

DOI: 10.7672/sgjs2026070056

基于 LMC-自适应重要性采样的地层模拟方法*

李伟¹, 方皓¹, 张美宁², 王长帅¹, 张大娃¹, 陈聪¹

(1. 中国路桥工程有限责任公司, 北京 100011; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

[摘要] 由于岩土勘测初期钻孔数据的稀疏性, 工程区域的地层模型需要大量的钻孔数据来构建。MCMC 模型可以处理稀疏的勘察钻孔数据, 且具有参数简单和可量化地层不确定性的优点, 因此被广泛用在地质建模和地质不确定分析中。然而, 传统的马尔可夫链假定地层的转移概率在整个时空范围内是恒定不变的, 这一均匀性假设在地层模拟中存在较大的局限性, 且蒙特卡洛在模拟地层序列的不连续性和变异性方面较为僵硬。为此, 提出了一种基于局部马尔可夫链-自适应重要性采样的地层模拟方法(简称 LMC-AIS)。该方法利用研究区钻孔统一深度区间片段化处理, 构建地层转移概率矩阵、随机模拟地层状态和多片段叠加的方式建立适应复杂不均匀地层的模型; 使用基于 LMC-AIS 模型生成地层序列的方差定量评价地质模型的不确定性。研究表明, 相较于传统方法, 该方法不仅考虑了地层变化的不均匀性, 还量化了地层预测中的不确定性。

[关键词] 岩土工程; 勘测; 马尔可夫链; 概率矩阵; 地层模拟; 预测

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)07-0056-09

Stratigraphic Simulation Method Based on LMC-adaptive Importance Sampling

LI Wei¹, FANG Hao¹, ZHANG Meining², WANG Changshuai¹,
ZHANG Dawa¹, CHEN Cong¹

(1. China Road and Bridge Engineering Co., Ltd., Beijing 100011, China;

2. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: Due to the sparsity of borehole data in the early stage of geotechnical survey, the stratum model of the engineering area needs a large amount of borehole data to construct. The MCMC model can process sparse survey borehole data and has the advantages of simple parameters and quantifiable formation uncertainty, so it is widely used in geological modeling and geological uncertainty analysis. However, the traditional Markov chain assumes that the transition probability of the stratum is constant throughout the space-time range. This uniformity assumption has great limitations in stratum simulation, and Monte Carlo is relatively rigid in simulating the discontinuity and variability of stratum sequences. Therefore, a stratum simulation method based on local Markov chain-adaptive importance sampling (LMC-AIS) is proposed. This method uses the unified depth interval fragmentation processing of boreholes in the study area to construct the stratum transition probability matrix, randomly simulate the stratum state, and multi-fragment superposition to establish a stratum model suitable for complex uneven strata. The uncertainty of the geological model is quantitatively evaluated by using the variance of the stratigraphic sequence generated based on the LMC-AIS model. The results indicate that compared with the traditional method, this method not only considers the inhomogeneity of formation change but also quantifies the uncertainty in formation prediction.

Keywords: geotechnical engineering; survey; Markov chain; probability matrix; stratigraphic simulation; prediction

* 陕西省创新能力支撑计划——创新团队(2020TD-005); 中国路桥工程有限责任公司 2023 重点科技攻关项目(2023-zlkj-08)

[作者简介] 李伟, 高级工程师, E-mail: 2161632248@qq.com

[收稿日期] 2025-08-30

0 引言

在工程场地中,地质钻孔是获取地层信息的主要手段,在岩土勘探中扮演着至关重要的角色^[1-2]。在大多数情况下,工程师们通常希望通过尽可能少的钻孔,精准刻画地层结构的变异特征^[3],并进行精确地地质建模。然而,由于地质条件复杂多变,如何选取合适的模型以精确表征地层结构,成为地质建模过程中亟待解决的问题。

现有研究表明,地质建模主要有两种基本方法:确定性建模和随机建模^[4]。在确定性地质建模中,通过明确的数学和物理原则来精确构建地质结构。这种方法依赖于对真实数据的详细解读和地质专家的经验,以确定地质单元的边界和属性^[5]。然而,该方法需要满足构建模型的 2 个基本要求:一是高密度、高质量的现成数据,以便准确地构建地质模型;二是地质剖面的分层关系必须足够简单和明确。由于这两个原因,限制了该方法在稀疏数据复杂地层情况下的地质建模。

近年来,基于概率论与统计学原理的随机建模方法在地质建模领域得到了广泛应用^[6-8]。该方法依托已有数据,并通过随机过程对地质变量进行估算。该方法结合地质、物理及其他相关数据,利用随机函数和概率分布生成多个可能的地层模型。特别是马尔可夫模型作为地质概率统计学的一种应用,以其参数简洁、理论清晰及适用性广泛的优点,受到学术界的高度关注^[9]。在此基础上,逐渐发展出了包括耦合马尔可夫链、马尔可夫随机场、广义耦合马尔可夫模型、连续马尔可夫模型及马尔可夫蒙特卡罗方法(Markov Monte Carlo model, MCMC)在内的一系列地层模拟技术^[10]。相比传统的确定性建模,这些方法在稀疏数据环境下具有更优的适应性,尤其适用于地层分布复杂的建模任务。与此同时,机器学习技术在地质建模中的应用日益显现出巨大潜力^[11]。基于卷积神经网络的训练模型在模拟地质结构变异性方面展现出优越的能力^[12-14]。然而,其性能极大依赖于 2 个关键因素:一是高质量且充分的地质钻孔及剖面数据;二是合理且针对性的训练算法。因此,在地质数据有限或不完整的情况下,机器学习模型的应用效果和准确性仍然存在一定局限。

地质建模的前提和基础是对复杂地层的准确模拟分析^[15]。尽管 MCMC 在地层模拟及地层变异性的量化方面具有显著优势,但仍面临若干挑战。现有 MCMC 模型主要基于全局序列及统一的转移概率等整体性假设,未能灵活适应地层转移概率的

空间非均质特性。此外,传统蒙特卡罗方法在处理地层序列的不连续性及高度变异性时也较为僵硬,缺乏对复杂地质环境的有效应对能力。这些问题的存在,进一步削弱了地质模型的准确度及其在工程应用中的可靠性。

针对 MCMC 模型在地层模拟建模中的局限性,提出了一种基于局部化的马尔可夫链-自适应重要性采样(LMC-AIS)模型的地层模拟方法,该方法适用于数据稀疏且地层随深度变化显著的复杂地质环境。其核心思想是在统一深度区间内对实际钻孔数据进行片段化处理,构建局部地层转移概率矩阵,并结合随机模拟与多片段叠加策略,以增强马尔可夫蒙特卡罗方法对复杂非均质地层结构的适应性。此外,该方法利用地层单元方差定量评估地质剖面的不确定性。通过 LMC-AIS 模型的应用实例,对其在地质建模中的可行性与有效性进行了深入分析和验证。

1 基于稀疏钻孔的地层模拟

在勘测数据有限的情况下,准确模拟复杂地层是进行地质建模的基础。某区域钻孔分布及剖面如图 1 所示,该区域共布设 7 个钻孔,自左至右编号为 ZK501~ZK507。勘探结果表明,该区域包含 6 类主要地层,包括人工堆积物、绿泥石英片岩、辉绿岩、磁铁石英岩、花岗岩及含铁石英岩,分别对应状态 0,1,2,3,4,5,并以不同颜色表示。此外,为统一计算范围,所有钻孔的最大深度被标准化,若某一深度缺少地层信息,则标记为空白(状态 6)。在不均匀地层的建模过程中,首先需要对钻孔数据进行离散化处理,以单元格形式概化钻孔序列。根据实际钻探数据,ZK506 处揭示的最小地层厚度为 1.49m,因此设定垂直采样间隔为 1.5m。为了便于建模和计算,每个地层单元中心的地层被定义为该间隔的地层类型。

1.1 钻孔地质特征分析

如图 1b 所示,钻孔剖面揭示了明显的空间非均质性,不同深度的地层转移概率呈现不稳定性。其中,在 0~200m 深度范围内,地层类型较为简单,地层厚度相对均匀,虽偶有火成岩侵入体(花岗岩),但整体地层变化频率较低;在 200~400m 深度范围内,地层类型多样化,辉绿岩与磁铁石英岩占比增加,且地层厚度变化剧烈,反映出较强的地质活动及沉积环境变迁;在 400~685.5m 深度,地层变化较大,此区间内铁矿成分较丰富,地层相对稳定。整体来看,地层的空间变异性显著,不同深度地层厚度及转移特性均表现出非均匀性。

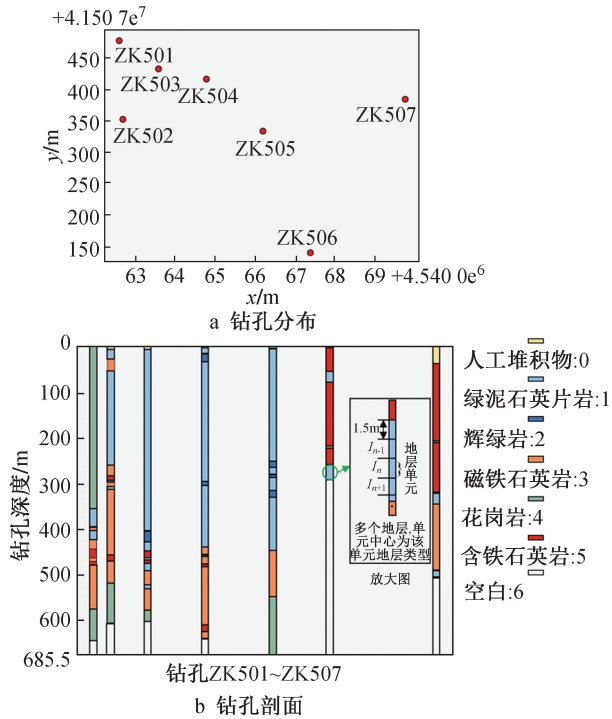


图 1 地质勘察钻孔

Fig. 1 Geological exploration borehole

由于地质构造的复杂性,各地层边界上收集到的数据量相对有限。而传统克里金法需要大量的钻孔数据以构建精确的半方差函数模型,因此在稀疏钻孔条件下,利用经典统计方法进行地层模拟存在一定困难。

1.2 基于 MCMC 模型的地层模拟

随机建模因其能够有效表征地质领域及地层的不确定性,受到学者们的广泛关注。目前,已有多种随机建模方法被提出,以提升地质建模的精度。例如,在传统随机模拟研究的基础上,引入试井动态数据约束,以改进地层建模的精密度^[16];经典的蒙特卡洛模拟也被用于隐式三维地质建模的不确定性分析,以评估模型数据的可靠性^[17]。自 Krumbein^[18]首次提出利用马尔可夫(Markov)模型构建地层序列以来,该方法逐步应用于地质建模领域。欧阳金武等^[19]进一步将马尔可夫链蒙特卡洛方法与虚拟钻孔相结合,该方法基于钻孔数据构建地层马尔可夫链,并通过蒙特卡洛模拟预测未知区域的地层状态。相比传统随机模拟,该模型在稀疏数据条件下具有更优的适用性,在地层建模中的表现更加稳定和可靠。

如图 2 所示,对于钻孔剖面,任意位置的土体类型由其在垂直方向上邻近单元的土体类型决定,即单元 Q_n 的状态取决于顶部 Q_{n-1} 单元的状态。设随机变量 S_n 表示土体单元 n 处的状态。当单元 Q_{n-1}

的状态为 S_{n-1} 时,单元 Q_n 的状态为 S_n 时的条件概率可以表示如下:

$$P_{ij} = P(I_n = S_n | I_{n-1} = S_{n-1}) = \frac{f_{ij}}{\sum f_{ij}} \quad (1)$$

$${}^v P = \begin{pmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{i1} & \cdots & P_{ij} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: f_{ij} 表示通过一步转移到地层 j 的地层 i 的样本数, f_{ij} (又称为频数转移矩阵)通过统计样本状态变化得到;“|”为条件概率; n 为土层分类总数;分母代表对概率的归一化处理; P_{ij} 表示地层 i 突变为地层 j 的概率; ${}^v P$ 表示单元一步垂直转移概率矩阵(VPTM)。

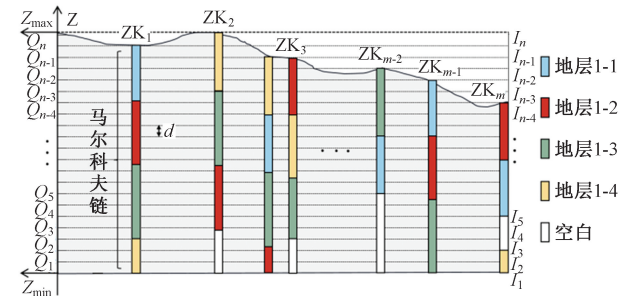


图 2 MCMC 模型模拟钻孔剖面

Fig. 2 Borehole profile simulated by MCMC model

尽管传统模型能够模拟表层的人工堆积层与绿泥石英片岩,但在地层连通性与分布上仍存在较大偏差。其固定的地层转移概率难以准确刻画地层的空间变异特性。此外,该模型的全局统一假设导致某些高转移概率的地层在不同深度交错分布,例如,人工堆积层不仅出现在地表,在较深部位也会异常生成,这与实际地质沉积过程的规律不符。通过分析可发现,传统 MCMC 模型在复杂地层模拟方面主要存在以下两大难以克服的问题。

1) 难以模拟非均匀变化的复杂地层

传统 MCMC 模型通常依赖钻孔剖面数据,并假设地层转移概率在整个空间范围内保持一致。这种全局性假设忽略了地层的空间变异性,导致某些地层(如表层人工堆积物)在深部区域异常出现,与实际地质沉积过程的特征不符,影响模拟的合理性和准确性。

2) 初始地层配置效率低,收敛速度慢

MCMC 模型的地层初始配置往往采用随机方式生成,并在后续模拟过程中逐步调整。然而,这种方法需要大量随机采样才能使 MCMC 达到稳定收敛,显著降低计算效率。同时,在钻孔数据有限

的情况下,该方法对先验土体空间相关参数的依赖较高,使得模型在稀疏数据条件下的适用性受到一定限制。

1.3 基于 LMC-AIS 模型的地层模拟

传统 MCMC 模型基于全局地层转移概率进行模拟,因此在局部剧烈变化的地层环境中难以精准推断地层状态,且计算效率较低。为克服以上局限,引入局部化马尔可夫链(LMC-AIS)模型,以提升地质建模的精度和适应性。该模型的主要思想是:将统一钻孔深度区间片段化,在每个区间内计算局部转移概率矩阵,从而建立区域适应性更强的 MC 模型;随后,基于地层厚度特征及局部转移概率矩阵,结合自适应重要性采样(adaptive importance sampling, AIS)技术,模拟并推测整个区域的地层分布及空间变异性。

1.3.1 实施步骤

LMC-AIS 模型的实现包括以下 4 个关键步骤,算法流程如图 3 所示。

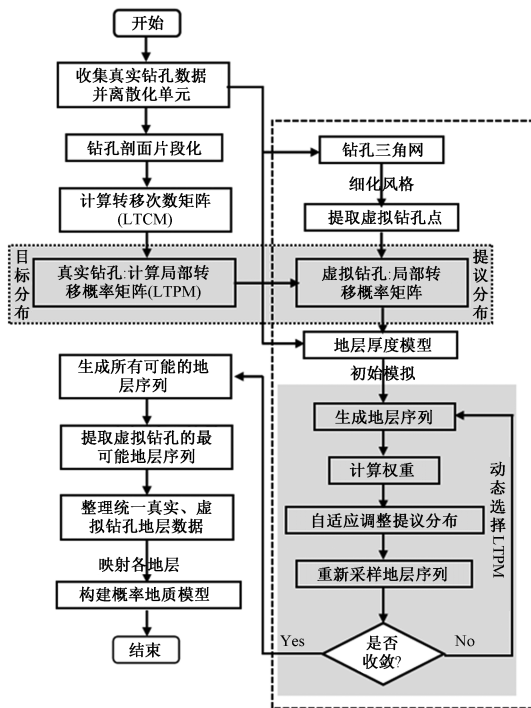


图 3 LMC-AIS 模型算法实现流程

Fig. 3 Flow chart of implementation of LMC-AIS model algorithm

1) 地层片段化与局部转移矩阵计算:对钻孔数据按深度区间进行片段化处理,计算真实钻孔的局部转移次数矩阵(local transition count matrix, LTCM)及局部转移概率矩阵(local transition probability matrix, LTPM)。

2) 虚拟钻孔生成与相关性计算:依据钻孔之间

的空间相关性构建虚拟钻孔,并计算其 LTPM,以增强数据完整性和地层推测能力。

3) 自适应重要性采样地层模拟:基于地层厚度模型及 LTPM,采用自适应重要性采样,对地层状态进行概率模拟,以获取最可能的地层分布结果。

4) 概率地质剖面构建与不确定性分析:整合真实与虚拟钻孔的地层数据,进行地层映射,最终生成概率地质模型,并量化地质的不均匀性及不确定性。

1.3.2 模拟分析

1) MC 模型的片段化

根据地质学经验可知,图 1b 中所示的钻孔剖面包含着比较明显的地层转移沿孔深非均匀性特征。在片段化处理中,将研究区域内真实钻孔的孔深根据地层变化划分为 3 个区间,可以得到 3 个 MC 片段,如图 4 所示。其中,在浅层区间(0~200m),地层类型较为简单,地层厚度相对均匀,偶有火成岩侵入体(花岗岩),但整体地层变化频率较低;在中层区间(200~400m),地层变化频率显著增加,地层厚度变化较大,主要出现较多的辉绿岩和磁铁石英岩,此区间表现为较为剧烈的地质活动和沉积环境的变化;在深层区间(400~685.5m),地层变化较少,但厚度较大,此区间内铁矿成分较丰富,地层相对稳定。

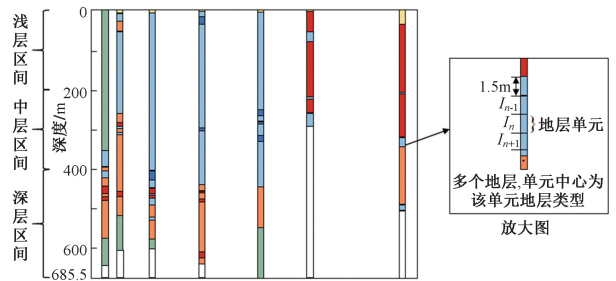


图 4 MC 模型分解成片段

Fig. 4 The MC model is decomposed into segments

通过分析,地层的转移概率随着深度的增加表现出显著的非均匀性,浅层区间的地层转移概率较低,中层区间地层转移概率较高,而深层区间地层转移概率则处于中等水平,可通过计算不同深度区间的地层转移概率来捕捉这种不均匀性。使用传统地质学统计方法对本问题的模拟存在一定的难度,因为克里金法需要大量的钻孔数据来建立准确的半方差函数模型。

2) 地层转移概率计算

地理环境的变迁和沉积条件的多样变化会使地层随深度变化,表现为不同沉积环境的依次叠加

和保存,加之时间跨度内地质活动与气候变化的综合作用,会形成具有分带性的垂直地层序列。相较于传统的均匀马尔可夫链,局部马尔可夫链能够更精确地描述地层序列随深度的非均匀变化特性,意味着某一区间某单元从状态*i*转移到状态*j*的概率可能不同于在其他区间的转移概率,也能更好地捕捉到地层的动态变化。

由于钻孔垂直划分为一系列的等距离采样间隔,垂直转移概率矩阵(VTPM)可直接根据钻孔数据进行估算。对每个钻孔计算不同MC片段的LTPM,如式(3)所示,并给出钻孔ZK501的3个LTPM,如式(4)所示。

$${}^v P_{d_i}^R = \frac{{}^v f_{ij}}{\sum_{i=1}^n {}^v f_{ij}} \quad (3)$$

式中: ${}^v f_{ij}$ 为在垂直方向上从状态*S_i*到状态*S_j*的转移次数; ${}^v P_{d_i}^R$ 被定义为某一MC片段与从状态*S_i*到所有状态的转移次数的比率。

$${}^v P_{d_1}^R = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$${}^v P_{d_2}^R = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9712 & 0.0288 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1071 & 0.8929 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$${}^v P_{d_3}^R = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9697 & 0 & 0.0303 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9890 & 0.0110 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

根据式(4),钻孔ZK501 3个深度区间地层2保持不变的概率分别为0,0.8929,0,而地层2转移为地层1的概率分别为0,0.0288,0。

3) 虚拟钻孔的生成与LTPM计算

由于项目预算限制,部分地区地势险峻,钻孔

资料不齐全,钻孔分布具有不均匀性与离散性,且数量与质量无法满足需求,仅凭部分区域的钻孔点无法建立准确真实的区域三维地质模型,据此增加虚拟钻孔,以增强模型的空间覆盖度。结合真实钻孔数据和Delaunay三角网算法,构建研究场地的钻孔三角网(见图5),并对其进行细分,使钻孔三角网达到所需的密度时,即可提取虚拟钻孔的位置。

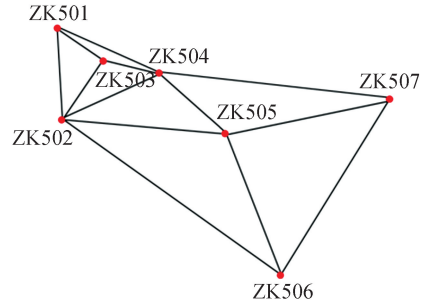


图5 钻孔三角网

Fig. 5 Drilling triangulation

提取虚拟钻孔位置的具体步骤如下:①构建钻孔不规则三角网;②遍历研究场地内钻孔不规则三角网的三角形,确定三角形的顶点是真实钻孔还是虚拟钻孔,真实和虚拟钻孔分别由红点和蓝点表示,如图6所示;③记录不规则三角网内所有虚拟钻孔编号与*x,y*坐标形成虚拟钻孔列表。

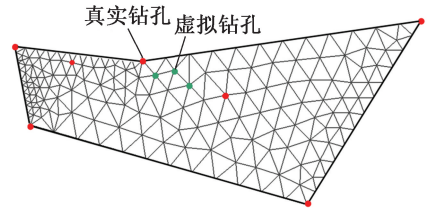


图6 细化三角网

Fig. 6 Detailed triangulation network

虚拟钻孔的地层分布未知且不确定的,不可能直接获得地层马尔可夫链。同一研究场地内分布的对象都是空间相关的,即越接近的对象往往具有相似度特征,故2个钻孔彼此越近,它们的地层分布在垂直方向上就越相似,地层马尔可夫链表现出相似性质。

因此,对于每个虚拟钻孔,根据其位置以及相邻真实钻孔的地层信息,引入相关系数计算虚拟钻孔的LTPM。相关系数反映了虚拟钻孔和真实钻孔的地层变化概率之间的相似程度。相关系数越大表示虚拟钻孔和真实钻孔的地层变化概率之间的相似性越大,反之越小。具体可表示为:

$$\beta_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{d_i^u}} \quad (5)$$

式中: β_i 为钻孔相关系数; d_i 为某个虚拟钻孔与第 i 个真实钻孔间的距离; $\frac{1}{d_i^u}$ 为某个虚拟钻孔与第 i 个真实钻孔之间距离的 u 次方; u 表示距离的幂次, 通常由研究场地的设计方案确定, 一般取为 2; m 表示真实钻孔个数。

$${}^v P_{d_1}^V = \begin{pmatrix} 0.6928 & 0.3004 & 0 & 0 & 0 & 0.0068 & 0 \\ 0 & 0.9922 & 0.0072 & 0.0003 & 0 & 0.0003 & 0 \\ 0 & 0.0476 & 0.9524 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0556 & 0 & 0.9444 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0057 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9943 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$${}^v P_{d_2}^V = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9888 & 0.0067 & 0.0024 & 0 & 0.0018 & 0.0003 \\ 0 & 0.2449 & 0.7551 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0063 & 0 & 0.9937 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0100 & 0 & 0 & 0.9900 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0795 & 0 & 0.2093 & 0 & 0.7112 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (7)$$

$$P_{d_3}^V = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9574 & 0.0035 & 0.0300 & 0 & 0.0071 & 0.0002 \\ 0 & 0.5000 & 0.5000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0108 & 0 & 0.9715 & 0.0134 & 0.0043 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9852 & 0 & 0.0148 \\ 0 & 0.1175 & 0 & 0.0886 & 0 & 0.7939 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

同样根据式(5), 得到了多个钻孔的相关系数, 再利用这些相关系数进行累积计算, 得出虚拟钻孔的 LTPM。例如, 考虑了坐标为 (4 546 441.857, 41 505 426.956) 的虚拟钻孔 V1, 并给出了它的 LTPM。

$${}^v P_{d_i}^V = \sum_{i=1}^m \beta_i {}^v P_{d_i}^R \quad (6)$$

式中: ${}^v P_{d_i}^R$ 为某个深度区间真实钻孔的 LTPM; ${}^v P_{d_i}^V$ 为虚拟钻孔的 LTPM。

4) 自适应重要性采样模拟地层

地层厚度作为关键地质参数, 直接影响着地层序列的模拟及地质结构的复现。因此, 在模拟虚拟钻孔的地层状态之前, 需要对地层厚度建立概率统计模型。根据研究区统一的地层序列, 建立地层厚度的概率模型。通过统计得到真实钻孔中不同地层的厚度数据(见表 1), 统计分析各地层的厚度数据特征(例如基本统计量、偏度和峰度等指标)。通过初步的统计描述, 甄选一系列潜在适用的地质概率分布模型进行拟合分析, 如正态、对数正态及伽玛分布等, 通过 K-S 检验选择与地层厚度数据特征相匹配的分布模型, 并采用最大似然估计法估算地

层厚度概率模型参数。这样就可以确定不同地层厚度的概率分布函数, 最终确定地层的概率分布类型。

表 1 地层厚度概率模型

Table 1 Probability model of formation thickness

| 地层标签 | ZK ₁ | ZK ₂ | ZK ₃ | ... | ZK _{m-1} | ZK _m |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----|-------------------|-----------------|
| 0 | t_0^1 | t_0^2 | t_0^3 | ... | t_0^{m-1} | t_0^m |
| 1 | t_1^1 | t_1^2 | t_1^3 | ... | t_1^{m-1} | t_1^m |
| 2 | t_2^1 | t_2^2 | t_2^3 | ... | t_2^{m-1} | t_2^m |
| ⋮ | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| n | t_n^1 | t_n^2 | t_n^3 | ... | t_n^{m-1} | t_n^m |

注: t_n^i 为厚度, m 为真实钻孔数, i 为地层

采用统计方法对钻孔 ZK501~ZK507 钻孔中同

一地层的厚度进行分析,得到地层厚度的概率模型参数,如表 2 所示。

表 2 钻孔地层厚度概率模型

Table 2 Probability model of borehole formation thickness in the site

| 地层类型 | 地层标签 | 地层厚度的概率模型 |
|--------|------|-------------------------------------|
| 人工堆积物 | 0 | $t \sim \Gamma(1.09, 10.18)$ |
| 绿泥石英片岩 | 1 | $t \sim \Gamma(1.15, 205.9)$ |
| 辉绿岩 | 2 | $t \sim \text{Log-N}(1.21, 282.24)$ |
| 磁石英英岩 | 3 | $t \sim \Gamma(10.8, 15.04)$ |
| 花岗岩 | 4 | $t \sim \Gamma(1.22, 98.87)$ |
| 含铁石英岩 | 5 | $t \sim \Gamma(0.75, 131.22)$ |

获得局部转移概率矩阵(LTPM)和地层厚度模型后,即可模拟获得每个虚拟钻孔的地层序列。单次模拟结果是基于马尔可夫链产生的随机数,存在不确定性。为了评价模拟结果的不确定结果,需借助蒙特卡洛法进行模拟测试。当模拟次数足够时,统计获得每个片段内地层单元状态概率分布的近似解,并确定钻孔的最可能实现结果。

在模拟完成后,分析所有模拟结果,确定可能地层序列中某个深度每个地层状态出现的频率,选择出现频率最高的地层为该处的地层状态。换句话说,这个状态在多次可能地层中被抽样到的次数最多,代表了在当前概率框架下,钻孔该状态处最有可能遇到的地层。表 3 表示虚拟钻孔 $V_1 \sim V_3$ 最大概率地层状态结果。

表 3 基于 AIS 模拟的最大概率地层序列

Table 3 Maximum probability stratigraphic sequence based on AIS simulation

| 地层序列 | V_1 | | V_2 | | V_3 | |
|------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | 地层类型 | 地层厚度/m | 地层类型 | 地层厚度/m | 地层类型 | 地层厚度/m |
| 1 | 0 | 50.88 | 0 | 53.14 | 0 | 45.64 |
| 2 | 1 | 36.43 | 1 | 30.75 | 1 | 30.86 |
| 3 | 3 | 21.36 | 2 | 13.41 | 2 | 14.06 |
| 4 | 1 | 33.69 | 3 | 18.65 | 1 | 29.84 |
| 5 | 3 | 17.53 | 2 | 14.19 | 3 | 22.87 |
| 6 | 1 | 32.42 | 1 | 35.73 | 2 | 14.20 |
| 7 | 3 | 20.38 | 2 | 14.85 | 3 | 19.79 |
| 8 | 1 | 35.02 | 3 | 21.75 | 1 | 35.80 |
| 9 | 3 | 18.62 | 1 | 38.16 | 2 | 13.16 |
| 10 | 2 | 13.70 | 3 | 21.45 | 1 | 34.34 |
| 11 | 3 | 19.86 | 2 | 15.11 | 3 | 20.98 |
| 12 | 1 | 34.29 | 3 | 21.91 | 1 | 33.94 |
| 13 | 3 | 19.19 | 1 | 36.90 | 3 | 21.12 |
| 14 | 1 | 30.63 | 3 | 18.44 | 1 | 35.23 |
| 15 | 3 | 19.44 | 1 | 34.40 | 3 | 24.84 |

1.4 工程地层剖面构建

由于在 MC 片段化过程中,每 2 个相邻片段会

共用一部分 MC 模型单元,这使得共用部分的最可能实现应当考虑前一段和后一段各自的结果,因此,应当对重叠段进行叠加。在进行蒙特卡洛模拟时,由于前后 2 个片段的模拟次数是相同的,因此,共用段部分的概率分布采用均值进行计算。第 i 个片段和 $i+1$ 个片段重叠部分单元的最终状态概率为:

$$P(Q = S_n) = \frac{1}{2}P_i(Q = S_n) + \frac{1}{2}P_{i+1}(Q = S_n) \quad (8)$$

式中: $P_i(Q = S_n)$ 和 $P_{i+1}(Q = S_n)$ 分别为单元 Z 在第 i 个 MC 片段和第 $i+1$ 个片段中处于 S_n 的概率。

利用上述 LMC-AIS 模型对图 1 的钻孔分布进行了地质模拟。在 LMC-AIS 模拟中,每个片段所使用的转移概率矩阵均是基于局部似然函数的最优解获得的,其中最重要的参数为每个片段竖直向下的转移次数矩阵。

基于 500 次模拟的钻孔 ZK501, ZK504 与虚拟钻孔 ($V_0 \sim V_9$) 的钻孔地质剖面最可能的模拟结果,如图 7 所示。在模拟中出现频率最高的状态类别被视为最可能的土体类型。图 7 的模拟结果表明, LMC-AIS 模型可以很好地模拟有不均匀性变化的复杂地层,浅层区间中的虚拟钻孔的地层转移较为简单;中层区间地层变化频率显著增加,地层厚度变化较大,此区间可能出现较为复杂的地质活动,而在深度区间地层变化变少。更重要的是,下卧的复杂褶皱结构被很好地模拟了出来,具有随地层变化的连通性。

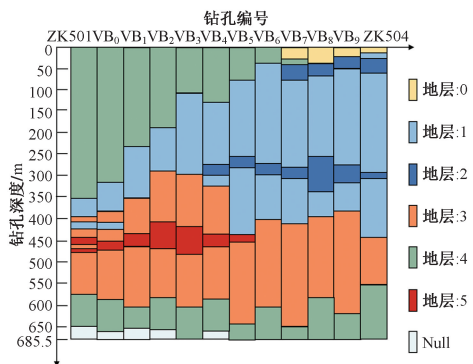


图 7 基于 LMC-AIS 模型的钻孔地层剖面

Fig. 7 Borehole profile based on LMC-AIS model

2 讨论

2.1 地质体点、线和边的拓扑关系

最大概率地层模型允许快速搜索地质体的点、线和边的拓扑关系。为了说明这一特点,以真实的钻孔 SZK503 为例,通过遍历钻孔三角测量网络的

三角形,可获得其拓扑关系,如图 8 所示。

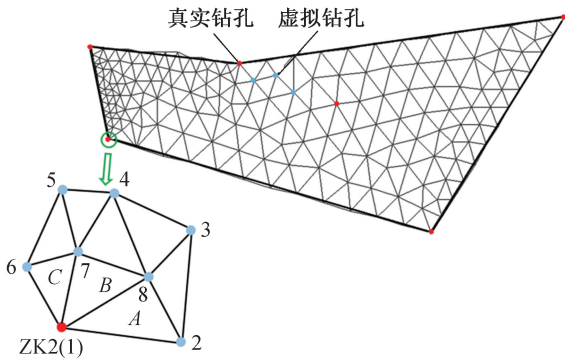


图 8 拓扑关系

Fig. 8 Topology

图 8 表明,真实钻孔 ZK502 与虚拟钻孔 2~6 相邻。由真实钻孔 ZK502 和虚拟钻孔 8 组成的直线为三角形 A 和 B 的公共边,三角形 B 的相邻三角形为三角形 A, C。地质体的点、线和边的其他拓扑关系也可以以类似的方式获得。这些关系对于数据检索、三角形删除和模型更新特别有用。构建的最大概率模型,可利用通过调整三角形的大小和数量来处理复杂的地质结构,更新地质模型。因此,最大概率模型也适用于复杂地质体的建模。

2.2 地层不确定性的定量分析

LMC-AIS 是基于地质概率学对地层序列进行模拟,因此自适应重要性采样获取的统计概率分布被认为与地层单元的不确定性密切相关。当单元所处状态的概率分布非常集中时,意味着该单元的地层不确定性小。为了量化这种不确定性,可以使用方差作为定量评价指标,通过计算模拟结果在每个单元上的波动性,反映模型对该单元的可靠性。方差越低,意味着模拟结果的不确定性越低,而方差越高意味着不确定性越高。每个单元的方差计算如下:

$$\text{Var}(Z_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (Z_i^{(k)} - \bar{Z}_i)^2 \quad (9)$$

式中: $\text{Var}(Z_i)$ 为地层单元 Z_i 的方差; N 为模拟总次数; $Z_i^{(k)}$ 为 k 次模拟时单元 i 的值。

利用式(10)中的平均方差(MV)可对钻孔地层序列的不确定性进行量化。如果可能地层序列的平均方差高,意味着该地层序列的不确定性也高;如果采用该类地层序列进行建模则增加整个模型的不确定性。

$$\text{MV} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \text{Var}(Z_i) \quad (10)$$

式中: M 为该钻孔地层单元总数; $\text{Var}(Z_i)$ 代表单元的方差。

为了量化概率模型模拟的地层不确定性,本文以 ZK501 和 ZK504 钻孔间选择 10 个虚拟钻孔点(用 0~9 表示)进行 MV 计算,如图 9 所示。

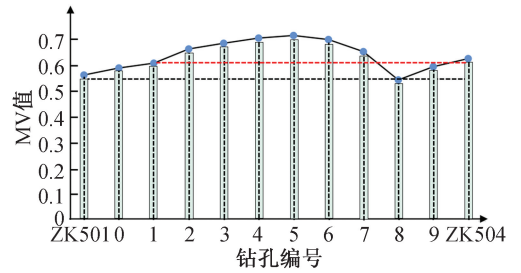


图 9 剖面的方差不确定分析

Fig. 9 Analysis of variance uncertainty of profile

图 9 表明,该剖面中各钻孔地层序列的 MV 不相等。虚拟钻孔地层序列的 MV 接近相邻真实钻孔的 MV,这意味着钻孔对虚拟钻孔地层不确定性的约束随着与真实钻孔距离的增加而减小。

3 结语

本文提出了基于 LMC-AIS 模型的地层模拟方法,在 MCMC 模型的概念上延伸出一种改进模型,进行有量化地层不确定性的地层模拟,得出以下结论。

1) LMC-AIS 模型充分利用所有钻孔数据,采用钻孔深度区间局部化-随机模拟的方式获得了复杂变化地层的地质结构,提升了模拟具有分带性地层的能力。

2) 结合钻孔间的相关性,利用基于马尔可夫链的概率分析方法获得虚拟钻孔的地层变化概率;并采用概率分析和随机模拟的方法生成虚拟钻孔的地层状态,使其具有非唯一性和不确定性。

3) LMC-AIS 模型基于方差可量化地层不确定性,不依赖过多的计算参数。模型核心的深度片段化、转移概率矩阵及地层厚度模型等参数基于钻孔数据进行确定,降低了对勘测数据的要求,在稀疏数据或复杂分层数据条件下仍可使用。

该方法虽充分考虑了待研究区域地层埋深的变化和地层的不确定性,但当前的 LMC-AIS 模型仍存在着地层边界的连续性描述上不如克里金法光滑自然、相关应用软件暂时不成熟等缺点,可以通过将其与传统的统计模型进行整合、各取所长以实现优势互补等方式来克服这些缺点,更好地服务于准确地质建模。此外,本文方法的三维扩展和地层厚度模型优化等也是需进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 康宝祥,宋战平,张庆贺,等. 倾斜煤系地层大断面客专隧道大变形原因分析及处置[J]. 土木与环境工程学报(中英文),

- 2024,46(2):89-99.
- KANG B X, SONG Z P, ZHANG Q H, et al. Causal analysis and disposal on large deformation of large section passenger dedicated line tunnel in inclined coal strata [J]. *Journal of civil and environmental engineering*, 2024, 46(2): 89-99.
- [2] 宋战平, 史贵林, 王军保, 等. 隧道工程 BIM 技术标准化及信息集成化管理研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(2): 556-566.
- SONG Z P, SHI G L, WANG J B, et al. Research on BIM technology standardization and information integration management of tunnel engineering [J]. *Chinese journal of underground space and engineering*, 2021, 17(2): 556-566.
- [3] 祁小辉, 李典庆, 周创兵, 等. 基于钻孔资料的耦合马尔可夫链水平方向转移概率矩阵估计[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2017, 25(5): 967-984.
- QI X H, LI D Q, ZHOU C B, et al. Estimation of horizontal transition probability matrix for coupled Markov chain based on borehole data [J]. *Journal of basic science and engineering*, 2017, 25(5): 967-984.
- [4] 梁栋. 三维地质模型不确定性分析方法研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.
- LIANG D. Research on the methods of uncertainty analysis of three-dimensional geological model[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.
- [5] 孙光吉, 邓小龙, 何乃武, 等. 基于三维地质建模的公路桥台岸坡数值分析[J]. *中外公路*, 2020, 40(S2): 47-49.
- SUN G J, DENG X L, HE N W, et al. Numerical analysis of highway bridge abutment slope based on 3D geological modeling [J]. *Journal of China & foreign highway*, 2020, 40(S2): 47-49.
- [6] 袁哲, 任培罡, 刘金华, 等. 咸水层 CO₂ 地质封存全地层地质建模技术研究[J]. *地球科学*, 2025, 50(5): 1987-1998.
- YUAN Z, REN P G, LIU J H, et al. Research on whole strata geological modeling technology for CO₂ geological storage in salt water layer[J]. *Earth science*, 2025, 50(5): 1987-1998.
- [7] 周鹏远, 宋战平, 王军保, 等. 基于随机介质理论的偏压隧道地表沉降预测方法[J]. *岩土工程学报*, 2025, 47(3): 589-598.
- ZHOU P Y, SONG Z P, WANG J B, et al. Prediction method for ground surface settlement induced by bias tunnel based on stochastic medium theory [J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2025, 47(3): 589-598.
- [8] CAO Z L, SONG Z P, SUN W C, et al. A numerical approach for CFD-DEM coupling method with pore network model considering the effect of anisotropic permeability in soil-rock mixtures[J]. *Computers and geotechnics*, 2025, 178: 106898.
- [9] 邓志平, 李典庆, 祁小辉, 等. 基于广义耦合马尔可夫链的地层变异性模拟方法[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(11): 2041-2050.
- DENG Z P, LI D Q, QI X H, et al. Simulation of geological uncertainty using modified generalized coupled Markov chain [J]. *Chinese journal of geotechnical engineering*, 2018, 40(11): 2041-2050.
- [10] 冯国庆, 何玉俊, 刘红林, 等. 利用试井数据约束的随机地质建模方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2020, 55(2): 435-441, 233-234.
- FENG G Q, HE Y J, LIU H L, et al. Stochastic geological modeling constrained by well test data [J]. *Oil geophysical prospecting*, 2020, 55(2): 435-441, 233-234.
- [11] 王丽芳, 刘肖莉, 徐坤, 等. 数据和知识融合的 Bayesian-MCMC 三维地质建模[J]. *地球科学*, 2024, 49(8): 3056-3070.
- WANG L F, LIU X L, XU K, et al. Bayesian-MCMC based three-dimensional geological model optimization by data and knowledge fusion[J]. *Earth science*, 2024, 49(8): 3056-3070.
- [12] 王彪龙, 孟凡利, 曾超, 等. 基于自然选择策略的 PSO-BP 神经网络的滑坡可靠性评价方法[J]. *中外公路*, 2019, 39(3): 1-9.
- WANG B L, MENG F L, ZENG C, et al. The method of landslide reliability evaluation based on natural selection strategy of PSO-BP neural network [J]. *Journal of China & foreign highway*, 2019, 39(3): 1-9.
- [13] 张坤牧, 彭浩, 梁铭, 等. 基于随钻测量技术的隧道岩体完整性定量评价[J]. *中外公路*, 2025, 45(6): 245-253.
- ZHANG K M, PENG H, LIANG M, et al. Quantitative evaluation of tunnel rock mass integrity based on MWD technology [J]. *Journal of China & foreign highway*, 2025, 45(6): 245-253.
- [14] 魏星星. 基于贝叶斯机器学习的地层几何形态分布及不确定性分析[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
- WEI X X. Distribution and uncertainty analysis of stratum geometry based on Bayesian machine learning [D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [15] 宋战平, 李世豪, 张学钢, 等. 基于修正 Peck 法的隧道施工全地层变形规律研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 50(2): 190-195.
- SONG Z P, LI S H, ZHANG X G, et al. Study on strata settlement regular pattern induced by tunnel construction based on Peck formula [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 2018, 50(2): 190-195.
- [16] 张萍. 结合试井动态资料的随机模拟方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- ZHANG P. Study on stochastic simulation method combined with well test dynamic data [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [17] 杨建民, 权勃, 张文童, 等. 基于蒙特卡洛模拟的三维地质模型不确定性分析[J]. *断块油气田*, 2020, 27(3): 309-312.
- YANG J M, QUAN B, ZHANG W T, et al. Uncertainty evaluation of 3D geology model based on Monte Carlo simulation[J]. *Fault-block oil and gas field*, 2020, 27(3): 309-312.
- [18] KRUMBEIN W C. Statistical models in sedimentology [J]. *Sedimentology*, 1968, 10(1): 7-23.
- [19] OUYANG J W, ZHOU C Y, LIU Z, et al. Triangulated irregular network-based probabilistic 3D geological modelling using Markov Chain and Monte Carlo simulation [J]. *Engineering geology*, 2023, 320: 107131.