

基于灰色马尔科夫模型的地埋管换热器 温度变化研究

牛 凯, 晋 华, 郭 毅

(太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024)

摘 要: 地埋管换热器温度变化规律对于浅层地温能的开发、地源热泵系统的设计有着重要的意义。采用灰色马尔科夫模型对热源温度、环境温度,不同渗流条件下的实验数据进行趋势性和随机性的分析。结果表明,换热器的温度变化既有趋势性又有随机性,且随机性不可忽略;温度变化的趋势性可采用GM(1,1)灰色模型进行分析,其偏差与渗流速度及时间呈负相关关系;温度变化的随机规律可采用马尔科夫模型进行分析,随机量与渗流速度呈负相关关系,渗流速度越大,随机状态间分布越均匀。

关键词: 马尔科夫过程; 地源热泵; 渗流; 灰色模型

中图分类号: TK529

文献标识码: A

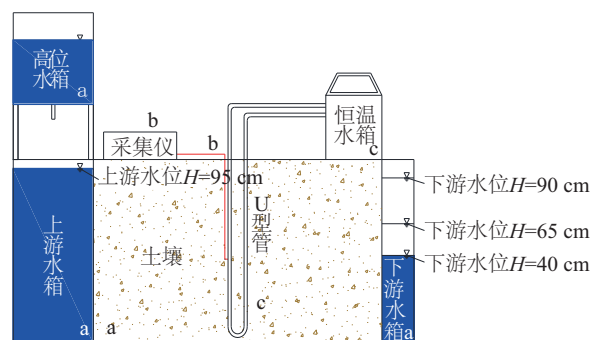
0 引 言

对地埋管换热器温度变化的研究有助于提高其换热性能。目前地埋管换热器周围土壤温度场多以传热模型研究为主,且已取得一定的成果,推动了该领域的发展,而实验研究尚处于探索阶段。室内实验大都为短期工况^[1],现场热响应实验又存在数据量少、离散性大的缺点,据此作为地埋管的设计参数,往往会出现较大的偏差^[2]。与此同时,目前的研究多为确定性研究,忽略了不确定因素,所得结论往往具有较大的局限性。真实的土壤中孔隙分布是不均匀和随机的,介质和孔隙结构具有分形特征^[3]。因此其传热传质过程中随机现象不可避免和忽略。对随机现象的研究早已在交通^[4]、工程建设^[5]、金融^[6]等领域广泛采用。Samuel^[7]在1966年对土壤温度场的随机性进行了研究。Tinti等^[8]在地源热泵现场热响应测试实验中发现温度随时间变化并非平稳过程,实际上是围绕着某种趋势波动变化,并将温度变化过程视为“趋势”和“随机”的组合。此后,温度场随机性的研究主要围绕在随机有限元法、模糊有限元法、模糊随机有限元法及区间有限元法等的理论研究^[8],而鲜有从实验角度出发的研究。因此开展相关实验对

实验数据进行趋势性和随机性研究就显得尤为重要,且具有广泛的现实意义

1 实验介绍

实验台根据地下水渗流理论及多孔介质传热质理论简化得出。该实验台可真实的模拟地埋管换热器工作情况,并可实时监测U型管管壁的温度。实验台示意图见图1。



注:a代表砂箱系统;b代表测温系统;c代表供热系统。

图1 实验台示意图

Fig. 1 Sketch of experimental platform

1.1 实验仪器简介

在功能方面,整个实验台可分为3个组成部分

收稿日期: 2017-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(41372247); 山西省回国留学人员科研资助项目(2017-045)

通信作者: 晋 华(1969—), 女, 博士、教授, 主要从事水文及水资源方面的研究。jinhuasx@163.com

——模拟地下水渗流的砂箱系统;采集温度的测温系统;提供恒定热源的供热系统。这 3 个系统共同作用以达到模拟实际地源热泵地埋管换热器的工作情况。

砂箱系统为整个实验台的核心部分,上、下游水箱间的水位差驱动水体在土壤中运动,不同水位差模拟不同的渗流条件,高位水箱为上游水箱补充恒定温度的水;测温系统由布设在 U 型管管壁上的 PT100 温度传感器和安捷伦数据采集仪组成,可等时间间隔的采集温度。供热系统由恒温循环水箱和 U 型管组成。U 型管在土壤中心处垂直埋设,模拟地源热泵垂直地埋管换热器,恒温水箱根据实验需求提供恒定温度的循环水。

1.2 实验内容

为探究不同渗流条件下地埋管换热器温度的变化规律,本实验以砾砂为实验介质,通过调节上、下游水箱水位差来变更渗流条件。即控制上游水箱水位不变,改变下游水箱水位,分别形成水位差为 0、5、30、55 cm 的渗流条件。在此基础上通过恒温水箱向 U 型管通入 30 ℃ 的恒温水,整个实验过程中通过高位水箱控制上游水箱水温恒定为 20 ℃。实验历时 12 h,每小时采集 1 次温度。

2 实验数据分析方法

灰色模型适用于数据平稳的问题,而实测数据难免会有波动,马尔可夫模型恰好适用于分散性强的数据^[9],二者相结合可更真实的反应原始数据的趋势规律及随机规律。

灰色马尔科夫模型的构建分为 2 部分:1)建立灰色模型,通过灰色模型分析原始数据的趋势项,从原始数据中扣除其趋势项成分,从而获得原始数据的随机成分;2)建立马尔科夫模型,采用均值标准差法对原始数据随机成分进行马尔科夫状态划分。

2.1 灰色模型构建

将原始数据 $x^{(0)}(t)$, 通过 GM(1,1) 灰色模型进行趋势性分析,得到原始数据的趋势项数据 $x^{(1)}(t)$ 。

趋势项 $x^{(1)}(t)$ 的表达式为:

$$x^{(1)}(t) = \begin{cases} x^{(0)}(t), & t=0 \\ (1-e^{-a})(x^{(0)}(t)-\frac{u}{a})e^{-at}, & t=1,2,3,\dots,n \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x^{(0)}(t)$ ——原始数据, ℃; $x^{(1)}(t)$ ——趋势项, ℃; t ——实验历时, h; a ——发展系数; u ——灰色作用量;

2.2 马尔科夫测模型构建

将原始数据 $x^{(0)}(t)$ 与趋势项数据 $x^{(1)}(t)$ 相减,得到随机项 $e^{(0)}(t)$ 。对随机项序列进行 χ^2 检验,以验证随机项序列是否满足马氏性。在满足马氏性的基础上对随机项进行状态划分,划分标准采用均值标准差法。表 1 为马尔科夫状态表,随机数据被划分为 5 种状态。其中, μ 为随机数据的平均值, s 为随机数据的标准差值。每种状态赋予各自对模型值 $M^{(1)}(t)$ 。

表 1 马尔科夫状态及模型值

Table 1 State and model values of Markov

状态	区 间	模型值
1	$[0, \mu-1.0s]$	$\mu+1.5s$
2	$(\mu-1.0s, \mu-0.5s]$	$\mu+0.75s$
3	$(\mu-0.5s, \mu+0.5s]$	μ
4	$(\mu+0.5s, \mu+1.0s]$	$\mu-0.75s$
5	$(\mu+1.0s, +\infty]$	$\mu-1.5s$

2.3 灰色马尔科夫模型构建

灰色马尔科夫为灰色模型及马尔科夫模型的叠加,其模型为 $x(3)(t) = x(1)(t) + M(1)(t)$ 。

3 实验数据分析

根据上述方法对砾砂条件下,热源温度为 30 ℃,渗流水温为 20 ℃,上下游水位差分别为 0、5、30、55 cm 的温度变化,采用灰色马尔科夫模型进行分析。通过趋势项与原始数据的偏差 $e^{(0)}(t)$,灰色马尔科夫模型值与原始数据间的偏差 $e^{(0)}(t)$ 比较灰色马尔科夫模型在对原始数据的模拟方面的适用性。

3.1 趋势项变化规律

温度场变化趋势满足式(1)。由于实验中上下游水头的不同,产生的渗流速度不同,因此不同实验条件温度变化趋势有所不同。可由式(1)中发展系数 a 与灰色作用量 u 体现,见图 2、表 2。

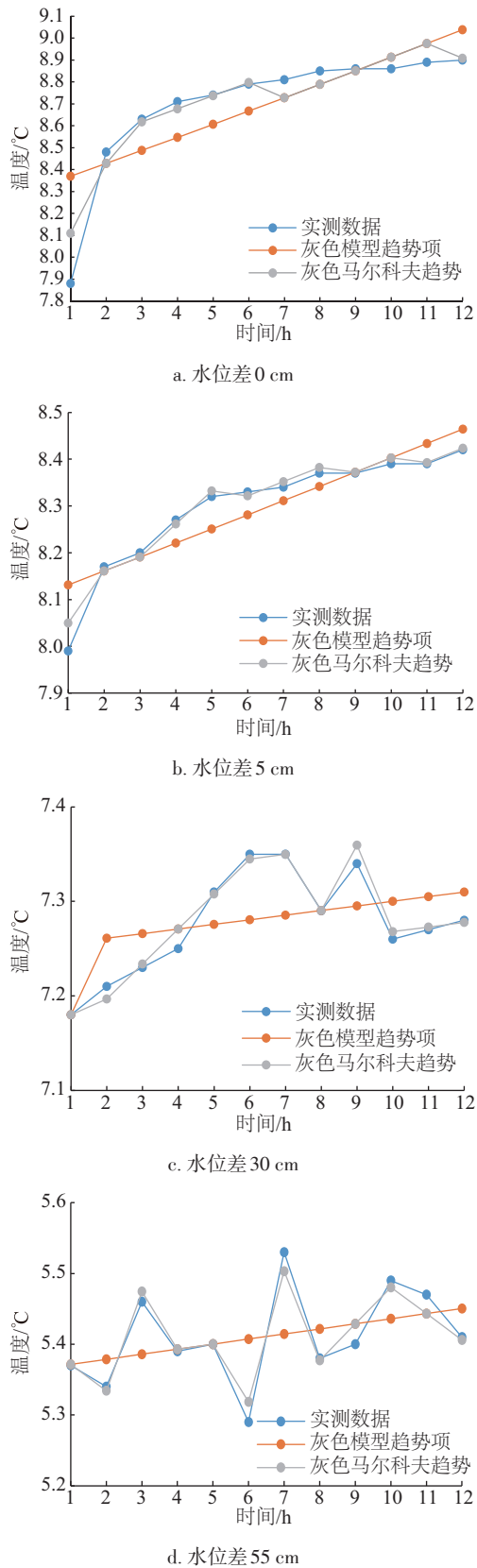


图2 灰色马尔科夫模型结果

Fig. 2 Grey-Markov model results

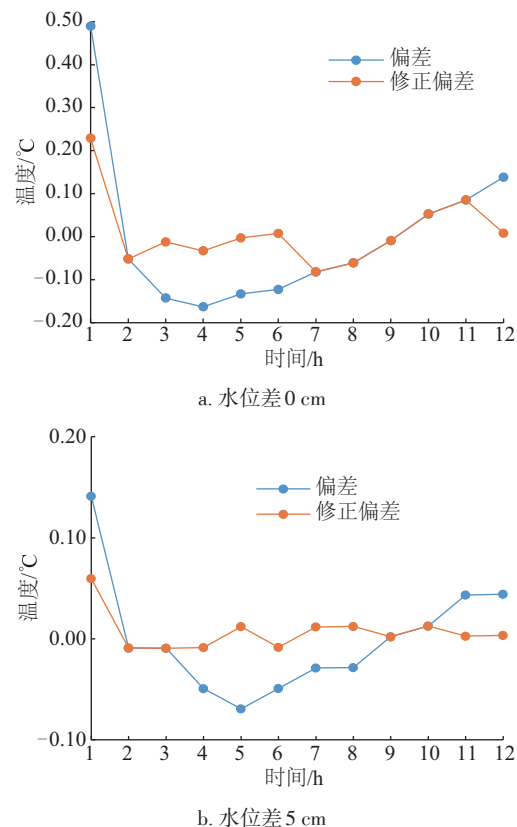
表2 灰色马尔科夫模型参数表

Table 2 Grey-Markov model parameters

水位差/cm	a	u	平均值	标准差
0	0.00699	8.34042	3.26×10^{-05}	0.174
5	0.00365	8.11636	-2.61×10^{-06}	0.054
30	0.00067	7.25378	-1.26×10^{-07}	0.043
55	0.00132	5.36795	-7.05×10^{-07}	0.059

由图2、表2可见,渗流速度越大,温度变化趋势线斜率越小,发展系数 a 与灰色作用量 u 越小。由图2可见,趋势项与原始数据间有较大的偏差,仅能反应总体趋势。无渗流或渗流速度小时,趋势项与实测值随时间逐渐接近;渗流速度大时,实测温度随时间围绕趋势项波动。有渗流情况下趋势项的发展系数明显小于无渗流状态,灰色作用量的变化相对较小。渗流速度的增加促进热对流,渗流速度越大,温度变化的趋势与实测值越接近。

由图3可见,当采用灰色马尔科夫模型后,模型值与实测值间偏差明显降低。因此在对温度变化值进行分析时不能仅考虑趋势性,还应考虑随机因素,且随机因素是不可忽略的。考虑随机因素的灰色马尔科夫模型能够很好的模拟实测数据。



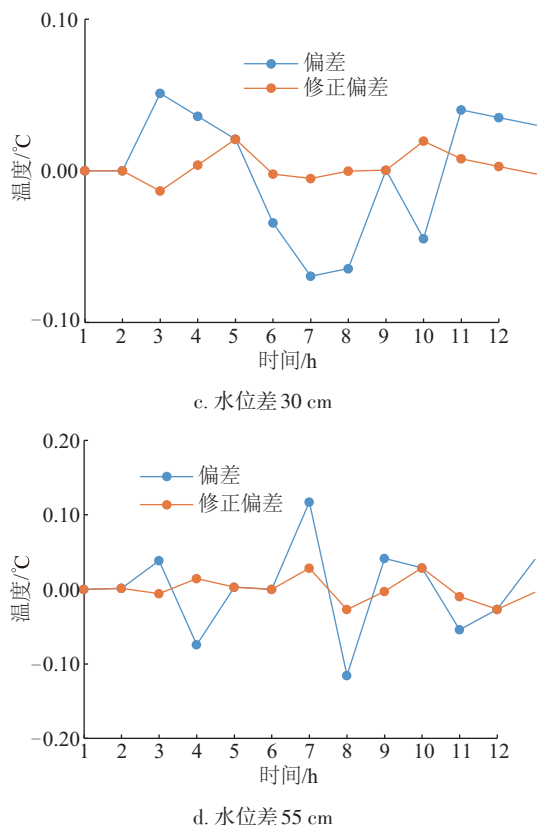


图3 偏差比较

Fig. 3 Deviations comparison

3.2 随机项变化规律

将不同实验条件下的随机项采取均值标准差法划分马尔科夫状态,具体划分方法同表1。由于各实验条件不同,划分参数也不相同,具体参数见表2。对每组实验中马尔科夫状态进行频率分布统计,见图4。

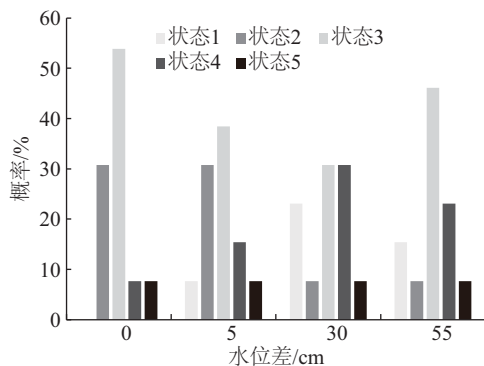


图4 马尔科夫状态频率图

Fig. 4 Frequency of Markov state

由图4可见,不同实验条件下各状态分布概

率不一,整体来说状态3占比最大,有渗流条件下,其他4种状态比重有所上升,且各状态间差距减小。

土壤中水分的运动在局部存在随机性,水分的运动带来热量也具有随机性。渗流速度的增加加快了水分的运动,使得随机成分减弱,随机状态分布均匀。

4 结 论

灰色马尔科夫模型对地源热泵条件下土壤温度数据分析行之有效,所得模型值与实测值间误差不超 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,有着较高的精度。在此方法下得出如下结论:

1)U型管温度变化过程中,既有反应整体的趋势项又有反应波动的随机项,且随机项不可忽略。

2)U型管温度变化趋势项满足 $GM(1,1)$ 模型,趋势项与实测值间的偏差与渗流速度及实验历时均呈负相关关系。

3)U型管温度变化随机项可采用马尔科夫模型进行分析,随机量与渗流速度呈负相关关系,速度越大,随机状态间分布越均匀。

[参考文献]

- [1] 夏 凯. 地源热泵地理管随机传热特性计算机模拟[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [1] Xia Kai. Computer simulation of random heat transfer characteristics for ground source heat pump [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [2] 刘卓栋. 地源热泵地理管随机传热与可靠性理论研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [2] Liu Zhuodong. Random heat transfer and reliability theory on ground-coupled pipe of ground source heat pump [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [3] Dathe A, Thullner M. The relationship between fractal properties of solid matrix and pore space in porous media [J]. Geoderma, 2005, 129(3-4): 279—290.
- [4] 樊冬雪. 基于优化灰色马尔科夫链模型的铁路客流量预测方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [4] Fan Dongxue. Study of railway passenger volume forecast method based on optimization of gray markov chain model [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.
- [5] 袁洪强. 基于小波变换的灰色马尔可夫链模型及其工

- 程应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [5] Yuan Hongqiang. Study on grey-Markov chain model based on wavelet transforming and its engineering application[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [6] 朱怀念. 线性 Markov 切换系统的随机微分博弈理论及在金融保险中的应用研究[D]. 广州: 广州工业大学, 2013.
- [6] Zhu Huainian. Research on stochastic differential game theory for Markov jump linear systems with application to finance and insurance [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013.
- [7] Samuels J C. Heat conduction in solids with random external temperatures and/or random internal heat generation[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1966, 9(4): 301—314.
- [8] Tinti F, Bruno R, Focaccia S, et al. Thermal response test for shallow geothermal applications: A probabilistic analysis approach [J]. Geothermal Energy, 2015, 3(1): 6.
- [9] 李金平, 陈建军, 朱增青, 等. 随机温度场的渐进——最大熵分析[J]. 应用力学学报, 2010, 27(1): 58—62.
- [9] Li Jinping, Chen Jianjun, Zhu zengqing et al. Comparative analysis of different wheel/rail contact models in vehicle and bridge coupled vibration[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(1): 58—62.
- [10] 袁孝勇, 赵艳东. 基于灰色马尔科夫链预测模型的换热站供水温度预测[J]. 电子测量技术, 2015, 38(4): 32—34.
- [10] Yuan Xiaoyong, Zhao Yandong. Supply water temperature forecast of the heat exchange station base on grey Markov chain model[J]. Electronic measurement technology, 2015, 28(4): 32—34.

STUDY OF TEMPERATURE CHANGING AROUND GROUND HEAT EXCHANGER BASED ON GREY-MARKOV MODEL

Niu Kai, Jin Hua, Guo Yi

(College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Understanding the variation of temperature around ground heat exchanger is vital for the development of shallow geothermal energy as well as the designment of ground source heat pump system. Based on the Grey-Markov model, the trend and randomness of laboratory data obtained under different heat sources, environmental temperatures and seepage conditions were analyzed. The results demonstrate that both trend and randomness exist in the temperature changing and the randomness can't be neglected. The trend of temperature changing can be analyzed by the GM (1, 1) Grey-Model, in which the deviation is in negative correlation to the seepage velocity and the time. The randomness of temperature changing can be analyzed by the Markov model and the random variable is in negative correlation to seepage velocity. The larger the seepage velocity is, the more uniform the distribution between random states is.

Keywords: Markov processes; ground source heat pump(GSHP); seepage; gray model