

破碎带三维模型不确定性分析 及其在地铁工程中的应用*

侯卫生¹, 陈秀文¹, 杨翘楚¹, 陈勇华²

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 广州 510275
2. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010

摘要: 依托现代空间信息理论和技术, 三维地质模型给出了地质对象更易于理解的空间透视图, 为地下空间利用的设计、开发和决策提供基础数据和支持。然而, 由数据稀疏性和结构复杂性所引起的不确定性严重制约了三维地质模型的深入应用。以钻孔分层数据误差为基础, 构建了地质结构面不确定性分布函数; 以地质属性概率值为参量, 利用蒙特卡洛模拟方法模拟不同扰动条件下地质结构面不确定性分布。广州地铁某站址破碎带不确定性实例研究结果表明: 以地质属性概率为参量的地质结构面不确定性分析方法不仅能融合不同类型的数据误差, 还能很好地把地质属性和空间误差关联起来; 误差扰动分析函数中的扰动因子控制了未采样区域的断裂面起伏形态; 利用断裂属性概率分布的特征可以准确再现断裂分布与地铁工程之间的空间关系, 为地铁工程的设计与施工的决策提供了基础。

关键词: 破碎带; 不确定性; 地质属性概率; 三维地质模型; 地铁工程

中图分类号: P628+.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2021)03-0058-10

The uncertainty analysis of 3D fault zone model and its application in metro engineering

HOU Weisheng¹, CHEN Xiuwen¹, YANG Qiaochu¹, CHEN Yonghua²

1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510010, China

Abstract: Based on the modern geoinformatics theory and techniques, 3D geological model provides a spatial perspective view of structures and attributes of geological bodies, which provides basic data and support for the design, development and decision-making of underground space. However, uncertainties, caused by the discretization and sparsity of observed data, complexity of geological body and randomness of modeling algorithm, strictly limit the effective application of the 3D geological model. Based on the data error of stratigraphic contacts, a function for uncertainty analysis of geological subsurface is built up in this study. The uncertainty analysis of geological structures is implemented with different perturbation conditions by the Monte Carlo simulation, in which the geological attribute probability (GAP) is used as simulating parameter. The concrete example of fault zone uncertainty at one of the stations of Guangzhou Metro illustrates that the proposed method of which the GAP is used as a parameter not only can integrate different types of data error, but also can connect geological attributes and spatial data er-

* 收稿日期: 2020-03-03 录用日期: 2020-03-16 网络首发日期: 2021-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(41472300, 41772345)

作者简介: 侯卫生(1976年生), 男; 研究方向: 三维地质模拟; E-mail: houwsh@mail.sysu.edu.cn

ror. The perturbation factor is the key to impact the shape of fault surface in the unsampled area, and the suite of GAP models represents the spatial relationship between the fault and metro engineering. Therefore, the proposed method can effectively guide the design and construction of metro engineering.

Key words: fault zone; uncertainty; geological attribute probability; 3D geological model; metro engineering

大力发展轨道交通是解决城市交通拥挤、实现土地集约利用的重要途径之一。然而, 断裂作用改变了岩石的结构和力学性质, 制约了地铁工程的设计、施工, 使地铁施工受阻, 造成工程投资增加、工期拖延、危及地铁运行安全和后期维护。因此, 明确断裂破碎带的三维空间分布, 探讨断裂破碎带地下水、活动性潜在的地震危险及围岩稳定性等问题, 对减少断裂对地铁设计、施工的影响有着重要意义。

利用现代空间信息理论和技术, 三维地质模拟建立了具有地质意义的三维数学模型, 并给出了地质体空间结构或属性更易于理解的空间透视图, 可以为工程设计、施工和决策提供基础数据和支持^[1-3]。地铁工程中, 大比例尺、高精度的地质结构三维表达是关键所在。然而, 由于地质数据的稀疏性、建模过程的随机性与不确定性、对地质现象认知不足等原因, 不确定性不可避免地存在于建模过程和最终的三维地质模型中^[4-10]。存在不确定性的三维地质模型将严重影响和制约地铁工程的设计、施工和决策。因此, 有必要细致探讨三维地质模型的空间分布不确定性并揭示其对地铁工程的制约。

针对不同的应用需求, 诸多研究提出了面向地质数据中的误差和建模过程中的随机不确定性特征分析的方法策略^[9, 11-14], 并初步形成了三维地质模型的修正^[15-16]、误差检测和分析方法^[17], 以及相应的研究体系框架^[18]。然而, 如何综合评价地质数据的不确定性对最终地质模型的影响仍是制约高精度模型深入应用和发展的一个重要因素。

假定同一地质要素的不同位置上空间误差服从不同密度分布函数, 空间上任意一点属于某一地质属性(如地层)的概率值, 与地层分界位置的空间不确定性具有密切联系^[19]。地质属性概率揭示了地质空间结构位置不确定性与地质属性之间的耦合关系, 融合地质属性概率和 Monte Carlo 随机模拟方法, 可以构建出依托建模数据误差的地质面多个概率等值模型, 从而达到分析地质模型不确定性的目的^[8]。本文以地质属性概率值为

参量, 通过分析钻孔分层数据误差, 探讨地质面模型不确定性分布, 结合广州地铁某站实例数据, 分析断裂模型的不确定性对地铁工程设计的影响。

1 地质体不确定性分析方法

三维地质建模中的不确定性大致可以分成3类^[4, 20]: (1) 不准确和测量误差。包括数据测量的误差、偏差和不准确。所有建模原始数据如地层分界位置、地层产状等误差均属于此类。(2) 随机不确定性。这类不确定性主要是由构建地质面、体模型的内插或外推过程所引起的, 并与相应的算法有直接关系。(3) 认知不完整引起的不确定性。这类不确定性主要是由于数据的有限性导致人类对地下地质结构认知的不足而引起的。其中, 第(1)、第(2)类不确定性可以通过随机误差理论、统计理论、误差熵等实现定量化分析^[9, 21-22], 并初步形成了模型修正^[16, 23]、误差检测和分析方法^[17], 以及相应的研究体系框架^[18]。而第(3)类不确定性则难以描述和定量分析^[9, 24]。

针对前两类不确定性的统计特性, 根据经典误差理论、空间统计学、模糊数学、信息熵等理论和方法, 在原始数据集成到三维模型之前减少不确定性, 或在集成过程中同时分析原始数据和三维地质模型的不确定性, 可以达到定量分析不确定性对最终模型影响的目的^[9-10, 12]。针对不同情况, 依托初始结构模型, 基于概率场方法, 通过一系列不同概率值的三维地质模型可以实现定量分析不确定性的分布。地质空间统计学方法通过探讨样本点数据之间的空间关系, 以半差图或协方差模型定量描述和分析面模型构建过程和结果的不确定性分布^[4, 11, 25-26], 突破了随机误差理论中误差独立性的假设前提。误差扰动方法则以初始地质面模型为期望, 结合数据源误差建立整个模型的置信区间, 通过一系列不同概率值三维地质模型的距离、体积、深度等参量的差异特征来表征不确定性^[11, 13]。栅格模型利用熵值来测度全三维空间内地质模型的不确定性及误差敏感度。它将空间划分成若干 Grid 或 Voxel 单元体, 依托建

模数据的概率分布及初始地质模型,通过信息熵值来标识每个节点上的不确定差异性,从而实现全三维空间内的不确定性分析^[20]。当有新的误差数据被引入三维地质模型时,节点上的熵值因数据改变而改变,从而实现了模型对不同误差源的敏感度的测度。

多元误差的存在使得三维地质建模不确定性分析面临误差集成的难题。基于数据或条件独立性假设,多元误差的集成可以看成是集成先验概率到后验概率中^[27]。然而,地质数据通常不能满足这个假设前提。针对不同的应用,众多学者开展了一系列的研究。Tarantola & Valette^[28]针对反问题提出了概率的合取和析取概念。Journel^[29]提出了Tau模型用于更宽泛的概率集成,Polyakova & Journel^[30]则用Nu模型改进了Tau模型方法。Allard等^[31]回顾和总结了已有概率分布集成方法,并给出了概率集成的通式。Hou等^[8]依托地质属性概率概念,推导了不同空间误差集成的公式,利用熵权方法来实现概率集成方法,并用于地质分界线的多元空间误差分析。在以上的集成方法中,具有未完全考虑未采样位置不确定性要远大于采样位置的特点。

以经典统计学或空间统计学方法为核心的地质模型不确定性分析方法是以误差置信区间为基础,通过构建距离核函数来内插误差分布实现。在不同的方法中,所采用的距离函数不尽相同。但是,由于待估点的不确定性是通过内插得到的,所以,会出现待估点的不确定性要小于采样点位置不确定性的情况。信息熵的方法在某种程度上可以解决该问题^[9, 20],但该方法仅支持栅格数据模型,难以用于结构模型的不确定性分析。

2 基于地质属性概率的地质结构面不确定性分析方法

本质上,地质结构面如地层或断层面的位置是由界面两侧的地质属性如岩性、地质年代来决定的。地质点空间位置误差的实质是地质属性在三维空间内分布的不确定性。因此,地质空间数据误差与相应的地质属性之间存在着一定的耦合关系。利用空间误差函数与地质属性分布概率之间的映射函数就可以定量表征这种耦合关系,由此可以将建模数据的三维空间误差转换成一维的地质属性概率分布问题。

2.1 地质属性概率值计算

地质属性概率(Geological Attribute Probability, GAP)是空间中的某一个点属于某一地层的可能性大小。误差的概率分布密度函数的累计分布函数通常用来计算相应的GAP值^[13]

$$P(A) = \int_a^b f(z) dz, \quad (1)$$

其中 a 和 b 是某一选择水平下的置信区间, $P(A)$ 就是地质点空间位置 z 的概率值。

然而,未采样位置的误差分布是未知的。依据每个采样位置(如钻孔)处地层分层或断层位置的误差分布函数时,其标准差或均方差值 σ 的变化应符合以下2个基本要求:

1) 结构面上某一点的误差范围应当与该点离其最近钻孔的距离成正相关,即距离钻孔越近的节点处误差范围应当越小,而距离钻孔越远的节点误差范围应当越大;

2) 随着节点与其最近钻孔之间距离的增大,误差分布的增大趋势应当呈现非线性递增趋势。

因此,以已知位置标准差或均方差 σ 为自变量,同一结构面空间中任意未采样位置的误差分布函数可以表示为

$$\sigma(i) = \left[A \cdot \frac{e^{x_i} - 1}{e - 1} + 1 \right] \sigma_{\text{sample min}}(i), \quad (2)$$

$$x_i = d_{\text{min}}(i) / \max(d_{\text{min}}), x_i \in [0, 1],$$

其中 $\sigma_{\text{sample min}}$ 是离当前位置最近的已知误差分布的标准差或均方差值, d_{min} 为当前点与最近已知点之间的距离, $\max(d_{\text{min}})$ 是所有 d_{min} 中的最大值。 A 为距离扰动因子。在获取当前未采样位置的误差分布函数参数 $\sigma(i)$ 时,先对同一结构面上钻孔进行搜索,找到与当前点距离最近的钻孔,它们之间的距离即为式中的 d_{min} 。由每个节点中都有一个各自应对的 d_{min} 可以找出最大的一个 $\max(d_{\text{min}})$,然后利用每个节点中的 d_{min} 除以全局中最大的 d_{min} ,即可获得正则化距离 x_i , x_i 的取值范围为 $[0, 1]$ 。以 e 为底的指数函数,通过距离扰动因子 A 和最小采样参数 $\sigma_{\text{sample min}}$ 就可以控制最佳估计模型的扰动强度以及当前点 $\sigma(i)$ 。

2.2 地质属性概率等值面计算

按照式(2),可计算出地质结构面上每个节点的误差参数。理论上可以依据式(1)计算出地质结构面上每个节点的地质属性概率值。在本研究中,地质结构面整体的不确定性分布采用等地

质属性概率值面来表征。为了获得地质结构面上任意一点的地质属性概率, 首先在每个节点位置的 Z 方向上设定出足够密集的离散点位, 然后通过 Monte Carlo 模拟计算得到大量的空间点位的地质属性概率值, 才能较为精确地构建出某一概率值所对应的地质属性概率等值面。在本研究中, 每个节点垂向上每个单位长度内都被等间距地设置了 200 个点位, 以充分揭示出模型空间中的地质属性概率分布特征。在此基础上, 式 (3) 用来计算空间点位的 GAP 值^[19]

$$\begin{cases} P(Q \in F) = \sum I_F(x_i)/N_{\text{count}}, \\ P(Q \notin F) = 1 - \sum I_F(x_i)/N_{\text{count}}, \end{cases} \quad (3)$$

其中 $I_F(x_i) = \begin{cases} 1, & x_i < Z_M, \\ 0, & x_i > Z_M. \end{cases}$

对于某一节点处的空间点位 x_i 而言, 每完成一次随机模拟都会得到一个该节点的可能存在位置点 Z_M 。当这个点位 x_i 的高程值小于本次随机模拟得到的点的高程值 Z_M , 说明本次模拟得到的结果处于该结构面 F 下方的位置, 那么, 根据式 (3) 可以将本次模拟结果所对应的指示特征值 $I_F(x_i)$ 记作 1, 反之, 则记为 0。当完成所有的模拟后, 对于空间中的任意点位而言, 都会存在与模拟次数个数相同的 $I_F(x_i)$ 值。因而, 只需要求得 $I_F(x_i)=1$ 的次数占随机模拟次数的比值, 即为这个点位处的 GAP 值 (见图 1)。

理论上, GAP 值的取值范围应当是 $[0, 1]$,

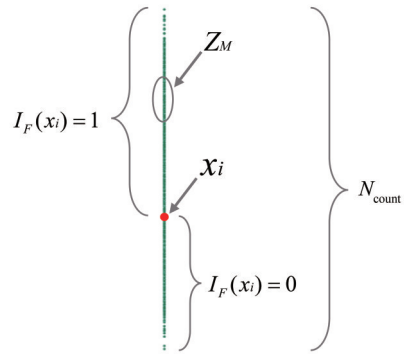


图 1 地层分界点位 GAP 值计算方法说明图
 x_i 是地质属性概率值待求点, 绿色点为 Monte Carlo 随机模拟的可能位置 Z_M , 模拟次数为 N_{count}

Fig. 1 Illustration of calculation of GAP from geological contact position

x_i is the value of GAP to be solved. The green dots represent the possible locations of the Monte Carlo simulation, Z_M , and the number of simulations is N_{count}

即随着高程的增加, GAP 值将不断降低, 从最低位置的 1 逐渐降低到最高位置的 0, 并且在最佳估计结构面节点位置处的 GAP 值最接近 0.5。图 2 中 ①、②、③为结构面上有不同标准差的节点位置上的 GAP 值, 其色阶分布也呈现出了正态分布的特征, 不同的标准差所对应的误差分布范围也有明显差别, 这些结果都是符合预期的。由此, 把结构面上每个节点上相同 GAP 值的空间位置连接成三角网, 即可生成不同 GAP 等值曲面。

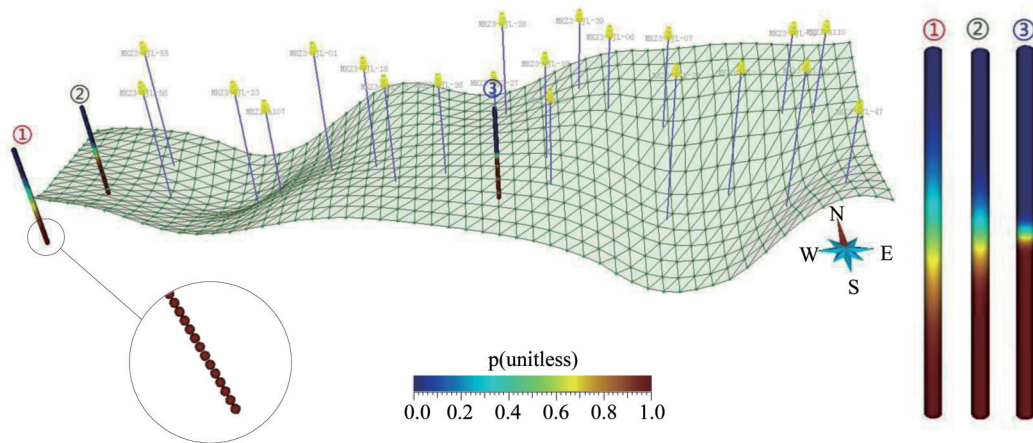


图 2 结构面节点的 GAP 可视化

①②③分别为结构面上 3 个具有不同标准差值节点所模拟出来的 GAP 值

Fig. 2 Visualization of GAP of structural surface nodes

①, ② and ③ are the GAP simulated by three nodes with different standard deviations on the structural surface.

基于GAP的地质结构面不确定性分析方法主要包括以下几个步骤：1) 构建断裂初始结构面。依托已知数据，利用三角化方法构建断裂结构面的初始模型，即最佳估计模型。2) 设定已知断裂数据的先验误差模型，计算未采样位置的空间分布误差函数。3) 重构断裂GAP等值面。根据每个节点上的空间分布误差函数，利用上述方法构建断裂GAP等值结构面。4) 与地铁构筑物三维结构进行空间叠加分析，探讨断裂结构面不确定性对地铁构筑物的影响。

3 广州某地铁站点断裂模型实例

3.1 地质背景

研究区为位于珠江三角洲北部的广州市某段地铁区间的江泰路站址 (见图3)。前期研究表明，研究区所揭露的地层主要为白垩系和第四系^[32]。

白垩系地层主要由下白垩统白鹤洞组猴岗段 (K_{1b}^1)、白鹤洞组广钢段 (K_{1b}^2) 和上白垩统三水组康乐段 (K_{2s}^1) 组成。下白垩统白鹤洞组猴岗段主要为紫红色泥质粉砂岩、含砾砂岩、砂砾岩，部分区域为暗红色泥质粉砂岩，粉砂质结构。白鹤洞组广钢段主要为青灰色、灰绿色、紫红-棕红色粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩、含砾砂岩、粉砂质泥灰岩和泥灰岩互层。上白垩统三水组康乐段主要为棕红、紫红、暗紫色砂岩、含砾粗砂岩、砾岩，以及钙质粉砂岩和钙质泥岩。第四系由松散沉积层组成，主要有杂填土、全新统和上更新统河流三角洲相和海陆交互相淤泥质土、砂层、粉质黏土及第四纪残积土，其中全新统厚度约数米至10余米不等，第四系最厚可超20 m，呈角度不整合上覆于白垩系地层。

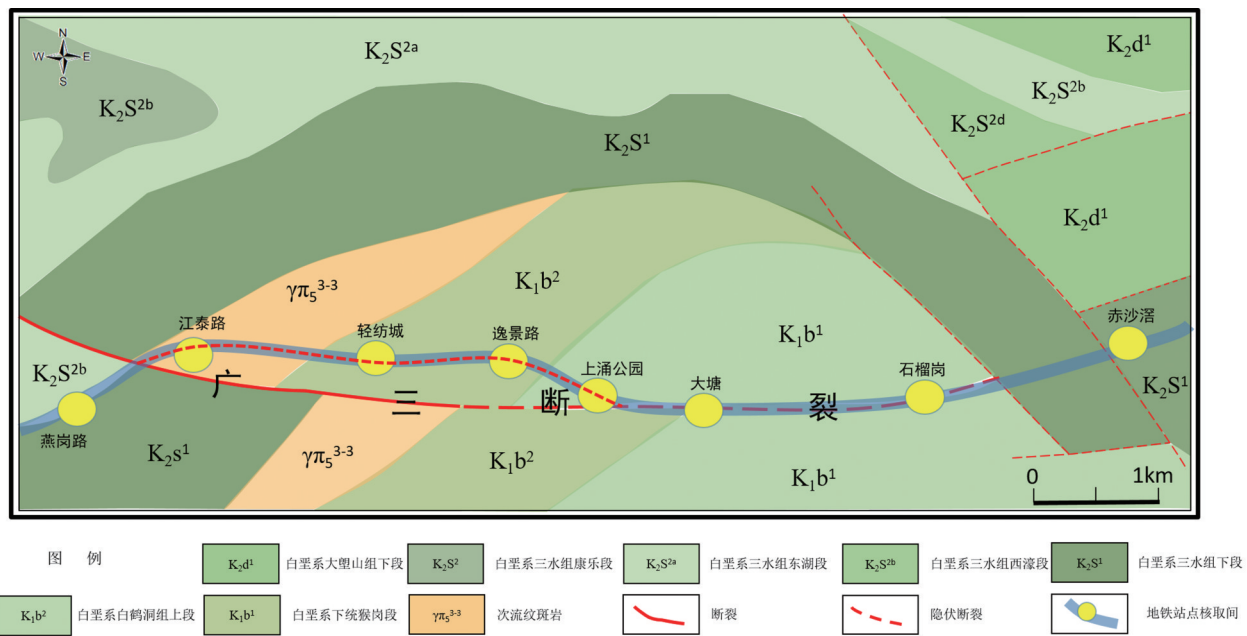


图3 研究区基岩地质图

Fig. 3 Bed rock map of the study area

研究区所遇褶皱构造主要是大塘背斜，其轴部位于大塘站北侧，由下白垩统白鹤洞组上段地层组成，两翼为三水组上段地层。背斜轴部大体呈北东东向展布，两翼地层倾角一般为 $15^\circ \sim 30^\circ$ 。研究区所钻遇的断裂为广三断裂，该断裂是控制广州地区地质架构的重要东西向断裂之一。广三断裂西起三水，经南海大沥延入广州，长度60 km以上。广三断裂在研究区总体近东西走向，主要倾向南，局部倾向北，倾角变化较大，局部区域

存在漏斗形态。破碎带视厚度一般 $10 \sim 30$ m，最厚达55.4 m，其影响范围大，其埋深从 $-0.5 \sim -52.1$ m。

3.2 三维地质模型构建

依据钻孔采样数据和钻孔剖面图数据，利用GOCAD®软件，本研究构建了江泰路站址的三维地质模型 (见图4)。从三维模型来看，人工填土近水平分布，基本覆盖了整个站址。整个站址均揭露了冲积-洪积-坡积土层，在站址的西侧附近区

域起伏较大。河湖相沉积的淤泥层近水平分布。整体来看, 站址内地层整体水平展布, 局部区域有起伏。基岩风化带分布均匀且在整个站址均有揭露, 但埋深起伏较大, 在站址中部北部区域断裂破碎带切过其顶部。在江泰路站址的中东部区域见断裂, 断裂总体朝南倾斜, 顶部埋深为-0.58

~-51.19 m。在站址的东部, 断裂厚度增加, 形成两个近漏斗形状; 在模型近中部, 断裂厚度逐渐减薄, 断裂逐渐尖灭。且断裂顶面埋深由西向东逐渐变浅, 而底部埋深变深。从断裂和地层空间展布关系来看, 断裂并没有切过第四系地层, 老地层也未因受力的作用而形成大的褶皱现象。

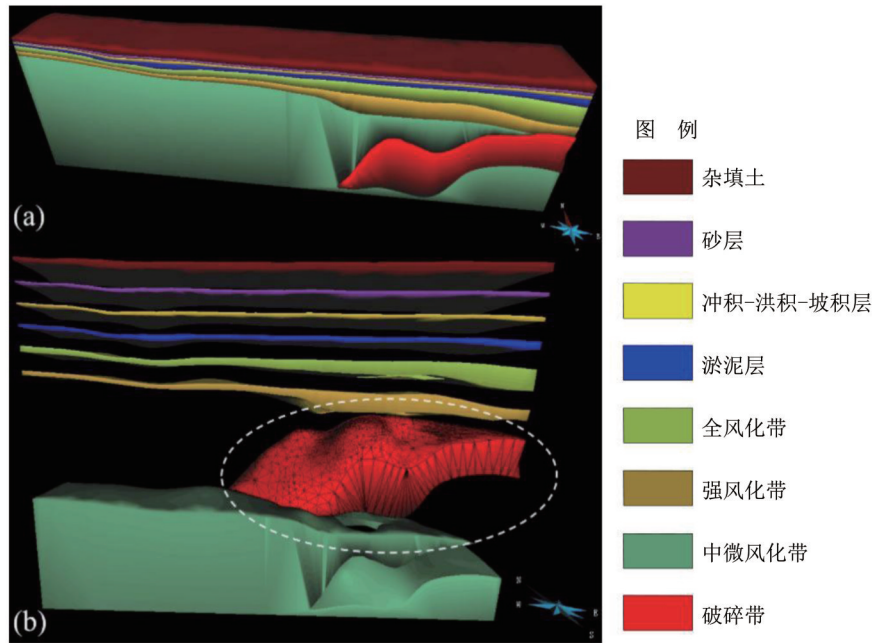


图4 研究区三维地质模型

(a) 透视图, (b) 三维模型爆炸显示, 其中白色椭圆标识的是破碎带体模型

Fig. 4 The 3D geological model of the study area

(a) Prospective view; (b) Explosive view of which the fault zone model is marked with white dash-line circle

3.3 破碎带模型不确定性分析及其对地铁站点建设影响分析

根据研究区所揭露破碎带角砾的粒径大小, 破碎带可以细分为断层泥状破碎带, 角砾状破碎带或断层角砾岩以及碎块状破碎带或碎块岩三种不同类型。其中, 断层泥遇水易软化, 强度较低、工程性质较差; 角砾岩和碎块岩的存在, 在一定条件下可形成导水通道和富水带。研究区所揭露的大部分破碎带区域位于地下水位以下。从图5来看, 大部分的地铁结构与破碎带没有接触, 但部分车站底板与破碎带顶面存有交集 (如图5中虚线圈内部分所示), 有一部分地铁构筑物结构完全处于破碎带中。因此, 在穿越断层破碎带施工时容易发生突水, 涌砂等工程地质灾害。当地铁车站或区间的顶底板处于破碎带范围内, 在施工过程中, 这些部位容易发生突涌和破坏。由于建模过程中不可避免地存在不确定性, 如对破碎带分界位置进行判断等, 这些不确定性因素必然会影响

到模型的精确程度。因此, 探讨断裂模型的不确定性对地铁工程设计和施工具有重要的参考价值。

在分析断裂对地铁构筑物影响大小时, 本研究引入了GAP等值体概念。GAP等值体是指同一地质体的上下两个具有相同GAP值的结构面封闭所形成的三维体模型。最佳估计模型的强度取决于不确定性表征函数中的扰动因子A和最小采样标准差 $\sigma_{\text{sample min}}$ 的大小, 考虑到扰动因子A对扰动强度的影响更为直接, 为了简明地展现不同扰动方案之间的差异, 将 $\sigma_{\text{sample min}}$ 值进行固定 ($\sigma_{\text{sample min}}=1$), 然后通过将A进行较大幅度的改变, 本文选取A=3, 7, 11, 获得3种扰动强度差别较大情形下的GAP等值体的模拟结果。

依据前述的参数, 图6是3种不同扰动强度下的GAP等值体模型, 为了直观地展示各组等值体轮廓的形态及其分布范围, 本例从每组50个等值体中挑选出GAP值为0.05, 0.50及0.95所对应的3个最具代表性等值体予以展示。可以看出, 在不

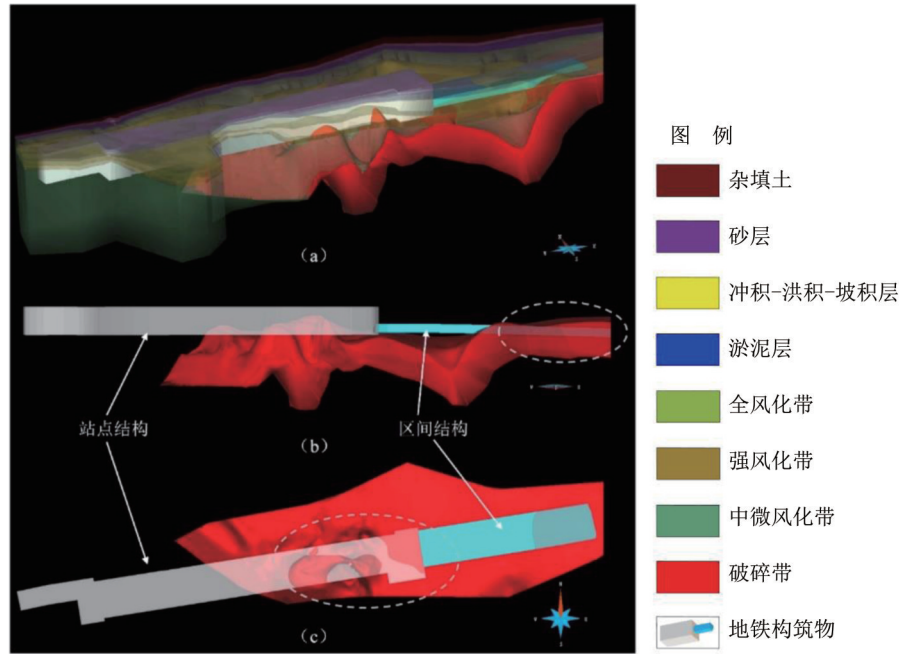


图5 研究区站址及其部分区间结构、破碎带的三维模型

(a) 所有地层与车站及区间的展示效果图,普通地层被作透明化处理;
(b) 车站结构与破碎带的水平视图;(c) 车站结构与破碎带的俯视图

Fig. 5 The 3D model of station and its affiliated structures, and fault zone

(a) the prospective view of all geological bodies and station and tunnel where geological bodies are shown in Fig.3;
(b) the plenary view of fault zone and structure of tunnel; (c) the top view of fault zone and structure of tunnel

同的扰动强度下得到的地质属性等值体之间的差异主要表现在两个方面,第一个差异为这3组等值体的分布范围各不相同。等值体的分布范围是以GAP值的最大值和最小值所对应的两个等值体为边界,即图6(a)蓝色等值体与图6(c)红色等值体的包裹范围。通过纵向比较图6中的a、b、c三个等值体的变化可以看出,扰动越强烈,蓝红两个等值体距离越远,扰动越强烈的等值体组的分布范围明显与扰动范围的分布范围大出许多;第二个差异主要是等值体局部几何形态的差异。通过将三种扰动强度下的模拟得到的等值体形态进行对比可以发现(见图6(a-c)):当断裂GAP相同时(如为0.05),A的值越小,其断裂GAP等值体相对光滑,且曲面局部起伏较小;相反,断裂GAP等值体局部形态起伏较大特征。这是因为,扰动因子取值越大,相邻节点标准差的变化幅度增强,最后反映到地质属性概率等值体变化上。

不同的扰动参数各自对应的本研究获得了3组不同扰动条件下的地质属性概率等值体体积的变化曲线图(图7a),以及破碎带GAP等值体与地铁构筑物相交体体积曲线(图7b)。不同扰动参数的GAP等值体体积随着GAP值由小变大而变化(图7a)。随着GAP值的变化,等值体体积会在一定范

围内波动,但扰动过程中等值体体积基本上都保持在一个较为稳定的范围(112 970~113 855 m³)。

结合图6和图7b,当断裂GAP值在0~0.50之间时,扰动因子的增大会使破碎带地质概率属性等值体与江泰路地铁站构筑物之间的相交体积增大。例如,当GAP为0.05时,断裂与地铁构筑物相交体积随着扰动因子A值的增大而增大(见图6(a-c))。它当扰动因子值为11时,地铁构筑物东南角与破碎带有大部分交集,在底部的西侧,部分区域与破碎带底部相交(图6c),此时交集的体积为11 408.5m³,占据地铁构筑物(地铁构筑体积117 649 m³)的体积可达9.6%。当断裂属性概率值在0.50~0.95时,等值体与地铁构筑物的相交部分提与扰动参数呈负相关(图7b)。当断裂属性概率值为0.95时,构筑物底部只有很小一部分切过了破碎带(图6i),体积约为529.89 m³,仅占地铁构筑物体积的0.5%。当断裂属性概率值为0.50时,即为断裂带的最佳估计模型,地铁构筑物与等值体的相交体积并不受扰动因子的影响(图7b),在构筑物底部的东南角占据了2 944.896 m³的空间,约为车站空间的2.5%。

结合研究区站址范围内岩土工程勘察资料以及相应的三维地质模型可知,站址西端底板及侧

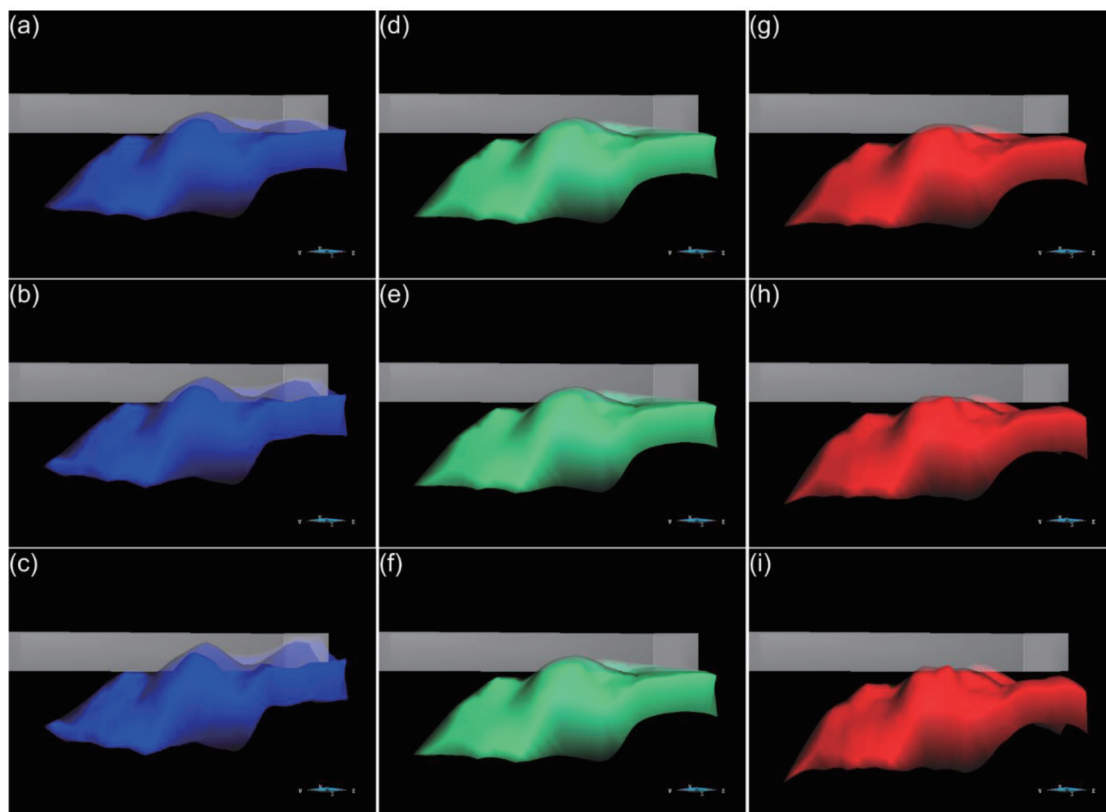


图6 研究区站址破碎带等值体模型

Fig. 6 The iso-GAP model of fault zone at the metro station

蓝色、绿色和红色的GAP等值面所对应的属性概率值分别为0.05、0.50和0.95, 灰白色模型为地铁构筑物外轮廓模型。其中,第一行图A=3,第二行图A=7,其余图A=11。

The GAP values of 0.05, 0.5 and 0.95 are presented with blue, green and red respectively. The grey model is the outline model of metro station. The value of perturbation factor of the images in the top, middle and bottom row, is 3, 7 and 11 respectively

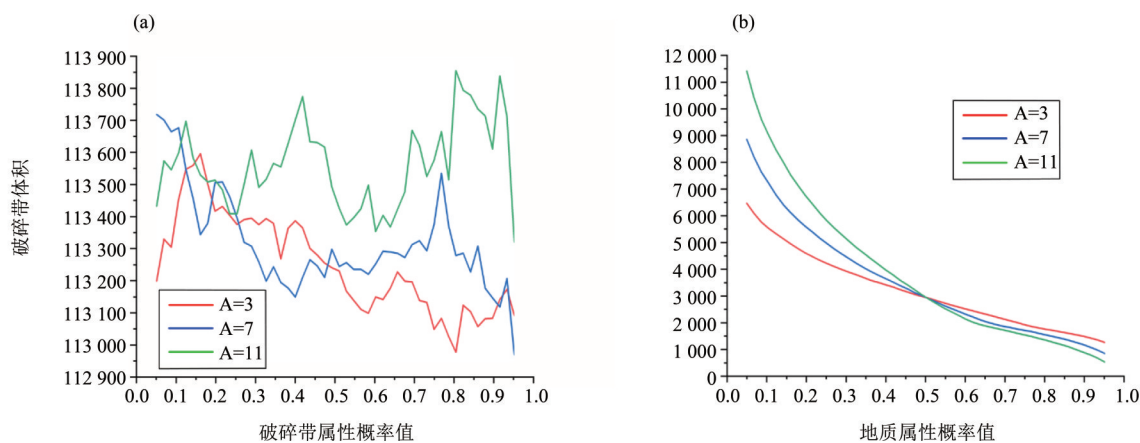


图7 (a) 研究区破碎带属性概率值体体积统计曲线图; (b) 破碎带GAP等值体占地铁构筑物的体积统计曲线图

Fig. 7 (a) The curve chart of volume with different GAP at the study area;

(b) The statistical curves of intersecting GAP volumes between the fault zone and subway structures

壁条件较好,但是其中的含砾砂岩风化层遇水浸泡易出现强度降低的情况;东段底板以破碎带、强风化层为主,侧壁分布有强风化和破碎带,局部分布有软土和砂层,其中的英安斑岩残积土、全风化、强风化层遇水崩解,扰动后强度急速下

降,水理性质极差。本车站结构局部底板与破碎带相接触,考虑到破碎带的物性特征与中、微风化岩层性质差异较大,在设计与施工中应充分考虑不均匀沉降对工程的影响。

4 结 论

地铁的设计与施工不可避免地会受到诸如破碎带等不良地质体的影响,准确勾勒不良地质体的分布显得至关重要。本研究提出了一种依托 Monte Carlo 模拟方法及地质属性概率概念的误差扰动分析函数,探讨三维地质结构模型不确定性分布对地铁工程设计施工的影响。有关断裂模型的不确定性,得出如下结论:

1) 以 GAP 为参量的地质结构面不确定性分析方法不仅能融合不同类型的数据误差,还能很好

地把地质属性和空间误差关联起来,有效避开就不确定性探讨不确定性的局限;

2) 误差扰动分析函数中的扰动因子控制了未采样区域的断裂面形态起伏;

3) 不同扰动参数的地质概率等值体体积随着 GAP 值由小变大而变化,但扰动过程中等值体体积基本上都保持在一个较为稳定的范围内;

4) 不同等概率值的断裂模型与地铁结构模型的空间耦合关系为地铁工程设计和施工提供了决策依据。

参考文献:

- [1] 屈红刚,潘懋,刘学清,等. 城市三维地质建模及其在城镇化建设中的应用[J]. 地质通报, 2015, 34(7): 1350-1358.
QU H G, PAN M, LIU X Q, et al. Urban 3-D geological modeling and its application to urbanization [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(7): 1350-1358.
- [2] 岳攀,钟登华,吴含,等. 基于 LHS 的坝基岩体三维裂隙网络模拟[J]. 水力发电学报, 2016, 35(10): 93-102.
YUE P, ZHONG D H, WU H, et al. Simulations of 3-D fracture networks in rock mass of dam foundation using Latin hypercube sampling [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(10): 93-102.
- [3] 朱良峰,李明江,孙建中. 工程地质空间多场耦合构模技术研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2500-2506.
ZHU L F, LI M J, SUN J Z. Multifield coupled modeling techniques in engineering geological space [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2500-2506.
- [4] BÁRDOSSY G, FODOR J. Evaluation of uncertainties and risks in geology: New mathematical approaches for their handling [M]. Springer Berlin, 2004.
- [5] BOND C E, GIBBS A D, SHIPTON Z K, et al. What do you think this is? "Conceptual uncertainty" in geoscience interpretation [J]. Gsa Today, 2007, 17(11): 4-11.
- [6] De KEMP E A, SCHETSELAAR M E, HILLIER M J, et al. Assessing the workflow for regional-scale 3D geologic modeling: an example from the Sullivan time horizon, Purcell Anticlinorium East Kootenay region, southeastern British Columbia [J]. Interpretation, 2016, 4(3): SM33-SM50.
- [7] GONZÁLEZ-GARCIA J, JESSELL M. A 3D geological model for the Ruiz-Tolima volcanic massif (Colombia): assessment of geological uncertainty using a stochastic approach based on Bézier curve design [J]. Tectonophysics, 2016, 687: 139-157.
- [8] HOU W, CUI C, YANG L, et al. Entropy-based weighting in one-dimensional multiple errors analysis of geological contacts to model geological structure [J]. Mathematical Geosciences, 2019, 51: 29-51.
- [9] WELLMANN J F, REGENAUER-LIEB K. Uncertainties have a meaning: information entropy as a quality measure for 3-D geological models [J]. Tectonophysics, 2012(526/527/528/529): 207-216.
- [10] WU Q, XU H, ZOU X, et al. A 3D modeling approach to complex faults with multi-source data [J]. Computers & Geosciences, 2015, 77: 126-137.
- [11] LI X, LI P, ZHU H. Coal seam surface modeling and updating with multi-source data integration using Bayesian geostatistics [J]. Engineering Geology, 2013, 164: 208-221.
- [12] LINDSAY M D, AILLÈRES L, JESSELL M W, et al. Locating and quantifying geological uncertainty in three-dimensional models: analysis of the Gippsland Basin, southeastern Australia [J]. Tectonophysics, 2012, 546/547(3): 10-27.
- [13] TACHER L, POMIAN-SRZEDNICKI I, PARRIAUX A. Geological uncertainties associated with 3-D subsurface models [J]. Computers & Geosciences, 2006, 32: 212-221.
- [14] THIELE T S, JESSELL W M, Lindsay M, et al. The topology of geology 2: topological uncertainty [J]. Journal of Structural Geology, 2016, 92: 74-87.
- [15] 朱良峰,吴信才,潘信. 三维地质结构模型精度评估理论与误差修正方法研究[J]. 地学前缘, 2009, 16

- (4):363-371.
ZHU L F, WU X C, PAN X. Theory of accuracy assessment and methods for error correction in 3D geological structure models [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(4): 363-371.
- [16] 安聪荣,刘展,李曼. 地层建模中钻井与地质平面数据间偏差检测及修正[J]. *岩土力学*, 2011, 32(9): 2834-2838.
AN C R, LIU Z, LI M. Research on detecting and modifying method of deviation between drilling data and geological planar data in stratigraphic modeling [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(9): 2834-2838.
- [17] 徐华,武强,李坤,等. 三维地质模拟中不确定性分析方法[J]. *系统仿真学报*, 2012, 24(4): 837-842.
XU H, WU Q, LI K, et al. Uncertainty analysis on 3D geology modeling [J]. *Journal of System Simulation*, 2012, 24(4): 837-842.
- [18] ZHU L F, ZHUANG Z. Framework system and research flow of uncertainty in 3D geological structure models [J]. *Mining Science and Technology (China)*, 2010, 20(2): 306-311.
- [19] 侯卫生,杨翹楚,杨亮,等. 基于 Monte Carlo 模拟的三维剖面地质界线不确定性分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2017, 47(3): 925-932.
HOU W S, YANG Q C, YANG L, et al. Uncertainty analysis of geological boundaries in 3D cross-section based on Monte-Carlo simulation [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2017, 47(3): 925-932.
- [20] WELLMANN J F, HOROWITZ F G, SCHILL E, et al. Towards incorporating uncertainty of structural data in 3D geological inversion [J]. *Tectonophysics*, 2010, 490(3/4): 141-151.
- [21] CAUMON G, COLLON-DROUAILLET P, LE CARLIER de VESLUD C., et al. Surface-based 3D modeling of geological structures [J]. *Mathematical Geosciences*, 2009, 41(8): 927-945.
- [22] 潘懋,方裕,屈红刚. 三维地质建模若干基本问题探讨[J]. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(3): 1-5.
PAN M, FANG Y, QU H G. Discussion on several foundation issues in three-dimensional geological modeling [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, 23(3): 1-5.
- [23] 朱良峰,吴信才,潘信. 三维地层模型误差修正机制及其实现技术[J]. *岩土力学*, 2006, 27(2): 268-271.
ZHU L F, WU X C, PAN X. Mechanism and implementation of error correction for 3D strata model [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(2): 268-271.
- [24] MANN G M, MEYER C E. Late Cenozoic structure and correlations to seismicity along the Olympic-Wallowa Lineament, northwest United States [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1993, 105(7): 853-871.
- [25] GUILLEN A, CALCAGNO P, COURRIOUX G, et al. Geological modelling from field data and geological knowledge: Part II. Modelling validation using gravity and magnetic data inversion [J]. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 2008, 171(1/2/3/4): 158-169.
- [26] ZHANG L, HAO T, JIANG W. Separation of potential field data using 3-D principal component analysis and textural analysis [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 2009, 179(3): 1397-1413.
- [27] CAERS J, HOFFMAN T. The probability perturbation method: a new look at Bayesian inverse modeling [J]. *Mathematical Geology*, 2006, 38(1): 81-100.
- [28] TARANTOLA A, VALETTE B. Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion [J]. *Reviews of Geophysics*, 1982, 20(2): 219-232.
- [29] JOURNEL A G. Combining knowledge from diverse sources: an alternative to traditional data independence hypotheses [J]. *Mathematical Geology*, 2002, 34(5): 573-596.
- [30] POLYAKOVA E I, JOURNEL A G. The Nu expression for probabilistic data integration [J]. *Mathematical Geology*, 2007, 39(8): 715-733.
- [31] ALLARD D, COMUNIAN A, RENARD P. Probability aggregation methods in geoscience [J]. *Mathematical Geosciences*, 2012, 44(5): 545-581.
- [32] 广东省地质矿产局. 1:5万广州幅综合区域地质调查报告[R]. 1989