固体传热。
- 7) 水池壁有隔热层和混凝土层。由于两者厚度与池直径相比非常小,因此它们的物理性质仅用于计算热阻。
- 8) 由于圆柱体的对称性,本文采用了一半的模型进行研究。

1.2 网格方案

基于模型假设,PTES 中具有一个顶部空气层的水域可以简化为一维模型以及土壤和混凝土墙组成的二维模型。水池上方有一层0.3 m厚的空气层。空气层上方为0.3 m厚的隔热盖板。水池的周围和底部由一层0.3 m厚的混凝土层建造。水域平均分为 n_w 个节点。水层中的节点从上至下从1至 n_w 编号,如图2所示。与PTES的半径 R 和深度 H 相比,空气层、盖板和混凝土层的厚度非常小。因此,在耦合时,它们的物理存在被忽略,仅用作传热计算中的热阻,计算如式(1)所示。

$$R_a = \frac{\delta_a}{\lambda_a}, R_g = \frac{\delta_g}{\lambda_g}, R_{con} = \frac{\delta_{con}}{\lambda_{con}} \quad (1)$$

为便于网格划分,在一年运行周期内,使用一致的网格划分土壤区域。根据节省计算资源的需要以及温度梯度的变化规律,可以设置近密和远疏的网格。水池热量损失会影响周围土壤的温度。在数值解的计算中,土壤区域的半径为15 m,水池底下的深

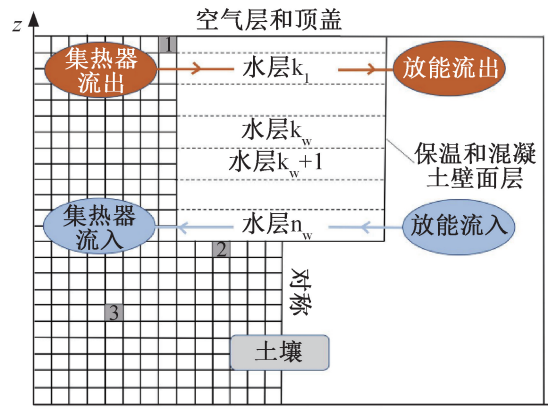


图2 水池传热模型

Fig.2 Model of heat transfer in water pit

度也为15 m,以模拟半无限土壤区域。因此,整个计算域的总半径为 $r_{cal} = r + 15 = 30$ m,总深度为 $D_{cal} = H + 15 = 31$ m。温度测量点布置在水体的上层、中上层、中层、中下层、下层,以及罐体外部的土壤区域,如图3中蓝色标记点位置所示。测量结果的云图显示,在运营的第一年,边缘区域不受水温影响。因此,认为土壤面积足够大,半无限边界是合适的。但对于多年运行而言,水池热量损失对周围土壤的影响增加,需要取 $r_{cal} = 5r + 15; D_{cal} = 5H + 15$ 来模拟半无限土壤区域^[8]。

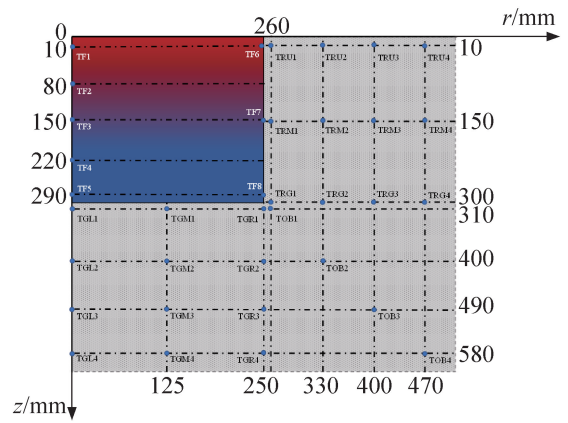


图3 砂箱实验台温度测点布置

Fig.3 Temperature measurement points layout in sandbox experiment

1.3 水域传热分析

跨季节储热水池水域传热分析中,第1层水面和外部空气之间有隔热盖板,盖板和水面之间有一层空气。在水面和盖板的受限空间中,空气层流动受到限制。该情况下,水汽化潜热和传质的传热远小于显热,因此忽略计算^[20]。在跨季节储热水池水体一维模型传热模型中,流入/流出水池的水的质量保持恒定,因此,水的稳态连续性方程如式(2)所示。

$$m_{in} = m_{out} = m \quad (2)$$

水池水体第1层的传热方程:

$$\rho_w c_{p,w} V_k \frac{\partial T_{w,1}}{\partial \tau} = \frac{T_{w,2} - T_{w,1}}{\frac{\Delta H_w}{\lambda_w A_p}} + \frac{T_{ev,k_1} - T_{w,1}}{\frac{\delta_a}{\lambda_a A_p} + \frac{1}{h_{ev,k_1} A_p} + \frac{\delta_g}{\lambda_g A_p}} + Q_{side-loss,1} + mc_{p,w} \left(\left\{ \begin{array}{l} T_{in}(m > 0) \\ T_{w,2}(m < 0) \end{array} \right\} - T_{w,1} \right) \quad (3)$$

其中, $m > 0$ 表示水池水体第1层有水充入, 为充能工况; 当 $m < 0$ 时表示水池水体第1层有水流出, 为放能工况; 待机工况下, 式(3)中流动项为0。

使用 McAdam 公式计算环境空气和土壤之间的传热系数 h_{ev,k_1} 计算式如式(4)所示:

$$h_{ev,k_1} = \begin{cases} 5.4 + 3.8u_{k_1} & u_{k_1} < 4.9 \text{ m/s} \\ 7.2u_{k_1}^{0.78} & u_{k_1} \geq 4.9 \text{ m/s} \end{cases} \quad (4)$$

当水池处于充能工况时, 水池水体与太阳能集热器直接连接, 此时, 太阳能集热器入口温度等于水池水体最底层温度, 太阳能集热器出口温度等于水池水体第1层温度。

当水池处于放能工况时, 水池水体与供热末端(用户、板式换热器或中深层地源热泵)直接连接, 即末端入口温度等于水池水体第1层温度, 末端出口温度等于水池水体最底层温度, 计算如式(5)和式(6)所示。

$$T_{Co} = T_{w,1}, T_{Ci} = T_{w,n_w} \quad (5)$$

$$T_{To} = T_{w,n_w}, T_{Ti} = T_{w,1} \quad (6)$$

水池水体域中节点 $k_w (1 < k_w < n_w)$ 方程:

$$\rho_w c_{p,w} V_k \frac{\partial T_{w,k_w}}{\partial \tau} = \frac{T_{w,k_w-1} - T_{w,k_w}}{\frac{\Delta H_w}{\lambda_w A_p}} + \frac{T_{w,k_w+1} - T_{w,k_w}}{\frac{\Delta H_w}{\lambda_w A_p}} + Q_{side-loss,k_w} + mc_{p,w} \left(\left\{ \begin{array}{l} T_{w,k_w-1}(m > 0) \\ T_{w,k_w+1}(m < 0) \end{array} \right\} - T_{w,k_w} \right) \quad (7)$$

水池水体底部节点的能量方程:

$$\rho_w c_{p,w} V_k \frac{\partial T_{w,n_w}}{\partial \tau} = \frac{T_{w,n_w-1} - T_{w,n_w}}{\frac{\Delta H_w}{\lambda_w A_p}} + Q_{bot-loss} + Q_{side-loss,n_w} +$$

$$mc_{p,w} \left(\left\{ \begin{array}{l} T_{w,n_w-1}(m > 0) \\ T_{in}(m < 0) \end{array} \right\} - T_{w,n_w} \right) \quad (8)$$

其中, 节点 $k_w (1 \leq k_w \leq n_w)$ 能量损失和底部能量损失计算如式(9)和式(10)所示。

$$Q_{side-loss,k_w} = \frac{\int_{(k_w-1)H_w}^{k_w H_w} T_{s,side} dz}{\Delta H_w} - T_{w,k_w} \quad (9)$$

$$Q_{bot-loss} = \frac{\int_0^R T_{s,bot} dr}{R} - T_{w,n_w} \quad (10)$$

在水池水体温度场求解过程中会出现下层水体比上层温度更高的情况, 这与实际情况不符, 所以在每个时间步长的 STES 水池水体温度场求解后, 会对所求解出来的温度场进行判断, 当下部水体的温度高于上部水体的温度时, 应遵循式(11)掺混公式:

$$T_{w,k_w} = T_{w,k_w+1} = \frac{\rho_{w,k_w} V_{w,k_w} T_{w,k_w} + \rho_{w,k_w+1} V_{w,k_w+1} T_{w,k_w+1}}{\rho_{w,k_w} V_{w,k_w} + \rho_{w,k_w+1} V_{w,k_w+1}} \quad (11)$$

1.4 土壤域传热分析

在土壤区域的热传导中, 土壤区域中节点温度将取决于相邻节点的热传导。采用图2中3个典型点的传热平衡方程对各节点能量平衡进行推导。土壤中节点1的能量平衡计算:

$$\rho_{soil} c_{p,soil} V_1 \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{T_L - T_1}{R_{L,R} + R_{1,L}} + \frac{T_G - T_1}{R_{G,U} + R_{1,G}} + \frac{\int_0^{\Delta y} T_w dh}{\Delta y} - T_1 \quad (12)$$

其中, 热阻计算如式(13)至式(16)所示。

$$R_U = R_G = \frac{\Delta h}{2\lambda_{soil} \Delta r} \quad (13)$$

$$R_L = R_R = \frac{\Delta r}{2\lambda_{soil} \Delta h} \quad (14)$$

$$R_{ev} = \frac{1}{h_{ev} \Delta r} \quad (15)$$

$$R_{w,side} = \frac{1}{h_{side} \Delta h} + \frac{\delta_{ins,side}}{\lambda_{ins,side} \Delta h} + \frac{\delta_{con}}{\lambda_{con} \Delta h} \quad (16)$$

土壤域中节点 2 的能量平衡计算:

$$\rho_{\text{soil}} c_{p,\text{soil}} V_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{T_L - T_2}{R_{L,R} + R_{2,L}} + \frac{T_G - T_2}{R_{G,U} + R_{2,G}} + \frac{T_R - T_2}{R_{R,L} + R_{2,R}} + \frac{T_{w,n_w} - T_2}{R_{w,\text{bot}} + R_{2,U}} \quad (17)$$

$$R_{w,\text{bot}} = \frac{1}{h_{\text{bot}} \Delta r} + \frac{\delta_{\text{ins,bot}}}{\lambda_{\text{ins,bot}} \Delta r} + \frac{\delta_{\text{con}}}{\lambda_{\text{con}} \Delta r} \quad (18)$$

土壤域中节点 3 的能量平衡计算:

$$\rho_{\text{soil}} c_{p,\text{soil}} V_3 \frac{\partial T_3}{\partial \tau} = \frac{T_L - T_3}{R_{L,R} + R_{3,L}} + \frac{T_G - T_3}{R_{G,U} + R_{3,G}} + \frac{T_R - T_3}{R_{R,L} + R_{3,R}} + \frac{T_U - T_3}{R_{U,G} + R_{3,U}} \quad (19)$$

由于水池土壤域采用的是半无限和对称边界条件。即假设径向和轴向上半无限边界最后一个节点的边界条件为绝热边界条件,计算如式(20)所示。

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{\text{cal}}} = 0; \left. \frac{\partial T}{\partial H} \right|_{H=D_{\text{cal}}} = 0 \quad (20)$$

2 模型验证与分析

为验证所提出模型的有效性和准确性,本研究对跨季节储热水体供热待机工况(Standby)采用缩尺砂箱实验台的实测数据进行验证,对动态工况中充能工况(Charging)和放能工况(Discharging)则采用中国科学院黄帝城项目^[8]中研究数据进行验证。结合 2 个数据源的实测数据全方面验证本研究数学仿真模型的正确性。

2.1 待机工况验证

为了获得 Standby 工况 STES 中静态水体热分层以及土壤传热特性,设计了一个水池式储热器测试实验台,原理如图 4 所示。水池式储热器主要包括木制箱体、干细砂、圆柱形不锈钢储水罐以及聚苯乙烯保温层;实验台由连接到数据记录器的计算机组成。数据记录器用于表征系统的热性能。

砂箱实验台如图 5 所示,搭建了 1 m×1 m×0.8 m 的木制箱体,所制备的箱体中装满了厚度为 0.6 m 的半干细砂。为观察更明显的热分层以及土壤的热扩散情况,圆柱形不锈钢罐体总深度为 0.35 m,土壤埋深为 0.3 m,储水深度为 0.3 m。在不锈钢罐体柱心处,水体的上层、中上层、中层、中下层、下层均匀设置 5 个水体温度测点,罐体外部土壤也均匀设有 28 个土壤温度测点以便可以更加精确地描述土壤中温度扩散的云图。

实验开始时圆柱形不锈钢罐体里装满 0.6 m 热水,并埋在木制箱体内的干燥细砂中。不锈钢罐的顶

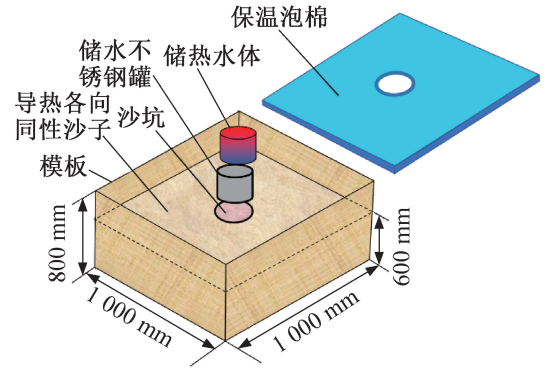
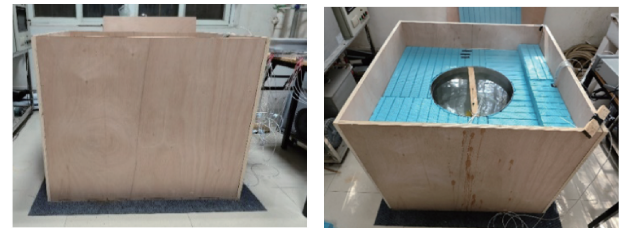


图 4 砂箱实验台原理

Fig.4 Principle of sandbox experiment platform



(a) 圆柱形砂箱实验台侧视图 (b) 圆柱形砂箱实验台俯视图



(c) 无纸记录仪与计算机

(d) 外部加热水箱

图 5 砂箱实验台

Fig.5 Sandbox experiment platform

面高于半干细砂的顶面 0.05 m。保温层为聚苯乙烯板,覆盖不锈钢罐顶面和裸露的半干细砂表面。各材料物性参数以及尺寸如表 1 所示。

表 1 砂箱实验台材料物性参数及尺寸
Tab.1 Thermal physical properties and dimensions of materials for sandbox experiment platform

材料	尺寸/ mm	密度/ (kg/m ³)	导热系数/ [W/(m·K)]	比热容/ [kJ/(kg·K)]
木板	20	—	0.052	—
细干沙子	—	1 520	0.59	1 410
聚苯板	50	28	0.042	1 500
水	—	980	0.69	4 195
空气	50	1.12	0.023	1 005
304 不锈钢	2.5	—	15.2	—

测量系统由 37 个 Pt100 型热电偶(-70~500

℃)、无纸数据记录器和计算机组成。这些 Pt100 型热电偶在实验前分别用 0 ℃ 冰水混合物及正在沸腾 100 ℃ 的热水进行了校准和误差标记。水体加热由外部 90 L 的加热水箱完成,当水体温度加热至指定温度时,采用水泵转移至实验台的不锈钢罐体中。

在缩尺砂箱实验台实验开始时,需对未储热水工况下的土壤温度场进行标定并运用标定点的温度进行线性插值得到土壤的初始温度场。

由于该缩尺砂箱实验台主要是对 STES 储热的待机工况进行验证,所以实验采用在外部水箱加热水体并快速注入该缩尺砂箱实验台储热水箱中的方式进行。每个工况下,采用 30 s 的扫描时间步长,设置扫描 3 000 次(25 h)后结束扫描并保存数据。每个工况结束后,需要去除该缩尺砂箱实验台储热水箱中的热水,并冷却至少 1 d,使砂箱中土壤的余温分布趋于平稳而不对第 2 次实验造成显著影响。在每次测量开始时,均对砂箱实验台的土壤温度进行测量以及温度场的标定。

在数值模型中,其初始条件与边界条件设置与该圆柱形砂箱实验台一致,包括初始不均匀土壤温度场、空气温度、接触土壤面的地面温度、物性参数参见表 1。数值模型运算时,其时间步长采用与实验扫描间隔相同的 30 s,计算步数也同实验有效扫描次数 3 000 次(25 h)一致,得到水体温度变化趋势如图 6 所示。

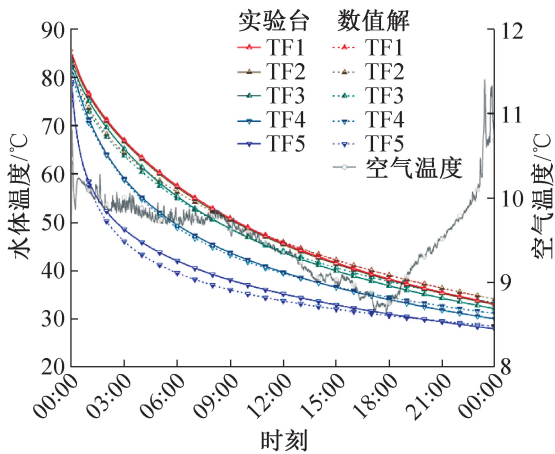


图 6 砂箱实验台与数值解各层水体温度变化的对比
Fig.6 Comparison of water temperature at different depths between sandbox experiment and numerical method

由图 6 可知,砂箱实验台水体温度变化数据与数值解得到的数据拟合情况良好,5 个水体分层温度测点误差均低于 10%,表现出较高准确性。误差主要集中于顶部以及底部区域水体。对比数值解结果与实验台结果可知,水池最上部水层、中上层、中层、中

下层、最下层水体温度平均绝对误差分别为 2%、2.1%、1.75%、1.24%、3.24%、3.67%。总体来看实验验证效果较好,数值解与实验台数据吻合良好。

2.2 充能、放能工况验证

STES 水池系统充能、放能工况使用黄帝城项目的运行数据进行验证。在进行系统时间步长鲁棒性验证中,在典型充能日(2018 年 6 月 1 日—2018 年 6 月 8 日)和典型放能日(2018 年 10 月 11 日—2018 年 10 月 16 日)中均存在待机工况,这里不再对典型待机工况进行验证。将河北省 1 年内测得的每小时气温、辐射强度和风速数据传输至曲线上,然后输入到模拟中。在黄帝城项目中,水池中水体的温度测量点分别位于距水池底部 4.25、2.65 和 0.25 m 的高度。坑内初始水温为 15 ℃,初始土壤温度为 10 ℃。

1) 充能工况。

采用 60 s 的时间步长,将项目典型充能日中充入的水体流量、温度按时间步长截取输入至模型中,通过模型 168 h 的运行和中国科学院黄帝城项目实验测量数据进行对比,结果如图 7 所示,充能模型的平均相对误差仅为 1.57%,平均误差温度为 0.44 ℃,模拟结果与实测结果吻合良好。

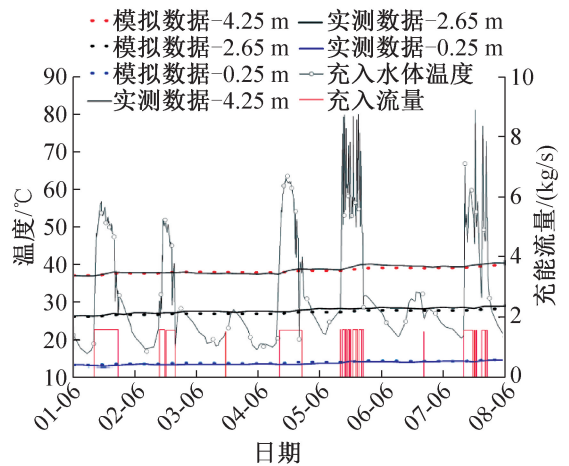


图 7 系统典型充能日验证

Fig.7 Verification of the charging mode on a typical day

2) 放能工况。

在 STES 典型放能工况的项目数据验证中,同样采用 60 s 的时间步长,将项目典型放能工况中的流出流量与温度按时间步长截取输入到模型中,通过模型 120 h 的仿真模拟运行数据和中国科学院黄帝城项目实验测量数据进行对比,结果如图 8 所示,模拟结果与实测结果差异小于 1%,在可接受范围。模拟模型中放能工况温度数据与中国科学院黄帝城项目实测温度数据的平均相对误差仅为 0.46%,平均误差温度为 0.24 ℃。

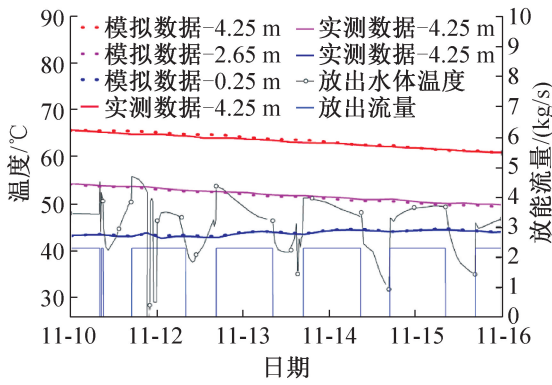


图8 系统典型放能日验证

Fig.8 Verification of the discharging mode on a typical day

2.3 系统热损失率

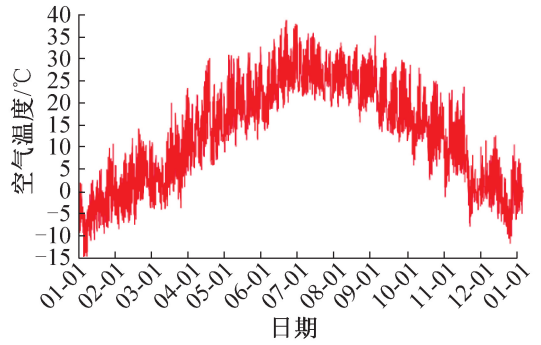
在系统的初始设置中,初始运行水温为 15 ℃,土壤温度为 10 ℃,气象数据边界条件输入如图 9 所示,计算时间步长为 3 600 s。系统充能工况的初始运行时间设置为北方供暖结束后的 4 月 1 日,放能工况的初始操作时间设置为北方开始集中供暖的 11 月 15 日。在系统的全年运行中,充能(集热)时间为 225 d,放能(供热)时间为 135 d。在系统充能工况下,当太阳能集热器不能加热进水温度或太阳辐射为 0 时,系统处于待机状态,反之亦然。

在跨季节储热水体供热系统中,储热子系统承担了系统最大的热量负荷,也是整个系统中热损失最大的部分。系统在第 1 年第 1 天至第 2 年第 1 天的完整运行周期中,太阳能集热器给水池充入的总能量为 683 MW·h。图 10 所示为系统逐时热损失情况。在所有热损失中,顶部总热损失为 13.91 MW·h,这是因为顶部有一层绝热良好的空气层,使顶部热损失较小。底部热损失大于顶部热损失,为 31.74 MW·h,因为在整个运行阶段底部温度均较低。若水池的保温措施得当,当经过长时间运行后,水池周围的土壤达到稳态,热损失率可以降至 10% 以下。

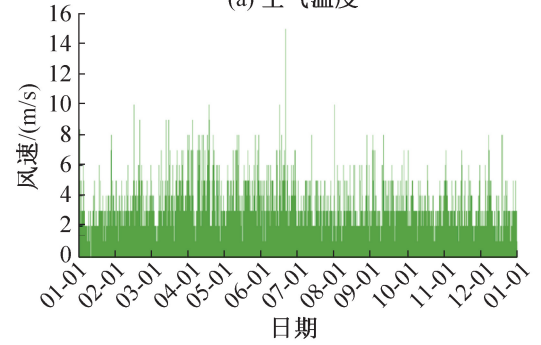
3 结论

本研究建立了一个总体积为 11 304 m³ 的圆柱形跨季节储热水体系统级耦合数值模型。采用一维模型计算水池水区域,采用二维模型计算土壤区域,再通过水池壁温度边界连接水和土壤传热以对 PTES 系统进行整体模拟。为验证模型的准确性,通过缩尺砂箱实验台对待机工况进行了验证,并采用黄帝城项目典型的日充放能实验数据对动态工况进行验证,得到如下结论:

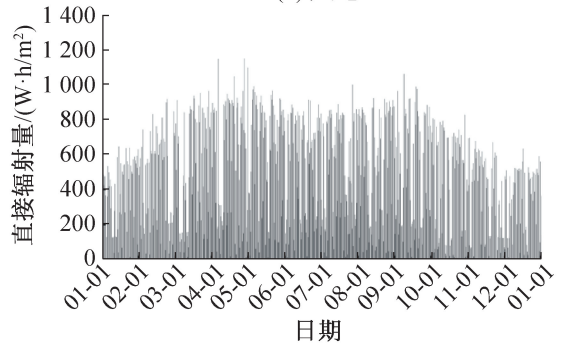
1) 砂箱实验台水体温度变化数据与数值解模拟



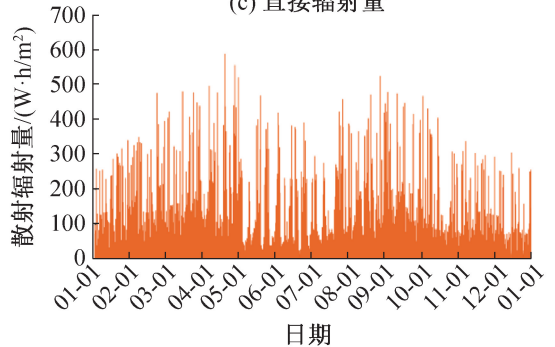
(a) 空气温度



(b) 风速



(c) 直接辐射量



(d) 散射辐射量

图9 气象数据边界条件

Fig.9 Boundary conditions for meteorological data

数据拟合情况良好,在 24 h 的模拟中,5 个水体分层温度误差均低于 10%。其中,中层和中下层水体温度准确性最高,平均绝对误差分别为 1.75% 和 1.24%。误差相对较大的顶部以及底部区域水体平均绝对误差也仅有 2.1% 和 3.24%。

2) 在典型充能日(2018-06-01—2018-08-08)和典型放能日(2018-10-11—2018-10-16)的数据

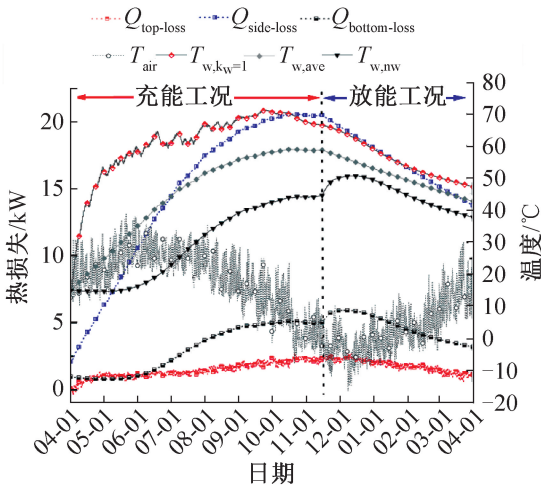


图 10 水池内逐时热损失

Fig.10 Hourly heat loss in the water pit

验证中,充能工况下的平均相对误差仅为 1.57%,平均误差温度为 0.44 °C;放能工况的平均相对误差仅为 0.46%,平均误差温度为 0.24 °C。模型模拟的温度数据与中国科学院黄帝城项目实测温度数据基本吻合。

3) 系统在第 1 年完整运行周期中,太阳能集热器给水池充入的总能量为 683 MW·h。在所有热损失中,顶部热损失较小,为 13.91 MW·h。底部热损失大于顶部热损失,为 31.74 MW·h。在长周期运行后,水池周围土壤温度稳定,热损失率可在 10%以下。

本文受中国长江电力股份有限公司科研项目(Z342302009)资助。(The project was supported by the China Yangtze Power Co., Ltd. (No. Z342302009).)

符号说明

- A——传热接触面积, m²
- c_p——比定压热容, J/(kg·K)
- H——水池深度, m
- h——传热系数, W/(m²·K)
- I_g——太阳能总辐照量, W·h/m²
- Q——传热量, W
- m——流量, kg/s
- r——半径, m;
- R——材质热阻, m²·K/W
- u——风速, m/s
- V——体积, m³
- T——温度, °C
- z——垂直方向
- δ——材质厚度, m
- λ——导热系数, W/(m·K)
- ρ——密度, kg/m³

- τ——时间, s
- φ——土壤对太阳辐射的吸收率

下标

- a——空气
- bot——水池底部
- cal——计算域
- Co——集热器出口
- Ci——集热器入口
- con——混凝土
- ev——环境
- g——盖板
- in——入口
- k——水体分层数
- ins——内部
- k_t——土壤表面
- k_w——水体表面层
- n_w——水体层数
- out——出口
- p——盖板
- s——土壤域
- soil——土壤侧
- side——水池侧面
- loss——损失
- Ti——供热末端入口
- To——供热末端出口
- w——水
- G——节点下侧
- L——节点左侧
- R——节点右侧
- U——节点上侧

参考文献

- [1] CAO Xiaodong, DAI Xilei, LIU Junjie. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade[J]. Energy and Buildings, 2016, 128: 198-213.
- [2] STUTZ B, LE PIERRES N, KUZNIK F, et al. Storage of thermal solar energy [J]. Comptes Rendus Physique, 2017, 18(7/8): 401-414.
- [3] SIFNAIOS I, SNEUM D M, JENSEN A R, et al. The impact of large-scale thermal energy storage in the energy system[J]. Applied Energy, 2023, 349: 121663.
- [4] XU J, WANG R Z, LI Y. A review of available technologies for seasonal thermal energy storage[J]. Solar Energy, 2014, 103: 610-638.
- [5] 赵璇, 赵彦杰, 王景刚, 等. 太阳能跨季节储热技术研究进展[J]. 新能源进展, 2017, 5(1): 73-80. (ZHAO Xuan, ZHAO Yanjie, WANG Jinggang, et al. Research

- progress on solar seasonal thermal energy storage [J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2017, 5(1): 73-80.)
- [6] HESARAKI A, HOLMBERG S, HAGHIGHAT F. Seasonal thermal energy storage with heat pumps and low temperatures in building projects—a comparative review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 43: 1199-1213.
- [7] 王子逸,徐玉杰,周学志,等. 跨季节复合储热系统储/释热特性[J]. *储能科学与技术*, 2020, 9(6): 1837-1846. (WANG Ziyi, XU Yujie, ZHOU Xuezhi, et al. Storage and release characteristics of seasonal composite thermal storage system [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2020, 9(6): 1837-1846.)
- [8] BAI Yakai, WANG Zhifeng, FAN Jianhua, et al. Numerical and experimental study of an underground water pit for seasonal heat storage [J]. *Renewable Energy*, 2020, 150: 487-508.
- [9] DAHASH A, OCHS F, JANETTI M B, et al. Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: a critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems [J]. *Applied Energy*, 2019, 239: 296-315.
- [10] 周喜超,李晓霞,李振,等. 基于太阳能储/供热综合能源系统的运行策略[J]. *可再生能源*, 2024, 42(1): 71-78. (ZHOU Xichao, LI Xiaoxia, LI Zhen, et al. Research on the influence of heat storage operation strategies on the performance of integrated energy system based on the solar energy storage and heating [J]. *Renewable Energy Resources*, 2024, 42(1): 71-78.)
- [11] 贾鹏琦,殷勇高,张思雨,等. 面向低碳供暖的城市中水余热跨季节储热系统性能分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(10): 4124-4134. (JIA Pengqi, YIN Yonggao, ZHANG Siyu, et al. Performance analysis of seasonal thermal energy storage system with urban reclaimed water waste heat for low-carbon heating [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2023, 54(10): 4124-4134.)
- [12] 王春林,郭放,朱永利,等. 大规模太阳能跨季节土壤储热系统设计优化[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(4): 320-327. (WANG Chunlin, GUO Fang, ZHU Yongli, et al. Design and optimization of large-scale seasonal borehole thermal energy storage system for solar energy [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2021, 42(4): 320-327.)
- [13] HOOKE R, JEEVES T A. "Direct Search" solution of numerical and statistical problems[J]. *Journal of the ACM (JACM)*, 1961, 8(2): 212-229.
- [14] FAN J, HUANG J, CHATZIDIAKOS A, et al. Experimental and theoretic investigations of thermal behavior of a seasonal water pit heat storage [C]//*ISES Solar World Congress 2017 and the IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry 2017*. Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2017.
- [15] DAHASH A, OCHS F, TOSATTO A, et al. Toward efficient numerical modeling and analysis of large-scale thermal energy storage for renewable district heating[J]. *Applied Energy*, 2020, 279: 115840.
- [16] PAN Xinyu, XIANG Yutong, GAO Meng, et al. Long-term thermal performance analysis of a large-scale water pit thermal energy storage [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 105001.
- [17] RAAB S, MANGOLD D, MÜLLER-STEINHAGEN H. Validation of a computer model for solar assisted district heating systems with seasonal hot water heat store [J]. *Solar Energy*, 2005, 79(5): 531-543.
- [18] XIE Zichan, XIANG Yutong, WANG Dengjia, et al. Numerical investigations of long-term thermal performance of a large water pit heat storage [J]. *Solar Energy*, 2021, 224: 808-822.
- [19] KORONAKI I P, NITSAS M T. Experimental and theoretical performance investigation of asymmetric photovoltaic/thermal hybrid solar collectors connected in series [J]. *Renewable Energy*, 2018, 118: 654-672.
- [20] RYAN P J, HARLEMAN D R F, STOLZENBACH K D. Surface heat loss from cooling ponds [J]. *Water Resources Research*, 1974, 10(5): 930-938.

通信作者简介

田志勇,男,博士,副教授,华中科技大学环境科学与工程学院,13522166267, E-mail: zhiyongtian@hust.edu.cn。研究方向:储热与太阳能。

About the corresponding author

Tian Zhiyong, male, Ph.D., associate professor, School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 86-13522166267, E-mail: zhiyongtian@hust.edu.cn. Research fields: thermal energy storage and solar energy.