

文章编号: 1007-2993(2026)03-0418-05

微重力测量在探测地下构筑物中的应用

张艳国 刘振旺 佟利明

(天津华北勘测设计院有限公司, 天津 300181)

【摘要】 在工程勘察或地基处理之前, 需要探测出场地内遗存地下构筑物的位置和规模。然而, 当场地内存在大量建筑垃圾、老旧基础以及电磁干扰等多种不利因素时, 会导致一些常用地球物理探测方法应用受限。微重力测量方法对场地要求低, 可突破上述不利因素限制, 在探测地下的质量异常方面具有明显的优势。本文利用 CG-5 高精度重力仪, 对天津市某机械厂城市更新场地的原地下设备间进行探测, 经过数据处理和分析, 确定了原地下设备间的位置和大致的平面分布情况, 为后续的工程勘察和地基处理工作提供了依据, 同时也为同类型场地内浅埋地下构筑物的探测积累了经验。

【关键词】 工程勘察; 微重力测量; 地下构筑物; 探测

【中图分类号】 P223

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0166

Application of microgravity measurement in detecting underground structures

ZHANG Yanguo LIU Zhenwang TONG Liming

(Tianjin North China Survey and Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300181, China)

【Abstract】 It is necessary to detect the location and scale of underground structures remaining on the site before engineering investigation or foundation treatment. However, when there are various unfavorable factors such as a large amount of construction waste, old foundations, and electromagnetic interference in the site, it can limit the application of some commonly used geophysical detection methods. The microgravity measurement method has low requirements for the observation site and has significant advantages in detecting underground mass anomalies. This research uses CG-5 high-precision gravity meter to detect the original underground equipment room of a machinery factory in Tianjin. After data processing and analysis, the location and rough plane distribution of the original underground equipment room were determined, providing a basis for subsequent engineering surveys and foundation processing. At the same time, experience has been accumulated for the detection of shallow buried underground structures in the same type of site.

【Key words】 engineering investigation; microgravity measurement; underground structures; detection

0 引言

城市更新项目的建设场地相较于未开发地块或常规场地更为复杂多元。在岩土工程勘察时, 未被完全拆除的浅埋地下构筑物会导致勘察设备损坏或数据失真, 给场地工程勘察和地基处理工作带来较大的困难和挑战。因此, 在遗存浅埋地下构筑物场地进行工程勘察或地基处理之前, 探测出构筑物位置和规模十分必要。地球物理探测技术作为一种有效的探测手段, 在工程勘察领域已得到广泛的应用, 常用地球物理方法主要有浅层高密度电法^[1-2]、综合测井^[3]、地质雷达^[4]、重力测量^[5]等。然而, 在城市更新项目场地, 一般存在大量建筑垃圾、老旧基础以及电磁干扰等多种不利因素, 致使高密度电法、地质雷达等方法的应用效果不够理想, 而微重力测量方法对探测场地

条件要求低, 且具有快速、经济等优点, 在探测地下的质量异常、地下孔洞坑道及人工构造具有明显的优势^[6], 近年来微重力测量技术被逐步推广应用于工程地质勘察^[7-11]。

天津某机械厂城市更新项目场地遗留旧设备间及基础, 为探测其分布位置, 在借鉴前人探测经验的基础上, 采用 CG-5 高精度相对重力仪对场地进行了探测, 查明了场地内遗存的原地下设备间的位置和大致的平面分布情况, 为后续工程勘察和地基处理工作提供了依据。本文详细介绍了微重力测量技术在该项目场地探测中的应用情况, 可为同类型场地内浅埋地下构筑物探测提供借鉴和参考。

1 基本原理

微重力法又称高精度重力法, 是利用地下密度

异常体引起的剩余重力异常进行地下介质探测的一种方法,其观测精度为微伽级。除了进行常规重力(观测精度为毫伽级)观测数据各项改正之外,为确保达到微伽级观测数据的质量要求,对于微重力观测得到的数据还需进行近物体影响的改正和在一定范围内的建筑物影响的改正。

背景项目场地内原地下设备工作间与周围均匀地层存在一定的密度差异,该特点为微重力测量的实施提供了较好的地球物理条件。通过开展微重力测量工作,理论上可实现查明原有地下设备工作间位置和规模的目的。

2 场地概况与测量

2.1 场地概况

场地原为天津某机械厂旧址,原主厂房位于厂区东南角,局部有1层地下室,为地下设备工作间,埋藏深约2.0~3.0 m。主厂房地表建筑已拆除,桩基础尚未清除。地表回填土主要为杂填土,土质均匀性较差,夹杂大量混凝土块等建筑垃圾,场地未完全平整,地表一般条件如图1所示。场地周围环境较简单,西侧、北侧及东侧均为空地,地表较平整,南侧近邻道路、空地,地形平坦。距测区北侧约70 m附近有两栋6层居民楼(见图2)。



图1 场地地表条件

Fig. 1 Surface conditions of the site

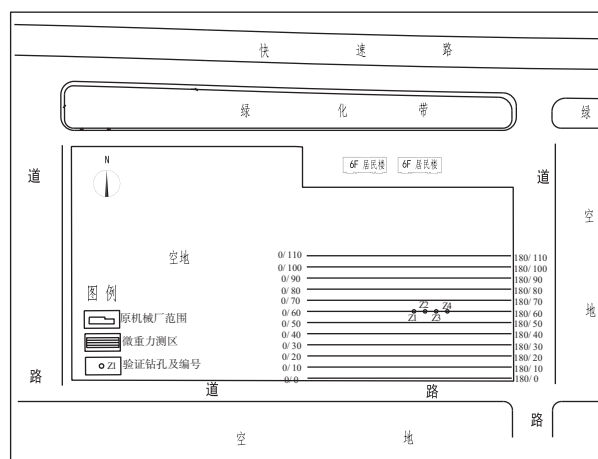


图2 测网布置示意图

Fig. 2 Layout diagram of the survey network

因原有工程资料缺失,地下设备工作间的位置及分布范围不详,需用物探手段探测出其位置。由于大量建筑垃圾分布杂乱、老旧基础尚未拆除,高密度电法、地质雷达等常用物探方法在该场地应用受限,而微重力测量方法受上述因素影响不大,可作为一种探测选择方案。

2.2 仪器设备

重力仪型号为CG-5,读数分辨率1 μGal ,重复精度5 μGal ,漂移小,能自动进行潮汐修正、仪器倾斜修正、温度修正、噪声修正,适合野外流动重力测量。

观测点平面坐标与高程使用全站仪测定。

2.3 测线布置及测量

原机械厂主厂房位于原厂区东南角,长约180 m,宽约110 m,本次高精度重力测量测线线距为10 m,点距为5 m,共布设测线12条,总测点数432个。

为提高微重力观测的精度,测点微重力观测首先进行基点—辅点—基点观测,基点3次读数,辅点2次读数;然后进行测点观测,每个测点读数2次。平均数采用四舍五入法记录,最后闭合于重力基点。在重力测量的过程中同时记录测量高度数据,以及每站重力读数的时间和各个点位的重力测量值,观测时间采用北京时间24 h制,精确到分钟。

3 数据处理及成果验证

原机械厂主厂房地下设备间属于地下质量异常体,为了研究浅埋设备间的分布和物性特征,需要进行数据处理,以将目标异常质量产生重力效应从叠加重力效应中分离出来。实测重力异常数据处理,除潮汐改正、仪器倾斜改正等由仪器自动完成外,还进行了地形改正、中间层改正等多项改正。

在城市地区开展微重力测量工作时,测区一定范围内的建筑物等近物体对测量结果产生的影响可能会掩盖探测目标体产生的重力异常。因此,数据处理时要考虑测区一定范围内的近物体对观测结果的影响。为此,本文计算了测区北两栋6层居民楼对测量结果的影响。

3.1 地形及中间层改正

采用计算机正演计算重力地形改正值,把测量区域各测点坐标及高程数据网格化处理,使之成为5 m \times 5 m的网格数据,以测点为中心将四周地形分割成5 m \times 5 m小块,再计算出每一小块地形质量对测点的重力值,最后累加求和得到该测点的地形影响值。

选取大地水准面作为参考高程面,中间层重力

作用值^[12]为

$$\Delta g_z = -41.91\rho\Delta h \quad (1)$$

式中: Δh 为校正测点和大地水准面之间的高程差, m;
 ρ 为无限水平板的密度, kg/m^3 。

高度校正值^[13]为

$$\Delta g_{\text{ZFA}} = 308.55\Delta h \quad (2)$$

式中 Δh 物理意义与式(1)中的相同。

3.2 近仪物体影响计算

本次工作测区北侧约 70 m 处有两栋 6 层居民楼, 高约 20 m, 需要计算其对本次微重力测量结果的影响。居民楼可近似为规则的长方体, 因此, 在进行地面建筑物的影响校正时要采用直立长方体模型的计算公式^[14]:

$$\Delta g = -G\rho \left\{ x \ln(y+r) + y \ln(x+r) + z \arctan \frac{zr}{xy} \right\} \Big|_{x_1, y_1, z_1}^{x_2, y_2, z_2} \quad (3)$$

式中: $x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2$ 为在重力测量点 P 为原点的 P_{-xyz} 坐标系下的坐标值, 如图 3 所示; ρ 为建筑物的平均密度; G 为引力常数; $r = (x^2 + y^2 + z^2)$ 。参考工程经验, 本次工作测区建筑物密度 ρ 取值为 950 kg/m^3 。

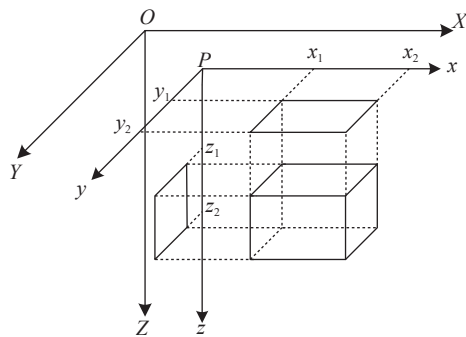


图 3 居民楼重力效应改正模型

Fig. 3 Model for gravity effect correction of residential buildings

按式(3)计算, 测区北侧两栋 6 层居民楼对所有站点产生的影响为 $0.065 \sim 0.431 \mu\text{Gal}$, 而各测点的实际观测值约为 $-15 \sim 115 \mu\text{Gal}$, 地下构筑物产生的剩余重力异常约为 $-65 \sim 40 \mu\text{Gal}$ 。因此, 居民楼产生的影响可以忽略不计。

3.3 成果分析及验证

经数据处理后, 测区重力异常平面图如图 4, 为突出目标体异常特征, 将远离极值的测点重力异常值取平均作为测区的背景值, 剔除背景值后为测区的剩余重力异常(见图 5), 剩余重力异常三维图见图 6。

根据图 5, 在 40—70 号测线之间的 100—130 号测点范围内有一处明显的重力负异常区域, 异常形态较规整呈南北向展布, 异常中心极值约 $-65 \mu\text{Gal}$ 。通过对物性特征分析, 认为在测区重力正异常背景下存在的一定规模的重力负异常区域可作为推测原地下设备间的依据。因此, 图 5 虚线方框内的剩余重力负异常区域推测为原地下设备间的中心范围, 其他局部高重力异常推测为由场地表层杂填土厚度不均或原厂地区地下未清除的老旧基础所引起。

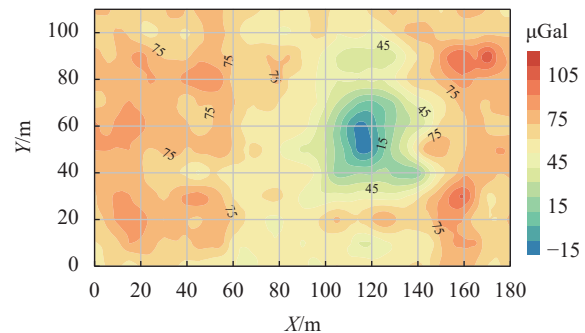


图 4 重力异常等值线平面图

Fig. 4 Plan of gravity anomaly contour lines

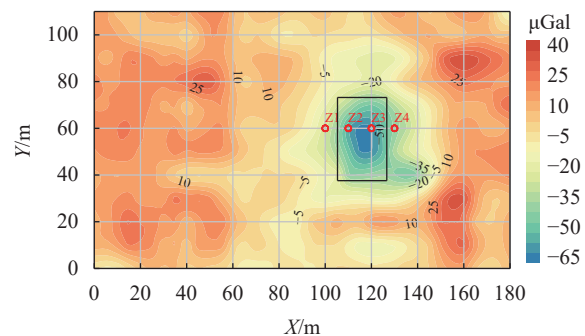


图 5 剩余重力异常等值线平面图(仅高度改正)

Fig. 5 Plan of residual gravity anomaly contour lines (height correction only)

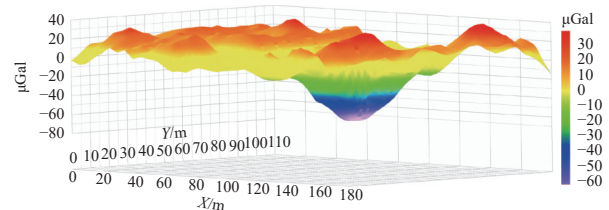


图 6 剩余重力异常三维图

Fig. 6 Three dimensional map of residual gravity anomaly

为验证微重力测量的探测效果, 对推测原地下设备间区域进行了钻探验证。在剩余重力异常小于 $-20 \mu\text{Gal}$ 的区域内共布设 4 个验证孔, 编号分别为 Z1、Z2、Z3、Z4, 孔深为 20.0 m, 孔间距为 10 m, 具体位置见图 5。钻探揭示: Z2 与 Z3 孔在埋深约 2.0 m 以浅均为杂填土; 在埋深 2.0 ~ 6.0 m 处见原地下设

备工作间,该工作间顶板混凝土厚度约 30 cm、底板混凝土厚度约 50 cm,顶板与底板之间为空腔;6.0~20.0 m 均为粉质黏土及粉土等自然沉积土层;Z1 与 Z4 孔表层为厚约 2.4~3.4 m 杂填土,其下至埋深 20.0 m 均为黏土、粉质黏土等自然沉积土层(见图 7)。

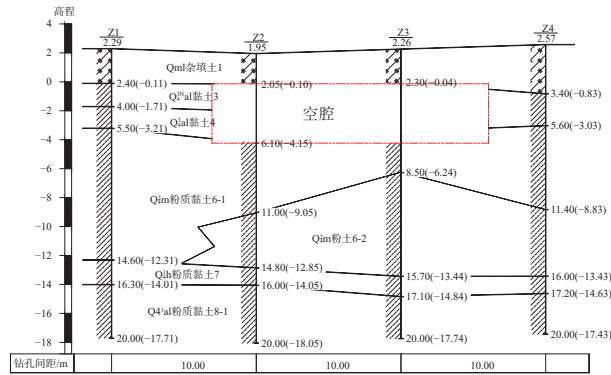


图 7 验证钻孔剖面图

Fig. 7 Verification borehole profile

根据本次测量成果大致圈定了原地下设备间的位置及分布范围,为后续工程勘察和地基处理工作提供了依据。结果表明,利用微重力方法探测地下浅埋的具有一定规模质量异常体的效果较好,可大致确定异常体的位置和平面分布特征,而在依据异常特征确定异常体的大小及埋深等信息方面还有待进一步深入研究。

4 结论与建议

(1) 针对地表条件复杂的场地,采用微重力测量方法探明了场地内遗存的浅埋地下设备间的位置。探测效果表明,微重力测量方法在解决工程勘察中浅埋构筑物探测的问题上可发挥重要作用。

(2) 背景工程周边建筑物对微重力测量结果影响甚微,可忽略不计。但在利用微重力测量时,若所探测场地周边存在体量较大建筑物、土堆等近仪物体时,应考虑近仪物体质量对测量结果的影响,必要时要进行近仪质量校正。

(3) 利用微重力测量方法可圈定出场地内地下目标体的位置,并揭示其平面分布特征,但对其具体大小及埋深等信息还有待进一步研究。今后开展类似探测时,可对目标区加密测量并对数据进行定量反演研究,以确定探测目标体的大小和埋深信息。

参 考 文 献

[1] 郭秀军,王兴泰.用高密度电阻率法进行空洞探测的几个问题[J].物探与化探,2001,25(4):306-311,315. (GUO X J, WANG X T. Some problems in the

application of high density resistivity method to cavity exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2001, 25(4): 306-311,315. (in Chinese))

- [2] 王建飞.高密度电法在工程地质勘察中的应用——以云南曲靖危险废物集中处置区为例[J].云南大学学报(自然科学版),2017,39(S2):317-321,330. (WANG J F. Application of high density electrical method in engineering geological prospecting: a case study of hazardous waste centralized disposal in Qujing City[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2017, 39(S2): 317-321,330. (in Chinese))
- [3] 李振海,刘建军.地下非开挖管线探测方法简介与应用[J].勘察科学技术,2019(3):55-60. (LI Z H, LIU J J. Brief introduction and application of underground non-excavation pipeline detection method[J]. Site Investigation Science and Technology, 2019(3): 55-60. (in Chinese))
- [4] 范昭平,张丽华,路 勋.探地雷达在多年冻土区公路工程勘察中的应用[J].工程勘察,2010,38(3):91-94. (FAN Z P, ZHANG L H, LU X. Application study on ground penetrating radar for highway engineering exploration in permafrost region[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(3): 91-94. (in Chinese))
- [5] 马 为,范 剑,袁 航,等.综合地球物理方法探测地下掩埋井口的效果研究[J].工程勘察,2015,43(11):93-96. (MA W, FAN J, YUAN H, et al. Effect study on integrated geophysical methods to detect underground buried well[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 43(11): 93-96. (in Chinese))
- [6] 江 东.重力梯度测量探测地下人造空洞的研究[D].郑州:解放军信息工程大学,2012. (JIANG D. Underground man-made vacancy detection from gravity gradiometry[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2012. (in Chinese))
- [7] 王延涛,潘瑞林.微重力法在采空区勘查中的应用[J].物探与化探,2012,36(S1):61-64. (WANG Y T, PAN R L. Application of micro-gravity method in survey of goaf[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(S1): 61-64. (in Chinese))
- [8] 袁炳强,杨明生,刘士毅,等.高精度重力测量探测秦始皇帝陵地宫[J].地球科学——中国地质大学学报,2005,30(4):498-502. (YUAN B Q, YANG M S, LIU S Y, et al. Exploring the underground palace of the emperor Qinshihuang mausoleum with high precision gravity survey[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2005, 30(4): 498-502. (in Chinese))
- [9] 郇恒飞,高 铁,赵海卿,等.高精度重力测量在抚顺煤

- 矿采空区探测中的应用 [J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(6): 194-200. (HUAN H F, GAO T, ZHAO H Q, et al. Application of high precision gravity survey in detecting mined-out areas of Fushun coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(6): 194-200. (in Chinese))
- [10] 吴治国, 臧凯, 刘洪波, 等. 高精度海底重力测量在探测隐伏断裂中的应用 [J]. 华北地震科学, 2024, 42(1): 18-24. (WU Z G, ZANG K, LIU H B, et al. Application of high precision seabed gravity measurement in detecting concealed faults[J]. North China Earthquake Sciences, 2024, 42(1): 18-24. (in Chinese))
- [11] 胡强, 伍吉仓, 郑二龙, 等. 利用微重力测量探测城市地下孔洞 [J]. 工程勘察, 2015, 43(11): 74-78. (HU Q, WU J C, ZHENG E L, et al. Detecting underground cavities in urban areas with micro-gravity measurements[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 43(11): 74-78. (in Chinese))
- [12] 王谦身, 张赤军, 周文虎, 等. 微重力测量——理论、方法与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1995: 2-4. (WANG Q S, ZHANG C J, ZHOU W H, et al. Microgravity survey—theoretical method and application[M]. Beijing: Science Press, 1995: 2-4. (in Chinese))
- [13] NAGY D, PAPP G, BENEDEK J. The gravitational potential and its derivatives for the prism[J]. Journal of Geodesy, 2000, 74(7/8): 552-560.
- [14] 李凤廷, 孟军海, 苗虎林, 等. 高精度重力测量中城市建筑物的影响及其校正 [J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(5): 686-691. (LI F T, MENG J H, MIAO H L, et al. The influence of city buildings on high precision gravity measurements and its correction[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(5): 686-691. (in Chinese))

收稿日期: 2025-04-10