doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2022.02.009

基于多源数据融合的广州南沙核心区三维工程地质建模

曾 敏¹,赵信文¹,陈 松¹,王晓晗¹,皮鹏程^{2*},侯清芹²,孙慧敏²

ZENG Min¹, ZHAO Xin–Wen¹, CHEN Song¹, WANG Xiao–Han¹, PI Peng–Cheng^{2*}, HOU Qing–Qin², SUN Hui–Min²

中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心),湖北武汉 430205;
 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,湖北武汉 430074

Wuhan Center of China Geological Survey(Central South China Innovation Center for Geossciences), Wuhan 430205, Hubei, China;
 School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China

摘要:安全合理开发利用城市地下空间需要城市地质调查工作提供支撑,三维工程地质建模是将城市地下空间的地质调查成果 可视化呈现以便于实施地下空间规划、建设决策的重要手段。作为数据源的各类地质钻孔及其他相关数据具有来源不同、格式各 异的特点,给数据建模和可视化呈现造成一定困难,而基于多源数据融合的三维工程地质建模能够解决建模效率低、可视化效果 差的模型建设现状。作为粤港澳全面合作示范区和区域性综合服务中心,广州南沙核心区集聚高水平对外开放和经济深度融合 的高端产业,其规模化建设急需开展三维工程地质建模,以实现空间利用高效化。本文通过原始数据处理、三维空间集成和多源 数据融合三个步骤实现了对多源钻孔数据和其它信息的有效集成,依托南沙三维地质结构模型及信息平台搭建地质空间数据 库,通过离散光滑插值(DSI)技术构建了三维曲面,并采用半自动建模方式,依据强制约束条件建立以钻孔为主、其它信息为辅的 三维工程地质模型。模型应用于南沙核心区地下空间开发利用和地铁路线规划,提出了软土地面沉降的工程处理建议,助力建设 "透明南沙",为更加安全合理开发利用城市地下空间提供了科学依据。

文章编号:2097-0013(2022)02-0281-11

Zeng M, Zhao X W, Chen S, Wang X H, Pi P C, Hou Q Q and Sun H M. 2022. 3D Engineering Geological Modeling of the Nansha Core Area of Guangzhou Based on Multi-source Data Coupling. *South China Geology*, 38(2): 281-291.

Abstract: Further exploitation and utilization of urban underground space requires continuous in-depth geological investigation, and three-dimensional (3D) modeling in engineering geology is an important approach to visualize the underground space. Due to the variable sources and formats of geological boreholes and associated data, it is difficult to model and visualize the data. The 3D modeling in engineering geology on the basis of fusion of multi-source data, however, can solve the problems of low modeling efficiency and poor visualization effect. As an integrated service center and demonstration area for the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, the Nansha core area, gathered with high-end industries with high-level

收稿日期:2022-1-7;修回日期:2022-3-1

基金项目:中国地质调查局项目(DD20190291)

第一作者:曾敏(1982—),男,高级工程师,主要从事水工环境地质与城市地质调查方面的研究,E-mail:zengmin1982@sina.com 通讯作者:皮鹏程(1997—),男,硕士研究生,主要从事地面沉降研究,E-mail:ppc0428@126.com

opening up and deep economic integration, has an urgent need for high-efficiency utilization of space through 3D engineering geological modeling and its scaling up. In this paper, the collected multi-source data was integrated through processing of raw data, 3D spatial integration, and fusion, and then a geo-spatial database was established. The 3D curved surface was constructed by using the discrete smooth interpolation (DSI) method, whereas the 3D engineering geological model was established following the semi-automatic modeling method. This model has been applied to the exploitation and utilization of the underground space such as the subway route planning in the Nansha core area, and suggestions for engineering treatment of land subsidence of soft soil were put forward. Overall, the model aids to build "Transparent Nansha" and provides the scientific basis for safer and more reasonable development and utilization of the Nansha core area

城市地质调查是城市规划建设的重要基础,贯 穿于城市运行管理的全过程。城市地质调查内容早 期主要为工程建设地质条件调查,中期主要调查工 程建设与地下空间利用条件、地质资源、水土环境 和地质灾害,而后期则主要为城市更新改造和运行 管理的相关地质调查(林良俊等,2017)。开展空间、 资源、环境及灾害等多要素城市地质调查成为服务 于城市规划、城市建设和城市管理的"透明城市"战 略的重要着力点,构建可视化的三维地质模型是其 重要手段(孙敏等,2002;Guo J T et al., 2021)。

三维地质建模是依托计算机技术,将地貌、地 层、地质构造及其他地质现象在三维空间中真实展 现,并用于地质分析的技术(Mallet, 1989, 1992), 起于克里金插值技术的提出,率先用于找矿、石油 开采领域,随后 Calson(1987)从地质学角度解释了 三维概念模型, Alexander et al(1990)也强调采用 三维形式表达地学信息,直到加拿大学者 Houiding (1994)正式提出三维地质建模概念。伴随地质工作 对可视化需求的不断增加和计算机技术的发展, 三维地质建模已覆盖多个领域,主要集中于矿产 勘查(Houiding, 1994)、油气勘查(Naji 和 Khalil, 2012; Tan X Q et al., 2019)、水文地质(Velasco et al., 2013; Conde et al., 2014; 万晓明等, 2020)、地铁 工程(周念清等,2020)、滑坡(申健等,2008)和城 市建设(屈红刚,2015;许珂和徐亚杏,2018;何静 等,2019)等。在城市三维地质建模过程中,能够直 接反应地下空间结构的数据源主要为钻孔(张源, 2021)。朱良峰等(2004)基于钻孔数据同专家经验 解译相结合,构建三维地层模型;刘娜等(2008)利

用钻孔数据实现多空间插值方法的建模对比研究; 唐丙寅等(2021)在钻孔数据基础上引入地质剖面, 修正钻孔数据模型。众多学者基于钻孔地质数据, 实现了三维地质模型的钻孔快速建模,提高模型的 精度,但由于获取钻孔数据成本较高,区域内钻孔 资料有限,且钻孔资料间无关联参数,揭示地层信 息有范围限制,单一数据源不能准确反映断层和褶 皱等特殊地质现象,也不能准确反映叠覆的关系复 杂的非标准层序情况。综合利用多源数据实现三维 地质建模成为完整反应地质信息的重要方法。王瑶 等(2017)实现钻孔、地质平面图和地质剖面数据的 融合,建立天津临港工业区的三维地质模型;Wang GW和HuangL(2012)基于钻孔、剖面两类数据实 现三维铜矿模型。多源数据的融合,实现数据间的 解译印证,提升了三维地质模型精度,但地质结构 模型准确度受融合技术(吴志春等,2016)与数据信 息量(Pan D D et al., 2020; 张源, 2021)的影响, 如 何高效实现多源钻孔数据与多源地质数据融合一 直是各国学者研究的重点。

国务院 2019 年印发的《粤港澳大湾区发展规 划纲要》明确了粤港澳大湾区的战略地位。南沙新 区作为粤港澳大湾区城市群的门户城市(钟嘉毅, 2018),其核心区明珠湾成为南沙新区重点打造的 粤港澳合作核心区和区域性综合服务中心(陈运 坤等,2020)。在"双区"格局背景下,大规模集中开 发建设,使得地面荷载不断加重,加之当地海陆相 软土发育,自固结作用明显(Liang S H 和 Zhou S Z, 2015),诱发的地面沉降已造成重大地质灾害,直接 经济损失高达人民币 5 亿元(陈小月,2018; Qiao F et al., 2020),极度影响地区经济的可持续发展。在 核心区城市建设规划中,充分开发利用地下空间, 有效预防地质灾害,亟待建立"透明城市"(Hou W S et al., 2016)。

南沙核心区城市建设过程中,积累大量多源地 质钻孔及地层属性信息,同时也收集到相关多源地 质资料,在此基础上,依托南沙三维地质结构模型 及信息平台分层次、分阶段实现数据的有效融合, 搭建地质空间数据库,实现以钻孔数据为主,其它 数据为辅的南沙核心区城市三维工程地质建模,以 期为南沙区城市地下空间的开发利用和地质灾害 的防治决策提供依据,并为南沙区地质环境信息平 台建设奠定基础。

1 地质概况

南沙新区位于粤港澳大湾区的几何中心(陈 松等,2020),位于珠江出海口的虎门水道西岸,东 与虎门隔海相望,西连中山市,是连接珠三角城市 群的枢纽性节点。区内地层分覆盖层与基岩。大部 分区域属于珠江三角洲冲积和人工堆积平原,为典 型的三角洲软土覆盖层性质,形成于晚更新世以来 的两次海侵构成了新、老两套三角洲沉积,自上而 下依次为全新统软土层和更新统软土层,由西北向 东南逐渐加厚。区内基底由古生界变质岩系构成, 最老岩石为下古生界震旦系变质砂岩、板岩、片岩 及硅质岩;大面积基岩为燕山期的细粒、中粒、粗粒 (或斑状)黑云母花岗岩,分布于黄山鲁一带以及黄 阁的大山乸等地;丘陵台地主要分布在南沙街道, 部分孤丘由白垩系红色砾岩组成;加里东期的混合 花岗岩分布于南沙深湾;中生代燕山运动使地台活 化,形成的主要断裂有沙湾断裂、万顷沙断陷(Liang SH和 Zhou SZ, 2015)。南沙核心区(明珠湾区)位于 粤港澳大湾区的中部,以三角洲平原地貌为主,北部 可见构造侵蚀丘陵台地。三角洲平原发育了较厚的 第四纪松散覆盖层,北部丘陵台地区云分布开岩系 及燕山期侵入岩。建模范围如图1所示。

2 构建数据库

2.1 数据源处理

通过野外调查和收集现有的图形、报告、数据 等资料,依据《城市地质调查数据库与信息系统建 设指南》,将建模源数据按照实体属性数据、基础空 间数据及文档资料数据等进行系统的分类、整理。 其中,实体属性数据为1329个钻孔3万余条地层 属性数据,基础空间数据为遥感影像1幅、地形地 貌1幅、基础地质3幅、贯穿全区的地质剖面4条 和物探剖面13条等,详见表1。

现有数据形式包含矢量、栅格和文本等多种, 具有多源、多尺度、多精度的特点,不易于集成运 用。需进行数据预处理,实现数据格式、比例尺、坐 标系以及投影参数的统一,构建统一的建模单元, 在数据标准化后导入建模软件。

(1)统一数据格式

数据格式的统一是后期地质建模的前提,也是 数据整合的基础。数据格式的统一主要是通过各种 软件实现矢量、栅格等数据的转换,本次主要采用 的软件主要有 Mapgis10、CAD、CSAMT-SW 等。将 矢量数据转换成南沙三维地质结构模型及信息平 台能够读取的点(WT)、线(WL)、面(WP)格式,将 栅格数据转换成平台能够识别的 TIF 或 MSI 格式, 散点数据则转换成文本文件格式。

(2)统一比例尺、坐标系和投影参数

数据参照系的统一是实现数据融合的关键。现 阶段主要通过比例尺、坐标系和投影参数实现空间 位置的统一,促进数据间的高度融合,从而提升模 型精度。现有的建模数据来自不同的学科、行业、单 位,而且时间跨度较大,导致数据不能统一到相同 的三维空间内,需对现有建模数据的比例尺、坐标 系、投影参数进行统一。

首先在 Mapgis10 软件的"投影变换"模块中对 矢量数据进行投影变换,在"图像处理"模块中实现 栅格数据的投影变换。对投影类型选用高斯一克吕 格(等角横切椭圆柱)投影,以中央经线和赤道投影 为坐标轴,中央经线与赤道交点为坐标原点,比例尺 为1:1000(仅为显示比例尺,不代表精度),采用 3° 分带。根据建模数据的特点,选取平面直角坐标系为 其坐标系类型,椭球参数选用国家 2000 坐标系。

(3)统一建模单元



图 1 南沙核心区三维地质建模范围及数据基础



1. 元古代片麻杂岩; 2. 元古代云开岩群变质含砾粗粒石英砂岩、变质砂岩等; 3. 古近纪古新世莘庄村组砂砾岩、含砾砂岩、粉砂岩等; 4. 第四纪全新世桂洲组灰黄色中细砂、细砂、粉砂质粘土夹深灰色淤泥、粉砂质淤泥,底部局部为浅黄-灰白色砂砾层、含砾粗砂、中细砂, 含有机质及腐木等; 5. 晚三叠世中细-细中粒斑状黑云母二长花岗岩; 6. 晚白垩世花岗斑岩; 7. 断裂及产状; 8. 南沙新区; 9. 南沙明珠湾区; 10. 南沙核心区三维建模区; 11. 建模地质钻孔及物探剖面

表1 建模源数据

Table 1 The source data of model construction

一级分类	二级分类	三级分类	数量
源数据	地理地形	1:5 万地理数据	1 (幅)
	遥感影像	原始影像	1 (套)
		1:5 万地质图	1 (幅)
	成果图件	1:50 万基岩地质图	1 (幅)
		1:50 万第四纪等厚线图	1 (幅)
		物探剖面	13条
	钻孔数据	工程地质钻孔	1329个
	剖面数据	剖面图	4条

由于数据的多源性、复杂性,同一个地质体可 能划分在不同地层。因此,需要在综合研究前人资 料的基础上,对不同时期、不同单位的资料进行整 合,构建统一的建模地层单元。南沙核心区地层岩 性主要为填土、全新世桂洲群各组、更新世礼乐群 各组、古近系红层以及燕山期各期次侵入岩。基于 地层分析建立的地层岩性情况,以地质时代及工程 地质岩组为地层划分的基本框架,按照地层时代确 定层组,进一步按照成因类型和工程地质性质细分 标准地层,以此确定建模区标准化地层,共形成 20 个地层单位,7个工程地质岩组,详见表 2。

本次建模收集了1329个钻孔数据,各个钻孔

之间并无相应的关联参数,但可充分利用钻孔数据 所蕴含的信息量,提取地层分层信息,结合专家经 验和其他勘察手段获取的成果,更好的提升模型精 度。因此在统一地质单元的基础上,进行钻孔数据 地层标准化。首先基于岩性进行钻孔分层,将数据 库中的 1329 个钻孔数据按照岩土特征进行分类, 再按照年代层序进行分层,实现钻孔地层标准化, 并参照国家 2000 大地坐标系,对钻孔位置、钻孔深 度等信息进行核对,使其与 DEM 数据、剖面数据 等相对应。最后依据标准地层分类,利用建模软件 的钻孔地层编码工具对钻孔数据进行标准化地层 编码。

2.2 三维空间集成

数据源预处理之后导入建模软件,形成建模数

据集,但依旧是以二维的形式展现,需要将数据集通 过三维空间定位、平面数据三维转换等处理,实现多 源数据的三维空间集成,构建原始资料数据库。

(1)三维空间定位

将南沙三维地质结构模型及信息平台读取的 点(WT)、线(WL)、面(WP)格式数据分别转换成 DXF格式,MSI格式数据转换成TIF格式,分别导 入建模软件。DXF格式数据和文本数据自身带有 坐标信息,导入软件后,数据能够自动精确定位,无 需再次校正。TIF格式数据,在"图像处理"模块中对 数据进行逐格网几何校正,将校正后的数据裁剪成 矩形,读取矩形图像的四个端点坐标进行重新定位。

(2)平面三维转换

钻孔数据导入建模软件后,能够自动形成三维

地层及代号	亚层及代号	地层岩性描述	工程地质分层	柱状图
填土 A	人工填土 A-1	以粘性土为主的各类填土		~~~~~~
	冲填土 A-2	冲填砂、冲洪积、坡积砂、砾石	項土	A-1
全新世桂洲 群 B	灯笼沙组 B-1	灰黄色粉砂质粘土、砂质粘土及粉砂、细砂层, 含贝壳或蚝壳	粘性土	A-2
	灯笼沙组 B-2	深灰色淤泥、粉砂质淤泥	淤泥、淤泥质土	
	万顷沙组 B-3	灰黄、灰褐、褐黄色中细砂、粗砾砂	砂性土	N B Z Z Z Z
	万顷沙组 B-4	深灰色淤泥、淤泥质粉细砂	淤泥、淤泥质土	B-3
	东升层 B-5	浅灰、灰黄、浅黄、褐黄及红褐色等,具花斑色 由黏土、粉质黏土、砂质黏土等组成	粘性土	
	横栏段 B-6	深灰 - 灰黑色淤泥、粉砂质淤泥、粉细砂及淤泥质粘土 等,局部含贝壳,底部含有机质、腐木等	淤泥、淤泥质土	B-5
	杏坛段 B-7	浅黄 - 灰白色砂砾层、含砾粗砂、中或细砂层、浅灰色 淤泥质粗、中、细砂层,含少量有机质	砂性土	<u>₿</u> -7
	大湾镇组 B-8	浅灰、浅褐色砂、砂砾、砂质粘土、粘土夹粉土		DO
更新世礼乐 群 C	三角层 C-1	灰黄、黄白、红黄色花斑状粉质粘土、粘土,局部为 粗砾砂、粗中砂等	砂性土	G-1 G-2
	西南镇组 C-2	灰黄色粉质粘土	粘性土	· 1-2
	西南镇组 C-3	深灰-灰黑色淤泥、淤泥质粘土	淤泥 淤泥舌土	<u></u>
	西南镇组 C-4	淤泥质粉细砂、粉细砂淤泥互层	<i>派化、</i>	
	石排组 C-5	粘粒质砂砾		C=5
	石排组 C-6	含砾粗砂、中粗砂、含砾粉砂	砂性土	· · · C ⊶¢
	石排组 C-7	褐黄色、灰白色卵砾石、砂砾		<u>6-7</u>
残坡积层 D	砂砾质粘性土 D-1	灰褐色、褐黄色、紫红间灰白、灰黄色粉质粘土、砂 质粘土及粘性土、砂砾质粘性土等	砂砾质粘性土	D-1
古近系 E	莘庄村组 E-1	砾岩、砂砾岩、泥岩及粉砂岩,夹泥灰岩和石膏	碎屑岩岩性组	<u> </u>
燕山期 H	侵入岩 H-2	中细 - 细中粒斑状黑云母二长花岗岩、细中粒斑状角闪 黑云母花岗岩	侵入岩岩性组	+ H-2 + -

表 2 标准化地层划分

Table 2 The divided layer standardization

数据。勘探线剖面图、物探剖面图等经过三维空间 定位,也能够实现三维显示。而矢量地质图、栅格地 质图和遥感影像图等数据,缺少高程属性,需要借 助 DEM 面进行三维转换。

2.3 多源数据融合

数据源预处理和三维空间集成主要是实现多 源数据的空间位置统一,构建原始资料数据库,而 多源数据的融合,是通过各种耦合插值技术,最大 化利用数据源信息,实现多源多尺度数据在地质内 容上的交叉融合统一,呈现更加完整精确的地质空 间三维信息,弥补单一数据的不足,提高地质模型 的准确性与可靠性。根据已有建模数据的类型和 特点,地质内容的融合主要分为不同精度数据的融 合、地表数据之间的融合、规则数据与离散数据的 融合、浅部数据与深部数据的融合等。

(1)不同精度数据的融合

原始数据来源多样,格式各异,自然数据的精 度差异大。不同精度数据间的融合主要是通过高精 度数据来约束、修正低精度数据。在南沙核心区城 市三维工程地质建模中,收集的数据有钻孔数据、 遥感影像、地形地貌图、物探剖面、地质图以及实 测地质剖面等,其中钻孔数据、地形地貌图、物探剖 面、实测地质剖面属于高精度数据,遥感影像以及 地质图的精度相对较低。在同一精度级别的数据 中,比例尺的大小也影响数据精度和可靠性的高 低,例如1.5万地质图和1.50万的基岩地质图中, 大比例尺的地质图精度相对较高。

(2)地表数据间的融合

在收集的原始数据中,地表数据主要有遥感影像、地形地貌图、地质图和实测地质剖面等,他们之间的融合需要借助 DEM 面。将矢量地质图导入南沙三维地质结构模型及信息平台中,对地质界线中的节点进行加密,并将地质界线沿着 z 轴方向投影到 DEM 面上,确保两者完全重合。之后通过地质界线对 DEM 面进行裁剪,使每小块 DEM 面与地质图中的地质体相对应,根据建模单元对小块的 DEM 面进行分类,修改面颜色,添加单元代号,形成三维矢量地质图。遥感影像、地形地貌图等数据作为 DEM 面的纹理,使平面图变成跟实际地形情况相一致的具有高低起伏的立体图。实测地质剖面

的处理是将其转换成地质填图路线,再将地质点、 分段路线、点间界线等要素投影到 DEM 面上,点 间界线和对应的产状生成分段地质界面,最终构成 地质填图路线剖面。遥感影像、地形地貌图、地质图 和实测地质剖面等数据都建立在 DEM 面之上,实 现地表数据间的融合。

(3)规则数据与离散数据间的融合

此类数据的融合,主要是根据数据的深度、精 度、分布范围,分层次、分阶段来实现。钻孔、实测地 质剖面等数据,分布相对离散、规律性不强,数据融 合的难度大;而物探剖面一般具有明显的规律性, 数据使用方便。因此根据数据的特点,从小到大、由 浅入深的分层次、分阶段进行融合,并在此过程中 利用物探与周边钻孔数据的融合校正物探解译层 面,有效提高模型精度。

(4) 浅部与深部数据间的融合

浅部与深部数据间的融合同规则数据与离散 数据间的融合方法一样,都是通过分层次、分阶段 来实现。前一阶段数据的融合可为后期数据的融合 提供参考与约束,而后期数据间的融合又可以反过 来对前期数据的融合进行修正与完善,是一个相互 约束、不断修正完善的过程。在这个过程中,通过 人机交互的方式,运用约束 – 插值技术进行数据插 值,使数据能够与实际情况相吻合,数据之间也能 平滑过渡,三维地质模型的精度进一步提高。

3 三维工程地质建模

3.1 模型设计

根据钻孔资料和各类地质成果资料分析确定 建模的深度控制在 200 m。三维平台将以 20 个地 层单元构建南沙核心区地层结构模型,以 7 个工程 地质分层构建南沙核心区地层结构模型,并赋予属 性建立属性模型。另外,沙湾断裂带主要隐伏于地 表之下,大面积分布于广州市番禺区和南沙区(陈 小月,2018),根据建模深度,模型尽可能反映沙湾 断裂带的几何特征。

3.2 地层面构建

利用南沙三维地质结构模型及信息平台,提取钻孔数据、遥感图像、高程数据与剖面数据等多种

数据源,对于丘陵、沿海等钻孔数据缺失的地区,增加虚拟孔来进行约束。其中地层高程的等值线疏密与边界地层的弧段疏密将影响到模型精度,需对高程等值线和地层弧段进行插值处理,在不改变原有文件的拓扑关系基础上提高模型精准度。

地层面模型的构建主要采用 DSI 离散光滑插 值技术分层次、分阶段来实现,包括地表面、土层面 以及基岩面。地表面模型的构建主要通过地形地貌 图、遥感影像参照 DEM 数据来实现,将平面比例 尺与高程比例尺标准一致化,将高程的线数据转换 成离散的点数据,从而创建地表面模型。地层面模 型是依据地层标准化钻孔,确定钻孔分层节点,提 取地层空间采样点,分析同一层采样点是否连续分 布或者尖灭,最后结合物探剖面进行离散光滑插值 处理,生成地层面模型。而基岩面模型,是从基岩地 质图提取各地层边界线的离散点,从地质构造图中 提取各断裂边界的离散点,设置好产状,利用点与 产状数据,构建基岩层面。

3.3 地质实体构建

整个建模过程中,三个层面的三角网在平面上 的投影模板相同,这样可保证各个地层沿着深度自 上而下都具有确定的、一致的拓扑关系,能够极大 地增强算法的稳健性,简化后续处理的复杂度。但 由于研究区的断层使地层面之间有交错,因此采用 半自动建模方式,通过人机交互方式,将交错处的 所有交点更新至模板中,从而可将断层、交错面分 离成若干子面,基于约束条件与专家经验,在三维 空间中保证各个子面之间的拓扑一致关系(图 2)。

(1)点对线的约束

实现断层交叉点(控制约束点)对地层控制线 的约束。首先保证断层面的完整性,提取断层线并 适当延伸,与现有构建的地层面地质界线形成交叉 点。以断层线方向为约束方向,以交叉点为控制节 点,适当增加断层线沿线的约束控制点,确保断层 处地质界线经 DSI 处理进行修正。

(2)点(线)对面的约束

实现断层交叉点和断层线对断层面的约束。在 通过多源钻孔等主要建模数据构建初始地质界面 的基础上,随着断层数据的增加,需要对模型的局 部面进行调整。主要依据断层交叉点和断层线,运 用约束 – 插值技术,连接相邻断层地质界线生成断 层面。





Fig. 2 3D engineering geological model of Nansha Core Area

A-1. 人工填土; A-2. 冲填土; B-1. 灯笼沙组粘性土; B-2. 灯笼沙组淤泥质土; B-3. 万顷沙组砂性土; B-4. 万顷沙组淤泥质土; B-5. 东 升层粘性土; B-6. 横栏段淤泥质土; B-7. 杏坛段砂性土; B-8. 大湾镇组砂性土; C-1. 三角层砂性土; C-2. 西南镇组粘性土; C-3、C-4. 西南镇 组淤泥质土; C-5、C-6、C-7. 石排组砂性土; D-1. 砂砾质粘性土; E-1. 莘庄村组碎屑砾砂岩; H-2. 花岗岩

(3)面对面的约束

运用面的边界约束功能实现断层两侧地质界 面的紧密接触。在地质界面的边界上增加端点来对 其分段,对需要延伸的边界设置"边界指向断层面" 的约束,通过插值处理使地质界面的边界自动延伸 并靠近断层面。

通过以上约束对地质体控制线的三维形态进 行调整,从而控制地质界面局部复杂区域的三维曲 面形态及实体的产状、走向等要素。最终通过构面 算法来构建平面、弧面及扭曲面等,采用合适的面 拼接方法进行拼接,避免复杂曲面出现自相交、不 封闭等问题。

由于本模型主要数据源为钻孔数据,加之钻孔 数据误差来源较多,我们采用钻孔数据函数自检方 式来进行模型检验,以避免数据误差过多影响后续 开展模型分析应用。从统计学角度,收集分析大量 钻孔数据中的各个地层厚度,让所采用的钻孔数据 进行函数自检,其中由于部分钻孔深度未至基岩底 部,自检基岩层不够精准,因此未列出基岩层的厚 度,自检结果见表 3。

在模型内各地层中随机选取 100 个钻孔数据, 经过数据统计分析可以得出以下结论:相比较而 言,更新世礼乐群和残坡积层两个地层的最大值误 差相对较大,但整体标准偏差和变异函数值均较 小,验证了模型精度较高。地层比较而言,填土地层 的标准偏差和变异系数均小于另外三组地层,分析 原因可能是,另外三组为第四系地层,地层分布面 积较广,而且厚度不一致,相邻钻孔间存在相差较 大现象,经实地结合网络地图核实,模型中反应的 地层厚度与实测数据极为相近,可知所建模型较标 准,可开展地层分析进行模型应用。

4 模型应用

4.1 地下空间开发利用

平原区工程地质调查的重点内容为查明地下 30m深度范围内地层结构、浅层地下水水位及水 质腐蚀性、不良地质现象,分析评价其岩土工程特 性(Qiao F et al., 2020)。本文结合南沙三维地质结 构模型及信息平台,基于 GIS 平台建立空间数据 库,运用"多源数据耦合层状地质体建模"方法建立 南沙核心区的三维工程地质模型,可清楚展示不同 岩土体类型在该区的分布情况(图 3),特别是不同 区域软土的厚度与基岩的深度,进而分析不同的地 基应用,指导城市地下空间规划。①浅层地下空间 (0-20 m):适合综合管廊、地下停车场及商场等建 设,需要注意软土沉降以及地下水腐蚀性等影响因 素。②中层地下空间(20-60 m):适合交通、物流等 市政基础设施建设,需要注意保护网纹红土隔水层 及底砾石含水层。③深层地下空间(60-200 m):适 合深部高速地铁、科研军事战略空间的建设,需要 注意断裂活动性、岩体富水性等问题。

4.2 广州地铁 4 号线及远期地铁规划建设

地铁等地下工程是城市最主要的地下工程 之一,地铁隧道是将地层开挖后沿开挖面修建而 成,其外边界构成了地层的内边界(Hou W S et al., 2016)。通过三维地质模型,按照广州轨道交通4号 线设定的路径和隧道截面参数生成隧道模型,可将 地质体的构造形态直观形象地展现(图4),辅助开 展符合工程地质规律的地铁4号线施工方案的设 计,减少因地质问题理解缺乏而造成的工程施工风 险,同时根据三维地质模型了解地质体的形态,也 为远期地铁规划建设提供工程设计依据。

4.3 预防地面沉降等地质灾害

地面沉降是一种隐性的缓变型城市地质灾害,

Tab 3 Drilling self-inspection statistical analysis table									
地层	样本数量	最大值	最小值	平均值	标准偏差	变异系数			
填土	100	6.5	0.4	2.265	0.98	0.24			
全新世桂洲群	100	7.2	0.7	3.855	1.79	0.29			
更新世礼乐群	100	16.4	0.5	5.735	2.45	0.39			
残坡积层	100	21	1.3	6.024	1.92	0.34			

表 3 钻孔自检统计分析表



图 3 南沙核心区地下空间分层开发利用示意图

Fig. 3 Schematic diagram of hierarchical development of underground space in Nansha core area

A-1.人工填土;A-2. 冲填土;B-1.灯笼沙组粘性土;B-2.灯笼沙组淤泥质土;B-3.万顷沙组砂性土;B-4.万顷沙组淤泥质土;B-5.东 升层粘性土;B-6. 横栏段淤泥质土;B-7. 杏坛段砂性土;B-8. 大湾镇组砂性土;C-1. 三角层砂性土;C-2. 西南镇组粘性土;C-3、C-4. 西南镇 组淤泥质土;C-5、C-6、C-7. 石排组砂性土;D-1. 砂砾质粘性土;E-1. 莘庄村组碎屑砾砂岩;H-2. 花岗岩



Fig. 4 The 3D geological profile of metro line 4 of Nansha Core Are A-1. 人工填土; B-2. 灯笼沙组淤泥质土; B-5. 东升层粘性土; B-7. 杏坛段砂性土; C-5. 石排组砂性土; D-1. 砂砾质粘性土; H-2. 花岗岩

具有不可逆性和累进性(Sun H et al., 2017)。为减少 地面建筑的荷载,缓解软土自固结作用,有效预防软 土诱发地面沉降,可通过可视化的三维地质模型,了 解地质基岩状况以及地表软土层的厚度分布情况, 指导工程区建设。南沙核心区建筑工程区可划分为 三类:①薄层软土工程区,软土层厚度小于10m,分 布于南沙街区及黄阁镇,区内基岩面较浅,采用合适 基础型式即可;②中层软土工程区,软土层厚度 10-20 m,分布在横沥镇和龙穴岛,基岩埋深 30 m,软土 层与粘土层、砂层交替分布,建筑物应采用桩基础, 以基岩作为持力层,针对软土地基可采用水泥搅拌 桩法和堆载预压法;③厚层软土工程区,软土层厚度 大于 20 m,分布在万顷沙镇、横沥镇等地,基岩面较 深,无理想持力层,建议采用桩基础,以基岩或坚硬 风化土层作为持力层,对于软土地基,可采用堆载 预压、塑料排水板及真空预压法,对于变形要求严 格且工期紧的工程,采用 CFG 桩复合地基。

5 结论

在三维地质建模过程中,建模数据的多源性是 其显著特点之一。本文以南沙核心区三维工程地质 建模为例,分层次、分阶段实现多源钻孔和多源地 质数据间的有效融合,并分析了南沙核心区模型空 间结构,提出一定的应用途径,得出以下结论。

(1)实现以多源钻孔为主,地质数据为辅的三 维地质建模分为三个阶段,分别为数据源处理、三 维空间集成和多源数据融合,完善了三维建模多源 钻孔数据融合技术的方法与基本原理。

(2)运用"多源数据耦合层状地质体建模"方法确定了南沙地下空间开发利用可分为三个层次,分别为浅层(0-20m)、中层(20-60m)和深层(60-200m)。

(3)三维地质建模实现地质结构的可视化,为 地铁路线规划提供工程设计依据,并将建筑工程区 划分为薄层软土(<10 m)、中层软土(10-20 m)和 厚层软土(>20 m)工程区,各区采用不同地基处理 方式来有效预防地质灾害。

感谢武汉中地数码科技有限公司潘声勇、黄玲、 王慧和刘静娜对本研究的辛勤工作和努力付出。

参考文献:

- 陈松,陈长敬,黄理善,赵信文,曾敏.2020.音频大地电磁 测深反演南沙新区地下空间岩性构造特征 [J].华南地 质,36(3):246-253.
- 陈小月.2018. 广州市南沙区软土地面沉降特征及城市防灾 减灾的建议 [J]. 地质灾害与环境保护,29(2):17-22.
- 陈运坤,高磊,屈尚侠.2020.广州南沙区软土工程特性及 软土分区评价[J].科技经济导刊,28(36):102-103.
- 何静,何晗晗,郑桂森,刘予,周圆心,肖景泽,王纯 君.2019.北京五环城区浅部沉积层的三维地质结构建 模[J].中国地质,46(2):244-254.
- 林良俊,李亚民,葛伟亚,胡秋韵,李晓昭,李云,孟晖, 张礼中,杨建锋.2017.中国城市地质调查总体构想与

关键理论技术 [J]. 中国地质, 44(6):1086-1101.

- 刘 娜,谢英情,楚 亮,毛 燕,闵照旭.2008.基于钻孔数 据的三维地质空间插值方法对比研究[J]. 地震研究, 31(S2):619-622+646.
- 屈红刚, 潘懋, 刘学清, 于春林.2015. 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, 34(7):1350-1358.
- 申 健,徐大伟,蔡雄翔.2008.基于钻孔数据的滑坡三 维地质建模研究 [J].东华理工大学学报(自然科学 版),31(2):127-130.
- 孙 敏,马蔼乃,陈 军.2002. 三维城市模型的研究现状评述 [J]. 遥感学报,6(2):155-160+168.
- 唐丙寅,吴冲龙,李新川,陈麒玉,慕洪涛.2015.一种基于 钻孔地质数据的快速递进三维地质建模方法 [J]. 岩土 力学,36(12):3633-3638.
- 万晓明, 凌丹丹, 马国玺, 马宇梅, 万小红.2020. 基于 GIS 的三维水文地质建模及应用——以咸阳市为例 [J]. 华 南地质与矿产, 36(1): 72-79.
- 王瑶,张像源,陈文杰.2017.基于多源钻孔数据的工程地 质三维建模方法及应用[J].中国矿业,26(S2):387-390.
- 吴志春,郭福生,林子瑜,侯曼青,罗建群.2016. 三维地质 建模中的多源数据融合技术与方法 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版),46(6):1895-1913.
- 许 珂,徐亚杏.2018. 基于 MapGIS-K9 软件的城市三维地 质建模方法探讨——以武汉市为例 [J]. 华南地质与矿 产,34(3):244-252.
- 张源.2021.城市三维地质建模方法研究[J].矿山测量, 49(1):65-68+88.
- 张夏林,吴冲龙,周琦,翁正平,袁良军,朱福康,李章林, 张志庭,杨炳南,赵亚涛.2020.贵州超大型锰矿集区 的多尺度三维地质建模[J].地球科学,45(2):634-644.
- 钟嘉毅.2018. 粤港澳大湾区建设背景下广州深化战略定位的思考——以南沙为例 [J]. 时代金融,(6):60-61.
- 周念清,杨浩博,杨磊,刘先林.2020. EVS 耦合地层-岩 性三维地质建模方法在南宁地铁工程中的应用[J]. 隧 道建设(中英文),40(2):238-245.
- 朱良峰,吴信才,刘修国,尚建嘎.2004.基于钻孔数据的三 维地层模型的构建[J].地理与地理信息科学,20(3):26-30.
- Alexander D H, Hitl E R, Smoot J L, Smith D R, Waldo K, Cerny B A, Krupka K M. 1990. Three-Dimensional

Visualization: Breakthrough in Analysis and Communication of Technical Information for Nuclear Waste Management[J]. MRS Online Proceedings Library, 212:797-808.

- Carlson E. 1987. Three Dimensional Conceptual Modeling of Subsurface Structures[J]. Technical Papers of ASPRS/ AGSM, Annual Convention, (4):188-200.
- Conde F C, Martínez S G, Ramos J L, Martínez R F, Colonia A M. 2014. Building a 3D geomodel for water resources management: case study in the Regional Park of the lower courses of Manzanares and Jarama Rivers (Madrid, Spain)[J]. Environmental Earth Sciences, 71(1):61-66.
- Guo J T, Wang X L, Wang J M, Dai X W, Wu L X, Li C L, Li F D, Liu S J, Jessell M W. 2021. Three-dimensional geological modeling and spatial analysis from geotechnical borehole data using an implicit surface and marching tetrahedra algorithm[J]. Engineering Geology, 284:106047.
- Hou W S, Yang L, Deng D C, Ye J, Clarke K, Yang Z J, Zhuang W M, Liu J X, Huang J C.2016. Assessing quality of urban underground spaces by coupling 3D geological models: The case study of Foshan city, South China[J]. Computers and Geosciences, 89:1-11.
- Houiding S W. 1994. 3D geoscience modeling-computer techniques for geological characterization[M]. Berlin: Springer-Verlag.
- Liang S H, Zhou S Z. 2015. Experimental research about mechanical properties and microscopic structures of Nansha soft soil stabilised with slag and cement[J]. Materials Research Innovations, 19(sup10):S10-69-S10-74.
- Mallet J L. 1989. Discrete smooth interpolation[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 8(2):121-144.

- Mallet J L. 1992. Discrete smooth interpolation in geometric modelling[J]. Computer-Aided Design, 24(4):178-191.
- Naji H S, Khalil M K. 2012. 3D geomodeling of the Lower Cretaceous oil reservoir, Masila oil field, Yemen[J]. Arabian Journal of Geosciences, 5(4):723-746.
- Pan D D, Xu Z H, Lu X M, Zhou L Q, Li H Y. 2020. 3D scene and geological modeling using integrated multisource spatial data: Methodology, challenges, and suggestions[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,100:103393.
- Qiao F, Bo J S, Qi W H, Wang L, Chang C Y, Zhang Z P, Wang J. 2020. Study on the dynamic characteristics of soft soil[J]. Royal Society of Chemistry Advances, 10(8):4630-4639.
- Sun H, Zhang Q, Zhao C Y, Yang C S, Sun Q F, Chen W R.2017. Monitoring land subsidence in the southern part of the lower Liaohe plain, China with a multi-track PS-InSAR technique[J]. Remote Sensing of Environment, 188:73-84.
- Tan X Q, Liu Y Y, Zhou X Z, Liu J D, Zheng R C, Jia C. 2019. Multi-parameter quantitative assessment of 3D geological models for complex fault-block oil reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 46(1):194-204.
- Velasco V, Gogu R, Vázquez-Suñè E, Garriga A, Ramos E, Riera J, Alcaraz M. 2013. The use of GIS-based 3D geological tools to improve hydrogeological models of sedimentary media in an urban environment[J]. Environmental Earth Sciences, 68(8):2145-2162.
- Wang G W, Huang L. 2012. 3D geological modeling for mineral resource assessment of the Tongshan Cu deposit, Heilongjiang Province, China[J]. Geoscience Frontiers, 3(4):483-491.