

微重力测量在城市地下空间探测应用研究

乔中坤^{1,2)}, 张宗宇¹⁾, 袁鹏¹⁾, 张家俊¹⁾, 李林玲¹⁾

1) 浙江工业大学理学院、浙江省量子精密测量重点实验室, 杭州, 310023;

2) 浙江工业大学前沿交叉科学研究院, 杭州, 310023

关键词: 重力勘探; 城市地下空间探测; 微重力测量

城市地下空间探测是解决城市地下问题的重要途径, 探明城市地下空间地质构造对于城市开发具有重要意义。如何更好的实现城市地下空间“透明化”是人们一直在探索的问题; 传统的勘探方法可能会对原有环境造成破坏, 难以在复杂的城市环境中开展; 而地球物理勘探方法具有无损探测的特点, 能够很好的获取城市地下精细结构信息。重力勘探是最常用且有效的地球物理勘探方法之一, 使用高精度重力仪采集测区范围内重力场的微小变化, 通过数据分析获得地下空间异常, 该方法具有精度高、分辨率高、成本低、效率高、环保绿色等优点, 可以很好的适应城市环境。本文介绍了重力勘探方法, 对微重力测量原理进行阐述, 构建了空洞异常模型并进行仿真, 为开展重力测量提供理论支撑; 最后在试验场地开展空洞模型试验测试, 验证微重力测量在城市地下空间探测的可行性(胡强等, 2015)。

1 微重力测量介绍

1.1 背景介绍

重力方法作为传统的地球物理勘探方法之一, 广泛应用于矿产、油气、地质构造、地震研究等方面(秦朋波, 2016; 乔中坤, 2017)。随着传统重力仪精度的提升、冷原子干涉重力仪等新技术的出现, 仪器分辨率能达到微伽, 满足微重力探测工作需求。微重力法以地下介质间的密度值差异为物理基础, 通过研究局部密度不均体引起的微弱重力变化、范围及规律来解决地质问题。微重力探测城市地下塌陷区是通过使用 μ Gal 级精度重力仪采集测区范围内重力场的微小变化、利用有效的数据处

理、图像分析方法, 准确地进行异常场分离并进行反演解释, 获得地下细小地质异常体空间分布特征, 达到探测地下空间的目标, 具有精度高、分辨率高、探测速度快、成本低、效率高等优点(卢进延, 2020)。为了验证微重力测量在城市地下空间探测应用的可行性, 浙江工业大学量子精密测量团队根据工程中经常出现的空洞隐患构建了不同尺寸、埋深组合空洞模型进行仿真模拟, 并在校内试验场地建设空洞模型、开展重力测量实验。最后本文对实测数据与理论正演模型数据进行对比, 验证该方法在城市地下空间探测的可行性。

1.2 测量原理

在笛卡尔坐标系下, 根据万有引力定律, 地下地质体内部任意一点在其外部空间产生的作用力为:

$$V(\vec{r}) = G \iiint_V \frac{\rho}{r} dV \quad (1)$$

其中, $\vec{r}$ 表示观测点 $P(x, y, z)$ 到地质体内部异常点 $Q(\xi, \eta, \zeta)$ 的矢量。 G 为万有引力常数。

由万有引力定律知, 异常点 Q 在观测点 A 处的引力位为:

$$V(\vec{r}) = G \iiint_V \frac{\rho}{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2 + (\zeta-z)^2} d\xi d\eta d\zeta \quad (2)$$

由(1.1)(1.2)两式可推出任意三度体重力基本公式:

$$V_z = \frac{\partial V}{\partial z} = -G\rho \iiint_V \frac{(z-\zeta)d\xi d\eta d\zeta}{((x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2)^{3/2}} \quad (3)$$

在微重力测量中, 重力的单位为 μ Gal, 1μ Gal = 10^{-8} m/s^2 。

1.3 测量仪器

按照测量原理, 重力测量的仪器分为相对重力

注: 本文为国家重点研发计划资助项目(编号: 2022YFF0607504)和浙江省自然科学基金(编号: LQ23D040001)的成果。

收稿日期: 2023-04-10; 改回日期: 2023-05-06; 责任编辑: 刘志强。DOI: 10.16509/j.georeview.2023.s1.178

作者简介: 乔中坤, 男, 博士, 硕士生导师, 固体地球物理专业; Email: qiaozhongkun007@163.com。

仪和绝对重力仪。相对仪器具有体积小、成熟度高、成本低、稳定性强等优点,可满足高精度重力测量需求,常见的高精度相对重力仪主要有加拿大 CG-6 石英弹簧重力仪,美国 Burris 金属弹簧重力仪,两种重力仪测量分辨率为 $1 \mu\text{Gal}$ 。基于冷原子干涉等原理的绝对测量仪器具有高精度、长期稳定性、无零漂等优点,可用于校准相对重力仪器长期漂移误差,是未来高精度重力测量仪器发展方向之一。其中,浙江工业大学量子精密测量团队是国内最早开展原子重力仪研究团队之一,研究成果已经应用于地震台绝对重力连续观测,并成功开展船载、车载等动态测量实验,随着体积重量优化,未来将在城市地下空间探测领域发挥重要作用。

1.4 空洞模型实验

将地下空间划分为 $50 \times 50 \times 20$ 个单元格,且在 X、Y、Z 方向上每个单元格长度均为 0.5 m,空洞异常体埋深 0.5 m,异常体尺寸长宽高 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 和 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$,密度为 0,围岩密度 2.67 g/cm^3 ,剩余密度为 -2.67 g/cm^3 ,可得到图 2 测试场地剖面模型示意图。本次试验采用 CG-6 和 Burris 两台仪器对模型构建前后数据进行对比,对实测重力数据进行处理,得到模型重力异常剖面图及残差图(图 3)。

实测数据由于受地形高度等影响,重力异常随点号成上升趋势,经过地形、高度等改正后得到重力异常值,如图 3 所示,在异常体附近重力异常明显,且与理论数据较为符合。综合改正数据残差,实测数据整体符合模型预期,但在 17 号点附近出现异常,结合实际施工情况,认为该异常是由于实际施工与理论模型位置出现一定偏差,使得在异常体模型边缘附近出现异常情况。考虑实测过程中存

在人为测量误差,认为实测数据经过改正后的数据符合理论正演所得模型。

2 结论

为了验证微重力及梯度测量的可行性,本文阐述了微重力测量的原理;通过异常体模型重力测量,对 CG-6、Burris 实测重力异常数据进行分析处理,得到模型重力异常图。重力异常数据可以较为清晰地识别出异常体分布情况,对地下异常体有较好的分辨能力,与实际空洞数据较为吻合,从而证明了微重力探测在城市地下空间探测的可行性,为工程勘探、考古探测、岩溶等城市地下空间探测提供了新的思路方法。

参 考 文 献 / References

- 卢进延. 2020. 微重力测量及浅层地震在岩溶勘查中的应用. 广东化工, 47(20): 124~126.
- 胡强, 伍吉仓, 郑二龙等. 2015. 利用微重力测量探测城市地下孔洞. 工程勘察, 43(11): 74~78.
- 乔中坤. 2017. 重力及张量数据联合反演研究及在 Vinton Dome 地区的应用. 吉林大学学位论文.
- 秦朋波. 2016. 重力和重力梯度数据联合反演方法研究. 吉林大学学位论文.

QIAO Zhongkun, ZHANG Zongyu, YUAN Peng, ZHANG Jiajun, LI Linling: Research on the application of microgravity measurement in urban underground space exploration

Keywords: gravity exploration; urban underground space exploration; microgravity measurement



图 1 测量现场及空洞模型

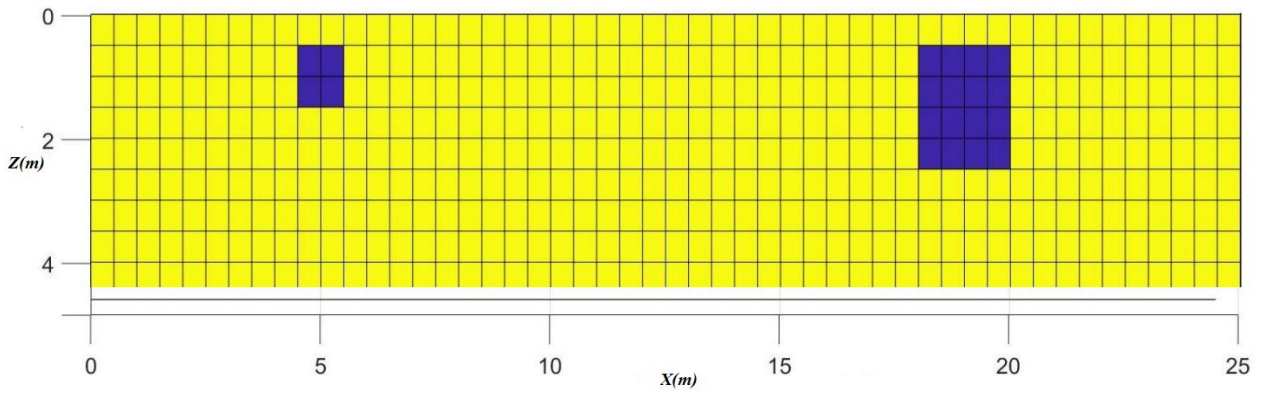


图 2 空洞模型示意图

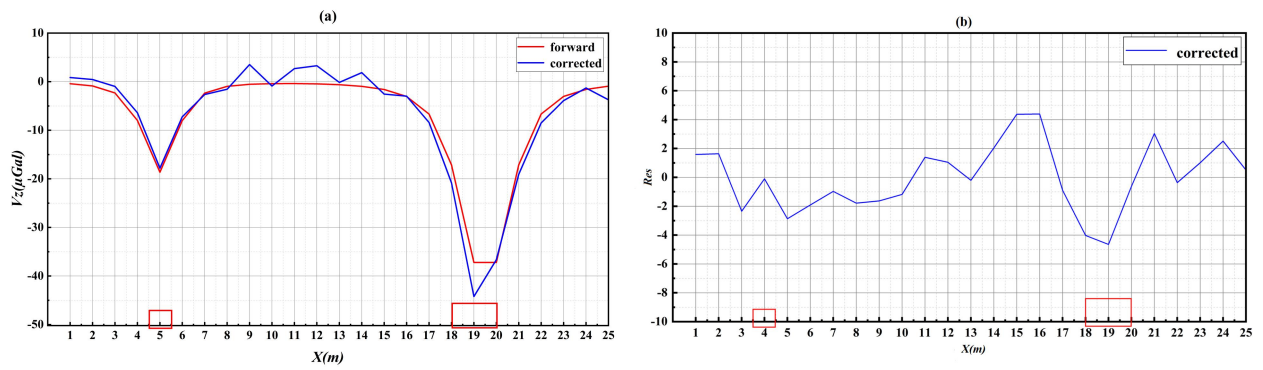


图 3 重力异常及残差图

(a) 重力异常理论与改正值 (b) 实测重力异常残差