文章编号：1008－8857(2025)03－0144－08 **DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2025.03.003

基于迭代模型的地铁车站空气温度逐年演化特性研究

王丽慧[1]，马嘉楠[1]，尹立元[2]
（1. 上海理工大学 环境与建筑学院，上海 200093；2. 山东商业职业技术学院，山东 济南 250103）

摘 要：基于地铁车站空气热平衡原理，提出地铁车站空气–土体流固耦合迭代模型，对地铁车站空气温度与围岩土体蓄放热量逐年演化特性进行研究，得到现有空调送风状态、标准工况下地铁车站空气温度逐年演化规律。结果表明，随着地铁车站空气热平衡动态参数的输入，迭代输出的地铁车站空气温度逐年升高，最热月份 8 月温度由第 1 年 24.2 ℃ 升高到第 15 年 27.3 ℃，最冷月份 1 月温度由第 1 年 11 ℃ 升高到第 15 年 16.8 ℃；地铁车站运营初期围岩土体吸热量逐年减少，达到饱和后蓄放热量逐年变化不大；地铁车站空调季室外侧进入车站热量占比、土体吸热量占比以及设备与照明散热量占比均逐年降低，隧道侧进入车站热量占比和人员散热量占比逐年升高。相较于课题组前期既有研究方案，该迭代方案能更精确地得到车站空气温度逐年演化特性，更具工程实际意义。

关键词：地铁车站；空气–土体流固耦合迭代模型；空气温度；逐年演化特性
中图分类号：TU831.6 **文献标志码**：A

Study on annual evolution characteristics of subway station air temperature based on an iterative model

WANG Lihui[1]，MA Jianan[1]，YIN Liyuan[2]
(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shandong Vocational College of Commerce, Jinan 250103, China)

Abstract: Based on the principle of air heat balance in subway stations, an iterative fluid-solid coupling model of subway station air and soil was proposed to study the annual evolution characteristics of air temperature and the heat storage and release in surrounding rock and soil. This approach reveals the yearly evolution law of subway station air temperature under standard operating conditions with current air-conditioning supply settings. Results show that with dynamic input of the subway station air heat balance parameters, the iteratively calculated air temperature increases annually. The hottest month, August, rises from 24.2 ℃ in the first year to 27.3 ℃ in the

收稿日期：2023－11－12
基金项目：国家自然科学基金面上项目(51878408)
第一作者：王丽慧(1978—)，女，教授。研究方向：地铁通风空调系统。E-mail：66amy99@126.com
通信作者：尹立元(1997—)，男，硕士研究生。研究方向：地铁通风空调系统。E-mail：1443816346@qq.com

15th year, while the coldest month, January, increases from 11 ℃ in the first year to 16.8 ℃ in the 15th year. During the early operation of the subway station, the heat absorption by surrounding soil decreases yearly; after reaching saturation, the heat storage and release show little annual change. The proportions of heat entering the station from the outdoor side during the air-conditioning season, soil heat absorption, and equipment and lighting heat dissipation all decrease annually, while the proportions of heat entering from the tunnel side and heat from passengers increase over the years. Compared with previous research schemes by the project team, this iterative model more accurately captures the annual evolution characteristics of station air temperature, offering greater engineering practical significance.

Keywords: subway station；iterative fluid-solid coupling model of air and soil；air temperature；annual evolution characteristics

伴随着轨道交通的快速发展，地铁车站内部空气温度及车站通风空调系统能耗与节能问题逐渐受到关注[1]。现有地铁车站空调负荷设计依照远期负荷最不利工况进行，地铁车站夏季空调冷量供给按照地铁车站远期负荷需求进行，未考虑地铁车站空气温度逐年演化特性，且地铁车站负荷逐年变化规律被忽视。

地铁车站空气温度不仅直接影响人员热舒适性，而且与地铁车站空调系统能耗息息相关。受多种因素的综合影响，夏季地铁车站空气温度较高，需要开启空调送冷风进行调节，同时夏季地铁车站围岩土体也会吸收车站空气中部分热量，从而对地铁车站空气温度起到一定的降温效果。因此研究地铁车站不同运营时期空气和土体的动态换热特性以及地铁车站空气温度影响因素对研究地铁车站空调系统节能极其重要。在地下建筑流固耦合传热的研究方面，王琴等[2−3]通过建立流体和固体区域的统一控制微分方程，将复杂的固体导热与流体对流换热通过彼此互为边界条件耦合起来，采用耦合传热计算方法对三维非稳态传热进行数值求解，研究室内空气对围岩土体蓄放热量的影响，并可反求室内空气与围护结构的对流换热系数，得到夏季围岩土体吸热量日平均值为 1 841.8 W，冬季围岩土体放热量日平均值为 5 141.9 W，比传统的未考虑流固耦合动态传热模型的计算值减少 18% ～ 27%。在地下建筑土体温度场与蓄放热量的研究方面，胡增辉等[4]为研究隧道土体温度场逐年演化规律，利用 FLAC3D 软件模拟计算其土体传热能力，发现地铁车站隧道运营 10 年后，围岩温度场基本达到稳定，稳定厚度约为 15 m，此时围岩的传热量约为 1.53 W/m^2。在地铁车站空气温度影响因素的研究方面，黄莉等[5]以长江流域的地下二层典型岛式地铁车站为例，分析重要参数在其可能的变化范围内改变对通风空调系统能耗的影响。结果表明，室外空气参数对能耗的影响程度高达 84%，机械新风量、出入口渗透风量和屏蔽门渗透风量对能耗的影响程度分别为 43%、29% 和 12%，设备能效对能耗的影响程度达 39%，站内及隧道空气参数对能耗的影响程度分别为 37% 和 33%。

综上，诸多学者已对地下建筑流固耦合传热、地下建筑土体温度场与蓄放热量以及地铁车站空气温度影响因素进行了广泛研究，但缺少对围岩土体蓄放热量与地铁车站空气温度变化之间关系的综合性分析。本文首先基于地铁车站空气热平衡原理，以围岩土体蓄放热 ANSYS 软件模拟为基础，建立地铁车站空气−土体流固耦合迭代模型；其次通过迭代计算得到考虑了地铁车站空气与围岩土体动态换热情况下的地铁车站空气温度逐年演化规律，所得到的结果更加贴近工程实际，具有较强的工程指导意义。

1　研究方法

1.1　地铁车站空气−土体流固耦合新迭代研究

为研究地铁车站空气与土体侧热量互相影响下的车站围岩土体蓄放热量以及车站空气温度演化特性，本文采用地铁车站空气−土体流固耦合

迭代模型进行研究[6]。新的迭代方案如图 1 所示。该迭代方案基于课题组前期未考虑车站空气与土体动态换热的既有研究方案[6]进行优化，采用的模型与既有研究方案的模型相同。相较于既有研究方案，新迭代方案能够更准确地得到车站空气温度逐年演化规律，对工程实际更具指导意义。将上海地铁车站第 1 ～ 15 年空气温度作为室内侧初始空气温度 t 的边界条件代入上海某地铁车站 ANSYS 软件模型进行模拟，研究地铁车站围岩土体蓄放热演化结果，其中第 1 ～ 15 年室外侧与隧道侧边界条件均与既有研究方案取值相同。通过模拟可以得到地铁车站 15 年内逐月围岩土体热流密度，进而求得围岩土体蓄放热量。将该围岩土体蓄放热量代入车站热平衡公式进行计算，输出新的 15 年内逐月地铁车站空气温度 t'。将输出的地铁车站空气温度 t'与输入的地铁车站空气温度 t 进行一致性验证，如果两者数值不同，则将 t'当作 t 代入进行迭代，直到两者一致方可停止，从而得到考虑了地铁车站空气与土体动态传热的围岩土体蓄放热量以及车站空气温度的演化结果。

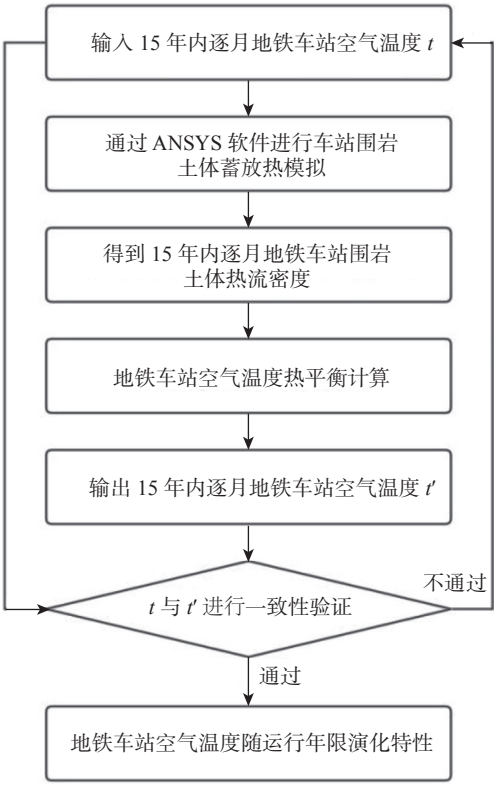


图 1 地铁车站空气–土体流固耦合迭代模型

Fig. 1 Iterative fluid-solid coupled model of subway station air and soil

1.2 上海地铁车站围岩土体蓄放热模型

为研究由室外侧、室内侧及隧道侧空气温度波叠加作用下的地铁车站围护结构周围土体温度场的演化规律，以上海某地铁车站为原型建立了 3 个温度波耦合影响下土体传热数值模型。模型尺寸如表 1 所示。通过网格无关性验证最终确定网格数量约为 50 万。地铁车站围岩体模拟模型如图 2 所示。

地铁车站顶墙土体为地铁车站顶壁面与地表面之间的这部分土体，土体厚度为 5 m。根据 Maref 等[7]的研究可知：在室内各处空气温度较为接近的前提下，相同深度围护结构各处的温度和热流密度基本相等，故以 X–Y 轴为截面，顶墙土体模拟监测点分别选取距车站顶壁面 0.5、1.5、3.5 m 处土体分析顶墙土体不同深度的温度变化，同时侧墙土体与底墙土体模拟监测点选取如图 3 所示，进而可以分析侧墙与底墙土体不同深度的温度变化。

1.3 空调季地铁车站空气热平衡模型

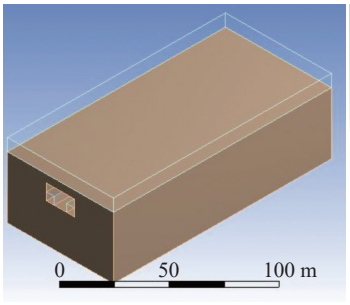
夏季列车单个行车周期内地铁车站空气热量变化分为由列车运行产生的正压效应与负压效应两种情况，如图 4 所示，其中：G_{pbm}、G_{crk}分别为屏蔽门渗透风量和出入口渗透风量，m^3；G_x、G_h和G_s分别为空调新风量、空调回风量及空调送风量，m^3；t_q、t_n和t_w分别为区间隧道空气温度、地铁车站第 n 个月空气温度及室外空气温度，℃。

在空调季，单个列车行车周期(即从上一趟

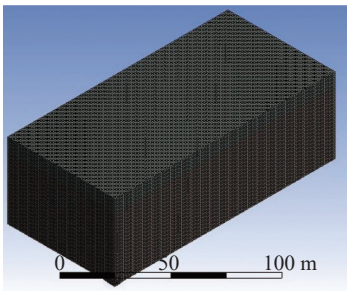
表 1 地铁车站围岩土体模型尺寸

Tab. 1 Dimensions of surrounding rock and soil model for subway station 单位：m

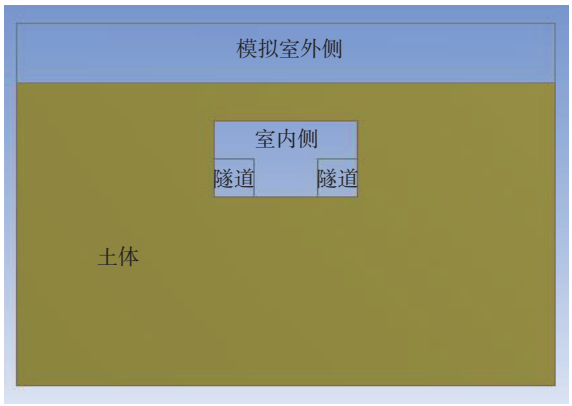
站厅宽	站厅高	站厅长	站台宽	站台高	站台长	区间隧道宽	区间隧道长	土体宽	土体高	土体长	车站顶壁面距地表距离
18	5	120	8	5	120	5	140	68	40	140	5



(a) 模型结构



(b) 模型网格划分



(c) 地体车站围岩土体模型主视图

图 2　地铁车站围岩土体模拟模型

Fig. 2　Simulation model of surrounding rock and soil for subway station

列车停站、离站到下一趟列车进站、停站的过程)内主要存在两种地铁车站空气流动模式。本研究是以月为时间尺度建立逐月的地铁车站空气热平衡公式，因此需要计算出单位时间地铁车站渗透风量 [见式(1)]，并将单位时间地铁车站内渗透风量代入地铁车站空气热平衡中进行计算，从而建立逐月地铁车站空气热平衡公式，即

$$G' = \frac{G}{\tau'} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}\Delta Q = & Q_{dr} - Q_{sr} = Q_z + Q_s + Q_r + Q_m + Q_t + \\ & \rho c G'_s (t_s - t_n)\tau + \rho c G'_{pbm}(t_q - t_n)\tau + \\ & \rho c G'_{crk}(t_w - t_n)\tau\end{aligned} \tag{2}$$

式中：G为单位行车周期内通风量，m^3/h；G'为单位时间通风量，m^3/h；ΔQ、Q_{dr}和Q_{sr}分别为地铁车站空气热量变化、地铁车站得热量及地铁车站失热量，kJ；Q_z、Q_s、Q_r、Q_m和Q_t分别为地铁车站照明散热量、设备散热量、人员散热量、屏蔽门传热量及围岩土体蓄放热量，kJ；τ为一个月时长，h；τ'为单个行车周期，h；ρ为空气密度，kg/m^3，对应各自通风温度选取相应的数值；c为空气比热，kJ/(kg·℃)；G'_{pbm}、G'_{crk}和G'_s分别为单位时间屏蔽门渗透风量、单位时间出入口渗透风量及单位时间空调送风量，m^3/h；t_s为空调送风温度，℃。

地铁车站空气–土体流固耦合迭代模型主要是将围岩土体 ANSYS 软件模拟得到的围岩土体壁面逐年热流密度代入地铁车站空气热平衡公式中，计算得到地铁车站逐年空气温度，并将该车站逐年空气温度作为围岩土体 ANSYS 软件模拟的室内侧空气温度边界条件进行新一轮的模拟与热平衡计算。通过不断迭代求解，当迭代输入与输出空气温度一致时，即得到考虑了土体与空气动态换热的逐年地铁车站空气温度。

根据式(2)可以进一步求解地铁车站空气温度，即

$$t_n = \frac{Q_z + Q_s + Q_r + Q_t + \rho_1 c\tau G'_s t_s + \rho_2 c\tau G'_{crk} t_w + \rho_3 c\tau G'_{pbm} t_q + 3.6KF\tau t_q + \rho_4 cV t_{n-1}}{\rho_1 c\tau G'_s + \rho_2 c\tau G'_{crk} + \rho_3 c\tau G'_{pbm} + 3.6KF + \rho_4 cV} \tag{3}$$

式中：V为地铁车站体积，m^3；K为传热系数，$W/(m^2\cdot K)$；F为屏蔽门面积，m^2；非空调季空调送风量取值为 0，m^3/h；ρ_1、ρ_2、ρ_3、ρ_4分别为 t_s、t_w、t_q、t_{n-1} 时的空气密度。

2　结果与分析

2.1　地铁车站围岩土体温度结果分析

为研究地铁车站空气温度逐年演化规律，分

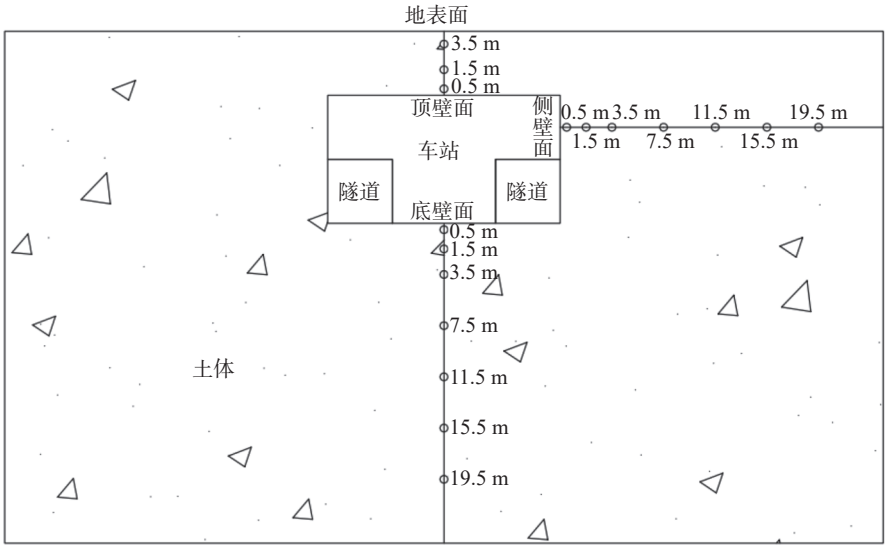


图 3 地铁车站中心截面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the central section of subway station

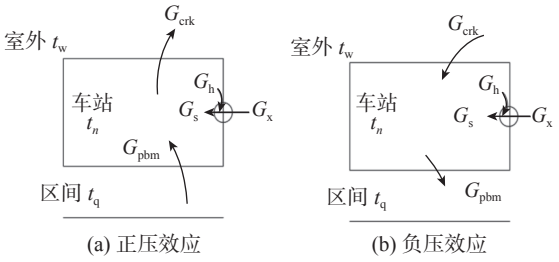


图 4 空调季单个行车周期内地铁车站空气流动状况

Fig. 4 Airflow conditions in subway station during a single train operation cycle in the air-conditioning season

别对地铁车站围岩顶墙土体、侧墙土体以及底墙土体和岩土体热流密度迭代结果进行分析。

2.1.1 地铁车站围岩土体温度场

将上海典型地铁车站土体初始温度设置为上海地下土体恒温层温度 17.2 ℃，通过 3 次迭代求解得到地铁车站顶墙土体、侧墙土体以及底墙土体不同深度的迭代输出温度场，如图 5 所示。由图可知，新迭代方案输出的顶墙土体、侧墙土体以及底墙土体温度均呈现逐年递增的趋势。其一，顶墙不同深度的土体温度均呈现正弦周期性波动，距顶壁面深度越大，越接近室外侧地面，其温度振幅波动越大，其中，距顶墙壁面 0.5 m 深度土体温度从第 1 年峰值 23.1 ℃ 升高到第 15 年峰值 27.5 ℃，1.5 m 深度土体温度从第 1 年峰值 24.5 ℃ 升高到第 15 年峰值 28.9 ℃，3.5 m 深度土体温度从第 1 年峰值 30.8 ℃ 升高到第 15 年峰值 32.8 ℃。顶墙土体温度主要受地铁车站空气温度与室外侧综合空气温度的影响。夏季室外侧综合空气温度远高于地铁车站空气温度。这是距室外侧越近的顶墙土体受室外侧综合空气温度影响越大导致。其二，侧墙土体温度随着距车站侧壁面深度的增加，土体温度振幅呈现逐渐减小的趋势。这是侧墙土体距侧壁面越近，其土体温度受地铁车站室内侧空气温度影响越大所致。其三，距地铁车站底壁面 3.5 m 深度的底墙土体温度呈现明显的正弦周期性波动趋势，底墙土体距底壁面越近，其土体温度受地铁车站室内侧空气温度与隧道侧空气温度影响越大。随着底墙土体距车站底壁面深度的增加，土体温度振幅呈现逐渐减小的趋势，且距底壁面 3.5 m 深度以下的底墙土体温度不再呈现明显的正弦周期性波动趋势。由于受上部土体温升的导热作用影响，3.5 m 深度以下的底墙土体也会有一定的温升。

2.1.2 地铁车站围岩土体热流密度

经过 3 次迭代可得最终的迭代输出地铁车站各壁面围岩土体热流密度，如图 6 所示。由图可知，地铁车站各壁面热流密度均呈正弦周期性波动，但并未像车站空气温度以及地铁车站各壁面土体温度一样呈现随运营年限逐年递增的趋

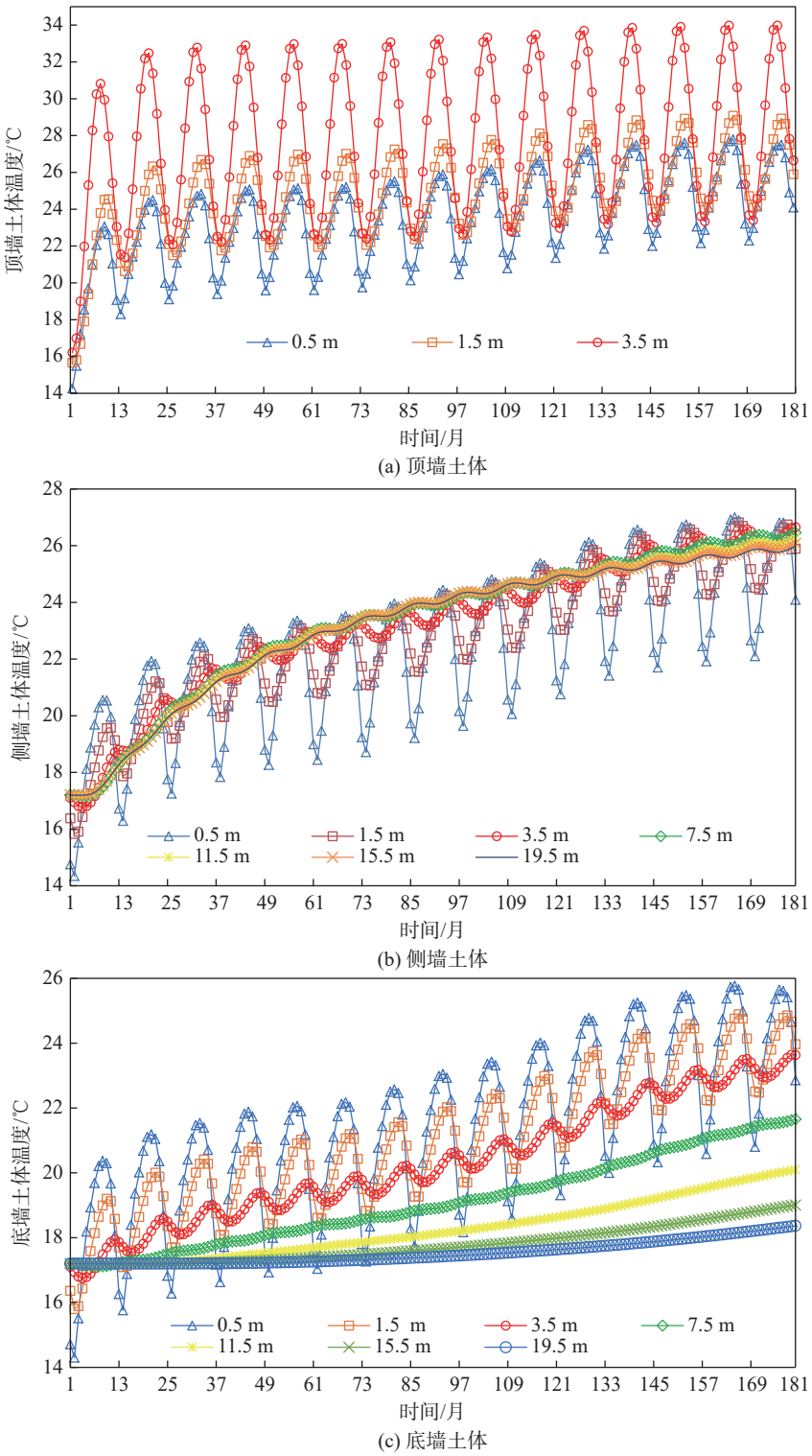


图 5　迭代输出地铁车站土体温度场逐年演化图

Fig. 5　Iterative output of the annual evolution of soil temperature field around subway station

势。例如，顶壁面冬季热流密度反而呈现逐年减少的趋势：由第 2 年 5.9 W/m^2 降低到第 15 年 5.5 W/m^2。这主要受地铁车站空气与围岩土体壁面温度变化的综合影响。

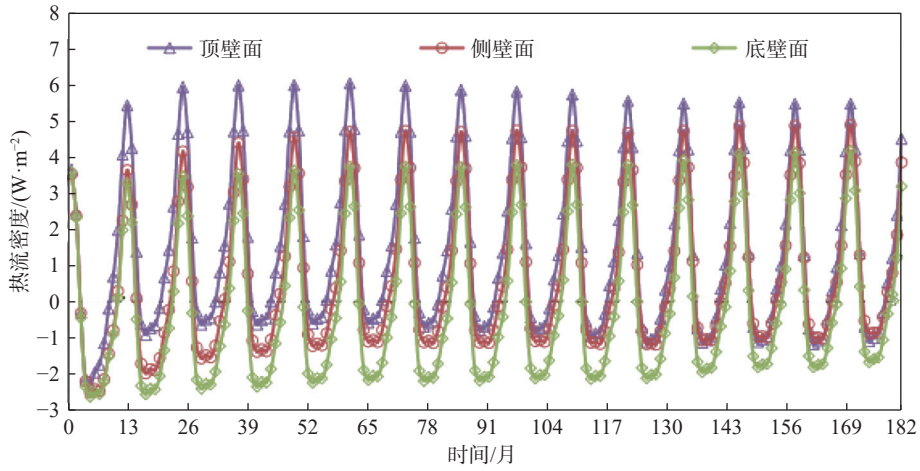


图 6 迭代输出地铁车站各壁面热流密度逐年演化图

Fig. 6 Iterative output of the annual evolution of heat flux density on subway station walls

2.2 地铁车站空气温度结果分析

将新迭代方案输出的地铁车站空气温度与既有研究方案得到的进行对比，结果如图 7 所示。新迭代方案输出的地铁车站空气温度整体呈现正弦周期性波动规律，并随地铁车站运营年限增加而增加。这与既有研究方案得到的规律相同。但是迭代输出的夏季车站空气温度要比既有研究方案得到的低，而冬季车站空气温度高于既有研究方案得到的。迭代输出的地铁车站最冷月份 15 年内温升为 5.8 ℃，比既有研究方案得到的 2.9 ℃ 高；迭代输出的地铁车站最热月份空气温度从第 1 年 24.2 ℃ 升高到第 15 年 27.3 ℃，而既有研究方案得到的从第 1 年 24.4 ℃ 升高到第 15 年 34.9 ℃。另外，与既有研究方案相比，迭代输出的车站空气温度在运营远期未发生突增。这主要是既有研究方案将室内侧空气温度设定为不随运营年限波动的边界条件，未考虑地铁车站空气与土体流固耦合动态传热，以及客流量变化与行车密度引起的车站渗透风量变化等热参数取值不同等综合因素。

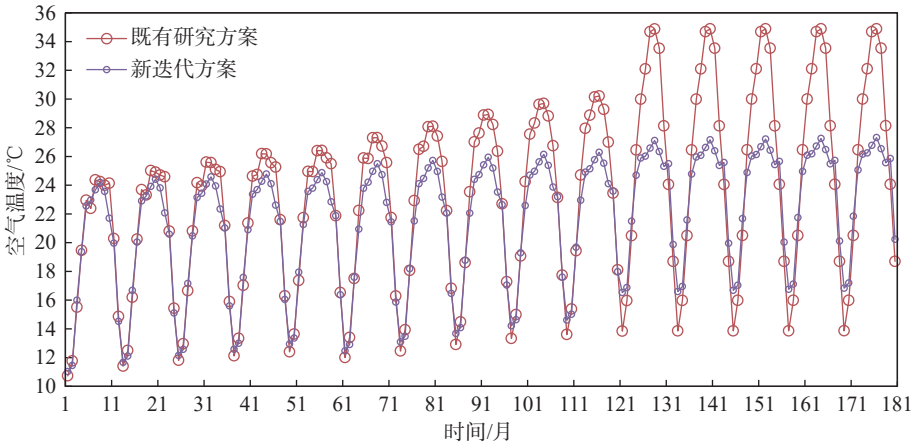


图 7 地铁车站空气温度逐年演化规律

Fig. 7 Annual evolution of air temperature in subway station

3 结论

(1)创建了考虑空气与土体动态换热和热平衡参数动态变化影响的地铁车站空气–土体流固耦合迭代模型。

(2)基于迭代模型求解得到的地铁车站空

气温度具有逐年递增特性，最热月份 8 月温度由第 1 年 24.2 ℃ 升高到第 15 年 27.3 ℃，最冷月份 1 月温度由第 1 年 11 ℃ 升高到第 15 年 16.8 ℃。既有研究方案得到的车站空气温度在第 10 年最热月份为 30.2 ℃，在第 11 年最热月份升高到 34.9 ℃，而迭代输出的车站空气温度在运营远期未发生突增。

(3)基于迭代模型求解得到的地铁车站围岩土体温度呈现逐年递增的趋势，且从第 1 年至第 15 年土体温升均大于既有研究方案得到的值。

参考文献：

[1] 匡江红, 余斌. 地铁空调通风环境控制系统的节能探讨 [J]. 能源研究与信息, 2003, 19(4)：218 − 222.

[2] 王琴, 程宝义, 缪小平. 基于 PHOENICS 的地下工程岩土耦合传热动态模拟 [J]. 建筑热能通风空调, 2005, 24(4)：19 − 23, 77.

[3] 王琴, 程宝义, 缪小平, 等. 浅埋工程围护结构全年动态传热计算 [J]. 建筑节能, 2007, 35(1)：24 − 28.

[4] 胡增辉, 李晓昭, 赵晓豹, 等. 隧道围岩温度场分布的数值分析及预测 [J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5)：867 − 872.

[5] 黄莉, 苏子怡, 李晓锋. 地铁车站公共区域空调能耗影响因素的敏感性分析 [J]. 都市快轨交通, 2021, 34(6)：125 − 130.

[6] 王丽慧, 张媛, 杜志萍, 等. 地铁隧道围岩土体蓄放热特性各影响因素显著性研究 [J]. 制冷学报, 2019, 40(4)：135 − 143.

[7] MAREF W, SWINTON M C, KUMARAN M K, et al. Three-dimensional analysis of thermal resistance of exterior basement insulation systems (EBIS)[J]. Building and Environment, 2001, 36(4)：407 − 419.

信息

全国首个数据中心源网荷储一体化绿电直供项目投运

7 月 15 日，全国首个数据中心源网荷储一体化绿电直供项目——内蒙古乌兰察布数据中心低碳算力基地源网荷储一体化项目正式投运。该项目是国内单体容量最大的基于算力基地的源网荷储一体化项目。该项目融合清洁能源技术、算力技术与网络技术，采用“源网荷储”一体化模式，通过整合风力发电、光伏发电、储能调节与电力负荷响应资源，达成能源供应与算力需求的动态匹配，实现清洁能源对数据中心直接供能。该项目包含新建 200 MW 风电、100 MW 光伏及配套集电线路，45 MW/180 MW·h 储能系统，一体化运营平台，以及 1 座 220 kV 升压站。投运后，年风光新能源发电量可达 8.48 亿 kW·h，相当于减排 CO_2 约 48 万 t，为构建“东数西算”战略绿色算力枢纽提供关键支撑与标杆示范。

哈尔滨电气集团自主研制的 16 MW 燃气轮机实现满负荷试车

7 月 11 日，哈尔滨电气集团哈尔滨汽轮机厂有限责任公司自主研制的国内首台 16 MW 燃气轮机样机(HGT16)在济南满负荷试车成功。作为国内首台具有完全自主知识产权的 16 MW 级燃气轮机，HGT16 长 6 m、宽 2.4 m、高 2.8 m，透平进口温度达 1 500 K，热效率不低于 36%，其在机械驱动、分布式能源、应急电源及海上平台发电领域优势显著，具备快速启停能力，能够有力支撑风、光等新能源为主体的新型电力系统。

（王　波）