

关于提高储罐沉降与倾斜测量精度的探讨

杨晓军（上海金地工程勘察有限公司，上海 200540）

摘要：本文阐述了采用精密几何水准测量技术对上海孚宝港务有限公司1#储罐区进行综合性的沉降与倾斜观测，对储罐沉降测量的误差进行了分析，并进一步探讨了提高观测精度的理论和方法。项目实施中，通过精确布设高程控制点和运用闭合水准路线，通过测绘人员现场严谨的测绘，确保了测量数据的高精度和可靠性。通过取得的测绘数据来判定储罐的沉降及倾斜状况，找出罐区地面开裂的原因。文章最后简要探讨了通过不断优化测量方法和新老技术的综合应用，提升建筑物沉降与倾斜测量的观测精度及效率，为建筑物的稳定性管理提供强有力的支持。

关键词：储罐沉降；倾斜测量；精密几何水准测量；全球导航卫星系统（GNSS）；激光扫描

1 引言

在现代建筑工程领域，建筑物的沉降与倾斜监测是确保其安全、稳定运行的重要环节。随着建筑技术的发展和建筑物规模的增大，对沉降与倾斜测量技术的精确度要求越来越高。几何水准测量、全球导航卫星系统（GNSS）技术与激光扫描等方法是目前广泛应用于建筑物沉降与倾斜测量的主要技术。这些技术各有特点，能提供不同精度的测量结果，对工程安全评估和长期稳定性监控起着至关重要的作用。通过对这些测量技术的原理、方法及其应用的探讨，评估各技术的测量精度，从而为实践中的技术选择和优化提供科学依据。

2 案例研究：上海孚宝港务有限公司漕泾储罐区1#罐区沉降观测

2.1 工程概况与观测目标

上海孚宝港务有限公司漕泾储罐区1#罐区位于上海漕泾化工区，化工区由围海而成。由于储罐区内储罐基础周围地坪出现了开裂现象，进而引起了对于该区域内所有14只储罐稳定性的关注。本项目的主要观测目标是通过精确的沉降测量来判断各储罐基础是否存在不均匀沉降，并据此评估其稳定性，找出地坪开裂的原因，以预防可能的安全风险。在实施沉降观测时，对每个储罐基础的四个方向（东、南、西、北）设置沉降观测点。通过对这些点的持续监测，可以捕捉到任何存在的不均匀沉降现象。初次测量周期安排为一个月，期间每周同一固定时间进行一次测量，共计四次。随后，进入第二个测量周期，持续六个月，期间每月同一固定时间进行一次测量，共六次。这种分阶段、高频度的测量安排，旨在通过累积数据来描绘出各储罐基础沉降的详细情况和趋势。

2.2 测量方法与监测方案

项目高程测量控制网由基准点和工作基点组成，根据本罐区的特征和测量精度要求，本次沉降监测采用二等水准测量技术要求，水准路线布设为二等闭合水准路线，以位于联合路州工路口水准基准点PG11为本次测量的起算点，在罐区附近稳定处布设3个工作基点D1、D2、A1（详见图1沉降点布置图）。每次测量前均须验证工作基点的稳定性。沉降点测量采用几何水准测量的方法，在工作基点的基础上对沉降点进行观测，测点精度满足现行国家规范的规定。仪器采用精密水准仪和钢钢水准尺。水准仪的*i*角定期进行检定。外业观测采用闭合水准路线，每站可观测多个测点，路线闭合差小于 $\pm 1.0\sqrt{n}$ mm（*n*为测站数），观测点测站高差中误差 ≤ 0.5 mm，视线长度小于30m，视线高出地面0.3m。外业观测结束后，进行平差计算，并进行精度评定。有效保证了测量数据的准确性和可靠性。表1为二等水准路线的主要技术指标。

项目采用了“罐东、南、西、北四个方位沉降点的沉降差与罐直径的比值”作为计算倾斜的方法。这种方法不仅简洁明了，而且能够有效地判定罐体在东西向、南北向的倾斜情况及倾斜方向，为罐区的稳定性评估提供了重要数据支持。

表1 二等水准路线的主要技术指标

等级	每千米高差中数中误差		测段、区段、路线往返测高差不符值	检测已测测段高差之差
	偶然中误差 $M\Delta$	全中误差 M_w		
二等	$\leq \pm 1$	$\leq \pm 2$	$\leq \pm 4\sqrt{L_s}$	$\leq \pm 6\sqrt{L_i}$

注：

L_s 为测段、区段或路线长度；

L 为符合路线或环线长度；
Li 为检测测段长度，均以 km 计。

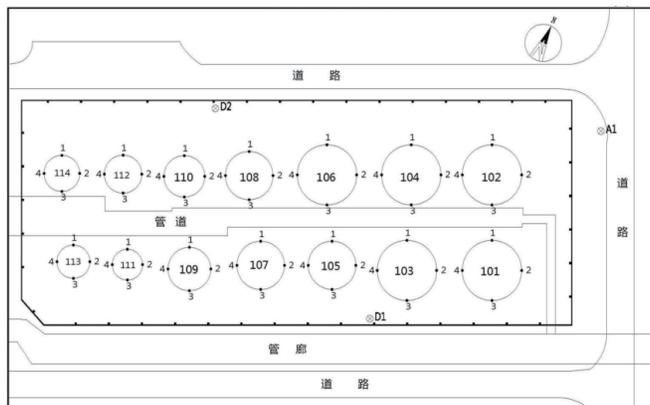


图 1 沉降点布置示意图

2.3 观测数据分析与解释

2.3.1 沉降观测数据分析

根据《建筑变形测量规范》的标准“最后 100 天的沉降速率小于 0.01mm/d 至 0.04mm/d 时，认为建筑物已经达到稳定状态”。“根据经验，上海地区建筑接近稳定时的周期容许沉降量为 2mm/半年，稳定控制指标为 0.01mm/d”，可以认为建筑物沉降进入稳定状态。根据观测数据所示，除了 104 号储罐外，其余储罐在观测周期内的沉降速率均表明这些储罐在观测周期内已经达到或接近稳定状态。

2.3.2 倾斜数据分析

倾斜数据的分析依据基础倾斜计算公式：

$$\alpha = (S_A - S_B) / L$$

其中：

S_A 和 S_B 代表基础倾斜方向上 A、B 两点的沉降量；
L 为 A、B 两点间的距离。

本项目中 L 为各储罐的直径。通过这一分析，可以定量地评估储罐的倾斜状况。依据《地基基础设计规范》，石油化工塔罐的倾斜率允许值为 0.0025 至 0.004。在本次观测中，所有储罐的倾斜率均未超过该规范允许值，表明从倾斜角度看，储罐基础的结构稳定性良好。104 号储罐尽管沉降速率较高，但其倾斜率 0.0001（偏北）及 0.0002（偏东）仍然在允许范围内，这表明尽管该储罐沉降速率较快，但其倾斜程度并未超限，为均匀沉降。

2.4 结论

本次观测严格执行规范要求，各项观测记录及成果计算均符合规范精度要求。在本次观测周期内，各储罐均匀沉降，达到或接近于稳定状态。从各罐沉降

观测 S—T 曲线图来看，各罐都有几次相对较大的均匀的整体的抬升，应与储罐内储物的减少有关，即储罐处于卸荷状态。故结合储罐的沉降机理研究可知，罐基础发生回弹变形，从而发生罐体上抬。所以建议应选择最佳监测时期，即储罐处于满荷状态（这种情况下沉降量最大）。结合以往类似工程地质条件下的储罐沉降变形曲线综合分析考虑，储罐处于弹性变形状态。在不考虑温度变化、材料等影响的情况下，频繁、快速的加荷、卸荷，使罐体的差异沉降处于动态状态是引发地面开裂的原因之一。由于储罐所处区域是围海而成，如储罐周围地面的不均匀沉降量大于储罐的沉降量，也可能造成地面开裂。但此次没有进行地面沉降的观测，所以无具体数据加以验证。

3 测量精度提升策略与建议

3.1 几何水准测量

几何水准测量是一种传统的测量方法，主要用于测定不同点之间的高差。这种方法依赖于水准仪和水准尺的使用，通过观测尺上的刻度来测量地面点的高程。在建筑物沉降测量中，几何水准测量被广泛应用于监测地基和结构的垂直位移。其优点在于精度高，能够检测到毫米级甚至更小的变化。然而，这种方法也有局限性，如工作效率低，受地形地貌和视距限制较大，且需要经验丰富的操作人员进行测量和数据处理。在进行精密几何水准测量时，通常需要在被测建筑周围设定一系列固定的测量点，定期进行测量以监控沉降变化。但布设的沉降监测点因检修等原因容易毁坏，需重新设置。无法保持沉降监测点的长期稳定性，观测数据就缺少连贯性，观测的精确度也会有所降低，从而影响到对沉降趋势的判定。所以做好测量点的日常维护，可以有效地保证沉降观测的准确性和可靠性，保证观测精度。

前后观测视距不等引起的测量误差。前后观测视距不等引起的高差误差主要是由水准仪 i 角误差引起，水准仪的 i 角误差是水准管轴不平行于望远镜视准轴时，在竖直面上的投影所产生的角度误差。当前后观测视距不等时，由于 i 角存在误差，沉降点的高差误差随距离增大而增大，所以对仪器的 i 角进行检测并进行调准，尽可能的降低由于仪器 i 角引起前后视距差的测量误差，从而提高测量精度。在实际现场观测中，做到测点前后视等距困难较大，也可以在首次测量时做好测站标志，固定测站点位，那么在以后观测周期中，因前后视距不等 i 角误差引起的高差误差可互相抵消，进一步提高了沉降点的观测精度。

3.2 新技术的应用

3.2.1 GNSS 技术在沉降测量中的应用

在建筑物沉降测量中, GNSS 技术提供了一种高效、准确的方法来监测大范围内的地表和结构物的位移。与传统测量技术相比, GNSS 技术的主要优势在于其操作的便捷性和能够提供实时数据。此外, GNSS 技术能够在任何天气条件下进行测量, 不受地理位置的限制。然而, GNSS 测量的准确性可能会受到多路径效应、大气延迟和卫星几何分布的影响。为了提高测量精度, 通常采用差分 GNSS (DGNS) 和静态技术来减少多路径效应和大气延迟的影响, 以提高观测精度。结合使用这两种技术, 不仅提升了测量的全面性和精确度, 也使得数据分析更加全面。GNSS 技术特别适用于监测广泛区域内的地表移动, 包括滑坡、地面沉降和桥梁的位移等。本项目中的罐区地面沉降观测, 就可以采用这种方法。

3.2.2 激光扫描

激光扫描, 又称为激光雷达测量, 是一种近年来迅速发展的测量技术, 它通过发射激光束并测量激光与物体反射回来的时间差来确定物体的位置、形状和尺寸。这种技术能够生成高精度的三维模型, 适用于建筑和地形的详细测量。在沉降和倾斜测量中, 激光扫描特别适合于复杂结构或大面积地形的快速测量, 提供了一种无接触、高效率的测量方案。通过比较不同时间点的扫描结果, 可以精确地监测结构的变化。在一些化工企业中, 设备装置高耸、密集, 现场环境复杂。在用全站仪采用小角法或投影观测法对装置设备进行倾斜观测时, 由于空间狭小, 视线受阻, 无法观测到顶部, 观测点也无法标识, 使每次观测测量的点位也不尽相同。这使得观测得到的数据成果无法完全反应设备的实际倾斜, 降低了成果的精确度。这种情况下可使用激光扫描进行测量, 利用扫描可以快速海量地获取高密度、高精度的点云数据, 生成三维模型, 在应用软件中可以对数据计算画出横切面或竖切面, 前后数据模型对比, 可以得到观测对象精确的变形数据。对于一些大型的储罐, 外部有保温层包裹且经常处于卸荷满荷状态, 精密几何水准测量、全站仪的倾斜测量只能通过测量储罐几个观测点来反映储罐的沉降、倾斜状态, 不能全面的高精度的实时的反映储罐整体变形情况。利用激光扫描、三位建模, 前后成果对比可以较高精度的直观反映储罐整体的一个形变状态。

4 结语

个人认为, 今后的沉降、倾斜等变形观测主要还

是依靠精密几何水准测量、全站仪倾斜测量这些传统的测量方法。并可以通过提高观测人员的技术水平, 选择最佳的观测时间、提高观测仪器的精度等级手段来不断提高测量精度。同时也可以在一些传统测量方法受限的场合利用 GNSS、激光扫描这些新技术, 使观测更高效, 观测成果更精准。比如可以用 GNSS 对本项工程的罐区的地面进行沉降测量; 利用激光扫描技术对一些高耸的化工设备、大型的储罐进行倾斜及整体的形变测量等。本单位最近使用激光扫描技术对上海石化一新建储罐进行整体的数据扫描采集, 同时也用传统的测量方法进行沉降、倾斜测量。用这两种方法对储罐进行长期监测, 对两者数据、成果进行对比分析。对几何水准测量、激光扫描技术在实际测量中的观测精度进行相互验证。

通过综合运用这些方法、技术, 不仅可以得到高精度的测量结果, 为安全评估和长期稳定性监控提供了可靠数据, 也进一步加强对结构稳定性的认识, 为预防潜在的安全风险制定相应的对策有了科学依据。展望未来, 随着测量技术的不断进步和数据处理能力的提高, 建筑物沉降与倾斜测量的精确度将进一步提升, 对保障工程安全和延长建筑寿命将起到更加关键的作用。

参考文献:

- [1] 杨松勇. 建筑基坑监测中位移测量技术的应用研究 [J]. 工程管理与技术探讨, 2023, 5(17): 59-61.
- [2] 张军. 数字化测绘技术在建筑工程测量中的应用 [J]. 国际建筑学, 2023, 5(3): 34-36.
- [3] 李小军. 工程测量技术要点与控制方法研究 [J]. 国际建筑学, 2022, 4(3): 34-36.
- [4] 李小山, 汪山林, 赵华山. GPS 应用于建筑物变形观测的分析与研究 [J]. 国际建筑学, 2020, 2(1): 110-112.
- [5] 余进, 陈炜, 胡久韶, 等. 基于实测的倾斜沉降储罐结构性能分析 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(16): 9-11.
- [6] 赵阳, 曹庆帅, 谢新宇. 大型钢储罐的沉降与结构性能的关系 [J]. 工业建筑, 2021, 37(4): 4.
- [7] 张兴. 钢储罐在实测不均匀沉降下的结构性能 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [8] 曹庆帅. 大型钢储罐在谐波沉降下的结构性能 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [9] 雷翔. 大型变壁厚钢储罐在不均匀沉降下的稳下性能 [D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [10] 林寅. 大型钢储罐结构的风荷载和风致屈曲 [D]. 杭州: 浙江大学, 2022.